№ 12 (66) ▪ 2017
Часть 5 ▪ Декабрь

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЖУРНАЛ

INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL

ISSN 2303-9868 PRINT
ISSN 2227-6017 ONLINE

Екатеринбург
2017

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЖУРНАЛ
INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL
ISSN 2303-9868 PRINT
ISSN 2227-6017 ONLINE

Периодический теоретический и научно-практический журнал.
Выходит 12 раз в год.
Учредитель журнала: ИП Соколова М.В.
Главный редактор: Меньшаков А.И.
Адрес редакции: 620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4, корп. А, оф. 17.
Электронная почта: editors@research-journal.org
Сайт: www.research-journal.org

Подписано в печать 18.12.2017.
Тираж 900 экз.
Заказ 26329.
Отпечатано с готового оригинал-макета.
Отпечатано в типографии ООО "Компания ПОЛИГРАФИСТ", 623701, г. Березовский, ул. Театральная, дом № 1, оф. 88.

№ 12 (66) 2017
Часть 5
Декабрь

Журнал имеет свободный доступ, это означает, что статьи можно читать, загружать, копировать, распространять, печатать и ссылаться на их полные тексты с указанием авторства без каких-либо ограничений. Тип лицензии CC поддерживаемый журналом: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Журнал входит в международную базу научного цитирования **Agris.**

Номер свидетельства о регистрации в Федеральной Службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: **ПИ № ФС 77 – 51217.**

Члены редколлегии:

Филологические науки: Растягаев А.В. д-р филол. наук, Сложеникина Ю.В. д-р филол. наук, Штрекер Н.Ю. к.филол.н., Вербицкая О.М. к.филол.н.

Технические науки: Пачурин Г.В. д-р техн. наук, проф., Федорова Е.А. д-р техн. наук, проф., Герасимова Л.Г., д-р техн. наук, Курасов В.С., д-р техн. наук, проф., Оськин С.В., д-р техн. наук, проф.

Педагогические науки: Куликовская И.Э. д-р пед. наук, Сайкина Е.Г. д-р пед. наук, Лукьянова М.И. д-р пед. Наук, Ходакова Н.П., д-р пед. наук, проф.

Психологические науки: Розенова М.И., д-р психол. наук, проф., Ивков Н.Н. д-р психол. наук, Каменская В.Г., д-р психол. наук, к. биол. наук

Физико-математические науки: Шамолин М.В. д-р физ.-мат. наук, Глезер А.М. д-р физ.-мат. наук, Свистунов Ю.А., д-р физ.-мат. наук, проф.

Географические науки: Умывакин В.М. д-р геогр. наук, к.техн.н. проф., Брылев В.А. д-р геогр. наук, проф., Огуреева Г.Н., д-р геогр. наук, проф.

Биологические науки: Буланый Ю.П. д-р биол. наук, Аникин В.В., д-р биол. наук, проф., Еськов Е.К., д-р биол. наук, проф., Шеуджен А.Х., д-р биол. наук, проф.

Архитектура: Янковская Ю.С., д-р архитектуры, проф.

Ветеринарные науки: Алиев А.С., д-р ветеринар. наук, проф., Татарникова Н.А., д-р ветеринар. наук, проф.

Медицинские науки: Ураков А.Л., д-р мед. Наук, Никольский В.И., д-р мед. наук, проф.

Исторические науки: Меерович М.Г. д-р ист. наук, к.архитектуры, проф., Бакулин В.И., д-р ист. наук, проф., Бердинских В.А., д-р ист. наук, Лёвочкина Н.А., к.ист.наук, к.экон.н.

Культурология: Куценков П.А., д-р культурологии, к.искусствоведения.

Искусствоведение: Куценков П.А., д-р культурологии, к.искусствоведения.

Философские науки: Петров М.А., д-р филос. наук, Бессонов А.В., д-р филос. наук, проф.

Юридические науки: Костенко Р.В., д-р юрид. наук, проф., Мазуренко А.П. д-р юрид. наук, Мещерякова О.М. д-р юрид. наук, Ергашев Е.Р., д-р юрид. наук, проф.

Сельскохозяйственные науки: Важов В.М., д-р с.-х. наук, проф., Раков А.Ю., д-р с.-х. наук, Комлацкий В.И., д-р с.-х. наук, проф., Никитин В.В. д-р с.-х. наук, Наумкин В.П., д-р с.-х. наук, проф.

Социологические науки: Замараева З.П., д-р социол. наук, проф., Солодова Г.С., д-р социол. наук, проф., Кораблева Г.Б., д-р социол. наук.

Химические науки: Абдиев К.Ж., д-р хим. наук, проф., Мельдешов А. д-р хим. наук, Скачилова С.Я., д-р хим. наук

Науки о Земле: Горяинов П.М., д-р геол.-минерал. наук, проф.

Экономические науки: Бурда А.Г., д-р экон. нау, проф., Лёвочкина Н.А., д-р экон. наук, к.ист.н., Ламоттке М.Н., к.экон.н.

Политические науки: Завершинский К.Ф., д-р полит. наук, проф.

Фармацевтические науки: Тринеева О.В. к.фарм.н., Кайшева Н.Ш., д-р фарм. наук, Ерофеева Л.Н., д-р фарм. наук, проф.

Екатеринбург
2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕЙКОЗА 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПЕРЕРАСШИРЕННЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СОПЛАХ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ 13

ЗАДАЧА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ ПО НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ 18

ОСОБЫЕ ТОЧКИ В ПРОЕКЦИЯХ НА ПЛОСКОСТЬ КООРДИНАТ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ 24

О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ ИНТЕГРИРОВАНИЯ В МНОГОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ 30

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

INCREASING OF DIESEL EFFICIENCY OF SHUNTING DIESEL LOCOMOTIVES, OPERATING ON RAILWAYS OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN 36

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ 41

ТРЕБОВАНИЯ К СОВРЕМЕННОМУ ДРАЙВЕРУ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ 49

АУТЕНТИФИКАЦИЯ ПО КЛАВИАТУРНОМУ ПОЧЕРКУ: ВЫГОДЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 55

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 59

РАСШИРЕНИЕ АССОРТИМЕНТА СОУСОВ К ЗАМОРОЖЕННЫМ ГОТОВЫМ БЛЮДАМ 63

ЛАМИНАРИЯ КАК ЙОДСОДЕРЖАЩИЙ КОМПОНЕНТ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОДУКТА 68

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННОГО ИЗВЕСТНЯКОВОГО ЩЕБНЯ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ 72

COMPLEX USAGE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE REGIONS OF TURKMENISTAN 77

ПСЕВДО β-ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ 83

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КРАНОВ 88

ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ДОРОГ 91

СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ФАКТОВ ИЗ ТЕКСТОВЫХ СООБЩЕНИЙ 95

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ ОДНОЯЧЕЕЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НОМОГРАММ НИЗКОЧАСТОТНЫХ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗОН ПОЛОГОСТИ ВОЛНЫ 98

РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БЕСКАРКАСНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗЕРНОХРАНИЛИЩ ТЕХНОЛОГИИ ZEMAN, АВСТРИЯ 104

OPTIMAL AUTOPILOT DESIGN ON THE BASIS OF GENETIC ALGORITHM 111

КОМПОЗИТНЫЕ РАСТВОРЫ ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА 116

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ МЕТАЛЛОШИХТЫ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ 120

УМЕНЬШЕНИЕ ПИК-ФАКТОРА OFDM СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА ОГРАНИЧЕНИИ СИГНАЛОВ 124

АНАЛИЗ ПОЗДНИХ ПОТЕНЦИАЛОВ ЖЕЛУДОЧКОВ СЕРДЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРТАТИВНЫХ КАРДИОАНАЛИЗАТОРОВ 127

АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 130

К ВОПРОСУ АППРОКСИМАЦИИ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ 133

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПРИ СОЗДАНИИ РАЗВИВАЮЩИХ ЯЗЫКОВЫХ ВИДЕОИГР 137

УРОВЕНЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ Г. ДУШАНБЕ 143

ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ 148

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ 152

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПРОСТОЯ ГРУЗА В ТРАНСПОРТНОМ УЗЛЕ 156

RELAY PROTECTION IN TRANSIENT PROCESSES 160

МОДУЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ СО СФЕРИЧЕСКИМ ИНДУКЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ 166

ПРИМЕНЕНИЕ IMACHINING КАК МОДУЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ 172

СВЯЗЬ МОРФОЛОГО-АНАТОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ 175

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБЖАТЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ЗАМАЧИВАНИИ 178

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВЕКТОРА УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЗАДАЧЕ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ 183

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МНОГОКОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ 188

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.156

Абузярова Р.Т.[1], Колпак Е.П.[2]
[1]ORCID: 0000-0002-3694-7832, студент,
[2]ORCID: 0000-0001-6956-4814, доктор физико-математических наук,
Санкт-Петербургский государственный университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕЙКОЗА

Аннотация

Разработана математическая модель лейкоза на основании современных данных о кроветворении у млекопитающих. В модели рассматриваются три типа клеток, один из которых лейкозные. Взаимодействие клеток рассматривается как конкуренция за функциональное пространство делящихся клеток. За лейкозные клетки принимаются клетки, делящиеся с большей скоростью, чем все остальные. Модель замены лейкозных клеток клетками донора рассматривается как внедрение более активных клеток, чем лейкозные. Модель представлена задачей Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Нарушение функций кроветворения сопоставляется с изменением ведущего параметра, переводящего систему из устойчивого стационарного состояния в неустойчивое.

Ключевые слова: лейкоз, математическое моделирование, устойчивость, дифференциальные уравнения, задача Коши, стационарная точка.

Abuzyarova R.T.[1], Kolpak E.P.[2]
[1]ORCID: 0000-0002-3694-7832, Student,
[2]ORCID: 0000-0001-6956-4814, PhD in Physics and Mathematics,
St. Petersburg State University

MATHEMATICAL MODEL OF LEUKEMIA

Abstract

We developed a mathematical model of leukemia on the basis of modern data on hematopoiesis in mammals. Three types of cells are considered in the model, one of which is leukemia. Interaction of cells is studied as a competition for the functional space of dividing cells. Leukemia cells are cells dividing at a higher rate than all the others. The model of replacement of leukemic cells with donor cells is considered as the introduction of more active cells than leukemia ones. The model is represented by the Cauchy problem for a system of ordinary differential equations. Violation of hematopoiesis functions is correlated with a change in the leading parameter, which transfers the system from a stable steady state to an unstable one.

Keywords: leukemia, mathematical modeling, stability, differential equations, Cauchy problem, stationary point.

Введение

Одним из острых заболеваний является лейкоз. Ему подвержены все возрастные группы. Это заболевание трудноизлечимо, и может длиться, несмотря на лечение, годами. Очень высок процент летальных исходов. Болезнь протекает с осложнениями. Наиболее распространенным и дорогостоящим методом лечения является пересадка в больной организм донорского костного мозга. Однако чужеродные клетки начинает отторгать иммунная система и, в результате, выход в ремиссию часто сопровождается другими заболеваниями организма. Лечение осуществляется и введением в больной организм препаратов, помогающих справиться с заболеванием. Стоимость лечения препаратами составляет около 100 средних по России месячных зарплат. При благоприятном исходе лечения выход в ремиссию не означает, что не возникнет рецидив. Математическое моделирование лейкоза и вариантов его лечения могут помочь лечащим заболевание специалистам спланировать лечение и по его срокам и по его стоимости.

Кроветворение

Кроветворение – это процесс образования тромбоцитов, эритроцитов и лейкоцитов. Родоначальными клетками гемопоэза являются стволовые клетки (СК), благодаря которым обеспечивается стабильное кроветворение [1]. В результате деления СК могут образовывать два типа клеток: дочерние клетки, являющиеся идентичными родительской клетке, и клетки, которые уходят в созревающую фракцию и начинают путь дифференцировки. Острый лейкоз представляет собой клеточный клон, все элементы которого являются потомками одной клетки [2]. Первоначальная мутация происходит в стволовой клетке. Генетическая нестабильность приводит к дополнительным мутациям, в результате которых клетки образовавшегося клона перестают дифференцироваться, постепенно поражают костный мозг морфологически незрелыми кроветворными клетками с вытеснением ими нормальных клеток.

На поведение СК влияет их микроокружение или их ниша. Ниши представляют собой пространство для СК, в котором контролируется поведение СК и регулируется их численность через сигналы от клеток и неклеточных факторов. СК в зависимости от сигналов могут или пролиферировать, или находиться в состоянии покоя, или дифференцироваться [3]. Дифференцировка и пролиферация кроветворных клеток происходят параллельно. За счет ниш поддерживается равновесие между различными типами кроветворных клеток.

Лейкозные клетки располагаются в тех же нишах что и гемопоэтические СК и прогениторные клетки, в результате чего имеет место конкуренция за нишу. В частности, лейкозные клетки способны избыточно вырабатывать колониестимулирующий фактор, увеличивающий скорость их деления по сравнению со скоростью деления нормальных клеток (стимулятор миелопоэза), специфически сильнее действующий на лейкозные, чем на нормальные клетки-предшественники гемопоэза [1], [2]. В то же время злокачественные клетки, даже в малом количестве, обладают способностью избирательно угнетать пролиферацию и дифференцировку нормальных предшественников с помощью гуморальных ингибиторов

В результате в нише происходит конкуренция за функциональное пространство между различными клетками [3]. Конкурентное преимущество имеют клетки, которые быстрее пролиферируют, давая многочисленное потомство.

Скорость пролиферации СК регулируется сигналами, поступающими от клеток микроокружения. Нарушение функционального состояния ниши приводит к увеличению скорости генерации клеток или к ее уменьшению.

Математическая модель лейкоза

Предлагаемые в литературных источниках математические модели [4], [5], представлены системами обыкновенных дифференциальных уравнений. В работах [6], [7] предлагается модель иммунного отклика на появление лейкозных клеток, а в [8] предлагаются варианты моделирования лечения лейкозов. Уровень заболеваний населения РФ заболеваниям крови отражен в [9]. За основу моделирования лейкоза взята концепция конкуренции всех типов клеток за функциональное пространство [10].

В математической модели предполагается, что лейкоз имеет иерархическую структуру. Рассматривается четыре типа клеток: здоровые, лейкозные, стволовые и клетки микроокружения, регулирующие пролиферацию стволовых клеток. Лейкозные, здоровые и стволовые клетки объединены в один пул единичного объема. Если принять, что u_s - количество стволовых клеток, находящихся в нише, u_h - здоровых, u_d - лейкозных, то их количество на момент начала кроветворения должно удовлетворять условию $u_s + u_h + u_d \le 1$. Распределение размножающихся стволовых клеток между больными и здоровыми происходит под влиянием клеток микроокружения u_a в пропорциях $\alpha : 1-\alpha$ ($0 < \alpha \le 1$). Здоровые, больные и стволовые клетки могут самостоятельно размножаться с удельными скоростями равными μ_1, μ_2 и μ_3 соответственно. Скорости перехода здоровых и больных клеток в кровеносное русло равны v_1 и v_2 соответственно. Скорость перехода клеток u_s в здоровые и больные регулируется клетками микроокружения u_a. С учетом этих предположений математическая модель лейкоза представлена задачей Коши для системы четырех обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{du_h}{dt} = \mu_1(1-u_h-u_d-u_s)u_h + \alpha\gamma u_a u_s - v_1 u_h,$$
$$\frac{du_d}{dt} = \mu_2(1-u_h-u_d-u_s)u_d + (1-\alpha)\gamma u_a u_s - v_2 u_d,$$
$$\frac{du_s}{dt} = \mu_3(1-u_h-u_d-u_s)u_s^2 - \gamma u_s u_a, \qquad (1)$$
$$\frac{du_a}{dt} = -\mu_4 u_a(\beta - u_s),$$
$$u_h(t=0) = u_h^0,\ u_d(t=0) = u_d^0,\ u_s(t=0) = u_s^0,\ u_a(t=0) = u_a^0.$$

Множитель $1-u_h-u_d-u_s$ в первых трех уравнениях представляет собой свободную от клеток часть пула, а параметр β соответствует количеству стволовых клеток, находящихся в нише, в равновесном состоянии при естественной генерации всех типов клеток.

Все искомые величины в модели считаются безразмерными. Время t также считается безразмерным, однако, применительно к реальным процессам единица безразмерного времени может быть сопоставлена с сутками в реальном процессе.

Стволовые клетки u_s под влиянием клеток микроокружения u_a покидают нишу со скоростью $\gamma u_s u_a$ и переходят в профилирующие здоровые (u_s) и лейкозные (u_d) клетки. При увеличении количества стволовых клеток в нише выше порогового значения β увеличивается и количество клеток микроокружения, вызывающих увеличение скорости ухода стволовых клеток из ниши со скоростью $\gamma u_s u_a$, а при уменьшении количества стволовых клеток в нише скорость ухода будет уменьшаться.

В случае отсутствия ниши (в (1) $\gamma_1 = 0$, $u_s = 0$, $u_a = 0$) первые два уравнения в (1) принимают вид

$$\frac{du_h}{dt} = \mu_1(1-u_h-u_d)u_h - v_1 u_h,$$
$$\frac{du_d}{dt} = \mu_2(1-u_h-u_d)u_d - v_2 u_d, \qquad (2)$$

Эта система уравнений имеет две стационарные точки

1. $u_h = 1 - \frac{v_1}{\mu_1}$, $u_d = 0$;

2. $u_h = 0$, $u_d = 1 - \frac{v_2}{\mu_2}$.

В первой стационарной точке собственными значениями матрицы Якоби правой части уравнений (2) будут

$\lambda_1 = -\mu_1$ и $\lambda_2 = \frac{\mu_2}{\mu_1} v_1 - v_2$.

И эта стационарная точка будет устойчивой, если выполняется неравенство $\mu_2 v_1 < \mu_1 v_2$. То есть, если удельная скорость генерации опухолевых клеток мала или скорость их ухода в систему велика, то клетки u_h со временем вытеснят клетки u_d. Если это неравенство не выполняется, то устойчивой будет вторая стационарная точка.

Модель пересадки клеток

Одним из способов лечения является пересадка донорских клеток. Если их активность выше, чем активность клеток хозяина, то они постепенно вытеснят клетки хозяина. Как показывает практика клинических исследований, донорские клетки не всегда приживаются в новом организме. С учетом этого модель вытеснения клеток хозяина донорскими клетками u_L будет представлена системой дифференциальных уравнений

$$\frac{du_h}{dt} = \mu_1(1 - u_h - u_L)u_h - v_1 u_h,$$
$$\frac{du_L}{dt} = \mu_3(1 - u_h - u_L)u_L - v_3 u_L - \gamma u_h u_L, \quad (3)$$

в которой μ_3 - удельная скорость размножения донорских клеток, v_3 - скорость перехода донорских клеток в кровеносное русло. Ингибирующее влияние клеток хозяина на клетки донора учитывается введением во второе уравнение слагаемого $\gamma u_h u_L$ с параметром γ, определяющим интенсивность ингибирования.

Система уравнений (3) имеет три нетривиальные стационарные точки

1. $u_L = 0, u_h = 1 - \frac{v_1}{\mu_1}$;

2. $u_h = 0, u_L = 1 - \frac{v_3}{\mu_3}$;

3. $u_h = \frac{v_3}{\gamma}\left(\frac{\mu_3}{\mu_1}\frac{v_1}{v_3} - 1\right), u_L = 1 - \frac{v_1}{\mu_1} - \frac{v_3}{\gamma}\left(\frac{\mu_3}{\mu_1}\frac{v_1}{v_3} - 1\right)$.

Третья стационарная точки существует, если выполняются неравенства

$$1 < \frac{\mu_3}{\mu_1}\frac{v_1}{v_3} < 1 + \frac{\gamma}{v_3}\left(1 - \frac{v_1}{\mu_1}\right).$$

В первой стационарной точке одно из собственных значений матрицы Якоби правой части уравнений (3) будет положительным, если выполняется неравенство

$$\frac{\mu_3}{\mu_1}\frac{v_1}{v_3} > 1 + \frac{\gamma}{v_3}\left(1 - \frac{v_1}{\mu_1}\right).$$

Это неравенство для модели (3) является условием вытеснения донорскими клетками клеток хозяина.

Вторая стационарна точка будет устойчивой, если выполняется неравенство $\mu_3 v_1 < \mu_1 v_3$.

В третьей стационарной точке характеристический полином матрицы Якоби правой части уравнений (3)

$$P(\lambda) = \lambda^2 + \left(\mu_1 u_h + \mu_3 u_L\right)\lambda - \gamma \mu_1 u_h u_L$$

имеет корни противоположных знаков. Поэтому эта стационарная точка будет неустойчивой.

Таким образом, в модели (3) донорские клетки либо вытесняют клетки хозяина, либо их вытесняют клетки хозяина.

Модель (3) для случая наличия здоровых и лейкозных клеток принимает вид

$$\frac{du_h}{dt} = \mu_1(1-u_h-u_d-u_L)u_h - v_1u_h,$$
$$\frac{du_d}{dt} = \mu_2(1-u_h-u_d-u_L)u_d - v_2u_d,$$
$$\frac{du_L}{dt} = \mu_3(1-u_h-u_d-u_L)u_L - \gamma(u_h+u_d)u_L - v_3u_L.$$

Решение этих уравнений для случая $v_1 = v_2 = v_3 = 0.1$, $\mu_1 = 1.0$, $\mu_2 = 1.5$, $\mu_1 = 2.0$, $\gamma = 0.007$ приведено на рис. 1. Пунктирной линией отмечен момент времени ($t = 60$) пересадки донорских клеток. В этом примере донорские клетки вытесняют и здоровые и лейкозные клетки.

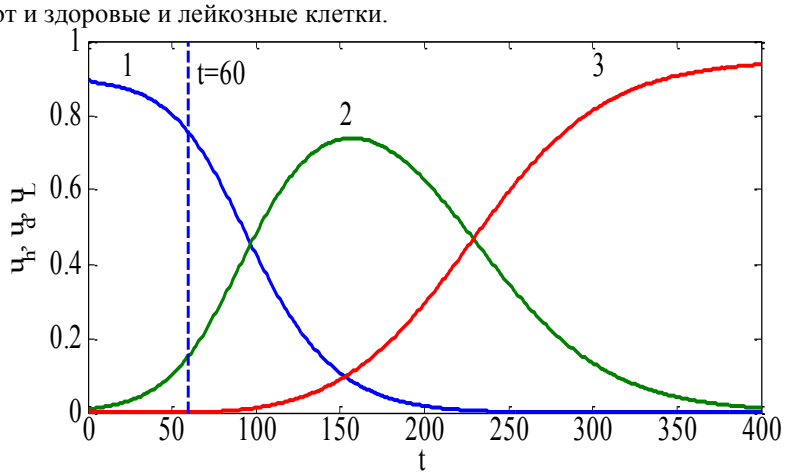


Рис. 1 – Графики зависимости функций $u_h(t)$ (кривая 1), $u_d(t)$ (кривая 2), $u_L(t)$ (кривая 3) от t при условии, что $u_L(t) = 0$ при $t < 60$ для случая $\mu_1 = 1.0$, $\mu_2 = 1.5$

Стационарные точки

Стационарные значения системы уравнений (1) и их устойчивость исследуются с применением численных методов. Для случая констант $\mu_3 = 20$, $\alpha = 0.98$, $v_1 = 0.5$, $v_2 = 0.5$ на рис. 2 приведена зависимость стационарных значений u_h от значений параметра β. Кривая 1 соответствует значениям $\mu_1 = 1.0$, $\mu_2 = 1.0$, кривая 2 - $\mu_1 = 1.0$, $\mu_2 = 1.5$. Пунктирная линия отображает границу между областью устойчивых ($\mathrm{Re}\,\lambda < 0$) и областью неустойчивых ($\mathrm{Re}\,\lambda > 0$) стационарных точек. В области устойчивых стационарных точек кривые 1 и 2, практически, совпадают.

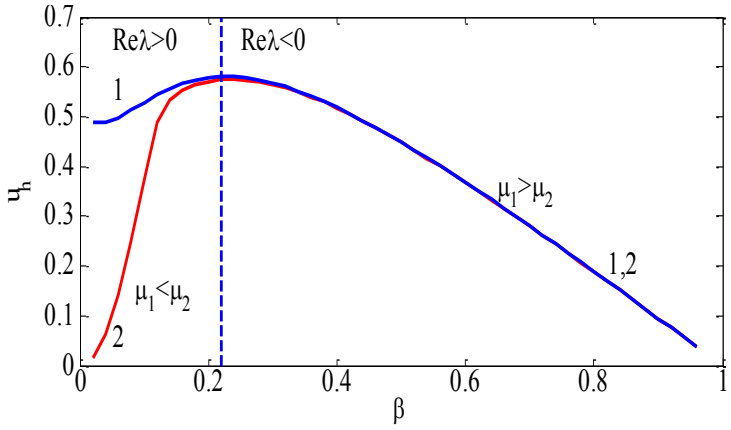


Рис. 2 – Графики зависимости стационарных значений u_h от параметра β. Кривая 1 - $\mu_1 = 1.0$, $\mu_2 = 1.5$, кривая 2 - $\mu_1 = 1.0$, $\mu_2 = 1.0$. Пунктирная линия отображает границу раздела между областями устойчивых ($\mathrm{Re}\,\lambda < 0$) и неустойчивых ($\mathrm{Re}\,\lambda > 0$) стационарных точек

Стационарные точки системы уравнений (1) в зависимости от значений параметра β могут быть как устойчивыми, так и неустойчивыми. При малых значениях параметра β в системе возникают колебания. Последнее интерпретируется как возникновение заболевания при недостатке стволовых клеток. На рис. 3 при значениях

параметров $\beta = 0.2$, $\mu_1 = 1.0$, $\mu_2 = 1.5$, $\mu_3 = 20$, $\alpha = 0.98$, $v_1 = 0.5$, $v_2 = 0.5$ отражено изменение $u_h(t)$, $u_d(t)$ и $u_s(t)$ во времени. Стационарная точка в рассматриваемом случае не является устойчивой – в ее окрестности возникают периодические колебания.

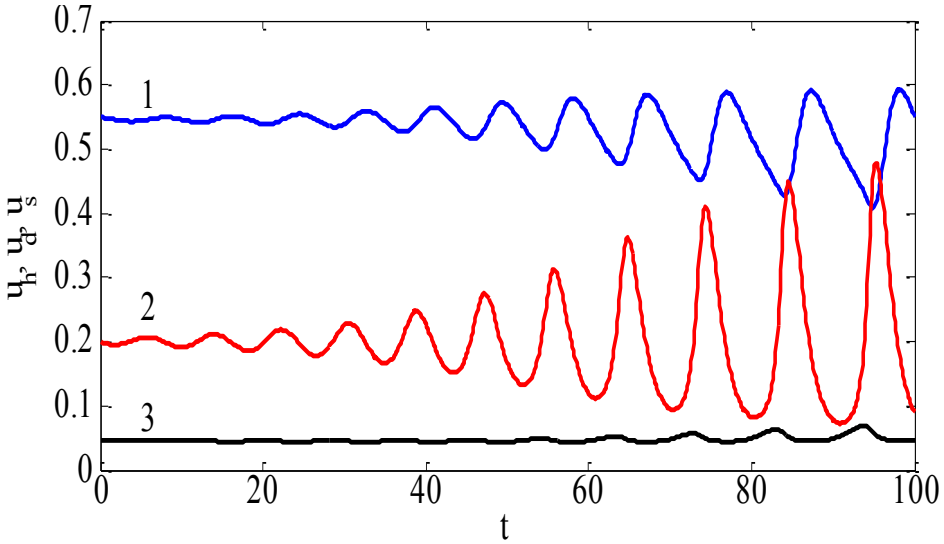


Рис. 3 – Графики зависимости функций $u_h(t)$ (кривая 1), $u_s(t)$ (кивая 2), $u_d(t)$ от t при малых начальных отклонениях от неустойчивой стационарной точки

Модель лечения заболевания

Возникновение заболевания в модели (1) рассматривается как изменение в момент времени t_0 параметра β, переводящее устойчивое стационарное состояние в неустойчивое. Тогда под лечением понимается такое воздействие на этот параметр, при котором он возвращается в «нормальное» состояние. При этом введение препарата происходит от момента времени t_1 до момента времени t_2. Пусть $\Delta\beta$ - отклонение параметра β от исходного значения, а $Drug(t)$ - закон введения препаратов, изменяющих значение возмущения $\Delta\beta$. Тогда модель нарушения функционирования генерации клеток и лечения нарушений с учетом четвертого уравнения в (1) принимает вид

$$\frac{du_a}{dt} = -\mu_4 u_a \left(\beta + \Delta\beta - u_s\right),$$

$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = -\Delta\beta Drug(t).$$

Препараты могут подаваться непрерывно во времени ($Drug(t) = const$) или периодически. Модель периодического воздействия может быть представлена функцией

$$Drug(t) = D\sin(\omega t), \text{ если } \sin(\omega t) > 0,$$

$$Drug(t) = 0, \text{ если } \sin(\omega t) \le 0.$$

Результаты моделирования для этой функции представлены на рис. 4 в виде зависимостей $u_h(t)$, $u_d(t)$ и $u_s(t)$.

Для случая констант $\beta = 0.35$, $\mu_1 = 1.0$, $\mu_2 = 1.5$, $\mu_3 = 20$, $\alpha = 0.98$, $v_1 = 0.5$, $v_2 = 0.5$ стационарная точка $u_h = 0.526$, $u_d = 0.031$, $u_a = 0.646$, $u_s = 0.359$ является устойчивой на временном промежутке $[0, t_0]$ (на рис. 4 зона A). В момент времени $t = t_0$ параметр β принимает значение 0.20. Стационарная точка системы уравнений (1) при этом значении параметра β будет неустойчивой (рис. 2). В системе возникают колебания (на рис. 4 зона B). То есть система переходит в неустойчивое состояние. С момента времени $t = t_1$ до момента времени $t = t_2$ вводится препарат с $D = 0.12$ и $\omega = 2\pi/20$ (зона $Drug$ на рис. 4). Постепенное уменьшение возмущения параметра β переводит систему в область устойчивых стационарных точек.

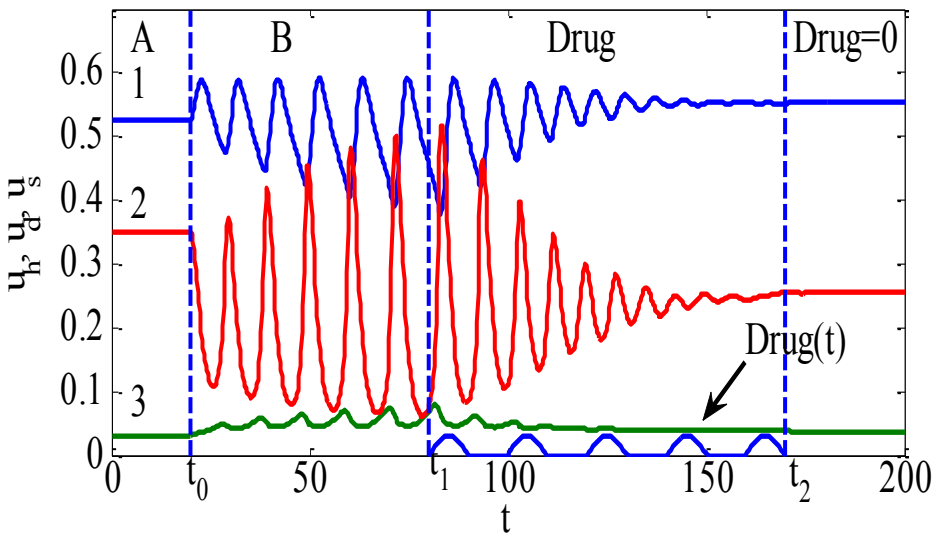


Рис. 4 - Графики зависимости функций $u_h(t)$ (кривая 1), $u_s(t)$ (кивая 2), $u_d(t)$ (кривая 3) и $Drug(t)$ от t. На промежутке $[0,t_0]$ система находится в равновесном состоянии (зона А), на промежутке $(t_0,t_1]$ в неустойчивом состоянии (зона В), на промежутке $(t_1,t_2]$ (зона $Drug$) происходит возврат системы в устойчивое состояние

Решение задачи Коши для систем дифференциальных уравнений осуществлялось с применением метода Рунге-Кутты в модификации Дорманда-Принса в среде программирования математического пакета MatLab. Использовалась встроенная функция ode45. Параметры систем уравнений μ_1, μ_2 и μ_3, определяющие скорости реакций, как следует из результатов клинических исследований, могут отличаться в 2-3 раза. В этом диапазоне отличия параметров системы уравнений не являются жесткими. Тем не менее, поскольку решения строились в окрестности неустойчивых точек, результаты решения сопоставлялись с решениями, построенными с использованием функции ode23tb, предназначенной для решения «жестких» систем. Результаты, поостренными обеими функциями с точностью 10-6 совпали в исследуемом диапазоне изменения параметров.

Заключение

Таким образом, разработанная модель объясняет механизм взаимодействия нескольких типов клеток как конкуренцию за функциональное пространство с вытеснением из него всех клеток более активными клетками, а нарушение функций кроветворения как переход системы из устойчивой области в неустойчивую.

Список литературы / References

1. Савостьянов Г. А. Возникновение стволовых клеток в развитии многоклеточности и их количественная характеристика / Г. А. Савостьянов // Цитология. – 2016. – Т. 58. – № 8. – С. 577–593.

2. Копнин Б.П. Современные представления о механизмах злокачественного роста: сходства и различия солидных опухолей и лейкозов / Б.П. Копнин // Клиническая онкогематология. – 2012. – № 5(3). – С. 165–185.

3. Васильев А.В. Ниши стволовых клеток и регенеративная медицина / А. В. Васильев, Е. А. Воротеляк, В. В. Терских // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 2016. – №103(3). – С. 241–261.

4. Fuentes-Garí M. A mathematical model of subpopulation kinetics for the deconvolution of leukaemia heterogeneity / M. Fuentes-Garí, R. Misener, D. García-Munzer and others // Journal of the Royal Society Interface. – 2015. – V. 12. – № 108. 20150276. doi:10.1098/rsif.2015.0276.

5. Berezansky L. Stability and Controllability Issues in Mathematical Modeling of the Intensive Treatment of Leukemia / L. Berezansky, S. Bunimovich-Mendrazitsky, B. Shklyar // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2015. – V. 167. – № 1. – P. 326–341. doi:10.1007/s10957-015-0717-9.

6. Rădulescu I. R. A complex mathematical model with competition in Leukemia with immune response - An optimal control approach / I. R. Rădulescu, D. Cândea, A. Halanay // IFIP Advances in Information and Communication Technology. – 2016. – V. 494. – P. 430–441.doi:10.1063/1.4765573

7. Bunimovich-Mendrazitsky C. Mathematical model of pulsed immunotherapy for bladder cancer / C. Bunimovich-Mendrazitsky, H. Byrne , L. Stone // Bulletin of mathematical biology. – 2008. –V.70. –№ 7. – P. 2055–2076. doi:10.1007/s11538-008-9344-z.

8. Clapp G. A review of mathematical models for leukemia and lymphoma / G. Clapp, D. Levy // Drug Discovery Today: Disease Models. – 2015, V. 16. – № 2. – P. 1–6.

9. Kolpak E. P. Neoplasm Morbidity among the Population of Russia / E. P. Kolpak, I. S. Frantsuzova, K. V. Kuvshinova // International journal of advanced biotechnology and research. – 2017. – V.8. – № 3 – P. 2315–2322.

10. Жукова И. В. Математические модели злокачественной опухоли / И. В. Жукова, Е. П. Колпак // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2014. – № 3. – С. 5–18.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Savostyanov G. A. Vozniknovenie stvolovyh kletok v razvitii mnogokletochnosti i ih kolichestvennaja harakteristika [The initiation of stem cells in the development of multicellularity and their quantitative characteristics] / G. A. Savostyanov // Citologiya [Cytology]. – 2016. – Vol. 58. – №8. –P. 577–593. [in Russian]

2. Kopnin B. P. Sovremennye predstavlenija o mehanizmah zlokachestvennogo rosta: shodstva i razlichija solidnyh opuholej i lejkozov [Modern views on the mechanisms of malignant growth: the similarities and differences of solid tumors and leukemias] / B. P. Kopnin // Klinicheskaya onkogematologiya [Clinical oncohematology]. – 2012. –№ 5(3). – P. 165–185. [in Russian]

3. Vasil'ev A. V. Nishi stvolovyh kletok i regenerativnaja medicina [Niches of stem cells and regenerative medicine] / A. V. Vasil'ev, E. A. Vorotelyak, V. V. Terskikh // Rossijskij fiziologicheskij zhurnal im. I. M. Sechenova [Russian physiological journal named after I. M. Sechenov]. –2016. –№103(3). – P. 241–261. [in Russian]

4. Fuentes-Garí M. A mathematical model of subpopulation kinetics for the deconvolution of leukaemia heterogeneity / M. Fuentes-Garí, R. Misener, D. García-Munzer and others // Journal of the Royal Society Interface. – 2015. – V. 12. – № 108. 20150276. doi:10.1098/rsif.2015.0276.

5. Berezansky L. Stability and Controllability Issues in Mathematical Modeling of the Intensive Treatment of Leukemia / L. Berezansky, S. Bunimovich-Mendrazitsky, B. Shklyar // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2015. – V. 167. – № 1. – P. 326–341. doi:10.1007/s10957-015-0717-9.

6. Rădulescu I. R. A complex mathematical model with competition in Leukemia with immune response - An optimal control approach / I. R. Rădulescu, D. Cândea, A. Halanay // IFIP Advances in Information and Communication Technology. – 2016. – V. 494. – P. 430–441.doi:10.1063/1.47655733.

7. Bunimovich-Mendrazitsky C. Mathematical model of pulsed immunotherapy for bladder cancer / C. Bunimovich-Mendrazitsky, H. Byrne , L. Stone // Bulletin of mathematical biology. – 2008. –V.70. –№ 7. – P. 2055–2076. doi:10.1007/s11538-008-9344-z.

8. Clapp G. A review of mathematical models for leukemia and lymphoma / G. Clapp, D. Levy // Drug Discovery Today: Disease Models. - 2015, V. 16. – № 2. – P. 1–6.

9. Kolpak E. P. Neoplasm Morbidity among the Population of Russia / E. P. Kolpak, I. S. Frantsuzova, K. V. Kuvshinova // International journal of advanced biotechnology and research. – 2017. – V.8. – № 3 – P. 2315–2322.

10. Zhukova I. V. Matematicheskie modeli zlokachestvennoj opuholi [Mathematical models of malignant tumor] / I. V. Zhukova, E. P. Kolpak // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Serija 10: Prikladnaya matematika. Informatika. Processy upravlenija [Bulletin of Saint-Petersburg university. Series 10: Applied mathematics. Informatics. Control processes]. –2014. – №3. – P. 5–18. [in Russian]

AGRIS

Международный научно-исследовательский журнал теперь индексируется в Agris.

Статьи, размещаемые в Agris, имеют статус публикаций ВАК.

***AGRIS (International System for Agricultural Science and Technology)** – это международная библиографическая база данных с более чем 7.5 млн структурированных библиографических данных по сельскому хозяйству и смежным дисциплинам.*

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.158

Гвоздева Л.Г.[1], Чулюнин А.Ю.[2]
[1]Доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН),
[2]Научно исследовательский институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-08-01228 А)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПЕРЕРАСШИРЕННЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СОПЛАХ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ

Аннотация

Изучение поведения сверхзвуковых струй, их структуры и свойств является одной из важнейших задач газовой динамики. Одним из наиболее исследуемых явлений, протекающих во многих задачах сверхзвукового течения газа, является процесс перехода от одного типа отражения ударный волн в другой. В работе аналитическими методами были получены границы регулярного и двух маховских отражений для трех определяющих параметров: Число Маха, отношения теплоемкостей, отношения давления в окружающей среде к давлению на выходе и сопла. Численно исследован процесс истечения струи из сверхзвукового сопла при различных начальных условиях и двух отношениях теплоемкостей. Показано влияние этих параметров на структуру течения.

Ключевые слова: численное моделирование, маховское отражение, трехударные конфигурации, сверхзвуковые сопла.

Gvozdeva L.G.[1], Chulyunin A.Yu.[2]
[1]PhD in Engineering, Professor
Federal State Budgetary Institution of Science "Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences",
[2]Scientific Research Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant 16-08-01228 A)

STUDY OF DEPENDENCE OF FLOW STRUCTURE IN ADVANCED SUPER-SURFACE NOZZLES FROM ADIABATIC INDICATOR

Abstract

The study of supersonic jets behavior, their structure and properties is one of the most important tasks of gas dynamics. One of the most researched phenomena occurring in many problems of supersonic gas flow is the process of transition from one type of shock wave reflection to another. We obtained the boundaries of the regular and two Mach reflections for the three determining parameters with the help of analytical methods: Mach number, the ratio of specific heats, the ratio of the pressure in the environment to the outlet pressure and the nozzle. The flow of a jet from a supersonic nozzle under various initial conditions and two ratios of specific heats are numerically studied. The influence of these parameters on the flow structure is shown.

Keywords: numerical simulation, Mach reflection, three-impact configurations, supersonic nozzles.

Исследование сверхзвуковых струй и их свойств является крайне важной задачей для многих инженерных приложений. Известный процесс перехода от одного типа отражения ударных волн в другой, наблюдаемый в частности в сверхзвуковых струях является предметом исследований многих научных групп. Среди этих групп можно отметить следующие работы: A.Hadjadj [1-2], E.Shimshi, G.Ben-Dor, A. Levy [3], E. Martelli, F. Nasuti, M. Onofri [4]. Однако, несмотря на огромное число исследований полного понимания этих процессов до настоящего времени не существует.

Некоторые зависимости расположения трехударных конфигураций в зависимости от показателя адиабаты были исследованы ранее в работах Гвоздевой и Гавренкова [5,6]. Была найдена новая трехударная конфигурация с отрицательным углом отражения. В этих же работах был исследован эффект влияния γ на процесс перехода маховского и регулярного отражения (RR/MR). Двухударные и трехударные конфигурации были построены как функции γ, числа Маха и угла падения волны. Было показано, что появление конфигурации с отрицательным углом отражения в стационарном сверхзвуковом потоке газа может привести к запиранию потока [7].

Схема появления трехударной конфигурации с отрицательным углом отражения представлена на Рис.1

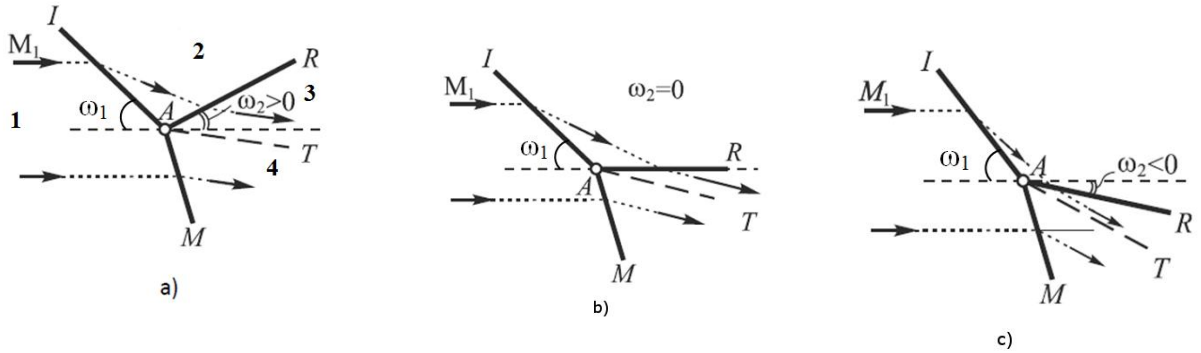


Рис. 1 – Структура ударных волн в окрестности тройной точки. IA – падающая волна, IR – отраженная волна, AM – волна Маха, ω1 – угол падающей волны, ω2 - угол отраженной волны. a - Случай с положительным углом отражения, b - схема переходного случая (ω2=0), c - схема с отрицательным углом отражения

Если мы рассматриваем трехударную конфигурацию без какой-либо отражающей поверхности (вроде стенки сопла), то положение волн в этой структуре определяется тремя параметрами: углом падения ω1, числом Маха M и показателем адиабаты γ. Из Рис.1 видно, что с уменьшением γ угол отраженной волны увеличивается и после критической точки ω1=ωg (угол ω2=0) отраженные волны начинают располагаться в той же плоскости, что и волна Маха. В работе Гвоздевой и Гавренкова [7] было показано, что появление таких аномальных конфигураций, при решении краевой задачи об обтекании системы из двух клиньев (модель воздухозаборника) приводит к дестабилизации течения. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния γ на истечение газа из перерасширенных сопел.

Аналитическое исследование трехударной конфигурации

Проведем анализ границ существования трехударных конфигураций для трех определяющих параметров: число Маха, показатель адиабаты и отношение давлений. Результаты подобных вычислений представлены на рис.2-4. На Рис.2 представлены границы существования конфигурации с отрицательным углом отражения ω2 для различных значений γ. Из полученной зависимости также следует, что при γ=1.4 областей с отрицательным углом отражения не существуют, наблюдается только маховское отражение.

Границы существования различных областей для γ=1.4 хорошо известны (см, например [3]). Область, находящаяся выше кривой ABCD содержит режимы как маховского, так и регулярного отражения (Рис.3). Область ниже кривой DC соответствует только регулярному отражению. На Рис.4 представлены расположения областей, соответствующих различным конфигурациям в зависимости от параметров P2/P1 и числа Маха на выходе из сопла, при значении отношения показателя адиабаты γ=1.2. Область AGHCA содержит два вида отражения – регулярное и маховское. Область GEBG соответствует нерегулярному отражению с отрицательным углом, область GBHG содержит два отражения – регулярное и нерегулярное с отрицательным углом; область ниже кривой DC соответствует исключительно регулярному отражению, область выше AGE содержит только маховское отражение

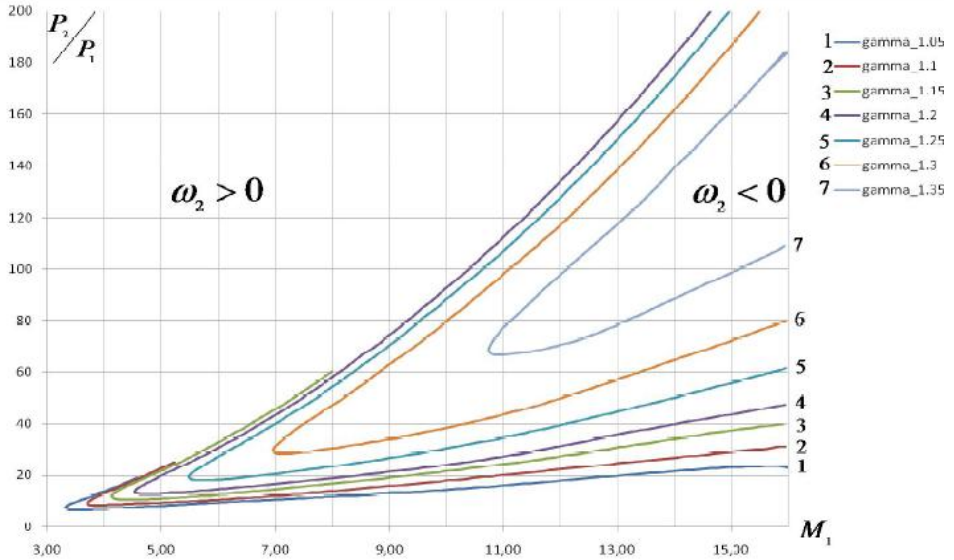


Рис.2 – Границы трехударных конфигураций для различных значений показателя адиабаты

При появлении трехударной конфигурации, расположение волн зависит не только от трех определяющих параметров, но также от формы и размеров сопла, перепаде давления на сопле и параметрах газа вниз по потоку. Далее в работе исследуется процесс истечения газа для двух значений показателя адиабаты, а также при различных начальных параметрах газа.

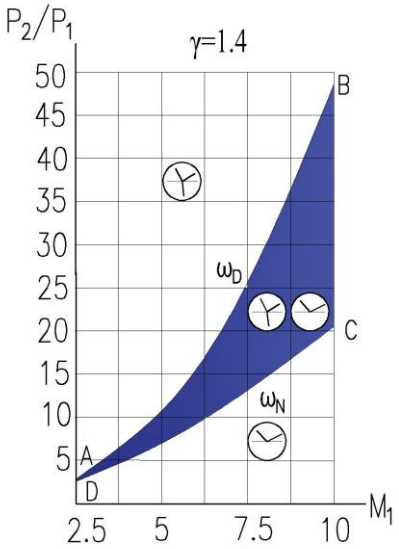


Рис.3 – Границы регулярного и маховского отражения для γ=1.4

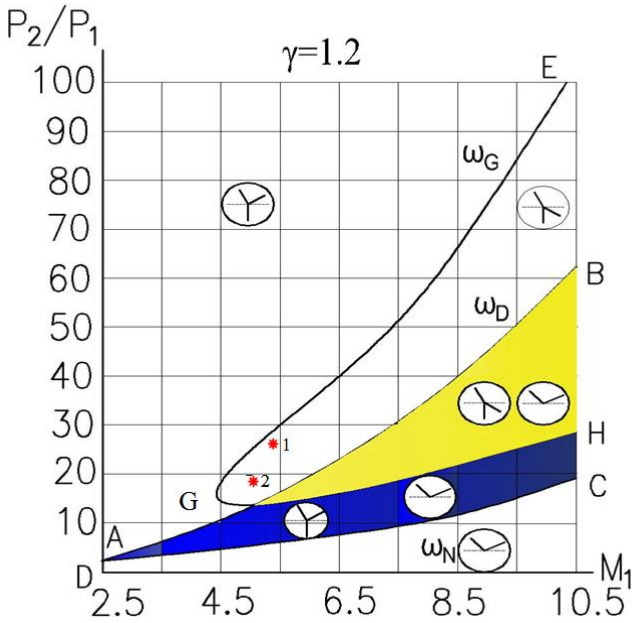


Рис.4 – Границы отражений различных типов для γ=1.2. AGHC – область двойного решения (возможны как регулярное, так и обычное маховское отражение). GHB область, где возможны как регулярное отражение так и маховское с отрицательным углом

Численное моделирование

Рассматривается процесс истечения сверхзвуковой струи из плоского сопла для двух значений показателя адиабаты, а также для различных значений показателя NPR (Nozzle Pressure Ratio). Этот параметр характеризует отношение давления на входе в сопло к атмосферному давлению. В качестве объекта исследования рассматривается сверхзвуковое сопло, со следующими геометрическими параметрами: ширина горловины, Dt=16 мм, отношение площади выходного сечения сопла к горловому сечению Ae/At=8. Угол расширения сопла 10°, длина расчетной области, Ld=2400 мм, высота вычислительного домена Hd = 1600 мм, радиус скругления конвергентной части сопла 24 мм. Расчетная область выбиралась с тем условием, чтобы расстояние от среза сопла до выходной границы равнялось не менее 10 калибров, рассчитанных по диаметру выходного сечения.

Разбиение расчетной области на контрольные объемы использовались ячейки типа полигонального типа (polyhedral mesh), со сгущением вблизи стенок сопла и в следе за выходной струей. На стенках сопла использовались ячейки призматического типа для более качественного разрешения пограничного слоя. Безразмерный параметр y+ определяющий высоту первой ячейки меньше 2. Общее количество контрольных объемов составило ~ 1 млн. ячеек. Преимущество ячеек многогранного типа над тетраэдрами описано в работе [8]. Вкратце можно отметить, что многогранные ячейки позволяют лучше описывать градиенты течений при сохранении размерности сетки, это особенно важно при исследовании задач с ударными волнами и другими поверхностями разрыва. Кроме того, использование многогранных ячеек позволяет существенно сократить время расчета.

Для описания течения внутри сопла и истечения сверхзвуковой струи использовались сжимаемые нестационарные уравнения Навье-Стокса, замыкание которых осуществлялось с помощью модели турбулентности SST. Опишем эти уравнения более подробно.

Система уравнений Рейнольдса в тензорном виде имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho c_P T}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i c_P T}{\partial x_j} = \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij} u_i}{\partial x_j} \tag{3}$$

где ρ - плотность, T –температура, ui - i-я компонента скорости, i = 1,2,3, xi – декартовы координаты, Cp – теплоемкость при постоянном давлении, τij – тензор вязких напряжений, qi – поток тепла.

Для замыкания Рейнольдсовых напряжений используется модель турбулентности SST [9], [10], которая имеет вид:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \rho k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t\right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \rho \omega}{\partial x_j} = \gamma \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t\right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] +$$

$$+ 2\left(1 - F_1\right) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{5}$$

Здесь k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, ω – скорость диссипации энергии, β, β*, σk, σω – константы турбулентности. Турбулентная вязкость и рейнольдсовы напряжения находятся, как и в случае k-e модели:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{6}$$

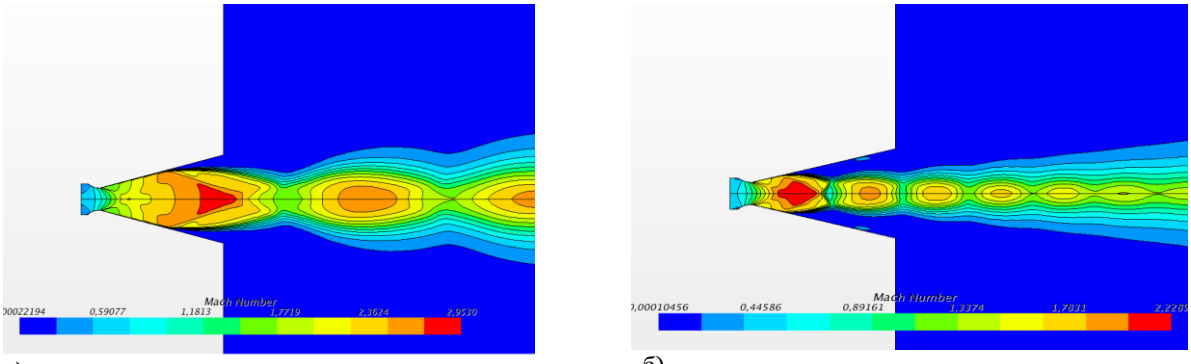
$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} \tag{7}$$

В качестве рабочей жидкости, при моделировании использовался совершенный газ, уравнение состояния которого описывается законом Менделеева-Клайперона. Для оценки влияния показателя адиабаты на структуру потока, коэффициент γ принимался равным 1.4 и 1.2.

Уравнения (1)-(6) совместно с граничными условиями образуют замкнутую систему, которую можно решить одним из численных методов. В настоящей работе используется метод контрольного объема [10]. Расчеты проводились на компьютере Intel Core i-7 32 Gb RAM, 8 узлов. Время, затраченное на единичный расчет, составляет 192 ядрочаса.

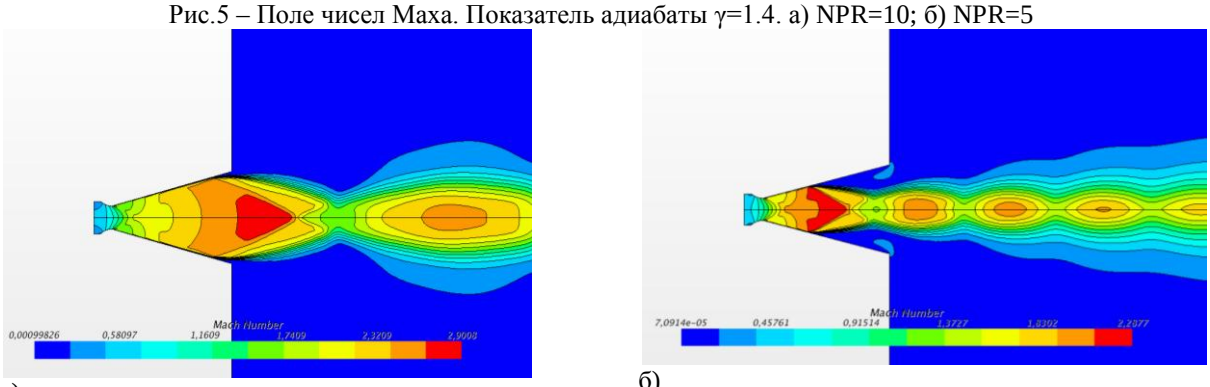
На рис.5 a, b представлены результаты расчета истечения струи при γ=1.4. При NPR=20 (режим на рисунке не представлен) наблюдается структура характерная для регулярного отражения с двойной точкой, расположенной на выходе из сопла. При уменьшении NPR до 10 структура, напоминающая регулярное отражение остается, однако при этом точка смещается внутрь сопла, возникает небольшой отрыв потока. При дальнейшем уменьшении NPR до 5 число «бочек» внутри сопла увеличивается. Появляются дозвуковые области, отделяющие падающую волну от «бочек». По мере уменьшения NPR дозвуковая область приближается к точке отражения волны от стенки сопла. Зона отрыва заметно возрастает. Этот режим предшествует формированию Маховского отражения. Полученные зависимости схожи с полученными ранее в работе [3]

На рис.6 a, b представлены результаты расчета истечения струи при γ=1.2. Отметим, что при одинаковом, по сравнению в γ=1.4, NPR точка отражения смещается ближе к выходному сечению сопла. Из рис.7 a, b следует, что при уменьшении γ отрывная зона уменьшается.



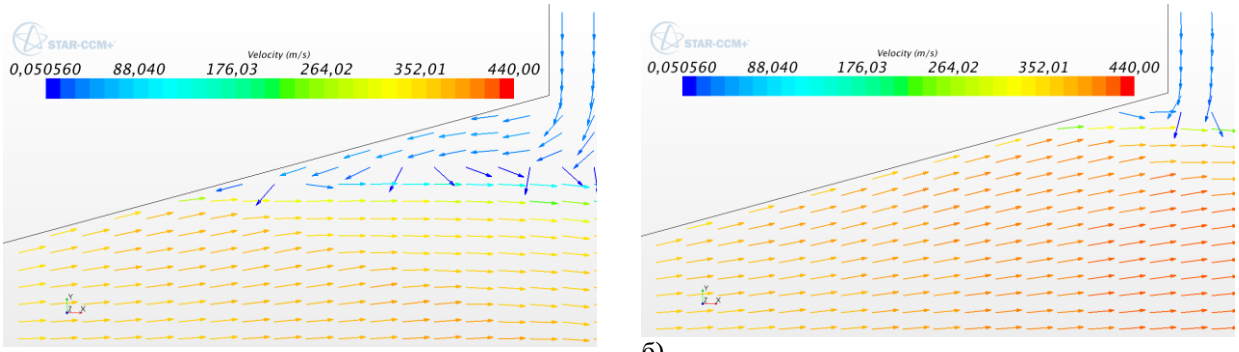
а) б)

Рис.5 – Поле чисел Маха. Показатель адиабаты γ=1.4. a) NPR=10; б) NPR=5



а) б)

Рис.6 – Поле чисел Маха. Показатель адиабаты γ=1.2. a) NPR=10; б) NPR=5



а) б)

Рис. 7 – Сравнение векторных полей скоростей, полученных при одинаковом показателе NPR=10.
а) γ=1.4; б) γ=1.2

Заключение

В работе аналитическими методами были получены границы регулярного и двух маховских отражений для трех определяющих параметров: Число Маха, отношения теплоемкостей, отношения давления в окружающей среде к давлению на выходе и сопла.

Процесс истечения струи при различных начальных условиях и двух отношениях теплоемкостей был исследован численно. Расчеты, проведенные для плоского сопла при значениях γ=1.4 и 1.2 и различных значениях NPR, показали что:

1. При значении NPR=20 наблюдается структура, напоминающая регулярное отражение с точкой пересечения волны и оси, расположенной за соплом.

2. Уменьшение NPR приводит к перестройке всей картины течения, начинает формироваться отрыв потока от стенки сопла, при этом зона отрыва тем больше, чем выше показатель адиабаты. При малых NPR внутри сопла начинают формироваться характерные «бочки» и дозвуковые зоны.

Список литературы / References

1. Hadjadj A. Numerical Investigation of Shock-Reflection Phenomena in Overexpanded Supersonic Jets / A.Hadjadj, A.N. Kudryvtsev, M.S. Ivanov // AIAA Journal. – 2004. - Vol. 42. - №3. – P. 570-577. doi:10.2514/1.989

2. Hadjadj A. Numerical study of shock/boundary layer interaction in supersonic overexpanded nozzles / A.Hadjadj, Y. Perrot, S. Verma // Aerospace Science and Technology. – 2015. – Vol. 42. – P.158-168. doi: 10.1016/j.ast.2015.01.010

3. Shimshi E. Viscous simulation of shock-reflection hysteresis in overexpanded planar nozzles / E.Shimshi, G.Ben-Dor, A. Levy // Shock Waves. – 2011. – Vol.21. – №3. – P.205-214. doi: 10.1007/s00193-011-0325-z

4. Martelli, E. Numerical analysis of film cooling in advanced rocket nozzles / E.Martelli, F. Nasuti, M. Onofri // AIAA Journal. – 2009. – Vol. 47. - №11. – P.2558–2604. doi: 10.2514/1.39217

5. Gvozdeva L.G. Influence of the adiabatic index on switching between different types of shock wave reflection in a steady supersonic gas flow / L.G. Gvozdeva, S.A. Gavrenkov // Technical Physics. - 2013. - Vol. 58. - № 8. – P.1238-1241. doi: 10.1134/S1063784213080148

6. Gvozdeva L.G. Formation of triple shock configurations with negative re- flection angle in steady flow / L.G. Gvozdeva, S.A. Gavrenkov // Technical Physics Letters. - 2012. - Vol. 38. - № 4. P. 372 - 374. doi: 10.1134/S1063785012040232

7. Gvozdeva L.G. New configuration of irregular reflection of shock waves / L.G. Gvozdeva, S.A. Gavrenkov // Progress in Flight Physics. – 2015. – Vol.7. – P.437-452. doi: 10.1051/eucass/201507437

8. Garimella R.V. Polyhedral Mesh Generation and Optimization for Non-manifold Domains. / R.V. Garimella, J.Kim, M. Berndt // Proceedings of the 22nd International Meshing Roundtable. Oct 13-16, 2013 in Orlando, Florida, USA / Springer, 2004. – pp.313-330

9. Menter, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / F.R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32. - № 8. – P. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149

10. Ferziger, J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J.H. Ferziger M. Peric - 2nd edition. - Springer, 2001 – 426 p.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.157

Гильманов С.А.[1], Кильдибаева С.Р.[2] Ишмухаметова А.А.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-7562-784X, кандидат физико-математических наук,
[2]ORCID: 0000-0001-9586-8926, кандидат физико-математических наук,
[3]ORCID: 0000-0002-0575-0818, кандидат физико-математических наук,
Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВО Башкирский государственный университет

Работа выполнена при поддержке гранта СФ БашГУ № В17-63

ЗАДАЧА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ ПО НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация

В работе проведен анализ некоторых особенностей движения тонкого слоя невязкой несжимаемой жидкости, стекающей по наклонной поверхности в приближении теории "мелкой воды". На основе предложенного подхода изучено влияние угла наклона поверхности на динамику движения флюида. Для упрощения процесса получения решений введена обобщенная автомодельная схема, когда вид временного компонента принимается без уточнений. Предложенная подстановка позволяет получить в ряде частных случаев аналитические решения. Выбор слагаемых уравнения для преобразования дает возможность получения достаточно большого количества разных решений в зависимости от количества слагаемых в уравнении. Сравнение с приближенными решениями может быть использовано для определения диапазона изменения особых параметров, получаемых при использовании метода. Полученные результаты могут представлять интерес, например, при подборе угла наклона стенок канавы, перехватывающей дождевую воду, стекающую с холма на дорогу или с полотна дороги в канаву.

Ключевые слова: тонкий слой жидкости, угол наклона, мелкая вода, несжимаемая жидкость, невязкая жидкость.

Gilmanov S.A.[1], Kildibaeva S.R.[2] Ishmukhametova A.A.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-7562-784X, PhD in Physics and Mathematics,
[2]ORCID: 0000-0001-9586-8926, PhD in Physics and Mathematics,
[3]ORCID: 0000-0002-0575-0818, PhD in Physics and Mathematics,
Sterlitamak Branch of FSBEI of Higher Education Bashkir State University

The work was supported by the Bashkir State University grant No.B17-6

PROBLEM OF THIN LIQUID LAYER DISTRIBUTION ON ANGLED SURFACE

Abstract

The article analyzes some features of the thin layer motion of inviscid incompressible fluid flowing along an inclined surface in the approximation of the theory of "shallow water." Based on the proposed approach, we studied the influence of the surface inclination angle on fluid dynamics. To simplify the process of obtaining solutions, a generalized self-similar scheme is introduced, when the form of the time component is adopted without specification. Proposed substitution allows us to obtain analytical solutions in a number of special cases. The choice of the terms of the equation for the transformation enables obtaining a sufficiently large number of different solutions depending on the number of terms in the equation. Comparison with approximate solutions can be used to determine the range of variation of the special parameters obtained by using the method. The results obtained may be of interest, for example, in selecting the angle of inclination of the walls of the ditch, intercepting rainwater flowing from the hill to the road or from the roadway to the ditch.

Keywords: thin layer of liquid, angle of inclination, shallow water, incompressible fluid, non-viscous liquid.

Поток жидкости, у которого линейные размеры вдоль поверхности грунта значительно больше, чем толщина (кратчайшее расстояние от поверхности грунта до свободной границы с атмосферой) могут быть описаны на основе теории «мелкой воды». Эволюция потоков, описываемых уравнениями из этой теории, для частных случаев приведена в [2, С. 65], [3, С. 82], [5, С. 90]. Так же некоторые особенности рассмотрены в работах [6, С. 520], [7, С. 106], [10, С. 137]

Рассмотрим поток жидкости, стекающий по наклонной поверхности с углом β. На поток действуют силы тяжести и трения со стороны окружающей среды. Причем с ростом угла наклона влияние силы тяжести меняется нелинейно Жидкость считается невязкой и несжимаемой, ее испарением в рамках представленной постановки можно пренебречь. Ось абсцисс 0x направлена вдоль наклонной поверхности. Ось 0n направлена перпендикулярно оси 0x. Скорость потока направлена вдоль оси 0x. Схема потока представлена на рис. 1.

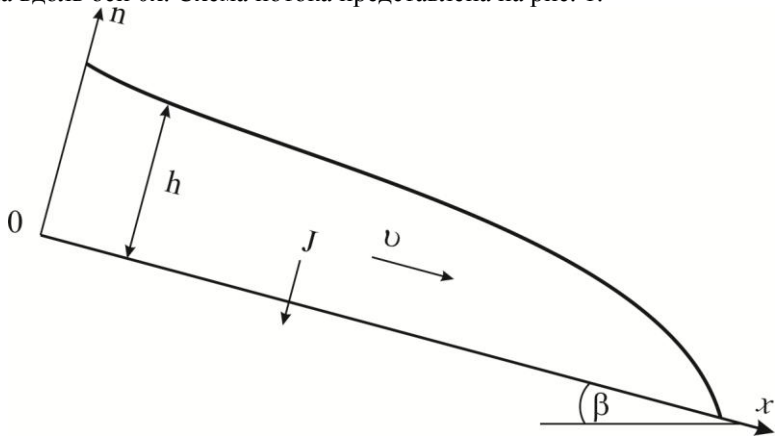


Рис. 1.– Схема одномерного потока тонкого слоя жидкости вдоль наклонной поверхности

Математическая модель, аналогично принятой в [1, С. 174], [8, С. 610], [9, С. 89] для гидродинамической задачи может быть записана как система уравнений балансов объема и локального количества движения. Такая постановка позволяет моделировать эволюции изотермической жидкости.

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(h\upsilon\right)=-J, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial t}+\upsilon\frac{\partial \upsilon}{\partial x}=g\sin\beta-g\cos\beta\cdot\frac{\partial h}{\partial x}-\alpha\frac{\upsilon^m}{h^k}. \tag{2}$$

Здесь h, υ – высота и усредненная по высоте скорость потока в направлении, параллельном наклонной поверхности, t, x – время и координата, g – ускорение сил тяжести, J – интенсивность потерь массы на единицу длины поверхности грунта за счет впитывания, α, m, k – эмпирические параметры.

Применительно для источника, у которого высота жидкости в начале координат поддерживается постоянной, система уравнений (1) – (2) замыкается следующим набором краевых условий:

$$h\left(x,0\right)=0,\ h\left(0,t\right)=h_0,\ h\left(l\left(t\right),t\right)=0,$$
$$\upsilon\left(x,0\right)=0,\upsilon\left(0,t\right)=\gamma\sqrt{2gh_0},\ \upsilon\left(l\left(t\right),t\right)=\dot{l}\left(t\right). \tag{3}$$

Конкретная физическая интерпретация может быть представлена в виде области пространства, ограниченного непроницаемой преградой, например шлюз в реке. Здесь l(t) – величина, указывающая положение переднего края потока в текущий момент времени. Коэффициент γ в формуле Торричелли для граничного условия в начале координат при определении скорости возникает при усреднении скорости по высоте. Учет сопротивления рассмотрен на базе альтернативного подхода. Из начальных условий получаем l(0) = 0.

Для получения решения системы уравнений (1) – (2) с краевыми условиями (3) введем замену переменных следующим образом

$$h\left(x,t\right)=a\left(t\right)H\left(\xi\right),\ \ \upsilon\left(x,t\right)=\dot{b}\left(t\right)V\left(\xi\right),\ \ \xi=x\cdot b\left(t\right)^{-1} \tag{4}$$

Величину ξ назовем автомодельной переменной. Она является безразмерной. В дальнейшем для упрощения записей аргументы функций a(t), b(t), H(ξ), V(ξ) опустим.

С учетом приведенной замены переменных (4) система уравнений (1) – (2) примет вид:

$$\dot{a}H+\frac{a\dot{b}}{b}\left(\frac{d}{d\xi}\left(HV\right)-\xi\frac{dH}{d\xi}\right)=-J,$$
$$\ddot{b}V+\frac{\dot{b}^2}{b}\frac{dV}{d\xi}\cdot\left(V-\xi\right)=g\sin\beta-\left(\frac{ga}{b}\cos\beta\right)\cdot\frac{dH}{d\xi}-\alpha\frac{\dot{b}^mV^m}{a^kH^k}. \tag{5}$$

Сведем уравнения в (5) к такому виду, чтобы с одной стороны от равенства была функция от t, а с другой – от ξ. Первое уравнение в (5) преобразуем следующим образом.

$$\left(\dot{a}H+J\right)\left(\frac{a\dot{b}}{b}\right)^{-1}=-\left(\frac{d}{d\xi}\left(HV\right)-\frac{dH}{d\xi}\cdot\xi\right)\rightarrow$$
$$\dot{a}\left(\frac{a\dot{b}}{b}\right)^{-1}\frac{dH}{d\xi}=-\frac{d}{d\xi}\left(\frac{d}{d\xi}\left(HV\right)-\frac{dH}{d\xi}\cdot\xi\right)\rightarrow$$
$$-\frac{\dot{a}b}{a\dot{b}}=\frac{\frac{d}{d\xi}\left(\frac{d}{d\xi}\left(HV\right)-\frac{dH}{d\xi}\cdot\xi\right)}{\frac{dH}{d\xi}} \tag{6}$$

Полученное уравнение является тождеством. Обозначим его через параметр P и перепишем отдельно временное и автомодельное уравнения. Для обоих уравнений укажем общее решение. В силу линейности полученного уравнения имеет место следующая цепочка элементарных преобразований

$$-\frac{\dot{a}b}{a\dot{b}}=P\rightarrow\frac{\dot{a}}{a}=-P\frac{\dot{b}}{b}\rightarrow\int\frac{\dot{a}}{a}dt=-P\int\frac{\dot{b}}{b}dt\rightarrow\ln a=-P\ln b+\ln C\rightarrow a=Cb^{-P} \tag{7}$$

Полученное решение связывает приведенные длину и высоту потока. В данном случае для объема жидкости имеет место обратная пропорциональность этих параметров, рост высоты сопровождается уменьшением длины, справедливо и обратное. С ростом размерности общая зависимость остается справедливой, меняется только значение параметра P.

$$\frac{\frac{d}{d\xi}\left(\frac{d}{d\xi}(HV)-\frac{dH}{d\xi}\cdot\xi\right)}{\frac{dH}{d\xi}}=P\rightarrow$$

$$\frac{d}{d\xi}\left(\frac{d}{d\xi}(HV)-\frac{dH}{d\xi}\cdot\xi\right)=P\frac{dH}{d\xi}\rightarrow$$

$$\frac{d}{d\xi}(HV)=\frac{dH}{d\xi}\cdot\xi+PH+Q \tag{8}$$

При значении параметра P = 1 имеем аналитическое решение вида

$$HV=H\xi+Q\xi+S \tag{9}$$

Решения (7) и (9) включают в себя по две функции, для уточнения решений рассмотрим второе уравнение из (5). Это уравнение имеет пять слагаемых с различными множителями относительно автомодельной и временной переменных, что дает более 20 вариантов ее преобразования. Рассмотрим один из возможных вариантов. Продифференцировав второе уравнение (5) по ξ, получим:

$$\ddot{b}\frac{dV}{d\xi}+\frac{\dot{b}^2}{b}\frac{d}{d\xi}\left(\frac{dV}{d\xi}\cdot(V-\xi)\right)=-\left(\frac{ga}{b}\cos\beta\right)\cdot\frac{d^2H}{d\xi^2}-\frac{\alpha\dot{b}^m}{a^k}\cdot\frac{d}{d\xi}\left(\frac{V^m}{H^k}\right) \tag{10}$$

Далее умножаем (10) на $\alpha^{-1}\dot{b}^{-m}a^k$ и продифференцируем полученное уравнение по времени. Результат запишем как

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{a^k\ddot{b}}{\alpha\dot{b}^m}\right)\frac{dV}{d\xi}+\frac{d}{dt}\left(\frac{a^k\dot{b}^2}{\alpha b^{m+1}}\right)\frac{d}{d\xi}\left(\frac{dV}{d\xi}\cdot(V-\xi)\right)=-\frac{d}{dt}\left(\frac{\left(\frac{ga}{b}\cos\beta\right)}{\frac{\alpha\dot{b}^m}{a^k}}\right)\cdot\frac{d^2H}{d\xi^2} \tag{11}$$

Умножаем (11) на $\left(\frac{dV}{d\xi}\right)^{-1}$, затем осуществляем дифференцирование по автомодельной переменной ξ, сводя (11) к виду (12)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{a^k\dot{b}^2}{\alpha b^{m+1}}\right)\frac{d}{d\xi}\left(\frac{\frac{d}{d\xi}\left(\frac{dV}{d\xi}\cdot(V-\xi)\right)}{\frac{dV}{d\xi}}\right)=-\frac{d}{dt}\left(\frac{\left(\frac{ga}{b}\cos\beta\right)}{\frac{\alpha\dot{b}^m}{a^k}}\right)\cdot\frac{d}{d\xi}\left(\frac{\frac{d^2H}{d\xi^2}}{\frac{dV}{d\xi}}\right) \tag{12}$$

Преобразуем (12) так, чтобы слева от знака равенства была функция времени, а справа – функция автомодельной переменной, тогда (13) будет тождеством согласно [4, С. 369], так как его левая сторона зависит от t, а правая – от ξ.

$$\frac{\frac{d}{dt}\left(\frac{a^k\dot{b}^2}{\alpha b^{m+1}}\right)}{-\frac{d}{dt}\left(\frac{\left(\frac{ga}{b}\cos\beta\right)}{\frac{\alpha\dot{b}^m}{a^k}}\right)}=\frac{\frac{d}{d\xi}\left(\frac{\frac{d^2H}{d\xi^2}}{\frac{dV}{d\xi}}\right)}{\frac{d}{d\xi}\left(\frac{\frac{d}{d\xi}\left(\frac{dV}{d\xi}\cdot(V-\xi)\right)}{\frac{dV}{d\xi}}\right)} \tag{13}$$

Полученное тождество преобразуем аналогично (6). Введем параметр T. Тогда временная часть уравнения может быть записана как

$$-\frac{d}{dt}\left(\frac{a^k\dot{b}^2}{\alpha b^{m+1}}\right)\left(\frac{d}{dt}\left(\frac{\left(\frac{ga}{b}\cos\beta\right)}{\frac{\alpha\dot{b}^m}{a^k}}\right)\right)^{-1}=T \tag{14}$$

После преобразования (14), интегрирования по времени и дополнительного преобразования получим

$$\frac{\dot{b}^{m+2}}{b^{m+1}} = -\frac{gaT}{b}\cos\beta + R\frac{\alpha\dot{b}^{m}}{a^{k}} \tag{15}$$

Подстановка вместо функции a из (7) дает обыкновенное дифференциальное уравнение для функции b.

$$\dot{b}^{m+2} = -gTCb^{m-P}\cos\beta + \alpha RC^{-k}b^{(m+1-P\cdot k)}\dot{b}^{m} \tag{16}$$

Обычно силы сопротивления со стороны окружающей среды принято брать пропорционально скорости (для медленных течений) или квадрату скорости (для быстрых течений). Учитывая, что при P=1 существует аналитическое решение для автомодельного уравнения, получим при m=1

$$\dot{b} = \frac{1}{6}\left(12\sqrt{\left(9gTC\cos\beta\right)^{2} - 12\left(\alpha RC^{-k}b^{(2-k)}\right)^{3}} - 108gTC\cos\beta\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{2\alpha RC^{-k}b^{(2-k)}}{\left(12\sqrt{\left(9gTC\cos\beta\right)^{2} - 12\left(\alpha RC^{-k}b^{(2-k)}\right)^{3}} - 108gTC\cos\beta\right)} \tag{17}$$

и m=2 соответственно

$$\dot{b} = \frac{1}{2}\left(2\alpha RC^{-k}b^{(3-k)} + 2\sqrt{2\left(\alpha RC^{-k}b^{(3-k)}\right)^{2} - 4gTCb\cos\beta}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{18}$$

Тестовые решения при T=–1, C=1, R=–1, k=0, α=1, g=9.81, b(0)=0, $\beta = 6°$ имеют вид, указанный на рисунке. Эти решения указывают на рост длины разлива с течением времени. Поиск зависимости решения от параметра β указал на слабую зависимость решения от параметра при малых углах наклона. По – видимому, это связано с тем, что при малых углах наклона имеет место линейная зависимость между углом β и долей силы тяжести, ответственной за стремление к уменьшению величины свободной поверхности потока.

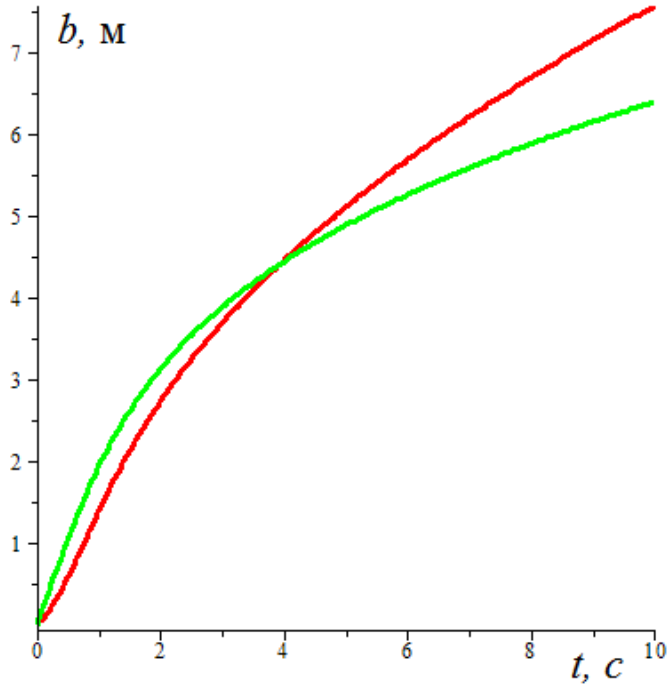


Рис. 2. – Зависимость длины потока от времени при разных значениях параметра m.

Красная линия – m=2, зеленая – m=1. Зная зависимость b(t) от времени, на основе (7) можно получить зависимость a(t). Т.е., формально временная часть уравнения решена.

Далее рассмотрим правую часть (13) в виде, аналогичном (14).

$$\frac{d}{d\xi}\left(\frac{\frac{d^{2}H}{d\xi^{2}}}{\frac{dV}{d\xi}}\right) = T\frac{d}{d\xi}\left(\frac{\frac{d}{d\xi}\left(\frac{dV}{d\xi}\cdot\left(V-\xi\right)\right)}{\frac{dV}{d\xi}}\right) \tag{19}$$

Проинтегрировав (19) по ξ и умножив на $\frac{dV}{d\xi}$, получим

$$\frac{d^2H}{d\xi^2} = T\frac{d}{d\xi}\left(\frac{dV}{d\xi}\cdot\left(V-\xi\right)\right)+U\frac{dV}{d\xi} \tag{20}$$

Повторное интегрирование дает

$$\frac{dH}{d\xi} = T\left(\frac{dV}{d\xi}\cdot\left(V-\xi\right)\right)+UV+W \tag{21}$$

Выразив из (9) H и подставив его в (21) получим обыкновенное дифференциальное уравнение для функции V.

$$\frac{d}{d\xi}\left(\frac{Q\xi+S}{V-\xi}\right) = T\left(\frac{dV}{d\xi}\cdot\left(V-\xi\right)\right)+UV+W \tag{22}$$

Это уравнение имеет аналитические решения при некоторых частных значениях параметров Q, S, U, W. Например, при Q=1, S=1, U=1, T=–1 имеет место аналитическое решение.

$$V\left(\xi\right) = \frac{1}{3}\left(3\sqrt{V_1\left(\xi\right)}-27\xi-27\right)^{\frac{1}{3}} - \frac{2-2\xi-\xi^2+2C_1}{\left(3\sqrt{V_1\left(\xi\right)}-27\xi-27\right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$V_1\left(\xi\right) = 90\xi+117\xi^2+48\xi^3-144C_1\xi-3\xi^6+105+$$
$$24C_1^3+72\left(C_1+C_1^2+C_1\xi^3-C_1^2\xi\right)+18\left(C_1-1\right)\xi^4-36C_1^2\xi^2 \tag{23}$$

Анализ показывает, что начальное значение V будет положительным при C1 < –2.5 и отрицательным при C1 > – 1. Тогда функция H имеет вид

$$H = \frac{\xi+1}{\frac{1}{3}\left(3\sqrt{V_1\left(\xi\right)}-27\xi-27\right)^{\frac{1}{3}} - \frac{2-2\xi-\xi^2+2C_1}{\left(3\sqrt{V_1\left(\xi\right)}-27\xi-27\right)^{\frac{1}{3}}}-\xi} \tag{24}$$

В работе рассмотрена математическая модель растекания жидкости вдоль наклонной поверхности с учетом сил сопротивления в степенной форме. Получены автомодельные аналитические и численные временные решения. Полученные решения проанализированы с учетом варьирования угла наклона и вида слагаемого, ответственного за учет взаимодействия с окружающей средой. Проанализирован диапазон константы интегрирования в решении (23). Установлены интервалы, где решение отсутствует, где начальное значение V(0) положительно при указанных значениях параметров. На основе полученных решений может быть построена реальная динамика жидкости вдоль наклонной поверхности.

Для обобщения результатов частные численные решения представленных дифференциальных уравнений могут быть аппроксимированы на основе точечного квадратичного приближения, что позволяет для конкретного набора параметров и граничных условий получить полностью аналитическое решение с погрешностями в наперед заданном диапазоне.

Список литературы / References

1. Гильманов С.А., Ишмухаметова А.А. Моделирование разливов нефти при разрушении трубопровода в процессе транспортировки // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. – Т.2, № 1. – С. 174–177.

2. Залипаева О.А., Трусов А.С. Растекание жидкости по горизонтальной поверхности // Известия Волгоградского государственного технического университета. –2012. – Т.5, № 1 (88). – С. 65–67.

3. Коханенко В.Н., Мицик М.Ф., Алейникова О.А. О плановой задаче растекания бурного потока несжимаемой жидкости // Известия высших учебных заведений. Северо–Кавказский регион. Серия: Технические науки. –2012. – № 6, – С. 82–88.

4. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов, т. 2: Учебное пособие для втузов.– 13-е изд. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 560 с.

5. Пономарева М.А., Шрагер Г.Р., Якутенок В.А. Использование уравнения Дюпре - Юнга для решения задачи о растекании жидкости при ограниченном смачивании // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2008. – № 1. – С. 90–96.

6. Свиркунов П.Н. Неустановившиеся осесимметричные движения в приближении теории мелкой воды // ПММ. – 1996. –Т.60, № 3. – С.520–522.

7. Татосов А. В. Растекание жидкости во влажной пористой среде // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, – 2012. – № 4. – С. 104–109.

8. Shagapov V.S., Gil’manov S.A. A contribution to the theory of spreading of liquid-containing ejections over a horizontal surface // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88. – № 3. – P. 630–644.

9. Shagapov V.S., Gils'manov S.A. Spreading of the liquid over the surface with penetration into the soil // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2010. – Vol. 51. – № 5. – P. 88–94.

10. Spannuth M. J., Neufeld J. A., Wettlaufer J. S., Grae Worster M. Axisymmetric viscous gravity currents flowing over a porous medium // J. Fluid Mech., – 2009. Vol. 622. – №1. –P. 135–144.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gil'manov S.A., Ishmuhametova A.A. Modelirovanie razlivov nefti pri razrushenii truboprovoda v processe transportirovki [Oil spills modeling during the pipeline destruction in transportation process] // Al'ternativnye istochniki jenergii v transportno-tehnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy racional'nogo ispol'zovanija [Alternative energy sources in the transport-technological complex: problems and prospects of rational using]. –2015. – Vol.2. – № 1. – P. 174–177. [in Russian]

2. Zalipaeva O.A., Trusov A.S. Rastekanie zhidkosti po gorizontal'noj poverhnosti [The liquid spreading by horizontal surface] // Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [The news of Volgograd state technical University]. –2012.– Vol.5. – № 1 (88). – P. 65 – 67. [in Russian]

3. Kohanenko V.N., Micik M.F., Alejnikova O.A. O planovoj zadache rastekanija burnogo potoka neszhimaemoj zhidkosti [About the planned task turbulent flow of incompressible fluid] // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo–Kavkazskij region. Serija: Tehnicheskie nauki [News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Series: Technical Sciences].– 2012. – № 6. – P. 82 – 88. [in Russian]

4. Piskunov N. S. Differencial'noe i integral'noe ischislenija dlja vtuzov, t. 2: Uchebnoe posobie dlja vtuzov [Differential and integral calculus for technical colleges, Vol. 2: Textbook for technical colleges]. – 13th iss. – M.: Nauka, Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoj literatury [M.: Science, General edition physical and mathematical literature], 1985. – 560 p. [in Russian]

5. Ponomareva M.A., Shrager G.R., Jakutenok V.A. Ispol'zovanie uravnenija Djupre - Junga dlja reshenija zadachi o rastekanii zhidkosti pri ogranichennom smachivanii [Usage of the equation of Dupre - Yung for the solution of tasks about spreading of the liquid at a limited wetting] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mehanika. [Bulletin of the Tomsk state University. Mathematics and mechanics]. – 2008. – № 1. – P. 90 – 96. [in Russian]

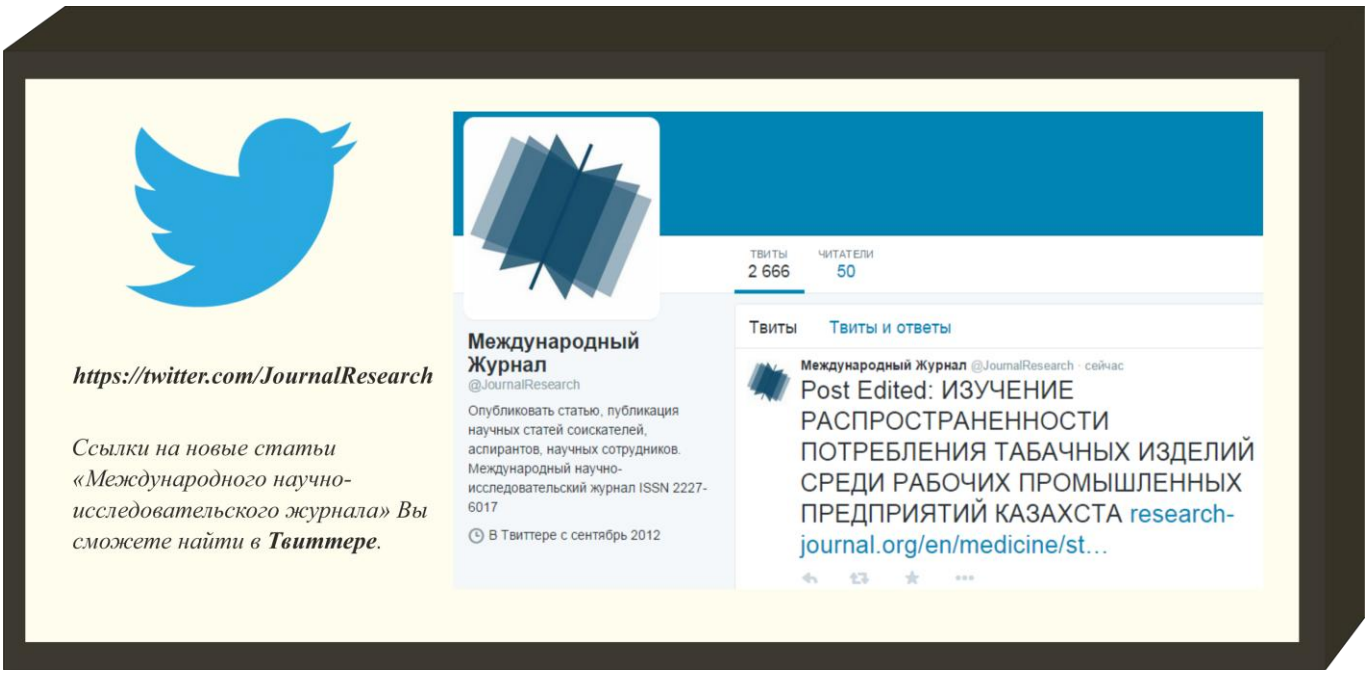
6. Svirkunov P.N. Neustanovivshiesja osesimmetrichnye dvizhenija v priblizhenii teorii melkoj vody [Unsteady axisymmetric motion in the approximation of shallow water theory] // PMM [Journal of Applied Mathematics and Mechanics]. – 1996. – V.60. – № 3. – P.520 – 522. [in Russian]

7. Tatosov A. V. Rastekanie zhidkosti vo vlazhnoj poristoj srede [Spreading the liquid in a wet porous medium] // Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, jenergetika [Herald of Tyumen state University. Physico-mathematical modeling. Oil, gas, energy], – 2012. – № 4. – P. 104 – 109. [in Russian]

8. Shagapov V.S., Gil’manov S.A. A contribution to the theory of spreading of liquid-containing ejections over a horizontal surface // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88. – № 3. – P. 630–644.

9. Shagapov V.S., Gils'manov S.A. Spreading of the liquid over the surface with penetration into the soil // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2010. – Vol. 51. – № 5. – P. 88–94.

10. Spannuth M. J., Neufeld J. A., Wettlaufer J. S., Grae Worster M. Axisymmetric viscous gravity currents flowing over a porous medium // J. Fluid Mech., – 2009. Vol. 622. – №1. –P. 135–144.



DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.154

Курбасова Г.С.
Кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН».

ОСОБЫЕ ТОЧКИ В ПРОЕКЦИЯХ НА ПЛОСКОСТЬ КООРДИНАТ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ

Аннотация

В настоящей работе обсуждается возможность и условия появления особенностей в проекциях на плоскость суточных координат Северного полюса Земли. Особые точки на графиках изменения положений мгновенного полюса Земли рассматриваются как геометрические формы проектирования на плоскость гладкого (квазипериодического) процесса движения мгновенного полюса по поверхности Земли при определённом соотношении между величинами внешних управляющих параметров и внутренних, определяющих вращение Земли вокруг оси. Появление особых точек – результат определённой физической перестройки в колеблющейся системе Земля и связанных с нею энергетическими обменными процессами геомагнитном поле и атмосфере.

Ключевые слова: геометрические формы, особенности, теория катастроф, полюс Земли, точки возврата.

Kurbasova G.S.
PhD in Physics and Mathematics,
Federal State Budgetary Institution of Science “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”

SPECIAL POINTS IN PROJECTIONS ON THE PLANE OF THE COORDINATE OF THE NORTHERN POLE OF THE EARTH

Abstract

In this paper, we discuss the possibility and conditions for the emergence of singularities in projections onto the plane of the daily coordinates of the Earth’s North Pole. Singular points on the graphs of the positions of the instantaneous pole of the Earth are considered as geometric shapes of projection on the plane of the smooth (quasiperiodic) process of motion of the instantaneous pole on the Earth’s surface with a certain ratio between the values of the external control parameters and the internal ones that determine the rotation of the Earth around its axis. The emergence of singular points is the result of a certain physical rearrangement in the oscillating system of the Earth and the geomagnetic field and atmosphere associated with it by the energy exchange processes.

Keywords: geometric shapes, features, catastrophe theory, the Earth's pole, point of return.

С древних времён наблюдения положения, размеров, формы и движения небесных тел способствовали развитию идеи постепенных изменений, которые могут быть описаны гладкими функциями. Возмущающее действие внешних сил вызывает изменения земных параметров в допустимых пределах с помощью механизмов обратных связей, что обеспечивает устойчивое функционирование всех систем нашей планеты даже в случае значительных изменений солнечной и космической обстановки. Многообразие и недостаточная физическая информация о возмущающих вращение Земли процессах создают условия, при которых точность современных наблюдений опережает точность аналитических моделей. Поэтому основная тенденция в изучении вращения Земли заключается в повышении точности математических моделей таким образом, чтобы их отклонения от наблюдений становились всё меньше и меньше. При этом наименее изученными до настоящего времени являются *нерегулярные* изменения длительности суток и *флуктуации* в изменении координат мгновенного полюса Земли. Возросшая за последние десятилетия точность наблюдений, методов обработки и анализа экспериментальных данных повысили информативность временных рядов координат полюса Земли. Это приблизило решение задачи происхождения и предсказуемости особенностей, обнаруживаемых на графиках изменения координат мгновенного полюса Земли. В предыдущих работах автора [1-5] впервые использовалась теория особенностей Уитни для объяснения появления особых точек на графиках проекций на плоскость координат Северного полюса Земли. Настоящая работа является продолжением этих исследований. Для анализа использовались данные о среднесуточных координатах Северного полюса Земли, предоставляемые Международной Службой Вращения Земли (International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS) [6].

В 1955 г. американский математик Хасслер Уитни опубликовал работу "Об отображениях плоскости на плоскость", заложившую основу новой математической теории - теории особенностей гладких отображений. Теория особенностей дифференцируемых отображений в настоящее время успешно применяется в современной математике для исследования функций на максимум и минимум, естествознании и технике (теории бифуркаций и катастроф) [7, С.8].

Уитни показал, что в общем случае (кроме некоторых исключений) при проектировании гладких поверхностей на плоскость встречаются особенности лишь двух видов: *складка* проектирования сферы на плоскость и *сборка* проектирования поверхности на плоскость. Эти особенности устойчивы. Все другие особенности разрушаются при малом шевелении тел или направлений проектирования. Более того, Уитни доказал, что всякая особенность гладкого отображения поверхности на плоскость после подходящего малого шевеления рассыпаются на складки и сборки. В местах, проектирования сборок, появляются точки возврата на плоскости (особые точки) [8, С.19, 20]. На рисунке 1 приведены графики суточных координат Северного полюса Земли X365, Y365 в трёхмерном приближении гладкой поверхностью и их проекция на плоскость.

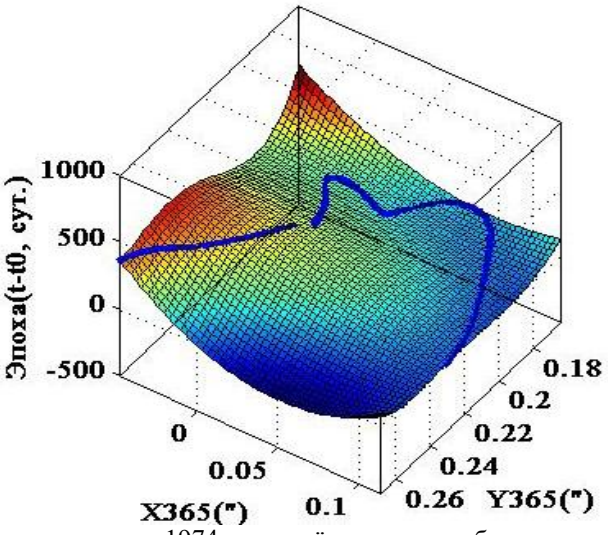


Рис. 1 – Суточные координаты полюса за 1974 год в трёхмерном приближении лежат на гладкой поверхности имеющей сборки

Полиномиальная модель этой поверхности порядка N=5 имеет вид:

$$f(x,y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3 + p_{22}x^2y^2 + p_{13}xy^3 + p_{04}y^4 + p_{23}x^2y^3 + p_{14}xy^4 + p_{05}y^5,$$

где коэффициенты p_{ij} вычислены с 95% доверительными границами.

Исходя из теории Уитни, точки возврата на графиках изменения положений мгновенного полюса Земли могут рассматриваться как геометрические формы проектирования на плоскость гладкого (квазипериодического) процесса движения мгновенного полюса по поверхности Земли при определённом соотношении между величинами внешних управляющих параметров и внутренних, определяющих вращение Земли вокруг оси. Положения мгновенного полюса Земли на гладкой поверхности $f(x,y,t)$ определяют координаты $x(t), y(t)$, причём, локальному равновесному состоянию соответствуют те участки траектории, на которых скорость изменения координат $\dot{x}(t) \cong 0,\ \dot{y}(t) \cong 0.$ В этом случае переход из локального равновесного состояния к регулярному колебательному движению при определённых условиях может происходить с появлением особенностей. В настоящей работе особенности, о которых идет речь в теории Уитни, связаны не с разрывами, а с обращением в нуль некоторых производных (локальное равновесие).

Особенности в проекции на плоскость XY среднесуточных величин координат X,Y Северного полюса Земли появляются в виде отклонений от регулярной траектории с точкой возврата.

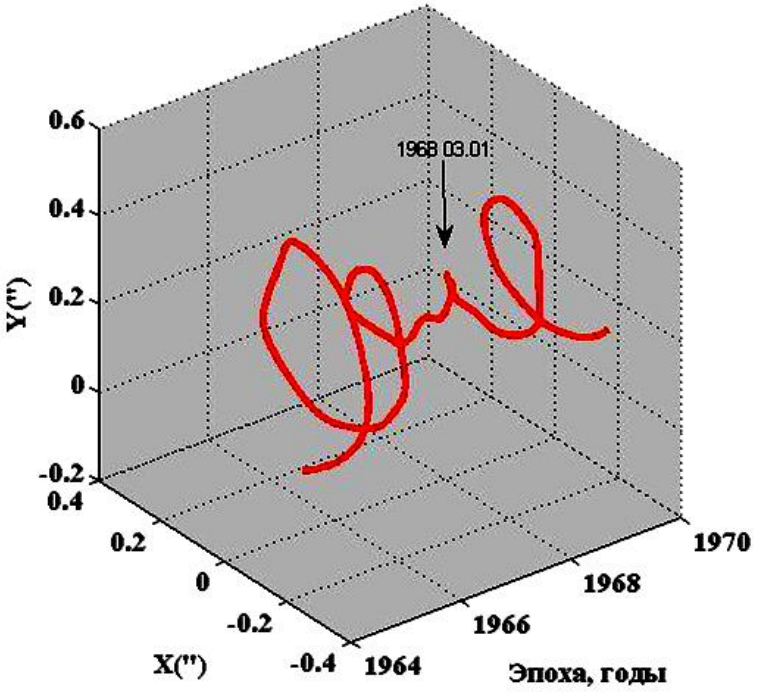


Рис.2 – Трёхмерное изображение смещения мгновенного полюса Земли за период 1965 01.01 – 1970 01.01. Приведена дата появления особой точки (точки возврата)

На графиках рисунков 1 и 2 наблюдаются точки возврата, которые остаются при изменении направления проекции (сборки Уитни). Эти особенности структурно устойчивы [9, С.227 – 230].

Как следствие структурной устойчивости в случае периодического вращения Земли должна наблюдаться повторяемость особенностей типа сборки с точками возврата. При этом никогда невозможно обеспечит *точную* повторяемость.

За последние пятьдесят лет (достаточно точные данные о координатах полюса до 1962 года отсутствуют) наблюдаются особые точки в проекциях на плоскость XY координат полюса Земли в 1968, 1974, 2006 годах. Повторяемость особенностей с точками возврата демонстрируют графики на рисунке 3.

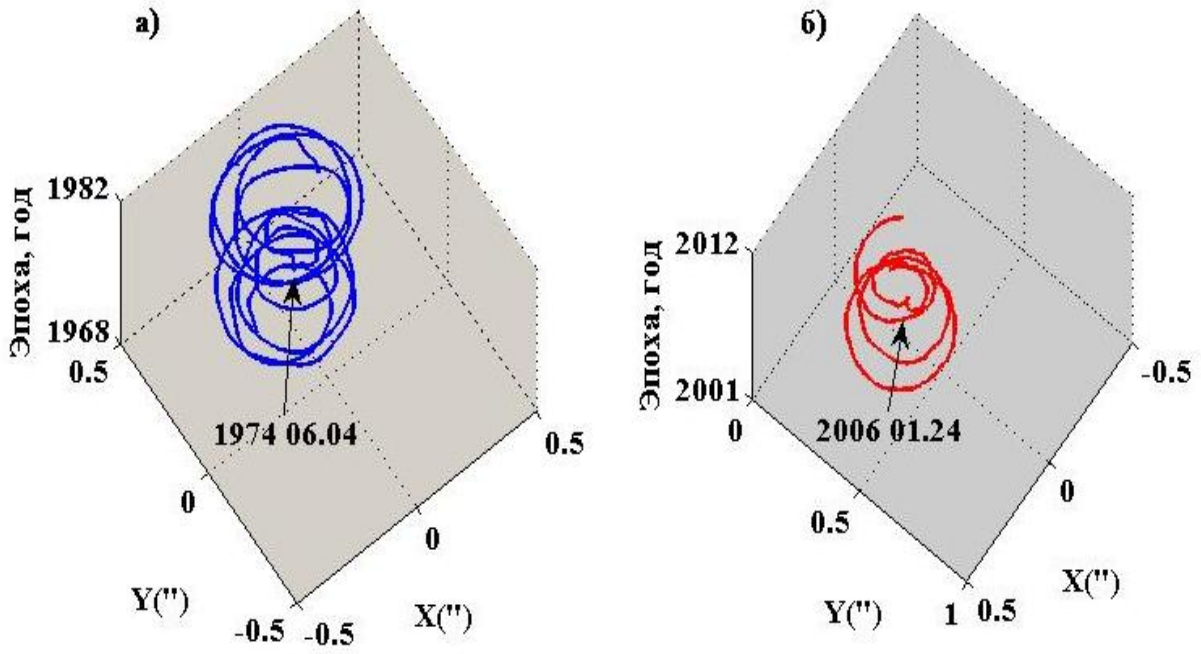


Рис. 3 – Трёхмерное изображение смещения Северного полюса Земли на интервалах: а) 1969 – 1980гг.; б) 2003 – 2008гг. Стрелками указаны особые точки (точки возврата) и моменты их появления

Временной интервал между появлениями точек возврата на рисунке 3 составляет ~32 года.

Точкам возврата на рисунках 1-3 предшествуют участки траектории, на которых скорость изменения координат равна 0 с точностью до погрешностей исходных данных.

Появление точек возврата – результат определённой физической перестройки внешних управляющих и внутренних параметров вращения Земли, что обнаруживается во всех оболочках связанных с Землёй энергетическими обменными процессами и, в первую очередь, в геомагнитном поле и атмосфере.

Физической характеристикой нашей планеты, отражающей сложные процессы во внутреннем и внешнем ядре, является геомагнитное поле. Особенности в изменениях координат Северного полюса Земли сопоставимы с обнаруженными скачками вековых вариаций геомагнитного поля.

Учёные предполагают, что вековые вариации геомагнитного поля, как и само поле, генерируются во внешнем ядре Земли. При этом задействованы различные механизмы в результате изменений в различных масштабах времени. Тем не менее, за последнее время отмечается одна из наиболее интересных особенностей - скачки в изменении вековых вариаций магнитного поля. В 1978 году впервые французскими учёными [10] обнаружен скачок в наблюдениях вековых вариаций геомагнитного склонения в 1969 году. На рисунке 3 показаны годовое изменение склонения магнитной обсерватории в Meanook, к северу от Эдмонтона [11].

Кроме того, на рисунке видны скачки открытые позже в 1978 и 1992 годах. Их связь с особыми точками на графиках координат Северного полюса Земли не очевидна. На приведенном графике выделяются участки локального равновесия перед скачками.

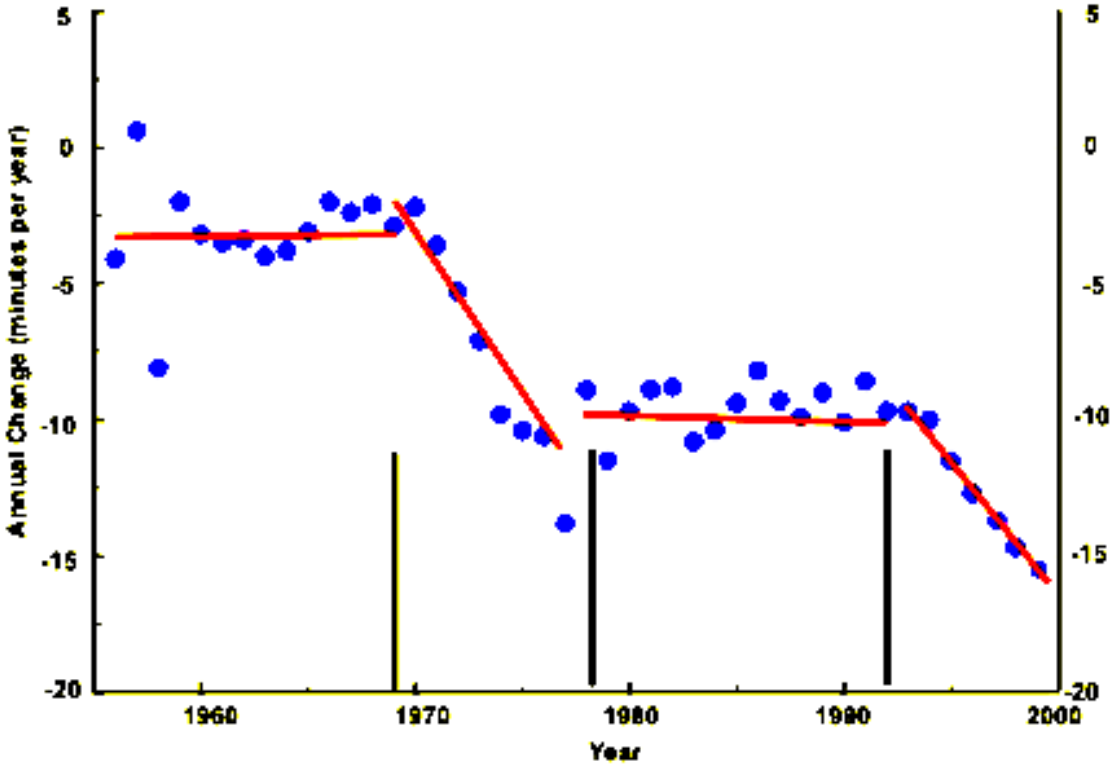


Рис. 4 – Годовые изменения склонений магнитной обсерватории в Meanook, к северу от Эдмонтона [11]

Вековые изменения внутреннего магнитного поля Земли обнаруживаются во временных масштабах порядка года. Скачок произошёл в 1969 году и, вероятно, в 1992 году. По мнению учёных [10] скачки обеспечивают ограничения на проводимость глубокой мантии, которая, по-видимому, довольно низкая и на движениях верхней части жидкого ядра, которые, вероятно, доминируют в западном дрейфе; скачки могут коррелировать с экстремумами в скорости вращения Земли и интерпретироваться в терминах электромагнитной связи между ядром и мантией.

В публикациях за последнее время показано, что появление скачков в данных о магнитном поле коррелирует с изменением параметров вращения Земли [12,13].

Энергетическая взаимосвязь атмосферной оболочки с вращением Земли – установленный факт. Она проявляется в периодических и экстремальных процессах.

На рисунке 4 демонстрируется график Z – компоненты углового момента атмосферы; приведена эпоха экстремального отклонения.

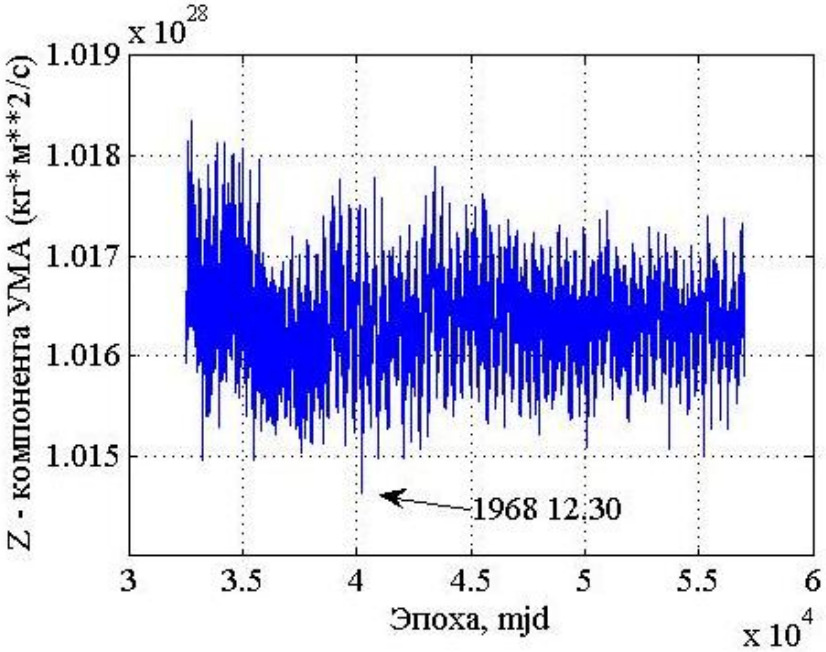


Рис.5 – График Z – компоненты (инвертированный барометр) углового момента атмосферы (УМА)

В Национальным центре экологического прогнозирования США (National Centers for Environmental Prediction - NCEP) получены данные о глобальном угловом моменте атмосферы (Atmospheric Angular Momentum - AAM) [14]. Интервалы между отсчётами равны 6 часам.

График на рисунке 5 демонстрирует частотно-временные изменения в данных о Z - компоненте углового момента атмосферы. Непрерывный частотно – временной вейвлет-анализ (см. рис. 5) показал, что амплитуда сезонного колебания углового момента атмосферы (Z – компоненты) за период с 1948 по 2014 годы максимально возрастает в конце 1968 года.

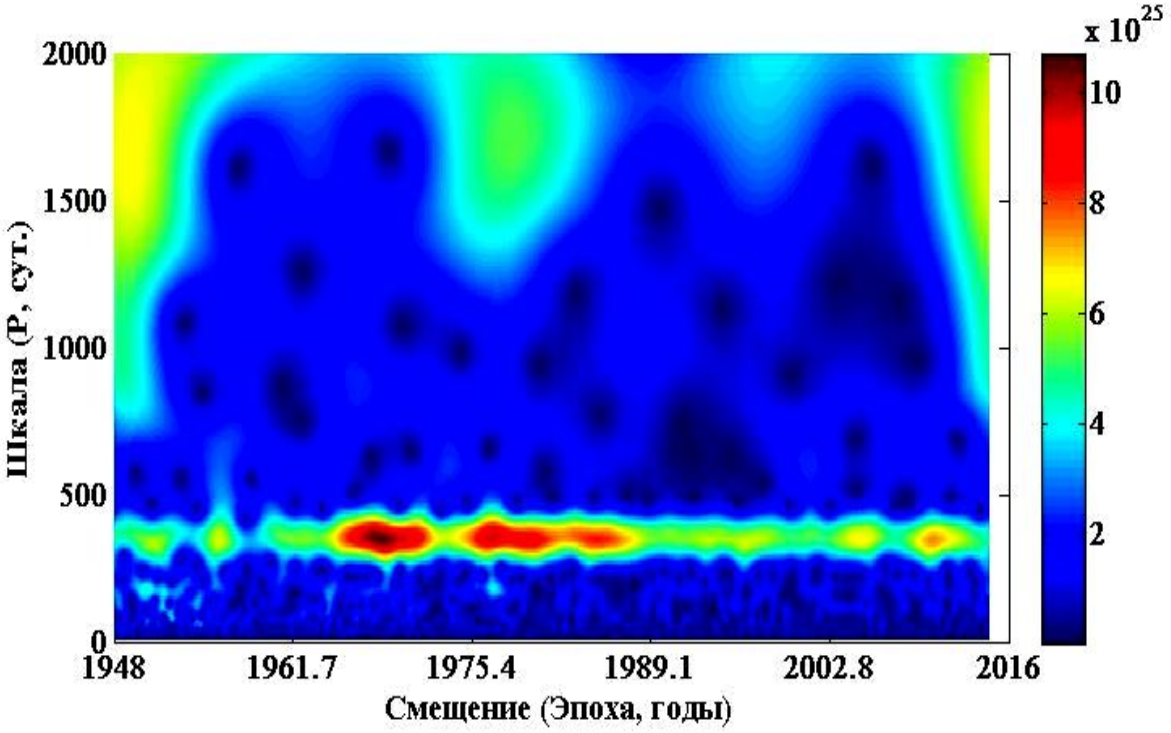


Рис. 6 – Непрерывный частотно-временной вейвлет-анализ данных о Z- компоненте углового момента атмосферы

ВЫВОДЫ

1. Движение полюса по поверхности Земли сопровождается появлением особенностей с точками возврата при отображении этого движения на плоскость.

2. Исходя из теории Уитни, показана возможность и условия возникновения подобных особенностей на графиках координат Северного полюса Земли.

3. Анализ характера особенностей, возникающих на графиках координат Северного полюса Земли в процессе её поступательно – вращательного движения, показал, что на рассматриваемом временном интервале особые точки появляются в результате проекции на плоскость гладкой функции изменения координат на поверхности Земли.

4. Согласно теории Уитни, рассмотренные в настоящей работе точки возврата возникли в результате особенности типа свёртки. Такие критические точки устойчивы и не исчезают при слабых, не нарушающих условия устойчивости процесса вращения Земли, возмущениях .

5. Следствием структурной устойчивости особенностей типа свёртки является их повторяемость при соответствующих параметрах периодического процесса изменения координат Северного полюса Земли. Так, временной интервал между появлением двух последних критических точек равен 32 годам.

6. Геометрическая картина появления критических точек связана с изменениями соотношений между внешними управляющими и внутренними параметрами вращения системы Земля. Эти изменения отражаются в сферах, связанных с Землёй обменными энергетическими процессами: наблюдаемые скачки в геомагнитном поле, экстремальные изменения углового момента атмосферы.

Список литературы / Refere

1. Курбасова Г.С. Особенности изменения координат полюса Земли / Г.С. Курбасова // Известия Крымской Астрофизической Обсерватории. – 2010. – Т. 106. – № 1. – С. 118–124.

2. Курбасова Г.С. Особенности движения Северного полюса и энергетическая активность Земли / Г.С. Курбасова // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Наука и современность». Выпуск 2. – 2012. – Киев. – С. 80 – 83.

3. Курбасова Г.С. Нетрадиционный анализ данных о координатах мгновенного полюса Земли / Г.С. Курбасова // Сборник научных трудов по материалам Международной научно - практической конференции «Научные исследования современности». Выпуск 4. – 2012. – Киев. – С.74 – 76.

4. Курбасова Г.С. Точки возврата на графиках полодий мгновенного полюса Земли / Г.С. Курбасова // Тезисы Всероссийской конференции «Пулково 2012». – 2012. – С.35.

5. Курбасова Г.С., Корсунь А.А., Рыбалова М.Н. О режиме движения полюса Земли по данным за период 1962 – 2007 / Г.С. Курбасова, А.А. Корсунь, М.Н. Рыбалова. // Известия Крымской Астрофизической Обсерватории. – 2009. – Т. 105. – № 1. – С. 202-211.

6. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), Earth Orientation Parameters, EOP (IERS) 08 C04. [Electronic resource] URL: https://datdcenter.iers.org./eop/ (accessed: 25.09.2017).

7. Арнольд В.И. Теория катастроф / В.И. Арнольд. – М.: «Наука», 1990. — 128с.

8. Арнольд В.И., Варченко А.Н., Гусейн-Заде С.М. Особенности дифференцируемых отображений / В.И. Арнольд, А.Н. Варченко, С.М. Гусейн-Заде – 3-е изд., стереотип. – 2009. – М.: МЦНМО. – 672с.

9. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и её приложения / Т. Постон , И. Стюарт . – Изд-во «Мир». – М. 1980. – 607с.

10. Courtillot V. and Le Mouël J.-L. Geomagnetic secular variation impulses / V. Courtillot and J.-L. Le Mouël // Nature. – 1984. – Vol**.** 311.– P. 709–716. Doi:10.1038/311709a0.

11. Natural Resources Canada: Secular variation (date modified: 2017-02-24). [Электронный ресурс] / URL: http://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/sec-en.php (дата обращения: 25.09.2017)

12. Vondrák J., Cyril R. Geophysical excitation of nutation – comparison of different models // acta geodyn. Geomater., vol. 11, no. 3 (175), xx1–xx8, 2014. Doi: 10.13168/agg.2014.0007.

13. Vondrak J., Ron C. Earth orientation and its excitations by atmosphere, oceans, and geomagnetic jerks // Serb. Astron. J. № 191 (2015), 59 – 66, DOI: 10.2V.

14. IERS, AAM from NCEP/NCAR Reanalyses. [Электронный ресурс] / URL:https://datacenter.iers.org./eop/–/somos/5Rgv/latestXL/188/aam.ncep.reanalysis.1948.longtame (дата обращения: 25.09.2017)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kurbasova G.S. Osobennosti izmenenija koordinat poljusa Zemli [Features of changing the coordinates of the Earth's pole] / G.S. Kurbasova // Izvestija Krymskoj Astrofizicheskoj Observatorii. [News of the Crimean Astrophysical Observatory]. – 2010. – V. 106. – № 1. – P. 118 – 124. [in Ukrainian]

2. Kurbasova G.S. Osobennosti dvizhenija Severnogo poljusa i jenergeticheskaja aktivnost' Zemli [Features of the motion of the North Pole and the energy activity of the Earth] / G.S. Kurbasova // Sbornik nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Nauka i sovremennost'». Vypusk 2. [Collection of proceedings on the materials of the International Scientific and Practical Conference "Science and Modernity" Issue 2]. – 2012. – P. 80 – 83. [in Ukrainian]

3. Kurbasova G.S. Netradicionnyj analiz dannyh o koordinatah mgnovennogo poljusa Zemli [Non-traditional analysis of data on the coordinates of the Earth's instantaneous pole] / G.S. Kurbasova // Sbornik nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoj nauchno – prakticheskoj konferencii «Nauchnye issledovanija sovremennosti». [Collection of proceedings on the materials of the International Scientific and Practical Conference "Scientific Research of the Present". Issue 4]. – 2012. – P. 74 – 76. [in Ukrainian]

4. Kurbasova G.S. Tochki vozvrata na grafikah polodij mgnovennogo poljusa Zemli [Points of return on the graphs of the poles of the instantaneous pole of the Earth] / G.S. Kurbasova // Tezisy Vserossijskoj konferencii «Pulkovo 2012». [Theses of the All-Russian Conference "Pulkovo 2012"]. – 2012. – P.35. [in Russian]

5. Kurbasova G.S., Korsun' A.A., Rybalova M.N. O rezhime dvizhenija poljusa Zemli po dannym za period 1962 – 2007 [On the mode of motion of the Earth's pole according to data for the period 1962 – 2007] / G.S. Kurbasova, A.A. Korsun', M.N. Rybalova. // Izvestija Krymskoj Astrofizicheskoj Observatorii. [News of the Crimean Astrophysical Observatory]. – 2009. – V. 105. — № 1. — P. 202-211. [in Ukrainian]

6. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), Earth Orientation Parameters, EOP (IERS) 08 C04. [Electronic resource] URL: https://datdcenter.iers.org./eop/ (accessed: 25.09.2017).

7. Arnol'd V.I. Teorija katastrof [Theory of catastrophes] / V.I. Arnol'd. –1990. – M.: «Nauka» – 128p. [in Russian]

8. Arnol'd V.I., Varchenko A.N., Gusejn-Zade S.M. Osobennosti differenciruemyh otobrazhenij [Singularities of differentiable mappings] / V.I. Arnol'd, A.N. Varchenko, S.M. Gusejn - Zade. – 2nd edition. – M.: MCNMO, – 2009. – 672p. [in Russian]

9. Poston T., Stjuart I. Teorija katastrof i ejo prilozhenija [Catastrophe theory and its applications] / T. Poston , I. Stjuart. – M.: “Mir”, – 1980. – 607p. [in Russian]

10. Courtillot V. and Le Mouël J.-L. Geomagnetic secular variation impulses / V. Courtillot and J.-L. Le Mouël // Nature. – 1984. – Vol**.** 311.– P. 709–716. Doi:10.1038/311709a0.

11. Natural Resources Canada: Secular variation (date modified: 2017-02-24). [Electronic resource] / URL: http://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/sec-en.php (accessed:: 25.09.2017)

12. Vondrák J., Cyril R. Geophysical excitation of nutation – comparison of different models // acta geodyn. Geomater., vol. 11, no. 3 (175), xx1–xx8, 2014. Doi: 10.13168/agg.2014.0007.

13. Vondrak J., Ron C. Earth orientation and its excitations by atmosphere, oceans, and geomagnetic jerks // Serb. Astron. J. № 191 (2015), 59 – 66, DOI: 10.2V.

14. IERS, AAM from NCEP/NCAR Reanalyses. [Electronic resource] / URL:https://datacenter.iers.org./eop/–/somos/5Rgv/latestXL/188/aam.ncep.reanalysis.1948.longtame (accessed:: 25.09.2017)

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.155

Мирошников А.Л.[1], Миллер Н.В.[2], Попова Н.И.[3], Швец Ю.В.[4]
[1]ORCID: 0000-0001-6057-0919, кандидат физико-математических наук,
[2]ORCID: 0000-0002-9351-6123, кандидат педагогических наук,
[3]ORCID: 0000-0002-2186-3556, кандидат педагогических наук,
[4]ORCID: 0000-0002-6742-070X, кандидат педагогических наук,
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ ИНТЕГРИРОВАНИЯ В МНОГОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

Аннотация

Работа посвящена установлению различных нетривиальных оценок функции концентрации. Интерес к этой функции связан с тем, что она является важнейшим инструментом для изучения свойств сверсток различных вероятностных распределений, которые появляются в многочисленных приложениях. В представленной статье обобщаются на многомерные пространства некоторые результаты, полученные для этой функции в одномерном случае. Так, в работе усиливается (см. теорему 2) известный результат Энгера из работы [1]. Кроме того, показывается, что оценка из теоремы 2 является неулучшаемой по размерности пространства. Доказательства основных результатов основаны на использовании метода характеристических функций. Основная трудность связана с оценками сложных многомерных интегралов.

Ключевые слова: многомерные пространства, функция концентрации, оценки функции концентрации, выпуклый функционал, интегрирование в многомерных пространствах.

Miroshnikov A.L.[1], Miller N.V.[2], Popova N.I.[3], Shvets Yu.V.[4]
[1]ORCID: 00010-0001-6057-0919, PhD in Physics and Mathematics, [2]ORCID: 0000-0002-9351-6123, PhD in Pedagogy,
[3]ORCID: 0000-0002-2186-3556, PhD in Pedagogy, [4]ORCID: 0000-0002-6742-070X, PhD in Pedagogy,
Siberian State Transport University, Novosibirsk

ON SOME ISSUES OF INTEGRATION IN MULTIDIMENSIONAL SPACES

Abstract

The paper is devoted to founding of various nontrivial estimates of the concentration function. The interest in this function is due to the fact that it is the most important tool for studying the properties of the convolutions of various probability distributions that appear in numerous applications. Some results obtained for this function in the one-dimensional case are generalized to multidimensional spaces in the presented paper. Thus, the well-known result of Enger from [1] is strengthened (see Theorem 2). In addition, it is shown that the estimate in Theorem 2 is unimprovable in the dimension of the space. The proofs of the main results are based on the use of the method of characteristic functions. The main difficulty is connected with the estimates of complex multidimensional integrals.

Keywords: multidimensional spaces, concentration function, estimates of the concentration function, convex functional, integration in multidimensional spaces.

Математическое моделирование реальных процессов и явлений является одним из самых эффективных методов исследования действительности, включающих в себя создание математической модели, нахождение и исследование решения модельной задачи, сравнение полученных решений с реальностью, корректировку модели по адекватности, использование уточненной модели для исследования целого класса реальных явлений.

Еще в первой половине XX века появилась знаменитая монография Леви [2, P.36], в которой была определена специальная характеристика вероятностного распределения – функция концентрации, которая стала важным инструментом изучения свойств сверток распределений. В дальнейшем, функция концентрации Леви исследовалась в работах А.Н. Колмогорова, Б.А. Рогозина, В.В. Сазонова, В.В. Петрова, А.Б. Мухина, А.А. Юдина, Н.Г. Ушакова, К. Эссеена, Х. Кестена, Я. Энгера и в наше время нашла применение в исследованиях А.Ю. Зайцева, Ф. Гётце, В.В. Ульянова и других отечественных и зарубежных математиков. Данной теме посвящена монография В. Хенгартнера и Р. Теодореску [3] и недавние работы отечественных ученых [10], [11], [12].

Функция концентрации Леви (или просто функция концентрации) суммы независимых случайных величин в одномерном случае исследована достаточно глубоко. Для нее получены неулучшаемые в общем случае оценки. Однако в случае многомерного пространства остались нерешенные вопросы. Так, еще не описан полностью класс множеств, для которых получаются неравенства с абсолютной постоянной, что необходимо для обобщения оценок на гильбертово пространство.

Формулировка основных результатов

Многомерная функция концентрации Леви $\psi\,(\xi, E)$, где ξ - случайный вектор, а E – выпуклое множество в R^d, определяется равенством:

$$\psi\,(\xi, E) = sup_{a\in R^d}\, P(\xi \in a + E),$$

где P – вероятность.

Пусть $x \in R^d$, $y \in R^d$, тогда $x = (x_1, \dots, x_d)$, $(x, y) = \sum_{i=1}^{d} x_1\, y_1$; $|x| = \sqrt{(x, x)}$. Обозначим

$$E = \{x \in R^d : max_{1\le i\le d}|(x, e_i)| \le 1\},$$

где $e_1, \dots, e_d$ – ортонормированный базис в R^d.

Отметим, что E является симметричным выпуклым множеством, а выпуклый функционал $p_E(x) = max_{1\le i\le d}|(x, e_i)|$ – функционалом Минковского для куба E.

Пусть $\xi_1, \dots, \xi_n$ – последовательность независимых случайных векторов в R^d ; $S_n = \sum_{k=1}^{n} \xi_k$.

Положим $\lambda \ge max_{1\le k\le n}\, \lambda_k$, $\lambda_k > 0$ и $a \wedge b = min\{a, b\}$.

Под вектором $\tilde{\xi}$ будем понимать вектор $\tilde{\xi} = \xi' - \xi''$, у которого ξ' и ξ'' независимы и одинаково распределены с ξ, и если P(·) – распределение случайного вектора ξ, то $\tilde{P}(\cdot)$ – распределение случайного вектора $\tilde{\xi}$.

В [1, С. 17] получены следующие неравенства:

$$\psi(S_n, \lambda B) \le C \cdot \lambda \left(\sum_{k=1}^{n} M\left(p_B(\tilde{\xi}_k) \wedge \lambda_k\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\psi(S_n, \lambda E) \le Cd \cdot \lambda \left(\sum_{k=1}^{n} M\left(p_E(\tilde{\xi}_k) \wedge \lambda_k\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

где E – d –мерный куб, M – математическое ожидание. Здесь и далее C – абсолютная постоянная.

Как следует из [1], зависимость от размерности в правой части (2) существенна. Действительно, если бы имели для d – мерного куба оценку вида (1), т.е. без размерности d в правой части, то пришли бы к противоречию. Для этого достаточно взять за $\tilde{\xi}_1, \dots, \tilde{\xi}_d$ (n = d) последовательность независимых случайных векторов в R^d, таких что

$$P(\xi_i = \pm e_i) = \frac{1}{2}, \ \ i = 1, \dots, d.$$

Тогда $\psi(S_d, E) = 1$, и

$$\sum_{k=1}^{n} M\left(p_E(\tilde{\xi}) \wedge 1\right)^2 = \frac{d}{2}.$$

Подставив данные равенства в (2) получим оценку $1 \le \frac{C}{\sqrt{d}}$, что заведомо приводит к противоречию при больших d.

Теорема1. Если $\xi_1, \dots, \xi_n$ независимые случайные векторы, то

$$\int_{\lambda E} P_n(dx) \le C\sqrt{d} \cdot \lambda \left(\sum_{k=1}^{n} M\left(p_E(\tilde{\xi}_k) \wedge \lambda_k\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}}$$

Теорема2. Если $\xi_1, \dots, \xi_n$ – независимые случайные векторы, то

$$\psi(S_n, \lambda E) \le C\sqrt{d} \cdot \lambda \, max_{1 \le k \le n} \ \psi(\xi_k, \lambda E) \left(\sum_{k=1}^{n} M\left(p_E(\tilde{\xi}_k) \wedge \lambda_k\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Заметим, что: из (3) следует (2); оценка (3) по d неулучшаема, что следует из приведенного выше примера; оценка (3) точнее оценки (2) в том смысле, что она дает более точное неравенство функции концентрации суммы, когда $max_{1 \le k \le n} \ \psi(\xi_k, \lambda E)$ мал.

2. Доказательство основных результатов.

Доказательство теоремы 1. Имеем:

$$\int_{\lambda E} P_n(dx) \le e \int_{\lambda E} e^{-\frac{1}{\lambda} \max_{1 \le i \le d} |(x,i)|} P_n^{(a)}(dx),$$

где $P_n(\cdot)$ - распределение S_n.

Заметим, что

$$|x| = \sqrt{\sum_{i=1}^{d} x_i^2} \le \sqrt{d} \max_{1 \le i \le d} |(x, l_i)|$$

и, следовательно,

$$P(S_n \in a + \lambda E) \le e \int_{R^d} exp\left\{-\frac{|x|}{\lambda\sqrt{d}}\right\} P_n(dx).$$

Но $\varphi(x) = exp\left\{-\frac{|x|}{\lambda\sqrt{d}}\right\}$ есть характеристическая функция некоторой вероятностной меры μ(·) [1], т.е. $\varphi(x) = \int_{R^d} \cos(t, x) \ \mu(dt)$.

Отсюда:

$$\int_{R^d} exp\left\{-\frac{|x|}{\lambda\sqrt{d}}\right\} P_n(dx) = \iint_{R^d R^d} \cos(t, x) \, P_n(dx) \, \mu(dt) \le \int_{R^d} \prod_{k=1}^{n} |f_k(t)| \, \mu(dt),$$

где $f_k(t)$ – характеристическая функция ξ_k. Итак, имеем:

$$\psi(S_n, \lambda E) \le e \int_{R^d} \prod_{k=1}^{n} |f_k(t)| \, \mu(dt), \quad (4)$$

где μ(·) - вероятностная мера с характеристической функцией $\varphi(x)$.

Интеграл, стоящий в правой части равенства (4), оценим по методу, изложенному в [1]. Вариацию этого метода можно найти у Зингеля [4].

Имеем

$$\psi(S_n,\lambda E)\le e\int_{R^d} exp\left\{-\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\int_{R^d}(1-\cos(t,x))\tilde{P}_k(dx)\right\}\mu(dt),$$

где $\tilde{P}_k(\cdot)$ - распределение вектора $\tilde{\xi}_k$.

Пусть

$$p_k>0,\qquad \sum_{k=1}^{n}p_k^{-1}=1,$$

тогда по неравенству Гельдера:

$$\psi(S_n,\lambda E)\le e\prod_{k=1}^{n}\left(\int_{R^d} exp\left\{-\frac{p_k}{2}\int_{R^d}(1-\cos(t,x))\tilde{P}_k(dx)\right\}\mu(dt)\right)^{p_k^{-1}}\le$$

$$\le e\sum_{k=1}^{n}p_k^{-1}\int_{R^d} exp\left\{-\frac{p_k}{2}\int_{R^d}(1-\cos(t,x))\tilde{P}_k(dx)\right\}\mu(dt).$$

Обозначим:

$$J_k=\int_{R^d} exp\left\{-\frac{p_k}{2}\int_{R^d}(1-\cos(t,x))\tilde{P}_k(dx)\right\}\mu(dt).$$

Выберем $p_k=\frac{A}{a_k}$, $A=\sum_{k=1}^{n}a_k$, где

$$a_k=M(p_E(\tilde{\xi}_k)\wedge\lambda_k)^2;\quad p_E(x)=\max_{1\le i\le d}|(x,e_i)|;\quad g_k(x)=(p_E(x)\wedge\lambda_k)^2;$$

$$\lambda_k\le\lambda;\quad \psi_k(dx)=\frac{g_k(x)\tilde{P}_k(x)}{a_k}.$$

Тогда:

$$J_k=\int_{R^d} exp\left\{-\frac{A}{2}\int_{R^d}g_k^{-1}(x)(1-\cos(t,x))Q_k(dx)\right\}\mu(dt).$$

По неравенству Иенсена:

$$J_k\le\iint_{R^dR^d} exp\left\{-\frac{A}{2}g_k^{-1}(x)(1-\cos(t,x))\right\}\mu(dt)Q_k(dx).$$

Рассмотрим интеграл

$$J=\int_{R^d} exp\left\{-\frac{A}{2}\,g_k^{-1}(x)(1-\cos(t,x))\right\}\mu(dt)=$$

$$=Mexp\left\{-\frac{A}{2}g_k^{-1}(x)(1-\cos(\eta,x))\right\},$$

где вектор η имеет характеристическую функцию $\varphi(x)$. Найдем характеристическую функцию случайной величины (η,x).

Возьмем $y\in R^1$ и рассмотрим

$$Mexp\{iy(\eta,x)\}=Mexp\{i(\eta,yx)\}=exp\left\{iy\left(-|y|\cdot\frac{|x|}{\lambda\sqrt{d}}\right)\right\}.$$

Отсюда величина (η,x) имеет распределение Коши с плотностью

$$K(y)=\frac{\lambda\sqrt{d}}{\pi|x|}\cdot\frac{1}{1+\left(\frac{y\lambda\sqrt{d}}{|x|}\right)^2}.$$

Тогда

$$J=\int_{R^1} exp\left\{-\frac{A}{2}\,g_k^{-1}(x)(1-\cos y)\right\}K(y)dy\le$$

$$\le\frac{4}{\pi}\int_{-\frac{|x|}{\lambda\sqrt{d}}}^{\frac{|x|}{\lambda\sqrt{d}}} exp\left\{-\frac{A}{2}\,g_k^{-1}(x)(1-\cos y)\right\}\frac{\lambda\sqrt{d}}{|x|}dy.$$

Неравенство следует из свойств распределения Коши. Далее имеем:

$$J\le\frac{4}{\pi}\frac{\lambda}{\lambda_k}\sqrt{d}\cdot\int_{-\frac{|x|}{\lambda_k\sqrt{d}}}^{\frac{|x|}{\lambda_k\sqrt{d}}} exp\left\{-\frac{A}{2}\,g_k^{-1}(x)(1-\cos y)\right\}\frac{\lambda_k}{|x|}dy.$$

Очевидно, $|x|\le\sqrt{d}p_E(x)$ и $|x|\ge\max_{1\le i\le d}|(x,e_i)|=p_E(x)$.

Следовательно,

$$J \le \frac{4}{\pi}\frac{\lambda}{\lambda_k}\sqrt{d}\cdot \int\limits_{-\frac{p_E(x)}{\lambda_k}}^{\frac{p_E(x)}{\lambda_k}} exp\left\{-\frac{A}{2}\, g_k^{-1}(x)(1-\cos y)\right\}\frac{\lambda_k}{p_E(x)}dy.$$

Тогда, получим:

$$J \le \begin{cases} C\sqrt{d}\,\dfrac{\lambda}{p_E(x)}\cdot g_k^{\frac{1}{2}}(x)\cdot\dfrac{1}{\sqrt{A}}\ , \text{если } p_E(x)\le\lambda_k \\ C\sqrt{d}\cdot g_k^{\frac{1}{2}}(x)\,\dfrac{\lambda}{\lambda_k}\cdot\dfrac{1}{\sqrt{A}}\ \ , \text{ если } p_E(x)>\lambda_k \end{cases}$$

Таким образом,

$$J_k \le\ C\sqrt{d}\cdot\frac{1}{a_k\sqrt{A}}\ \cdot\ (\int\limits_{p_E(x)\le\lambda_k}\frac{\lambda}{p_E(x)}\cdot g_k^{\frac{3}{2}}(x)\cdot\tilde{P}_k(dx) \qquad + \int\limits_{p_E(x)>\lambda_k} g_k^{\frac{3}{2}}(x)\cdot\frac{\lambda}{\lambda_k}\cdot\tilde{P}_k(dx)\ ) \le$$

$$\le C\sqrt{d}\cdot\frac{1}{a_k\sqrt{A}}\left(\int\limits_{p_E(x)\le\lambda_k}\lambda\cdot p_E^2(x)\cdot\tilde{P}_k(dx)+\int\limits_{p_E(x)>\lambda_k}\lambda\cdot\lambda_k^2\cdot\tilde{P}_k(dx)\right) == C\sqrt{d}\cdot\lambda\cdot\frac{1}{a_k\sqrt{A}}a_k = C\sqrt{d}\cdot\lambda\cdot\frac{1}{A}.$$

Отсюда

$$\psi(S_n,\lambda E)\le e\sum_{k=1}^{n}p_k^{-1}\cdot J_k \le C\sqrt{d}\cdot\lambda\cdot A^{-\frac{1}{2}} =\ C\sqrt{d}\cdot\lambda\cdot(\sum_{k=1}^{n}M(p_E(\tilde{\xi}_k)\wedge\lambda_k)^2)^{-\frac{1}{2}}$$

Теорема 1 доказана.

Доказательство теоремы 2.

Если $\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)\le\frac{1}{2}$, то (3) следует из теоремы 1, а если $n\le 3$, то (3) тривиально. Допустим $n\ge 4$ и $\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)>\frac{1}{2}$.

Возьмем некоторое $m_1\ge 2$ такое что:

$$P(\xi_n\in b_1+m_1\lambda E)\ge\frac{1}{2},\ \ b_1\in R^d,\quad \text{но}$$

$$\psi(\xi_n,(m_1-1)\lambda E)\le\frac{1}{2}.$$

Без ограничения общности будем считать, что

$$\psi(\xi_n,(m_1-1)\lambda E)\ge\psi\big(\xi_j,(m_1-1)\lambda E\big)\ \text{ для } j=1,2,\dots,n-1.$$

Обозначим за D_1 событие $\{\xi_n\in b_1+m_1\lambda E\}$, $\overline{D}_1$ – дополнение к D_1;

$$P(\,\overline{D}_1)\le\frac{1}{2}\,,\qquad B_1=b_1+m_1\lambda E\,.$$

Возьмем произвольное $a\in R^d$, тогда:

$$P(S_n\in a+\lambda E)=\int\limits_{R^d}P(\xi_n\in a-x+\lambda E)P(S_{n-1}\in dx)\le$$

$$\le\int\limits_{R^d}P\left(\{\xi_n\in a-x+\lambda E\}\bigcap D\right)P(S_{n-1}\in dx)\ +$$

$$+\frac{1}{2}\int\limits_{R^d}P(\{\xi_n\in a-x+\lambda E\}/\overline{D})P(S_{n-1}\in dx)\,.$$

Заметим, что $P(\{\xi_n\in a-x+\lambda E\}\bigcap D)=0$, если

$$x\notin a+\lambda E-B_1\ (\gamma\in A-B\ \Leftrightarrow\ \gamma=\alpha-\beta\colon\alpha\in A,\beta\in B).$$

Следовательно,

$$P(S_n\in a+\lambda E)\le\int\limits_{\alpha+\lambda E-B_1}P(\xi_n\in a-x+\lambda E)P(S_{n-1}\in dx)+$$

$$+\frac{1}{2}\int\limits_{R^d}P(S_{n-1}\in a-x+\lambda E)\,P(\xi_n\in dx/D_1).$$

Таким образом:

$$\psi(S_n,\lambda E)\le\psi(\xi_n,\lambda E)\psi(S_{n-1},\lambda E-m_1\lambda E)+\frac{1}{2}\psi(S_{n-1},\lambda E).$$

Но $\lambda E-m_1\lambda E\subset(1+m_1)\lambda E$, и мы получаем неравенство:

$\psi(S_n,\lambda E)\le\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)\,\psi(S_{n-1},(1+m_1)\lambda E)+\frac{1}{2}\psi(S_{n-1},\lambda E)$.

Согласно теореме 1:

$$\psi(S_{n-1},(1+m_1)\lambda E) \le C\sqrt{d}\cdot\frac{\lambda(1+m_1)}{\lambda(m_1-1)}\left(\sum_{k=1}^{n-1}\left(1-\psi(\xi_k,(m_1-1)\lambda E\,)\right)\right)^{-\frac{1}{2}} \le$$

$$\le C\sqrt{d}\cdot\frac{1}{\sqrt{n-1}}\frac{1}{\sqrt{1-\psi(\xi_n,(m_1-1)\lambda E\,)}} \le C\frac{\sqrt{d}}{\sqrt{n}}.$$

Окончательно имеем:

$$\psi(S_n,\lambda E) \le C\frac{\sqrt{d}}{\sqrt{n}}\cdot\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)+\frac{1}{2}\psi(S_{n-1},\lambda E).$$

Далее, существует $m_2 \ge 2$, такое что:

$$P(\xi_{n-1}\in b_2+m_2\lambda E) \ge \frac{1}{2},\quad b_2\in R^d,\quad \text{но}$$

$$\psi(\xi_{n-1},(m_2-1)\lambda E) \le \frac{1}{2}.$$

И можно считать, что ξ_{n-1} такой вектор, что:
$\psi(\xi_{n-1},(m_2-1)\lambda E) \ge \psi\big(\xi_j,(m_2-1)\lambda E\big)$ для $j=1,2,\dots,n-2$.
Обозначим за D_2 событие $\{\xi_{n-1}\in b_2+m_2\lambda E\}$.
Применяя описанный выше метод для оценки $\psi(S_n,\lambda E)$, получим:

$$\psi(S_{n-1},\lambda E) \le C\frac{\sqrt{d}}{\sqrt{n-1}}\cdot\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)+\frac{1}{2}\psi(S_{n-2},\lambda E).$$

Теперь оцениваем $\psi(S_{n-2},\lambda E)$ и так далее. Через $\left[\frac{n}{2}\right]$ шага мы приходим к неравенству

$$\psi(S_n,\lambda E) \le \frac{1}{2^{\left[\frac{n}{2}\right]}}\psi\left(S_{\left[\frac{n}{2}\right]},\lambda E\right)+C\sqrt{d}\cdot\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)\cdot\sum_{k=0}^{\left[\frac{n}{2}\right]-1}\frac{1}{2^k\sqrt{n-k}}.$$

Заметим, что:

$$\sum_{k=0}^{\left[\frac{n}{2}\right]-1}\frac{1}{2^k}\cdot\frac{1}{\sqrt{n-k}} \le \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{2^k} \le C\frac{1}{\sqrt{n}},$$

$$\psi\left(S_{\left[\frac{n}{2}\right]},\lambda E\right) \le \max_{1\le k\le\left[\frac{n}{2}\right]}\psi(\xi_k,\lambda E) \le \max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E).$$

Отсюда $\psi(S_n,\lambda E) \le C\frac{\sqrt{d}}{\sqrt{n}}\cdot\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)+C\cdot\frac{\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)}{\sqrt{n}}$.
Следовательно,

$$\psi(S_n,\lambda E) \le C\sqrt{d}\cdot\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)\cdot\frac{1}{\sqrt{n}} \le\le C\sqrt{d}\cdot\max_{1\le k\le n}\psi(\xi_k,\lambda E)\cdot\left(\sum_{k=1}^{n}M\left(p_E\left(\tilde{\xi}_k\right)\wedge\lambda_k\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Теорема 2 доказана.

Список литературы / References

1. Enger J. Bounds for the concentration function of a sum of independent random vectors with values in a Euclidean or Hilbert space / J. Enger. – Uppsala: Thesis Uppsala University, 1975. - 68 p.
2. Levy P. Theorie de I´addition des variables aletorires / P. Levy. - Paris: Gauthier – Villar, 1937. - 228 p.
3. Хенгартер В., Теодореску Р. Функции концентрации / В. Хенгартер, Р. Теодореску. - М.: Наука, 1980. - 176 с.
4. Зигель Г. Верхние оценки для функции концентрации в гильбертовом пространстве / Г. Зигель // Теория вероятностей и ее применение. Т. 26. – 1981. - С. 335-34.
5. Гётце Ф., Зайцев А. Ю. Оценки точности сильной аппроксимации в гильбертовом пространстве / Ф. Гётце, А. Ю. Зайцев // Сиб. матем. Журнал. – 2011. - №52:4. - С. 796-808.
6. Мирошников А. Л., Рогозин Б.А. Неравенства для функции концентрации / А. Л. Мирошников, Б. А. Рогозин // Теория вероятностей и ее применение. Т. 25, в.1. – 1980. - С. 178-183.
7. Ананевский С.М., Мирошников А.Л. Локальные оценки функции концентрации Леви в многомерном гильбертовском пространстве / С. М. Ананевский, А. Л. Мирошников // Записки научных семинаров ЛОМИ. Т. 130 – 1983. - С. 6-11.
8. Мирошников А.Л. Локальная оценка многомерной функции концентрации Леви для куба / А. Л. Мирошников // IV Международная Вильнюсская конференция по теории вероятностей и математической статистике. Тезисы докладов. Т. II / Ин-т математики и кибернетики АН Лит. ССР. – Вильнюс. 1985. – С. 192.
9. Tao T., Van. V. From the Littlewood–Offord problem to the circular law: universality of the spectral distribution of random matrices / T. Tao, V. Van // Bull. Amer. Math. Soc. - 2009. - Vol. 46 (3). - P. 377–396
10. Елисеева Ю. С., Зайцев А. Ю. Оценки функций концентрации взвешенных сумм независимых одинаково распределенных случайных величин / Ю. С. Елисеева, А. Ю. Зайцев // Теория вероятностей и ее применение. Т. 57. – 2012. - С. 768–777.
11. Елисеева Ю. С. Многомерные оценки функций концентрации взвешенных сумм независимых одинаково распределенных случайных величин / Ю. С. Елисеева // Зап. науч. семинар / ПОМИ. - 2013. - С. 127–137.

12. Vershynin R. Invertibility of symmetric random matrices / R. Vershynin // Random Structures and Algorithms. - 2014. - Vol. 44. - P. 135–182

Список литературы на английском языке / References in English

1. Enger J. Bounds for the concentration function of Euclidean or Hilbert space / J. Enger. - Uppsala: Thesis Uppsala University, 1975. - 68 p.

2. Levy P. Theorie de Iaddition des variables aletorires / P. Levy. - Paris: Gauthier - Villar, 1937. - 228 p.

3. Hengarter V., Teodorescu R. Funktsii kontsentratsii [Concentration Functions] / V. Hengarter, R. Theodorescu. - Moscow: Nauka, 1980. - 176 p. [in Russian]

4. Siegel, G., Verkhniye otsenki dlia funktsi kontsentratsii v gilbertovom prostranstve [Upper Bounds for Concentration Function in Hilbert Space] // Probability theory and its application. Vol. 26. - 1981. - P. 335-34. [in Russian]

5. Götze F., Zaitsev A. Yu. Otsenki tochnosti silnoy approksimatsii v gilbertovom prostranstve [Accuracy Estimates of Strong Approximation in Hilbert Space] / F. Götze, A. Yu. Zaitsev // Sibirsk. Math. Journal. - 2011. - No. 52: 4. - P. 796-808. [in Russian]

6. Miroshnikov A.L., Rogozin B.A. Neravenstva dlia funktsii kontsentratsii [Inequalities for Concentration Function] / A.L. Miroshnikov, B.A. Rogozin // Theory of Probability and its Application. Vol. 25, p.1. - 1980. - P. 178-183. [in Russian]

7. Ananevsky S.M., Miroshnikov A.L. Lokalniye otsenki funktsii kontsentratsii Levi v mnogomernom gilbertovom prostranstve [Local Estimates of Levi Concentration Function in Multidimensional Hilbert Space] / S.M. Ananevskii, A.L. Miroshnikov // Zapiski sovetnikov Seminam LOMI. Vol. 130 - 1983. - P. 6-11. [in Russian]

8. Miroshnikov A.L. Lokalnaya otsenka mnogomernoy funktsii kontsentratsii Levi dlia kuba [Local Estimate of Multidimensional Levi Concentration Function for Cube] / A.L. Miroshnikov // IV International Vilnius Conference on Probability Theory and Mathematical Statistics. Theses of reports. T. II / Institute of Mathematics and Cybernetics of the Academy of Sciences of Lithuania. SSR. - Vilnius. 1985. - P. 192. [in Russian]

9. Tao T., Van. V. From the Littlewood-O ff ord problem to the circular law: universality of the spectral distribution of random matrices / T. Tao, V. Van // Bull. Amer. Math. Soc. - 2009. - Vol. 46 (3). - P. 377-396.

10. Eliseeva Yu. S., Zaitsev A. Yu. Otsenki funktsiy kontsentratsii vzveshennikh summ nezavisimykh odinakovo raspredelennykh sluchaynikh velechin [Estimates of Concentration Functions of Weighted Sums of Independent Identically Distributed Random Variables] Yu. S. Eliseeva, A. Yu. Zaitsev // Theory of Probability and its Application. Vol. 57. - 2012. - P. 768-777. [in Russian]

11. Yu. S. Eliseeva, Mnogomerniye otsenki funktsiy kontsentratsii vzveshennykh summ nezavisimykh odinakovo raspredelennykh sluchaynikh velichin [Multidimensional estimates for the concentration functions of weighted sums of independent identically distributed random variables] Yu. S. Eliseeva, Zap. sci. seminar / SEM. - 2013. - P. 127-137. [in Russian]

12. Vershynin R. Invertibility of symmetric random matrices / R. Vershynin // Random Structures and Algorithms. 2014. Vol. 44.-P. 135-182.

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
Science Index

*Мы настоятельно рекомендуем всем нашим авторам зарегистрироваться в системе **Science Index РИНЦ.***

Таким образом, авторы могут более детально контролировать список своих публикаций, не только в нашем журнале, но и во всех научных изданиях, входящих в РИНЦ. Регистрация в системе также позволит узнать индекс научного цитирования автора и его публикаций.

*Подробную инструкцию по регистрации в системе Science Index РИНЦ Вы можете найти на нашем сайте **http://research-journal.org/** в разделе «Полезно знать».*

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Абдуллаев С.С.[1], Токтамысова А.Б.[2], Бакыт Г.Б.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-1825-0097, Доктор технических наук,
[2]ORCID: 0000-0002-1825-0023, Кандидат технических наук,
[3]ORCID: 0000-0002-1825-0097, Старший преподаватель,
Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева в г. Алматы

ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ МАНЕВРОВЫХ ТЕПЛОВОЗОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Аннотация

Работа посвящена решению вопросов, связанных с определением в зависимости от условий эксплуатации маневровых локомотивов на разных станциях и выбора их основных технических параметров, требующие сложные технико-технологические и аналитические исследования. Статья посвящена проблеме увеличения эксплуатационного расхода топлива маневровых тепловозов в холодное время года. Рассматриваются возможные пути решения данной проблемы путем применения дизелей с сухим картером. Приведена методика оценки теплового состояния дизеля и расчета расхода топлива котла подогрева.

Ключевые слова: дизель-генераторная установка (ДГУ), топливно-энергетические ресурсы (ТЭР), удельный эффективный расход топлива, коэффициент загрузки ДГУ, вредные вещества.

Abdullayev S.S.[1], A.B. Toktamysova[2], Bakyt G.B.[3]
[1]ORCID: 0000-0001-6746-4887, MD, Professor,
[2]ORCID: 0000-0001-6746-4887, MD, Professor
[3]ORCID: 0000-0002-3135-2370, MD, Senior teacher
Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev, Almaty, Kazakhstan
Karaganda State technical university, Karaganda, Kazakhstan

INCREASING OF DIESEL EFFICIENCY OF SHUNTING DIESEL LOCOMOTIVES, OPERATING ON RAILWAYS OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Abstract

The works devoted to the solution of the questions connected with justification of the choice of the power station and the key technical parameters of shunting locomotives depending on service conditions demands carrying out complex technical and technological and analytical researches. The article is devoted to the problem of increasing fleet operation of diesel of shunting locomotives in cold time. Possible ways of solving that problem by means of diesel appliance with dry carter are considered. The methods of diesel condition estimation and calculation of diesel consumption of boiler heating are given.

Keywords: diesel generator set (DGS), fuel-energy resources (FER), operational specific fuel consumption, DGS loading factor, deleterious substance.

Introduction

The important part of railway transportation process is shunting work. It raises together with transportation, increasing of network extent and number of stations, making technical and commercial operations. Shunting work is carried out entirely with diesel locomotives. The main operator, providing with locomotive traction transportation process of Kazakhstan railways, is joint stock company «Locomotive», with annual diesel consumption 700÷800 thousand tons. If taking into account, that 40÷50% of all operating costs of Kazakhstan railways is cost for diesel consumption and locomotive electrical energy, it means that economy of diesel resources is important reserve of energy effectiveness increasing. The main part of shunting locomotive is diesel locomotive of series TEM2, ChME3 and CKD6e (fig. 1). Main technical data of shunting locomotives is given in the table 1.

Diesel locomotive TEM2 Diesel locomotive ChME3 Diesel locomotive CKD6e

Fig. 1 – Shunting diesel locomotives, operating on Kazakhstan Railways

Table 1 – Main technical data of shunting diesel locomotives

№	Technical parameters	Series of locomotives		
		TEM2	ChME3	CKD6e
1	Capacity concerning diesel N_e, kW	882	992	995
2	Axle formula	3o-3o	3o-3o	3o-3o
3	Adhesive weight P_{adh}, kN	1176	1205	1226
4	Maximum traction power, F_{max}, kN	196	200,8	225
5	Constructive speed V_{max}, km/h	100	95	80
6	Specific effective fuel consumption g_e, g/kW·h	224	220	220
7	Calculating speed V_{Cal}, km/h	11	11,4	9
8	Coefficient of beneficial use of diesel, η	0,7	0,72	0,74
9	Tangent capacity N_T, kW	616,6	726,3	714,4
10	Traction power of continuous regime F_{cr}, kN	200	225,6	274

General quantity of diesel fuel, spent by locomotives is calculated basing on diesel consumption according to types of performing works

$$E_d = \sum_{i=1}^{n} G_i \tag{1}$$

here: G_i – diesel consumption by shunting locomotives according to types work (freight, passenger, shunting and household works), kg.

Generally accepted criteria of effective usage of diesel locomotives is specific diesel consumption for measurer 10 000 t. km. total (brutto)

$$e_d = \frac{E_d}{A} \cdot 10^4, \ \frac{\text{kg}}{10^4 t \cdot km \cdot brutto} \tag{2}$$

here: A – annual volume of performed types of works by diesel locomotives according to types of works, mln. t. км. Brutto (total);

Scope of work by diesel locomotives JSC «Locomotive» in 2015 is 208 264,6 mln. t. km. brutto (total) (pic 2), for performing of which is consumed 727 117 ton of diesel with average specific diesel consumption 34,9 $\frac{\text{kg}}{10^4 t \cdot km \cdot brutto}$ (fig. 2).

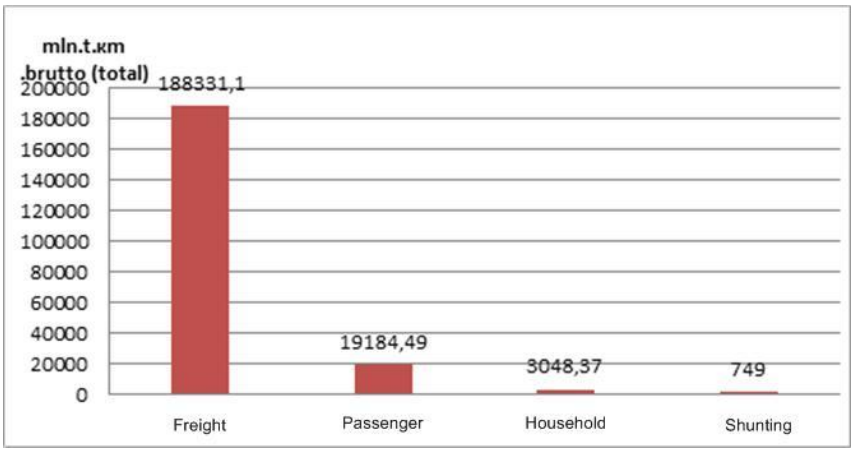


Fig. 2 – Annual work, performed by diesel locomotives according to types of movements

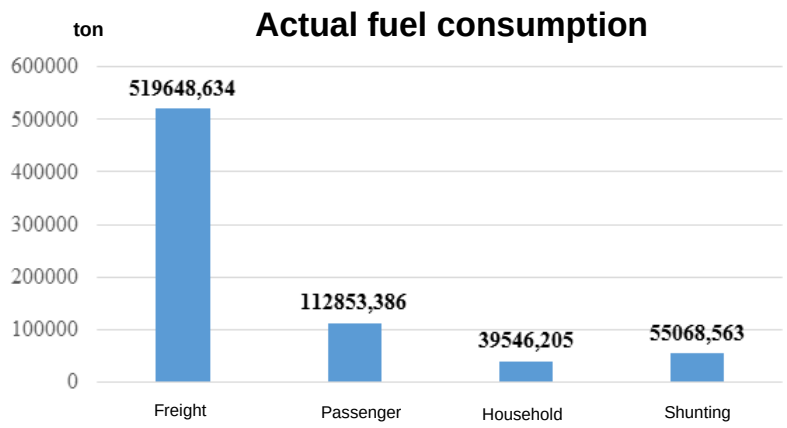


Fig. 3 – Actual fuel consumption by diesel locomotives according to types of movement

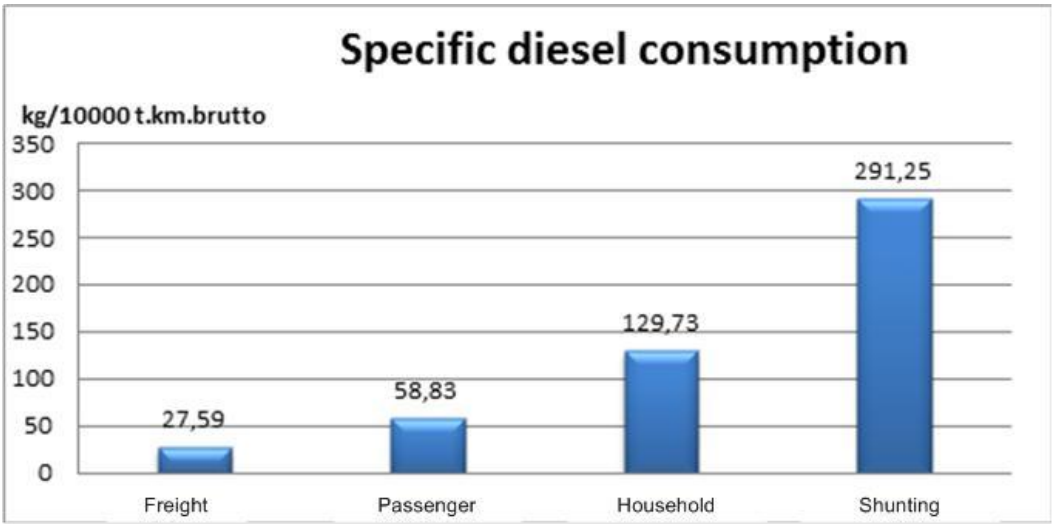


Fig. 4 – Specific diesel consumption by diesel locomotives according to types of movements

Effectiveness of diesel locomotive capacity usage is defined by usage coefficient Diesel Generator Set – K.

$$K = \frac{N_{\text{int.r.}}}{N_{nom}}, \quad (3)$$

$N_{int.r.}$ - capacity on intermediate regime, кW;
$N_{nom.}$ - nominal capacity, кW

Actual problems

Loads of diesel generator set of shunting locomotives on different types of work which have following average meanings:
- in freight K = 0,7 ÷ 0,9;
- in passenger K = 0,5 ÷ 0,7;
- in household K = 0,3 ÷ 0,4;
- in shunting K = 0,2÷0,3.

The data points out at non-economical regimes of work of diesel locomotives, especially at shunting-household activity.

Characteristic peculiarity of shunting diesel locomotives operation is non-load running and small loads which are 60÷75 % of general duration of its work, nominal regime diesel generator set is 1,5 % of diesel locomotive total time [1, 2].

Such distribution in some other types of work [3-5]. It is defined by conditions of train and shunting work conditions, and also by temporary (season) factors. Diesel consumption on regimes of non-load running of diesel which is 30÷50 % of total diesel consumption in operation [1]. As a result specific diesel consumption of shunting locomotives is exceeding meanings of specific consumption of main line diesel locomotives in freight work in the amount of 10,6 times (fig. 4).

Exceeding diesel consumption is not the only negative consequence of traction work on small load regimes and in a no-load running. In parallel there is intensive carbon accumulation in turbo compressor, that leads to rotor disbalance, reducing of productivity and air pressure and as a sequence, to increasing wear of mounting bearings of turbo compressor, diesel consumption increasing by traction in all capacity diapason, increased heat density of cylinder-reciproating group and increasing of emissions release into the atmosphere. Currently, big number of projects concerning reducing of diesel consumption by traction of shunting locomotive in a non-load running during hot downtime is proposed, reducing of carbon accumulation for the cost of reducing corrective periods of turbo compressor or injection of water inside of it and other. [5]. Significant reducing of operational coefficient of effectiveness and consequently, big diesel consumption by shunting diesel locomotives, appearing with low temperatures of environment air. Danger of water freezing in the cooling system and high oil viscosity with low temperatures do not allow simply to shut-off engine. To use antifreeze in current diesels economically and constructively not possible. There is enough many different heating systems of shut-off diesel. For example, big distribution got the system of American company Kim Hotstart, where the main source of heating is electrical heating tube (EHT) set in the cooling diesel system and supplied from additional Diesel Generator Set (DGS) of not big capacity [6].

Materials and Methods

Autonomous heating system of diesel «Golfstrim», developed by the company «Dalway Management» [3, 7], acting as source of heating are used boiler heat exchangers (energy of diesel combustion is at once transforms into the heating).

Essential deviation of this system is:
- their low coefficient of productivity for the cost of energy conversion;
- necessity of frequent maintenance of additional Diesel Generator Set (DGS).
- appliance of additional set, necessary for oil heating on carter diesel.

Main consumptive part on diesel locomotives, it is diesel traction.

Analysis of chronometric data demonstrates that:

- at first - no-load running when they correspond to the awating of work by diesel locomotive and it means the diesel locomotive is.

- at second– nominal capacity (for example 880 kW of diesel PD1M – of locomotive TEM2) mostly is not used, it means that Diesel Generator Set (DGS) of shunting locomotives is operating with very low coefficient of load.

The most optimal solution of diesel consumption redicung on shunting locomotives– it turns down diesel during awaiting for work by diesel locomotive. In parallel emissions release by diesel locomotive is reducing.

Diesel usage on shunting diesel locomotives with dry carter allows to solve the problem of diesel stop and provide heat its condition support. There is experience in diesel railway operation with dry carter on diesel locomotives with hydro mechanical transmission.

Principal work scheme of diesel cooling system with dry carter concerning innovative patent [8, 9] is given on fig. 2.

The main condition of diesel stop in the course of winter is providing support of water temperature in diesel cooling system, it means that heating and water circulation is provided by the following:

- diesel locomotive work in standard operation – water circulation is carried out by main water pump;
- diesel turned off – water circulation in cooling system is carried out by additional pump from energy source (site a-4-4-b).

Turned off diesel and oil in separate oil tank are heated by warm water in specific heating boiler operating on diesel.

Water circulation is carried out according to contour – diesel – radiators – heat boiler – additional pump – oil tank – cooler of boosted air -diesel. Oil from oil tank into diesel back to the tank is transferred through pipe system by oil pumps. (fig. 5).

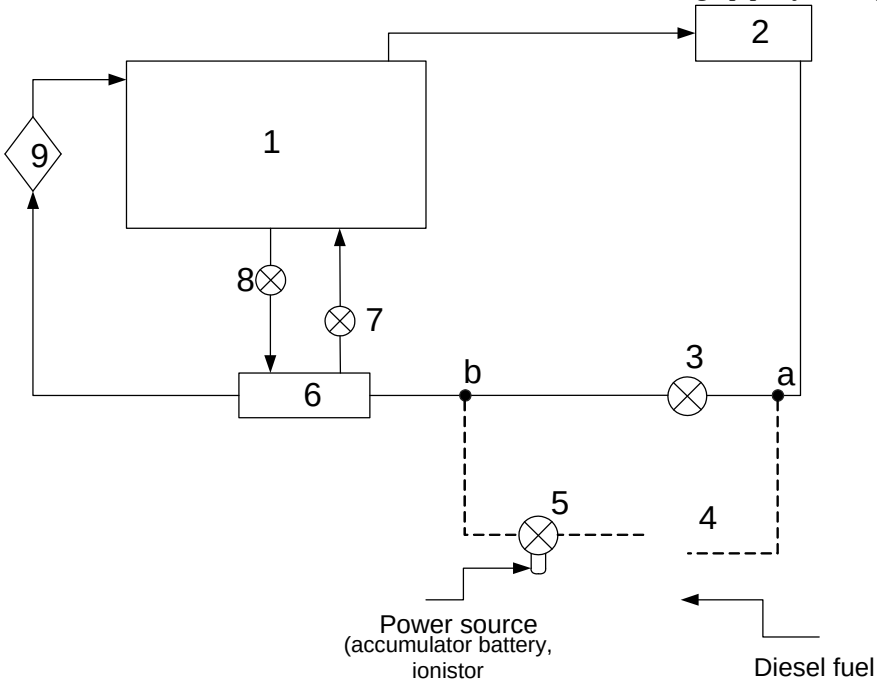


Fig. 5 – Scheme of work of diesel cooling system with dry carter:
1-diesel, 2 – cooling radiators, 3 – main water pump, 4-water boiler heater, 5- additional water pump, 6 – oil tank, 7- oil booster pump, 8 – oil drain pump, 9 – cooler of boosted air

Electromotor of circular pump 5 is supplied from power supply – energy accumulator (energy accumulator or pseudocapacitor). With launched diesel, into storage oil tank receives cooling water in radiators, which makes oil cool.

Discussion and Results

Effectiveness estimation of boiler heating for keeping of diesel locomotive heat condition is defined by help of comparison of diesel consumption at idle speed and diesel consumption necessary for boiler heating work [10], [11].

Necessary heat amount for traction:

$$Q = \frac{c_d \cdot \Delta T}{\tau} + \alpha \cdot F \cdot \Delta T \qquad (4)$$

here: C_d –conditional diesel heat capacity, kilojoule/degree

$$C_d = c_{met} \cdot M_{met} + c_{oil} \cdot M_{oil} + c_{lig} \cdot M_{lig},$$

here: C_{met}, c_{oil}, c_{liq} – conditional heating capacity consequently of metal, oil, cooling liquid, kilojoule/kg·degree;

M_{met},, M_{oil},, M_{liq} - mass consequently of metal, oil, cooling liquid (water).

ΔT – necessary size of traction heating, $\Delta T = t_{main.b.} - t_0$

$t_{main\ b.}$– temperature main bearings will be equal to –20^{0}C,

t_o – start traction temperature, will be equal to –40°C

t – duration of traction heat preparation,

α – coefficient of heat loss from traction surface into the environment (depending on wind speed and quality of warmth-keeping devices of traction is accepted within limits 15…80 kilojoule/m^2·h·degree),

F – surface of cooling traction surface, m^2:

$$F = i \cdot (\pi \cdot D \cdot S + \frac{2 \cdot \pi \cdot D^2}{4}) \cdot K_{sur}$$

here i – number of traction cylinders,

D, S- consequently, diameter and engine stroke,

K_{sur} – coefficient, taking into account active surface of traction, is equal to 1,25…1,3.

According to found heat producing capacity of it, it is necessary to check head cylinder block temperature in the end of.

$$t_{head} = \frac{Q \cdot t}{C_{head} \cdot M_d \cdot 60},$$

here C_{head} conditional heating capacity of cylinder head,

$$C_{head} = \frac{B}{S / D},$$

B – constant coefficient acceptable for head of iron – 0,45, aluminium floating – 0,5.

Control of temperature condition of diesel fading is carried out by the temperature of cylinder head, which must be no more than 40°C [12].

Diesel consumption on traction heating with definite temperature of environment at specific:

$$B_{fuel} = \frac{Q}{H_u \cdot \eta_n},$$

H_u – heating diesel effect (for diesel $42{,}5 \cdot 10^3$ kilojoule/kg),

η_n – coefficient of productivity of heater.

Control of temperature condition of turned off diesel is carried out by temperature of cylinder head, which has to be no less than 40°C .

Upon receiving of work performance order, driver starts up diesel, driver starts diesel locomotive movement.

Conclusion

1. The timing analysis showed that the specific consumption of diesel locomotives in shunting operations exceeded the value of the specific consumption of diesel locomotives in train operation by 10.6 times, and the load factor of the engine exceeded K = 0.2 ÷ 0.3.

2. The possible solution to this problem is by using diesel engine with dry crankcase as power installation of the diesel locomotive according to an innovative patent. № 31244, it will allow to maintain the thermal state of the muffled main diesel engine during cold weather, thereby reducing fuel consumption and emission of harmful substances with exhaust gases at idle.

Список литературы / References

1. Гапанович В.А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В.А. Гапанович, В.Д. Авилов, и др. // М.: Изд. Дом МИСиС. – 2012. – 620 с.

2. Hoimoja H. Modernisation Issues of Diesel-Electric Shunting Locomotive Power Units [Electronic resource] / H. Hoimoja, T. Jalakas, A. Rosin, A. Rassylkin // Scientific Journal of Riga Technical University. – 2010. – Vol. 27, P. 57-62. - www.degruyter.com/view/j/ecce.2010.26.issue.

3. Молчанов А.И. Автоматизированная система учета, контроля и анализа расхода топлива маневровыми тепловозами / А.И. Молчанов, И.Л. Поварков, Л.А. Мугинштейн, К.М. Попов // Вестник «ВНИИЖТ» – 2004. №2. С. 25-29.

4. Abdullayev S. The determination of admissible speed of locomotives on the railway tracks of the Republic of Kazakhstan / S. Abdullayev, N. Tokmurzina, G. Bakyt // Transport Problems International scientific journal – 2016. Vol. 11 – № 1, P. 61-68.

5. Kato T. Development of CNG fueled engine with lean burn for small size commercial van / T. Kato, K. Saeki, H. Nishide, T. Yamada // JSAE Review – 2001. Vol. 22 – №3, P. 365–368.

6. Володин А.И. Комплексный анализ термодинамических, экономических и экологических характеристик тепловозных дизелей в условиях эксплуатации / А.И. Володин, Е.И. Сковородников, А.С. Анисимов // Омск: ОмГУПС. – 2011. – 165 с.

7. Dorado M.P. Exhaust emissions from a diesel engine fuelled with transesterified waste olive oil / M.P. Dorado, E. Ballesteros, J.M. Arnal, J. Gomez, F.J. Lopez // Fuel – 2003. Vol. 82 – №11, P. 1311-1315.

8. Просвиров Ю.Е. Инновационные энергосберегающие технологии в локомотивном хозяйстве / Ю.Е. Просвиров, А.В. Муратов, С.А. Петухов //: Самара: СамГУПС. – 2012. – 123 с.

9. Albert, R.E. Comparative potency method for cancer risk assessment: application to diesel particulate emissions / R.E. Albert, J. Lewtas, S. Nesnow, T.W. Thorslund, E. Anderson // Risk Analysis an international journal – 1983. Vol. 3 – №2, P. 101–117.

10. Barone T.L. An analysis of direct-injection spark-ignition (DISI) soot morphology / T.L. Barone, J.M.E. Storey, A.D. Youngquist, J.P. Szybist // Atmos. Environ – 2012. №49, P. 268–274.

11. Мусабеков М.О. Маневровый тепловоз / М.О. Мусабеков, Г.Б. Бакыт, А.М. Омирбек // Инновационный патент №31244, дата регистрации в Госреестре Республики Казахстан от 16.02.2016.

12. Володин А.И. Методы оценки технического состояния, эксплуатационной экономичности и экологической безопасности дизельных локомотивов / А.И.Володин// М: Желдориздат. – 2007. – 264 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gapanovich V.A. Energosberezhenie na zheleznodorozhnom transporte [Energy saving in railway transport] / V.A. Gapanovich, V.D. Avilov and other. // M.: Izd. Dom MISiS. – 2012. – 620 p. [in Russian]

2. Hoimoja H. Modernisation Issues of Diesel-Electric Shunting Locomotive Power Units [Electronic resource] / H. Hoimoja, T. Jalakas, A. Rosin, A. Rassylkin // Scientific Journal of Riga Technical University. – 2010. – Vol. 27, P. 57-62. - www.degruyter.com/view/j/ecce.2010.26.issue.

3. Molchanov A.I. Avtomatizirovannaya sistema ucheta, kontrolya i analiza rashoda topliva manevrovymi teplovozami [Automated system for accounting, control and analysis of fuel consumption by shunting locomotives] / A.I. Molchanov, I.L. Povarkov, L.A. Muginshtejn, K.M. Popov // Vestnik «VNIIZHT» – 2004. №2. P. 25-29. [in Russian]

4. Abdullayev S. The determination of admissible speed of locomotives on the railway tracks of the Republic of Kazakhstan / S. Abdullayev, N. Tokmurzina, G. Bakyt // Transport Problems International scientific journal – 2016. Vol. 11 – № 1, P. 61-68.

5. Kato T. Development of CNG fueled engine with lean burn for small size commercial van / T. Kato, K. Saeki, H. Nishide, T. Yamada // JSAE Review – 2001. Vol. 22 – №3, P. 365–368.

6. Volodin A.I. Kompleksnyj analiz termodinamicheskih, ekonomicheskih i ekologicheskix xarakteristik teplovoznyx dizelej v usloviyah ekspluatacij [Complex analysis of thermodynamic, economic and ecological characteristics of diesel diesel engines under operating conditions] / A.I. Volodin, E.I. Skovorodnikov, A.S. Anisimov // Omsk: OmGUPS. – 2011. – 165 p. [in Russian]

7. Dorado M.P. Exhaust emissions from a diesel engine fuelled with transesterified waste olive oil / M.P. Dorado, E. Ballesteros, J.M. Arnal, J. Gomez, F.J. Lopez // Fuel – 2003. Vol. 82 – №11, P. 1311-1315.

8. Prosvirov Iu.E. Innovacionnye energosberegayushie tehnologii v lokomotivnom hozyajstve [Innovative energy-saving technologies in the locomotive sector] / Iu.E. Prosvirov, A.V. Muratov, S.A. Petuhov //: Samara: SamGUPS. – 2012. – 123 p. [in Russian]

9. Albert, R.E. Comparative potency method for cancer risk assessment: application to diesel particulate emissions / R.E. Albert, J. Lewtas, S. Nesnow, T.W. Thorslund, E. Anderson // Risk Analysis an international journal – 1983. Vol. 3 – №2, P. 101–117.

10. Barone T.L. An analysis of direct-injection spark-ignition (DISI) soot morphology / T.L. Barone, J.M.E. Storey, A.D. Youngquist, J.P. Szybist // Atmos. Environ – 2012. №49, P. 268–274.

11. Musabekov M.O. Manevrovyj teplovoz [Shunting locomotive] / M.O. Musabekov, G.B. Bakyt, A.M. Omirbek // Innovative patent №31244, the date of registration in the State Register of the Republic of Kazakhstan from 16.02.2016.

12. Volodin A.I. Metody ocenki tehnicheskogo sostoyaniya, ekspluatacionnoj ekonomichnosti i ekologicheskoj bezopasnosti dizelnyh lokomotivov [Methods for assessing the technical condition, operational efficiency and environmental safety of diesel locomotives] / A.I.Volodin// M: Zheldorizdat. – 2007. – 264 p.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.132

Алексеев А.П.[1], Абрамов Г. В.[2], Булгакова И.Н.[3]

[1]Аспирант, [2]доктор технических наук, профессор, [3]кандидат экономических наук,
Воронежский Государственный Университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация

При проектировании компьютерных сетей решают задачу выбора состава технических и программных средств при ограниченных ресурсах. При этом важно рассматривать сеть как систему из взаимодействующих друг с другом элементов, где может проявляться синергетический эффект. Основной характеристикой использования ресурсов сети является пропускная способность участка сети или всей сети. Это максимальный объем трафика, который может быть пропущен сетью, поэтому для оператора связи пропускная способность — это базовый показатель. В статье рассматривается задача нахождения максимальной пропускной способности компьютерной сети и оптимального маршрута, обеспечивающего эту пропускную способность, а также расширения этой сети при максимально эффективном использовании ее мощностей. При решении учитываются взаимосвязи между элементами сети, а в качестве параметров используются оценки типа трудность достижения цели.

Ключевые слова: компьютерные сети, максимальный поток, синергия, пропускная способность, трудность достижения цели.

Alekseev A.P.[1], Abramov G.V.[2], Bulgakova I.N.[3]

[1]Postgraduate student, [2]PhD in Engineering, Professor, [3]PhD in Economy,
Voronezh State University

USE OF SYNERGETIC APPROACH IN SIMULATION AND MODERNIZATION OF INFORMATION NETWORKS

Abstract

When designing computer networks, one solves the problem of selecting the composition of hardware and software with limited resources. It is very important to consider the network as a system of interacting elements, where a synergistic effect can be manifested. The main characteristic of using network resources is the bandwidth of the network or the entire network. This is the maximum amount of traffic that can be transmitted via the network, so for a telecom operator, the bandwidth is the basic rate. The paper considers the problem of finding the maximum throughput of a computer network and the optimal route, providing this capacity, as well as expanding this network with the most effective use of its capacities. The decision takes into account the interrelations between the elements of the network, and the estimates such as the difficulty in achieving a goal are used as parameters use.

Keywords: computer networks, maximum flow, synergy, throughput, difficulty in achieving goal.

Круг задач, решаемых с использованием компьютерных сетей, достаточно широк [1], и каждая из этих задач предъявляет свои специфичные требования к качеству обслуживания, обеспечиваемого сетью, что должно

учитываться на этапе её проектирования. При проектировании информационных систем с той или иной степенью точности решают задачу выбора состава технических и программных средств при ограниченных ресурсах [2], которые должны быть использованы максимально эффективно.

Принцип максимально эффективного использования ресурсов сетей подразумевает возможность качественной и количественной адаптации, наиболее полное использование всех ресурсов и сервисов, надежность, доступность, безопасность [3]. Необходимо учитывать взаимодействие различных элементов и узлов сети между собой. Основной характеристикой использования ресурсов сетей, которая в различной форме учитывается при расчете и проектировании сетевых структур, является пропускная способность участка сети или всей сети. Пропускная способность — это интенсивность нагрузки, которая может быть пропущена участком сети или всей телекоммуникационной сетью с заданным качеством обслуживания. С точки зрения оператора связи пропускная способность сети связи — это максимальный объем трафика, который может быть пропущен сетью при условии соблюдения требований по качеству обслуживания, для него это базовый показатель, позволяющий прогнозировать доходы [3].

Пропускная способность не является пользовательской характеристикой, так как она говорит о скорости выполнения внутренних операций сети - передачи пакетов данных между узлами сети через различные коммуникационные устройства [4]. Зато она непосредственно характеризует качество выполнения основной функции сети, т.е. транспортировки сообщений, и во многом зависит от функционирования сети в целом как системы, поэтому чаще используется при анализе производительности сети, чем другие характеристики.

Пропускная способность измеряется либо в битах в секунду, либо в пакетах в секунду. Чаще всего при проектировании, настройке и оптимизации сети используются такие показатели, как средняя и максимальная пропускные способности [5].

Средняя пропускная способность вычисляется путем деления общего объема переданных данных на время их передачи, причем выбирается достаточно длительный промежуток времени - час, день или неделя.

Максимальная пропускная способность - это наибольшая мгновенная пропускная способность, зафиксированная в течение периода наблюдения [4].

Отметим, что большинство задач построения компьютерной сети связано более с техническими характеристиками вычислительно-коммутационных устройств [1], чем с эффективностью их использования для решения определенной задачи. Кроме того, зачастую стоит задача оптимального расширения уже существующей сети.

При решении задачи эффективного использования имеющихся ресурсов для модернизации сети важно учитывать возможность возникновения синергетических эффектов, так как узлы и каналы сети не являются изолированными и непосредственно влияют на функционирование друг друга.

В данной статье нами предлагается вариант решения задачи модернизации сети передачи данных с помощью численной модели, предназначенной для нахождения максимальной пропускной способности сети и оптимального маршрута, обеспечивающего эту пропускную способность, а также расширения этой сети с минимальными трудностями с учетом максимально эффективного использования возможностей сети. Поскольку любую сеть произвольной топологии можно представить в качестве ориентированного графа, то поставленная задача сводится к поиску максимального потока в сети с ее последующим расширением, и решается методами линейного программирования.

Рассмотрим задачу определения максимального потока между двумя выделенными узлами связной сети. Каждая дуга обладает пропускными способностями в обоих направлениях, которые определяют максимальный поток, проходящий по данной дуге. Ориентированная (односторонняя) дуга соответствует нулевой пропускной способности.

Задачу о максимальном потоке можно свести к задаче линейного программирования [6].

Пусть y - поток из источника 1 в сток n. Обозначив поток в дуге (i, j) через x_{ij} получим следующую модель.

$$\sum_{j=2}^{n} x_{1j} = y,$$

$$\sum_{k \neq 1,n} x_{ik} = \sum_{k \neq 1,n} x_{kj},$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} x_{in} = y,$$

$$0 \le x_{ij} \le c_{ij},$$

$$y \to \max,$$

где c_{ij} пропускная способность дуги (i, j). Параметры c_{ij} сети можно представиться в матричной форме.

Алгоритм решения подобных задач подробно представлен в [6]. Решение, полученное с использованием данного алгоритма, необязательно задействует все имеющиеся пропускные способности сети, оставляя часть каналов недонасыщенными, поэтому полученный поток будем считать почти насыщенным или квазинасыщенным.

Поток можно считать максимальным тогда, когда используются все мощности сети. Для этого необходимо заполнить ненасыщенные дуги и, как следствие, расширить некоторые уже насыщенные дуги.

Для поиска ненасыщенных дуг проведём покомпонентное вычитание из матрицы пропускных способностей (исходной *C*) матрицу оптимального потока (*X*). Кроме того, приравняем нулю дуги, обратные к тем, что уже используются квазинасыщенным потоком. Таким образом получим матрицу *ΔX*. На величину полученных разностей

потоки по дугам должны быть увеличены для того, чтобы исходный граф обеспечивал максимальный возможный поток.

Для оценки сложности расширения различных дуг сети воспользуемся оценками трудности достижения максимального потока.

Понятие «трудность» исходит из соображений о том, что получить результат определенного качества тем труднее, чем ниже качество ресурсов, подаваемых на входе, и выше требования к качеству результат на выходе, при прочих равных условиях [7].

Если есть система, на входе которой подается набор ресурсов, необходимых для достижения результата, то величиной μ_i обозначим оценку качества ресурса i, заданную в полуинтервале $0 < \mu_i \le 1$ [8]. Так как не все значения качества ресурсов достижимы, имеет смысл ввести минимальное требование к качеству ресурса ε_i, так же заданное в полуинтервале $0 \le \varepsilon_i < 1$. Невыполнение минимального требования к качеству автоматически ведет к невыполнению требований качества результата, поэтому $\varepsilon_i \le \mu_i$.

Для оценки качества дуги в сети возьмем отношение пропускной способности этой дуги по отношению к максимально возможной, а для оценки требования к качеству – минимальную ненулевую способность в той же сети, т.е.:

$$\mu_{ij} = \frac{c_{ij} - c_{ij}^{\min}}{c_{ij}^{\max} - c_{ij}^{\min}} \qquad \varepsilon = \frac{\min c_{ij}\ (\textit{по всем } \mathrm{c_{ij}} > 0)}{\max c_{ij}\ (\textit{по всем } \mathrm{c_{ij}} > 0)}$$

Формула трудности расширения дуги на единицу принимает вид [9]:

$$d_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}(1-\mu_{ij})}{\mu_{ij}(1-\varepsilon_{ij})}, \text{ при этом } d_{ij}(0,0) = 0 \ \ и \ \ d_{ij}(1,1) = 1$$

Поскольку каждая дуга в сети обладает своей трудностью расширения, логично построить матрицу трудностей *D*, причем ее элементы находятся по формуле [2]:

$$d_{ij}^{\ *} = d_{ij}^{\ \alpha_{ij}} = 1 - (1 - d_{ij})^{\alpha_{ij}},$$

где параметр α_{ij} обозначает весовой коэффициент важности конкретной дуги в сети. Эти параметры находятся в диапазоне $0 < \alpha_{ij} \le 0{,}1$.

Для определения дуг, которые необходимо расширить, воспользуемся следующим алгоритмом:

Шаг 1. Определяются весовые коэффициенты α_{ij} (по умолчанию 0,1) и на основе исходной матрицы *C* строится матрица трудностей $D = d_{ij}^{\ *}$.

Шаг 2. Выбирается ненасыщенная дуга из матрицы *ΔX*.

Можно выбирать различные исходные дуги, однако, хорошим выбором (вначале и на каждой итерации) будет минимальная *безальтернативная* дуга (т.е. не имеющая ненулевой обратной дуги в матрице *ΔX*). Такая дуга должна быть насыщена в любом случае.

Значение для этой дуги из матрицы *ΔX* обозначим как Θ^d.

Шаг 3. Определяется цепь, соединяющая s с t, и включающая в себя выбранную на предыдущем шаге дугу.

Предпочтение отдается цепи, включающей в себя другие ненасыщенные дуги, т.к. они будут насыщены при следующей итерации. Кроме того, при построении цепи необходимо избегать циклов.

Шаг 4. Насыщенные дуги, входящие в выбранную цепь, необходимо расширить на Θ^d единиц, при этом трудность такого расширения оценивается как $d_{ij}^{\ \Theta^d} = 1 - (1 - d_{ij})^{\Theta^d}$.

Шаги 3-4 повторяются до тех пор, пока не будет найдена цепь с минимальной трудностью. После этого нужно перейти к шагу 5.

Шаг 5. Цепь с минимальной трудностью расширения насыщенных дуг найдена, поэтому матрица *ΔX* изменяется – показатель Θ^d вычитается из показателей всех дуг, задействованных в выбранной цепи, при этом показатель исходной ненасыщенной дуги становится равным нулю, а показатели насыщенных дуг становятся отрицательными (т.е. нуждаются в увеличении пропускных способностей).

Кроме того, если в матрице *ΔX* были дуги, обратные к только что насыщенным, их показатели приравниваются к нулю.

Шаг 6. Если в матрице остались положительные элементы, то нужно перейти к шагу 2. В противном случае выписывается *окончательная* матрица *ΔX*. Отрицательные элементы матрицы показывают дуги, которые необходимо расширить.

Интегральная трудность расширения находится по формуле [10]:

$\sum_{i,j}(d_{ij})^{-\Delta x_{ij}} = 1 - \prod_{i,j}(1 - d_{ij}^{-\Delta x_{ij}}) = 1 - \prod_{i,j}(1 - d_{ij})^{-\Delta x_{ij}}$, для всех *(i,j),* для которых справедливо неравенство $\Delta X_{ij} < 0$.

Исходная матрица *C* заменяется расширенной $C^* = c_{ij} - \Delta x_{ij}$.

При этом приращение потока равно сумме всех Θ^d, а максимальный поток равен сумме величины квазинасыщенного потока и этого приращения.

Необходимо отметить, что все цепи, найденные на шаге 5, являются оптимальными решениями подзадачи поиска пути с минимальной трудностью и максимальным использованием недонасыщенных дуг. Таким образом, конечное решение, составленное из этих цепей, также будет оптимальным по данным показателям. Однако для проверки оптимальности полученного решения имеет смысл сравнить его с лучшим из вариантов, не учитывающих заполнение недонасыщенных дуг.

Если решение, учитывающее заполнение недонасыщенных дуг, дает лучший эффект, чем варианты, его не учитывающие, то есть смысл говорить о синергетическом эффекте, проявляющимся во взаимном влиянии недонасыщенных дуг сети друг на друга.

Рассмотрим предложенный подход на примере. Исходная сеть, с заданными пропускными способностями имеет вид (рис. 1).

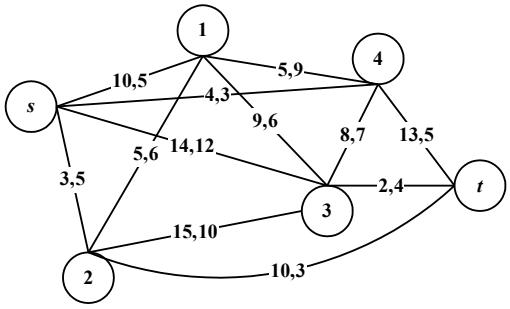


Рис. 1 – Исходная сеть, с заданными пропускными способностями

Соответствующая матрица пропускных способностей имеет вид:

$C =$

	s	1	2	3	4	*t*
s	0	10	3	14	4	0
1	5	0	5	9	5	0
2	5	6	0	15	0	10
3	12	7	10	0	7	2
4	3	9	0	8	0	13
t	0	0	3	4	5	0

Применив алгоритм [6], получим квазинасыщенный поток (рис. 2).

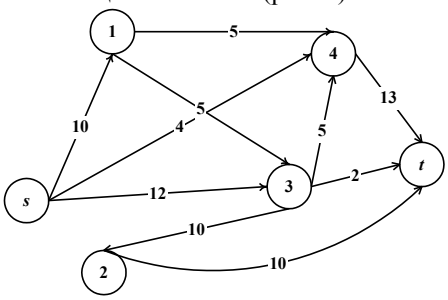


Рис 2 – Квазинасыщенный поток

Матрица полученного потока:

$X =$

	s	1	2	3	4	*t*
s	0	**10**	0	**12**	**3**	0
1	0	0	0	**5**	**5**	0
2	0	0	0	0	0	**10**
3	0	0	**10**	0	**5**	**2**
4	0	0	0	0	0	**13**
t	0	0	0	0	0	0

Из матрицы видно, что $y = \sum_j x_{sj} = 10 + 12 + 3 = \sum_i x_{it} = 10 + 2 + 13 = 25$, это и есть величина квазинасыщенного потока.

Матрица ненасыщенных дуг выглядит следующим образом:

$\overset{\Delta}{X} =$

	s	1	2	3	4	t
s	0	0	**3**	**2**	**1**	0
1	0	0	**5**	**4**	0	0
2	0	**6**	0	0	0	0
3	0	0	0	0	**2**	0
4	0	0	0	0	0	0
t	0	0	0	0	0	0

Примем все весовые коэффициенты равными 0,1:

$$\alpha_{ij} = 0{,}1 \qquad \forall i, j$$

Матрица трудностей с учетом этих коэффициентов имеет вид:

$D =$

	s	1	2	3	4	t
s	0,0000	0,0080	0,0911	0,0011	0,0535	0,0000
1	0,0361	0,0000	0,0361	0,0108	0,0361	0,0000
2	0,0361	0,0259	0,0000	0,0000	0,0000	0,0080
3	0,0039	0,0192	0,0080	0,0000	0,0192	0,2057
4	0,0911	0,0108	0,0000	0,0144	0,0000	0,0024
t	0,0000	0,0000	0,0911	0,0535	0,0361	0,0000

В качестве первой дуги выбираем $s \to 4$, $\Theta^d = 1$.

Единственная цепь, включающая эту дугу, это $s \to 4 \to t$, поэтому мы можем пометить дугу $4 \to t$ на расширение и изменить матрицу, вычтя 1 из ячеек (s,4) и (4,t).

	s	1	2	3	4	t
s	0	0	3	2	**0**	0
1	0	0	5	4	0	0
2	0	6	0	0	0	0
3	0	0	0	0	2	0
4	0	0	0	0	0	**-1**
t	0	0	0	0	0	0

В качестве следующей дуги можно принять $s \to 3$. Эта дуга входит в несколько цепей, а именно $s \to 3 \to t$, $s \to 3 \to 4 \to t$ и $s \to 3 \to 2 \to t$.

Заметим, что дуга $3 \to 4$ тоже недонасыщена на 2 единицы. Поскольку обратная дуга ($4 \to 3$) отсутствует в матрице, мы в любом случае попытаемся насытить эту дугу в одной из следующих итераций, поэтому можно сразу выбирать цепь $s \to 3 \to 4 \to t$.

Вычитаем число 2 из ячеек (s,3), (3,4) и (4,t).

	s	1	2	3	4	t
s	0	0	3	**0**	0	0
1	0	0	5	4	0	0
2	0	6	0	0	0	0
3	0	0	0	0	**0**	0
4	0	0	0	0	0	**-3**
t	0	0	0	0	0	0

Следующая минимальная дуга это $s \to 2$. Она входит в цепь $s \to 2 \to t$ и несколько цепей $s \to 2 \to 1 \to \ldots$

Заметим, что поскольку дуги $2 \to 1$ и $1 \to 3$ также ненасыщенные, то создается впечатление, что оптимальный путь пролегает через эти них, однако существует обратная дуга $1 \to 2$, поэтому насыщение $2 \to 1$ не является безальтернативным.

Интегральная трудность цепи $s \to 2 \to 1 \to 3 \to 2 \to t$ меньше, чем у цепей $s \to 2 \to 1 \to 3 \to t$ и $s \to 2 \to 1 \to 3 \to 4 \to t$ (0,0159 против 0,205 и 0,0215 соответственно), но она содержит цикл $2 \to 1 \to 3 \to 2$, что недопустимо. Цепь $s \to 2 \to t$ имеет еще меньшую трудность 0,008, поэтому именно ее следует выбрать в качестве оптимальной.

Матрица принимает вид:

	s	1	2	3	4	*t*
s	0	0	**0**	0	0	0
1	0	0	5	4	0	0
2	0	6	0	0	0	**-3**
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	-3
t	0	0	0	0	0	0

Предыдущая итерация показала, что цепи, включающие дугу $2 \to 1$, имеют большую трудность насыщения, чем цепи с дугой $1 \to 2$. Поэтому следующей выберем дугу $1 \to 2$, при этом обратная дуга станет равна нулю.

Она входит только в одну цепь $s \to 1 \to 2 \to t$, поэтому матрица изменяется соответственно:

	s	1	2	3	4	*t*
s	0	**-5**	0	0	0	0
1	0	0	**0**	4	0	0
2	0	**0**	0	0	0	**-8**
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	-3
t	0	0	0	0	0	0

Осталась только дуга $1 \to 3$. Поскольку мы уже вычислили, что цепь $\ldots \to 3 \to 2 \to t$ лучше альтернатив, проходящих через узлы 3 и 4, то оптимальной становится цепь $s \to 1 \to 3 \to 2 \to t$.

После преобразования получаем конечную матрицу *ΔX:*

	s	1	2	3	4	*t*
s	0	**-9**	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	**-12**
3	0	0	**-4**	0	0	0
4	0	0	0	0	0	**-3**
t	0	0	0	0	0	0

Интегральная трудность насыщения сети равна:

$$D = 1 - \prod_{i,j} (1 - d_{ij})^{-\Delta x_{ij}} = 0{,}1872$$

Графическое решение представлено на рисунке 3:

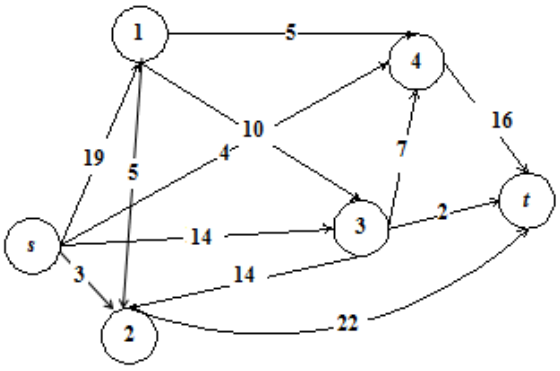


Рис. 3 – Графические решение

Вычислим новую матрицу C^*:

$C^* =$

	s	1	2	3	4	t
s	0	19	3	14	4	0
1	5	0	5	9	5	0
2	5	6	0	15	0	22
3	12	7	14	0	7	2
4	3	9	0	8	0	16
t	0	0	3	4	5	0

Наконец, найдем приращение квазинасыщенного потока:

$$\sum \Theta^d = 1+2+3+5+4=15$$

Для проверки оптимальности найдем лучшее решение задачи расширения без оглядки на ненасыщенные дуги. Для этого необходимо найти цепь с минимальной трудностью расширения и увеличить все ее каналы так, чтобы по этой цепи могло пройти приращение потока $\sum \Theta^d$.

В нашем примере это цепь $s \to 3 \to 2 \to t$, дуги $3 \to 2$ и $2 \to t$ необходимо расширить на 15, дугу $s \to 3$ - на 13 (т.к. она недонасыщена на 2). Интегральная трудность насыщения будет равна:

$$D = 1 - \prod_{i,j} (1-d_{ij})^{-\Delta x_{ij}} = 1-(1-d_{s3})^{13}(1-d_{32})^{15}(1-d_{2t})^{15} = 0{,}2247$$

Сравнив этот результат с полученным ранее, можно сделать вывод, что найденное нами решение является наименее трудоемким вариантом расширения сети с использованием всех недонасыщенных каналов.

Таким образом, полученная нами модель отражает синергетический подход к решению задачи модернизации информационной сети с целью увеличения ее пропускной способности. Учет недонасыщенных каналов связи и их влияния друг на друга позволяет найти более оптимальный вариант расширения, нежели простое увеличение наиболее удобных для этого потоков.

Представление квазинасыщенной сети в виде системы взаимосвязанных элементов позволяет говорить о получении синергетического эффекта, который обеспечивает максимальный достижимый при ограниченных ресурсах поток наименее трудоемким способом.

Список литературы / References

1. Катаев М.Ю., Крупский А.С. Оценка пропускной способности на основе модели однородной сети / М.Ю. Катаев, А.С. Крупский // Доклады ТУСУРа. - № 2 (36). - июнь 2015.

2. Таненбаум Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум . – СПб.: Питер, 2008. – 992 с.

3. Степанова И. В., Булатов С. В. Методы повышения пропускной способности уровня абонентского доступа / И. В. Степанова, С. В. Булатов // Журнал T-Comm - Телекоммуникации и Транспорт. - № 2 - 2009.

4. Куделькина Н.Н. Системы передачи данных. Курс лекций для специальности 210407 «Эксплуатация средств связи» / Н.Н. Куделькина. Томский техникум железнодорожного транспорта. – Томск. - 2010.

5. Втюрин В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП: Учебное пособие для студентов специальности 220301 "Автоматизация технологических процессов и производств" / В.А. Втюрин. - СПб: СПбГЛТА. - 2006.

6. Таха Х.А. Введение в исследование операций. 6-е издание / Х.А. Таха. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», - 2001.

7. Булгакова И.Н., Саликов Ю.А. Совершенствование модели развития социально-экономических систем / И.Н. Булгакова, Ю.А. Саликов // Современная экономика: проблемы и решения. – Воронеж, - 2010 - №2(2) – С. 146-154.

8. Алексеев А.П. Использование модели Р. Стоуна для оценки синергетического эффекта процесса интеграции предприятий / А.П. Алексеев // Наука и образование в жизни современного общества. - 2014. - №11. - С. 10-11.

9. Руссман И.Б. Интегральные оценки качества в организационных системах / И.Б. Руссман // Сборник "Структурная адаптация сложных систем управления", - Изд. ВПИ, Воронеж. – 1977. - с. 90-92.

10. Алексеев А.П. Использование трудности достижения цели для оценки синергетического эффекта при создании интегрированных структур / А.П. Алексеев, Г.В. Абрамов, И.Н. Булгакова // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - №10-2 (41). - С.6-10.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kataev M.J., Krupskij A.S. Ocenka propusknoj sposobnosti na osnove modeli odnorodnoj seti [The estimation of network capacity based on the model of homogenous network] / M.J. Kataev, A.S. Krupskij // Doklady TUSURa [Reports of TUSUR]. - № 2 (36). - June 2015. [In Russian]

2. Tanenbaum A. Computer Networks / A. Tanenbaum. - Prentice Hall, 2002.

3. Stepanova I. V., Bulatov S. V. Metody povyshenija propusknoj sposobnosti urovnja abonentskogo dostupa [Methods for increasing of network capacity on the level of local loop] / I. V. Stepanova, S. V. Bulatov // Zhurnal T-Comm - Telekommunikacii i Transport [Journal T-Comm – Telecommunications and transport]. - № 2. - 2009. [In Russian]

4. Kudel'kina N.N. Sistemy peredachi dannyh. Kurs lekcij dlja special'nosti 210407 «Jekspluatacija sredstv svjazi» [The systems of data transfer. Lectures for specialization 210407 “Exploitation of communications facilities”] / N.N. Kudel'kina // Tomskij tehnikum zheleznodorozhnogo transporta. – Tomsk. - 2010. [In Russian]

5. Vtjurin V.A. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija tehnologicheskimi processami. Osnovy ASUTP: Uchebnoe posobie dlja studentov special'nosti 220301 "Avtomatizacija tehnologicheskih processov i proizvodstv" [Automatic control systems for technological process. Basics of ACSTP: Textbook for students of specialization 220301 “Automatization of technical processes and manufactures”] / V.A. Vtjurin. - SPb: SPbGLTA. - 2006. [In Russian]

6. Taha H. A. Operations research: an introduction / H. A. Taha. - Prentice Hall, 1996.

7. Bulgakova I.N., Salikov J.A. Sovershenstvovanie modeli razvitija social'no-jekonomicheskih sistem [Improving of the model of evolution of social-economic systems] / I.N. Bulgakova, J.A. Salikov // Sovremennaja jekonomika: problemy i reshenija [Modern economics: Problems and solutions]. – Voronezh, 2010. - №2 (2). – P. 146-154. [In Russian]

8. Alekseev A.P. Ispol'zovanie modeli R. Stouna dlja ocenki sinergeticheskogo jeffekta processa integracii predprijatij [The using of model of R. Stone for evaluation of synergistic effect of companies integration process] / A.P. Alekseev // Nauka i obrazovanie v zhizni sovremennogo obshhestva [Science and education in life of modern society]. - 2014. - №11. - P. 10-11. [In Russian]

9. Russman I.B. Integral'nye ocenki kachestva v organizacionnyh sistemah [Structure adaptation of complex control systems] / I.B. Russman // Sbornik "Strukturnaja adaptacija slozhnyh sistem upravlenija" [Collection “Structural adaptation of complex control systems”]. - Izd. VPI, Voronezh, - 1977, - P. 90-92. [In Russian]

10. Alekseev A.P. Ispol'zovanie trudnosti dostizhenija celi dlja ocenki sinergeticheskogo jeffekta pri sozdanii integrirovannyh struktur [Using of the difficulty of achieving the goal for evaluation of synergetic effect in the creation of integrated structures] / A.P. Alekseev, G.V. Abramov, I.N. Bulgakova // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. - 2015. - №10-2 (41). - P. 6-10. [In Russian]

ВКонтакте

Получить актуальную информацию, задать вопросы и узнать свежие новости о Международном научно-исследовательском журнале Вы сможете на официальной странице ВКонтакте

http://vk.com/public43173774

Опубликовать статью ВАК / Научный журнал

О компании:

Почта: editors@research-journal.org

МНИЖ предоставляет возможность опубликовать свои научные достижения аспирантам, преподавателям вузов, студентам, лицам, имеющим ученую степень, общественным деятелям, деятелям культуры и образования, политикам, экономистам России, стран СНГ и дальнего зарубежья.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.147

Амелин С.А.[1], Амелина М.А.[2], Фролков О.А.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-1705-297X, кандидат технических наук,
[2]ORCID: 0000-0001-6210-1729, кандидат технических наук, [3]ORCID: 0000-0002-7717-1161,
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00380 А

ТРЕБОВАНИЯ К СОВРЕМЕННОМУ ДРАЙВЕРУ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ

Аннотация

Проведен обзор состояния дел в области разработки силовых преобразовательных устройств. Обоснованы причины необходимости создания отечественных драйверов силовых ключей. Намечены основные пути решения этой задачи. Сформулированы основные требования к набору функций, которые должен поддерживать современный драйвер силовых ключей. Приведены примеры недостатков драйверов фирмы CT Concept, выявленные в процессе их эксплуатации и предложены пути их устранения. Предложена новая топология выходного каскада драйвера, обеспечивающая управление импедансом цепи перезаряда входной емкости ключа на разных этапах процессов заряда-разряда. Показаны преимущества этой топологии при использовании режима активного ограничения индуктивных выбросов напряжения на ключе в процессе его выключения (Active Clamp).

Ключевые слова: драйверы, транзисторные ключи, силовые модули, MOSFET, IGBT, плато Миллера, Active Clamp, управляемый импеданс.

Amelin S.A.[1], Amelina M.A.[2], Frolkov O.A.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-1705-297X, PhD in Engineering, [2]ORCID: 0000-0001-6210-1729, PhD in Engineering,
[3]ORCID: 0000-0002-7717-1161,
Branch of FSBEI of Higher Education “National Research Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk,

The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 16-07-00380 A.

REQUIREMENTS TO THE MODERN DRIVER OF POWER SWITCHES

Abstract

We conducted a review of the state of power conversion devices development. The reasons for the necessity to create domestic power switch drivers are justified. The main ways of solving this problem are outlined. Basic requirements to the set of functions that a modern driver of the power switch should support are formulated. Examples of the shortcomings of the drivers of the CT Concept Company revealed during their operation are given; the ways of their elimination are suggested. A new topology of the output stage of the driver is proposed. It provides control of the impedance of the recharge circuit of the input switch capacity at different stages of the charge-discharge processes. The advantages of this topology are shown when using the active clipping mode for inductive voltage ejections on a switch during its shutdown (Active Clamp).

Keywords: drivers, transistor switches, power modules, MOSFET, IGBT, Miller plateau, Active Clamp, controlled impedance.

Практически любое устройство силовой преобразовательной техники содержит драйвер — функциональный блок, осуществляющий непосредственное управление силовым ключом.

Основной задачей, которую выполняет драйвер, является преобразование уровней токов и напряжений сигнала управления, поступающего от контроллера (который, как правило, является узлом, формирующим слаботочный логический сигнал) в уровни, достаточные для переключения силового ключа. Поскольку в качестве силовых ключей сейчас, как правило, используются мощные MOS- и IGBT-транзисторы, а также силовые модули на их основе, то фактически драйвер работает на емкостную нагрузку и должен обеспечивать токи, гарантирующие быстрый перезаряд входной емкости силового ключа [1]. При этом выходной импульсный ток может достигать десятков ампер при напряжении 10–15 В.

Дополнительными функциями драйвера является контроль за состоянием силового ключа и защита его от короткого замыкания, перегрузки по току и т.п. Таким образом, драйвер является промежуточным звеном между силовым ключом и контролером, обеспечивающим выполнение общего алгоритма работы силового преобразовательного устройства. В устройствах малой мощности (до сотен ватт) функции контроллера и драйвера могут совмещаться в одном функциональном блоке или даже в одной интегральной микросхеме.

С учетом того, что силовые ключи в полумостовых, мостовых и многоуровненых схемах работают при напряжениях, существенно превышающих потенциалы сигналов контроллера, устройство управления затвором должно осуществлять или высоковольтный сдвиг уровня, или гальваническую изоляцию входных импульсов управления от импульсов, поступающих на затворы [2].

Номенклатура драйверов, обеспечивающих обозначенные выше функции, достаточно разнообразна. Такие устройства выпускаются фирмами IXYS, Motorola, Agilent, International Rectifier, CT-Concept, Semikron [3, 4]. Однако в России наибольшее распространение получила продукция фирмы CT-Concept. Популярность изделий этой фирмы связана с достаточной простотой этих драйверов, поддержкой принципа plug-and-play, обеспечивающего хорошую совместимость с разными типами силовых транзисторов. Немаловажным фактором оказалась доступность (по крайней мере, до недавнего времени) на отечественном рынке электронных комплектующих. Однако введение режима экономических санкций против России изменило ситуацию. Если использование импортной элементной базы в изделиях оборонной отрасли и раньше достаточно жестко ограничивалось, то теперь такие ограничения вводятся и в ряде других стратегически важных для нашего государства отраслей. Например, введены ограничения для продукции, предназначенной для РЖД. Причем, речь идет не только об ограничениях при разработке новых изделий, но и о необходимости замены импортных комплектующих на отечественные аналоги в уже разработанной и ныне выпускаемой аппаратуре [5].

Выполнение этих требований связано с большими трудностями. В изделиях оборонной промышленности проблема частично решена и фирма «Электрум АВ» выпускает ряд драйверов-аналогов продукции «CT Concept». Эти драйверы функционально совместимы с оригинальными драйверами и аналогичны им по габаритам и схеме включения. Однако, как заявляет сама фирма разработчик, ни один из драйверов-аналогов абсолютного соответствия параметрам драйвера-прототипа не имеет. При разработке данных драйверов во главу угла была поставлена возможность получения полного соответствия с помощью настроек [6].

Главным недостатком этих драйверов является их высокая стоимость. Это обусловлено тем, что оригинальные драйверы построены на основе специализированных интегральных микросхем, что позволило предельно упростить схему и технологичность производства. А устройства-аналоги от «Электрум АВ» реализованы на основе микросборок, выполненных по гибридным технологиям. Кроме того, изделия «Электрум АВ» изначально разрабатывались для оборонной отрасли и имеют в своем составе только комплектацию, допущенную для создания электронной аппаратуры военного назначения (соответствующую так называемой «приемке 5»). Это накладывало серьезные ограничения и на выбор элементной базы, и на схемные решения, и на конструктивное исполнение. Все эти ограничения приводили к повышению стоимости устройства.

Для изделий военной техники такой подход является единственно возможным. Однако применение драйверов «Электрум АВ» в продукции гражданского назначения приводит к неоправданному повышению её стоимости. Но на данный момент альтернативы нет. Кроме того, «Электрум АВ» выпускает аналоги не для всех драйверов фирмы «CT Concept». В частности, на данный момент не существует аналогов драйверов малой мощности, драйверов на планарных трансформаторах и драйверов высоковольтных модулей с высоким напряжением защиты от выхода из насыщения.

В связи с вышеизложенным становится очевидным актуальность задачи создания семейства отечественных драйверов силовых транзисторов и силовых модулей, предназначенных для работы в изделиях гражданского назначения. Причем далеко не обязательно эти драйверы должны быть полными функциональными копиями изделий фирмы «CT Concept», поскольку у иных фирм есть технические решения, позволяющие превзойти по ряду параметров продукцию «CT Concept». Кроме того, существуют отечественные разработки, позволяющие обеспечивать более эффективные алгоритмы управления силовым ключом, нежели используемые в драйверах «CT Concept» [7].

Следует учесть, что схемотехнические решения, используемые при создании драйвера, должны допускать возможность его реализации в виде набора специализированных интегральных микросхем. Аналогичным образом разрабатывались драйвера CT Concept. В частности, последние версии этих драйверов строятся на основе набора микросхем SCALE-2, который специально спроектирован для реализации основных функций драйверов IGBT- и MOSFET-транзисторов. В этот набор входит несколько модификаций микросхемы интеллектуального драйвера IGD и заказной микросхемы LDI-логического интерфейса драйвера. Эти микросхем выполнены по КМОП-технологии [4].

Для создания отечественного драйвера силового ключа необходимо сначала сформулировать требования к этому устройству. За основу можно взять функции, реализованные в наборе микросхем SCALE-2 [4]:

- независимые установки импеданса цепей заряда и разряда входной емкости силового ключа;
- активное ограничение индуктивных выбросов выходного напряжения силового ключа на этапе его выключения;
- управление параметрами начального запуска преобразователя (плавный пуск);
- система выключения при снижении напряжения питания ниже допустимого значения;
- система диагностики и сигнализации об аварийных состояниях (в частности, защита от выхода силового ключа из насыщения);
- возможность реализации алгоритмов управления силовыми преобразователями, построенными с использованием многоуровневых и параллельных топологий;
- встроенный контроллер преобразователя постоянного напряжения для обеспечения гальванически развязанного питания выходных каналов драйвера;
- гальванически развязанные электрические интерфейсы управления силовым ключом;
- совместимость со всеми семействами логических ИС;
- задержка прохождения сигнала не более 80 нс;
- работоспособность при высоких скоростях изменения сигналов du/dt>100 В/нс;

Кроме того, в набор функций, который реализует драйвер, целесообразно добавить:

- ограничение скорости выключения силового ключа в случае короткого замыкания или перегрузки по току (реализовано в драйверах семейства компании SEMIKRON);
- возможность использования переменного импеданса цепей заряда и разряда силовых ключей.

Последняя функция в настоящее время не реализована ни в одном из существующих драйверов, однако, как будет показано ниже, она позволяет существенно снизить потери при использовании активного ограничения индуктивных выбросов выходного напряжения силового ключа на этапе его выключения, поэтому эти функции целесообразно использовать совместно.

При разработке нового драйвера необходимо также учесть недостатки драйверов CT Concept, выявленные в процессе эксплуатации устройств на их основе. Одним из таких недостатков является использование простейшего двухтактного преобразователя напряжения, не имеющего демпфирующих цепей (рис. 1).

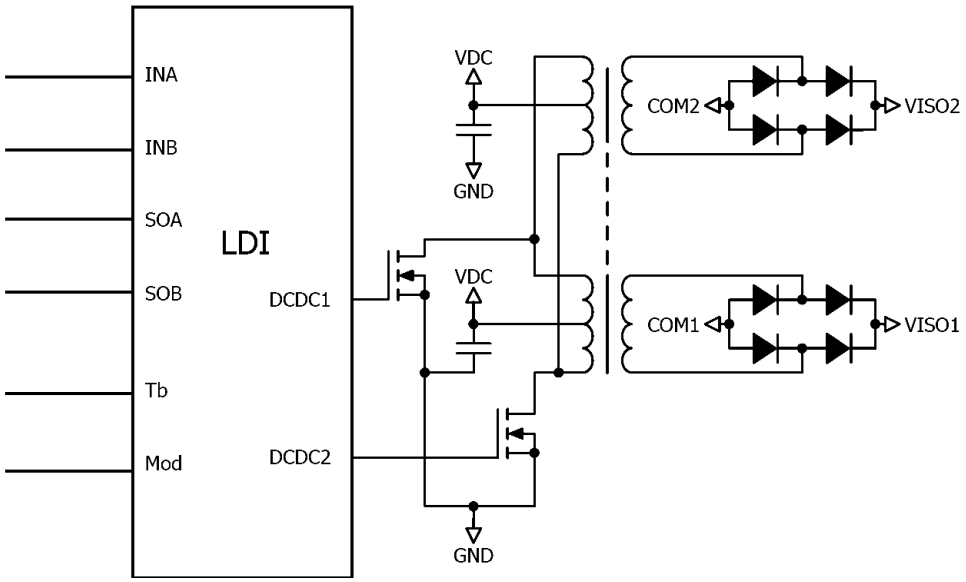


Рис. 1 – Схема преобразователя напряжения в драйверах CT-Concept

Как известно, в такой схеме на стоках полевых транзисторов возникают выбросы напряжения. Эти выбросы обусловлены наличием индуктивности рассеяния трансформатора преобразователя напряжения.

В рассматриваемой схеме выбросы напряжения ограничиваются лишь паразитной емкостью полевого транзистора. Однако в определенных условиях этого недостаточно. В частности, при использовании многоуровневых драйверов на индуктивные выбросы, формируемые трансформатором преобразователя, накладываются кондуктивные помехи от переключения силового ключа, и суммарное напряжение на стоке транзистора преобразователя превышает допустимую величину. В результате транзистор преобразователя выходит из строя. Это явление наблюдалось неоднократно и для его устранения приходилось модифицировать оригинальную схему драйвера (добавлять демпфирующие цепи). В простейшем случае достаточно добавить супрессор или аналогичную ему цепь на основе стабилитрона [8], [9].

Также стоит отметить, что при постоянном импедансе разрядной цепи на этапе выключения обеспечивать малую задержку выключения можно только ценой увеличения амплитуды выброса напряжения на коллекторе транзистора. Чтобы оптимизировать оба этих параметра импеданс разрядной цепи на разных участках этапа выключения силового ключа должен меняться. На этапе медленных изменений тока силового ключа, соответствующих «плато Миллера», импеданс должен быть низким (рис. 2).

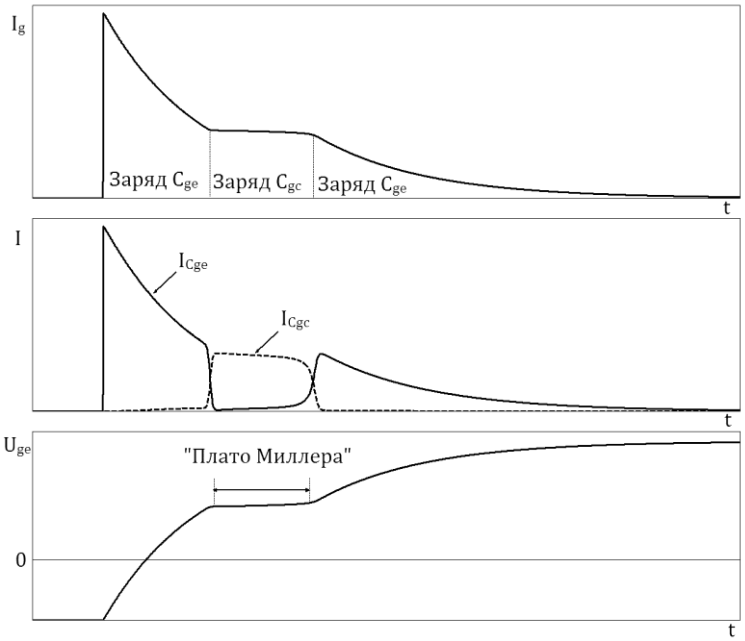


Рис. 2 – Процессы заряда входной емкости при включении ключа на основе БТИЗ: I_g – ток цепи затвора, I_{Cge} – ток заряда емкости затвор-эмиттер, I_{Cgc} –ток заряда емкости затвор-коллектор, U_{ge} – напряжение затвор-эмиттер

Это позволяет обеспечить малое время задержки выключения. А на этапе резкого изменения тока ключа импеданс должен быть достаточно высоким, чтобы ограничивать скорость изменения тока и, соответственно, величину индуктивного выброса напряжения на ключе.

Для реализации драйвера, обеспечивающего такое изменение импеданса, необходим еще один ключ S3, переключающийся по сигналу системы управления СУ, отслеживающей напряжение на затворе силового транзистора (рис. 3).

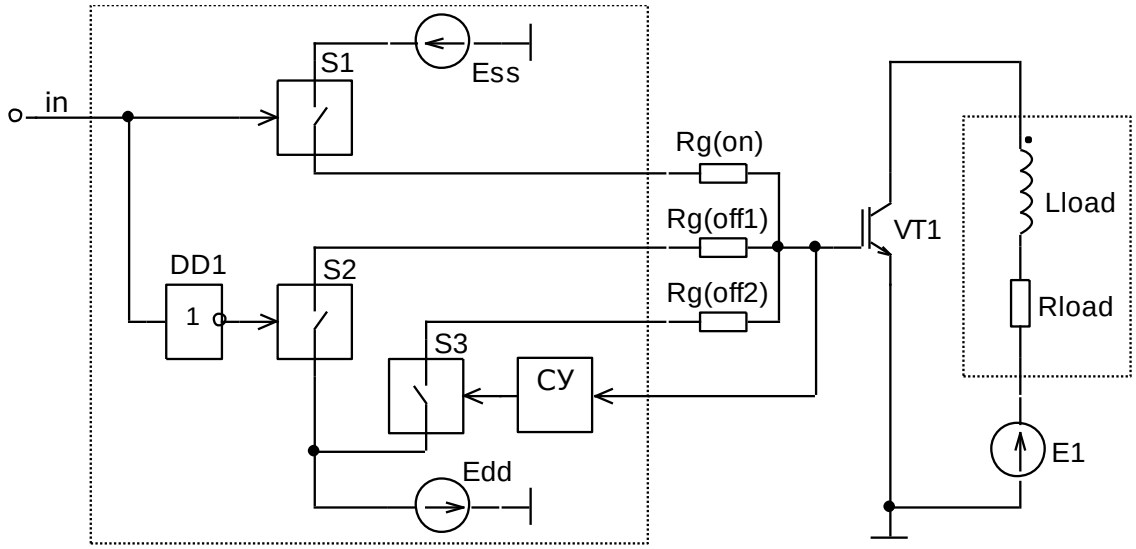


Рис. 3 – Структура силовой части драйвера с изменяемым импедансом на этапе выключения ключа

Результаты математического моделирования с использованием программы схемотехнического анализа Micro-Cap [10] показывают, что использование такой топологии драйвера позволяет существенно уменьшить задержку выключения t_3 без увеличения скорости изменения тока ключа и увеличения индуктивного выброса напряжения на коллекторе (рис. 4). Протяженность «плато Миллера» и, следовательно, задержка выключения, будет определяться сопротивлением резистора $R_{g(off2)}$, а скорость изменения коллекторного тока – резистором $R_{g(off1)}$.

При переменном импедансе ток разряда входной емкости транзисторного ключа на начальном участке переключения в несколько раз превышает ток разряда схемы с постоянным импедансом. За счет этого уменьшается время перезаряда емкости затвор-сток и, соответственно, протяженность «плато Миллера», которое в основном и определяет задержку выключения.

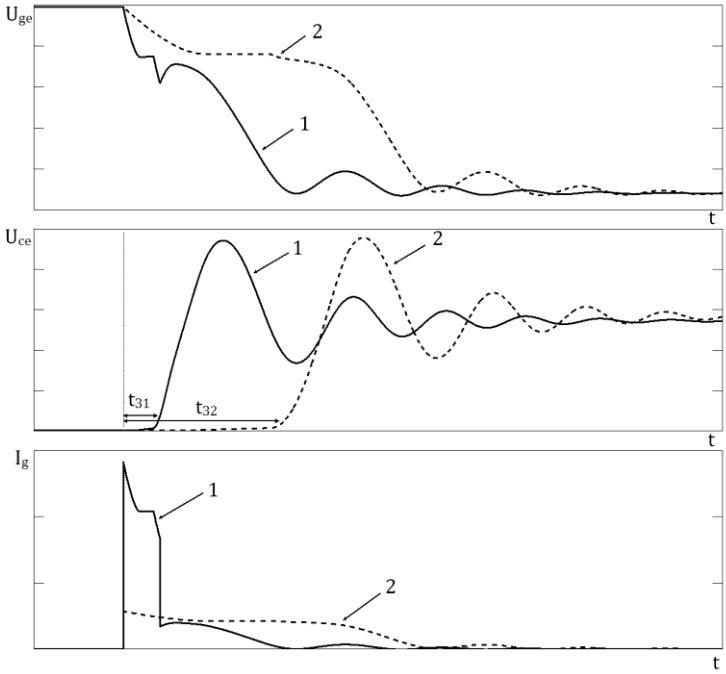


Рис. 4 – Процессы выключения БТИЗ-ключа при переменном (1) и постоянном (2) импедансе разрядной цепи затвора: U_{ge} – напряжение затвор-исток, U_{ce} – напряжение коллектор-эмиттер, I_g – ток цепи затвора

Рассмотренный алгоритм переключения ключа целесообразно использовать в мостовых схемах, поскольку он позволяет существенно уменьшить опасность возникновения сквозных токов на этапе коммутации за счет минимизации задержки переключения, вызванной наличием «плато Миллера». Однако отечественных драйверов с такими функциональными возможностями пока не существует.

Изменяемый импеданс разрядной цепи затвора может оказаться полезным и при использовании активного демпфирования индуктивного выброса напряжения (Active Clamp) [8, 11]. В схемах драйверов мощных силовых ключей для этой цели, как правило, используются мощные стабилитроны (снабберы), подключаемые между коллектором и затвором IGBT-транзистора. В такой схеме ток пробоя стабилитрона ограничен только импедансом разрядной цепи и может достигать единиц ампер. При этом на стабилитроне рассеивается существенная мощность (единицы–десятки Вт). Для уменьшения тока пробоя и, соответственно, мощности, рассеиваемой на стабилитроне, необходимо на время его пробоя увеличивать импеданс разрядной цепи. Реализовать это можно на основе

рассмотренной ранее топологии, изменив алгоритм управления дополнительным ключом S3 (рис. 5).

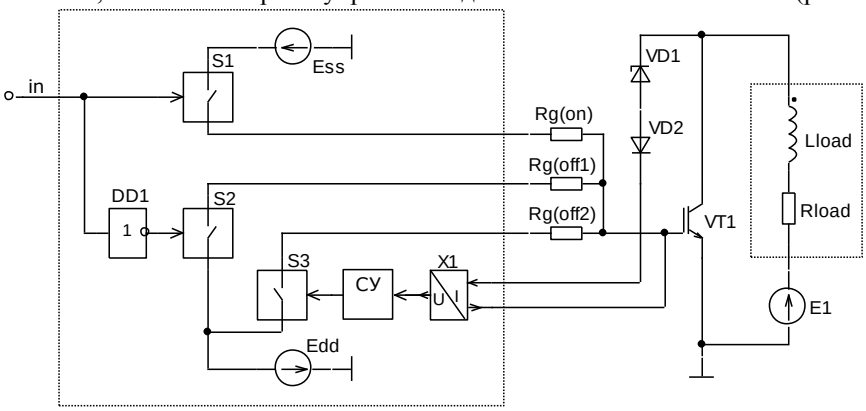


Рис. 5 – Структура силовой части драйвера с изменяемым импедансом при использовании активного демпфирования

Для ограничения тока в снабберной цепи необходимо на время пробоя стабилитрона размыкать ключ S3. При этом ток снабберной цепи будет протекать через ключ S2 и резистор $R_{g(off1)}$ с сопротивлением достаточно большой величины (сотни Ом – единицы кОм). В остальной промежуток времени выключения ключа ток затвора протекает через резистор $R_{g(off2)}$, сопротивлением единицы-десятки Ом.

Предложенная схема ограничения тока стабилитрона не влияет на скорость процессов переключения ключа, однако существенно (в 10 раз и более) снижает среднюю и импульсную мощность, рассеиваемую на снаббере (рис. 6). Это позволяет снизить общие потери и повысить надежность его работы

Анализ работы рассмотренных топологий показывает, что оптимальный выбор импеданса цепи затвора силовых ключей и оптимальный алгоритм управления этим импедансом позволяет существенно повысить надежность работы силовых ключей за счет уменьшения перенапряжения при выключении и снижении динамических потерь при выключении. При разработке схем отечественных драйверов возможность использования переменного импеданса включения и выключения является обязательным условием получения эксплуатационных параметров, отвечающих современным требованиям к подобным устройствам.

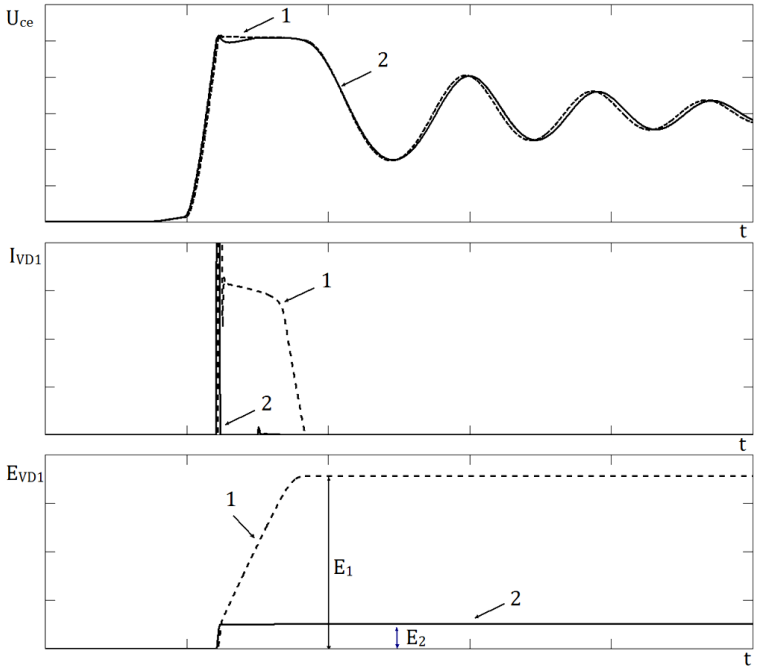


Рис. 6 – Временные диаграммы токов и напряжений схемы без ограничения тока снаббера (1) и с ограничением тока снаббера (2): U_{ce} – напряжение коллектор-эмиттер, I_{VD1} – ток снаббера VD1, E_{VD1} – энергия, рассеиваемая в снаббере за время выключения ключа

Таким образом, драйвер, реализующий сформулированные в этой работе функции, по своим возможностям будет превосходить большинство серийно выпускаемых дайверов зарубежных производителей и способен оказаться конкурентоспособным не только на внутреннем рынке России. Топологии реализации этих функций будут рассмотрены в дальнейших работах.

Список литературы / References

1. Хермвиль М. Управление изолированным затвором IGBT / М. Хермвиль, А. Колпаков // Электронные компоненты. – 2008. – №6. – С. 43–50.

2. Арендт В. Управление изолированными затворами MOSFET/IGBT, базовые принципы и основные схемы / В. Арендт, Н. Ульрих, Р. Тобиас и др. // Силовая электроника. – 2013. – №5 (44). – С. 50–58.

3. Колпаков А. Драйверы MOSFET/IGBT: идеология «ядра» / А. Колпаков // Электронные компоненты. – 2006. – №6. – С. 37–42.

4. Pawel S. Prime (PACK) Time for SCALE-2 / S. Pawel, J. Thalheim, O. Garcia and others // Bodo's Power Systems. – 2008. – № 4. – P. 20–23.

5. Новиков П.В. Драйвер и приёмка «5»: всё ли так просто? [Электронный ресурс] / П.В. Новиков // Официальный интернет-сайт компании ЗАО «Электрум АВ», г. Орел. – URL: http://electrum-av.com/images/stati/drayveri%20i%20priemka%205.pdf (дата обращения: 20.11.2017).

6. Новиков П.В. CT Concept - made in Russia [Электронный ресурс] / П.В. Новиков // Официальный интернет-сайт компании ЗАО «Электрум АВ», г. Орел. – URL: http://electrum-av.com/images/stati/CT%20Concept%20-%20made%20in%20Russia.pdf (дата обращения: 20.11.2017).

7. Амелин С.А. Топологии драйверов силовых ключей с переменным импедансом цепей перезаряда затворной емкости / С.А. Амелин, М.А. Амелина, О.А. Фролков и др. // Вестник Московского энергетического института. –2017. – № 3. – С. 60–66.

8. Новиков П.В. Защита силового транзистора часть 1. Перенапряжение / П.В. Новиков // Силовая электроника. – 2012. – №.4 (37). – С. 10–12.

9. Затулов С.Л. Моделирование переходных режимов работы ограничителя выбросов напряжения, работающего в режиме ограничения мощности / С.Л. Затулов, С.А. Амелин, М.А. Амелина // Практическая силовая электроника. – 2016. – № 1 (61). – С. 52–56.

10. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Амелина М.А., Амелин С.А – Электрон. текстовые дан. – СПб. : Лань, 2014. – 632 с. – Режим доступа: URL http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=53665

11. Крапп Й. Защитные функции современных драйверов IGBT / Й. Крапп // Силовая электроника. – 2010. – №5 (28). – С. 41–44.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Hermvil' M. Upravlenie izolirovannym zatvorom IGBT [Isolated gate control of IGBT transistor] / M. Hermvil', A. Kolpakov // Jelektronnye komponenty [Electronic components]. – 2008. – №6. – P. 43–50. [in Russian]

2. Arendt V. Upravlenie izolirovannymi zatvorami MOSFET/IGBT, bazovye principy i osnovnye shemy [MOSFET/IGBT Isolated Gate Control, Basic Principles and Basic Circuits] / V. Arendt, N. Ul'rih, R. Tobias and others // Silovaja jelektronika [Power electronics]. – 2013. – №5 (44). – P. 50–58. [in Russian]

3. Kolpakov A. Drajvery MOSFET/IGBT: ideologija «jadra» [MOSFET / IGBT Drivers: Core Ideology] / A. Kolpakov // Jelektronnye komponenty [Electronic components]. – 2006. – №6. – P. 37–42. [in Russian]

4. Pawel S. Prime (PACK) Time for SCALE-2 / S. Pawel, J. Thalheim, O. Garcia and others // Bodo's Power Systems. – 2008. – № 4. – P. 20–23.

5. Novikov P.V. Drajver i prijomka «5»: vsjo li tak prosto? [The Driver and acceptance "5": is everything so simple?] [Electronic resource] / P.V. Novikov // Oficial'nyj internet-sajt kompanii ZAO «Jelektrum AV», g. Orel [The official website of the company "Elektrum AV", Orel]. – URL: http://electrum-av.com/images/stati/drayveri%20i%20priemka%205.pdf (accessed: 20.11.2017). [in Russian]

6. Novikov P.V. CT Concept - made in Russia [Electronic resource] / P.V. Novikov // Oficial'nyj internet-sajt kompanii ZAO «Jelektrum AV», g. Orel [The official website of the company "Elektrum AV", Orel]. – URL: http://electrum-av.com/images/stati/CT%20Concept%20-%20made%20in%20Russia.pdf (accessed: 20.11.2017). [in Russian]

7. Amelin S.A. Topologii drajverov silovyh kljuchej s peremennym impedansom cepej perezarjada zatvornoj emkosti [Topology of the power switches drivers with variable impedance of the gate capacitor overcharge circuit] / S.A. Amelin, M.A. Amelina, O.A. Frolkov and others. // Vestnik Moskovskogo jenergeticheskogo instituta [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute]. – 2017. – № 3. – P. 60–66. [in Russian]

8. Novikov P.V. Zashhita silovogo tranzistora chast' 1. Perenaprjazhenie [Protection of power transistor part 1. Overvoltage] / P.V. Novikov // Silovaja jelektronika [Power electronics]. – 2012. – №.4 (37). – P. 10–12. [in Russian]

9. Zatulov S.L. Modelirovanie perehodnyh rezhimov raboty ogranichitelja vybrosov naprjazhenija, rabotajushhego v rezhime ogranichenija moshhnosti [Modeling of transients of the voltage limiter operating in the power limiting mode] / S.L. Zatulov, S.A. Amelin, M.A. Amelina // Prakticheskaja silovaja jelektronika [Practical power electronics]. – 2016. – № 1 (61). – P. 52–56. [in Russian]

10. Amelina M.A., Amelin S.A. Programma shemotehnicheskogo modelirovanija Micro-Cap. Versii 9, 10 [Micro-Cap circuit simulation program. Version 9, 10]. [Electronic resource]: Tutorial / Amelina M.A., Amelin S.A – Jelektron. tekstovye dan. – SPb. : Lan', 2014. – 632 p. – Rezhim dostupa [Access mode]: URL http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=53665 [in Russian]

11. Krapp J. Zashhitnye funkcii sovremennyh drajverov IGBT [Protective functions of modern IGBT drivers] / J. Krapp // Silovaja jelektronika [Power electronics]. – 2010. – №5 (28). – P. 41–44. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.123

Аюпова А.Р.[1], Якупов А.Р.[2], Шабалкина А.А.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-6820-1605, кандидат физико-математических наук,
[2]студент экономико-математического факультета, [3]студент экономико-математического факультета,
Нефтекамский филиал БашГУ,

АУТЕНТИФИКАЦИЯ ПО КЛАВИАТУРНОМУ ПОЧЕРКУ: ВЫГОДЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Аннотация

Аутентификация является одной из самых старых и одновременно актуальных проблем в области информационной безопасности. Уже ставшие догматами правила образования паролей не могут выдержать критику специалистов IT-индустрии. В статье рассматривается возможность устранения части недостатков парольного метода с помощью системы распознания клавиатурного почерка. Клавиатурный почерк относится к динамическим (поведенческим) биометрическим характеристикам, описывающим подсознательные действия, привычные для пользователя. А также подробно рассмотрены достоинства и недостатки данной системы.

Ключевые слова: аутентификация, идентификация, защита информации, клавиатурный почерк, пароль.

Ayupova A.R.[1], Yakupov A.R.[2], Shabalkina A.A.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-6820-1605, PhD in Physics and Mathematics,
[2]Student of the Faculty of Economics and Mathematics, [3]Student of the Faculty of Economics and Mathematics,
Neftekamsk branch of Bashkir State University,

KEYBOARD RHYTHM AUTHENTICATION: BENEFITS AND PROBLEMS OF USE

Abstract

Authentication is one of the oldest and at the same time topical problems in the field of information security. The rules of passwords forming that have already become dogmatic doesn't stand up to scrutiny of the specialists of the IT industry. The paper deals with the possibility of eliminating some of the shortcomings of the password method with the help of a keyboard rhythm recognition system. Keyboard rhythm refers to dynamic (behavioral) biometric characteristics describing subconscious actions, typical for a user. Also the advantages and disadvantages of this system are considered in detail.

Keywords: authentication, identification, information protection, keyboard rhythm, password.

Во время всеобщей информатизации особую важность и значение приобретают задачи защиты информации. Современная защита информации невозможна без процесса проверки подлинности вводимых данных - аутентификации. Широкое распространение получил парольный метод аутентификации, у которого имеется ряд и недостатков [1, С. 119], [4, С. 158]:

Решением части проблем является сочетание пароля и клавиатурного почерка человека. Клавиатурный почерк – это уникальный стиль ввода символов. Стиль ввода определяют: скорость удержания клавиши, время между нажатиями клавиш, особенности ввода сдвоенных или строенных нажатий и т.д. [2, С. 26], [8, С. 50].

Использование клавиатурного почерка дает заметное преимущество для пользователя – упрощенный пароль. Человеку будет достаточно запомнить удобную комбинацию, например, длина пароля может состоять от 4 до 8 символов. Учитывая особенности ввода, угроза хищения пароля злоумышленником становится менее приоритетной, так как скорость ввода может значительно отличаться.

Однако не стоит забывать, что человек никогда не будет вводить пароль абсолютно одинаковым образом. В биометрических методах аутентификации всегда допускается некоторая неточность. Этот недостаток может привести к следующим ошибкам:

- FRR (false rejection rate) – ошибка первого рода – вероятность не допустить в систему зарегистрированного пользователя;
- FAR (false access rate) – ошибка второго рода – вероятность пропустить в систему злоумышленника под видом зарегистрированного пользователя.

Еще одним недостатком является необходимость обучения программы, чтобы она запомнила особенности клавиатурного почерка пользователя и уменьшила вероятность FRR и FAR. Очевидно, что чем больше программа обучается, тем меньше вероятность возникновения ошибок, и тем выше защищенность системы.

Но самая серьезная проблема использования клавиатурного почерка – это сильная зависимость результата от психофизического состояния пользователя. Если человек плохо себя чувствует, он, возможно, не пройдет проверку подлинности, так как его скорость ввода может значительно ухудшиться. Нельзя не обойти и зависимость от опыта пользователя и технических характеристик клавиатуры [3, С. 232].

Не рекомендуются здесь к использованию слишком длинные пароли, так как это ухудшает результаты по причине того, что человек задумывается над вводом, вспоминая комбинацию – в первую очередь изменяется значение параметра времени между нажатиями клавиш. Это объясняется тем, что движения рук при вводе заученного недлинного пароля управляются подсознательным процессом мышления, следовательно, время ввода такого пароля будет примерно одинаковым в разных временных отрезках.

Также не исключено что злоумышленник, используя специальную программу – кейлогер, может выкрасть не только пароль, но и клавиатурный почерк пользователя.

Для проверки возможности реального использования сочетания методов клавиатурного почерка с паролями, была разработана программа «Клавиатурный почерк» (рис.1). Данная программа способна измерить основные показатели, такие как скорость ввода, время между нажатиями клавиш, время удержания клавиш, а также их средние значения для сравнения «выученного» пароля с вновь введенным. Дополнительно, для проверки метода клавиатурного почерка, предполагается, что злоумышленник знает пароль, но пытается обойти защиту и проникнуть в систему.

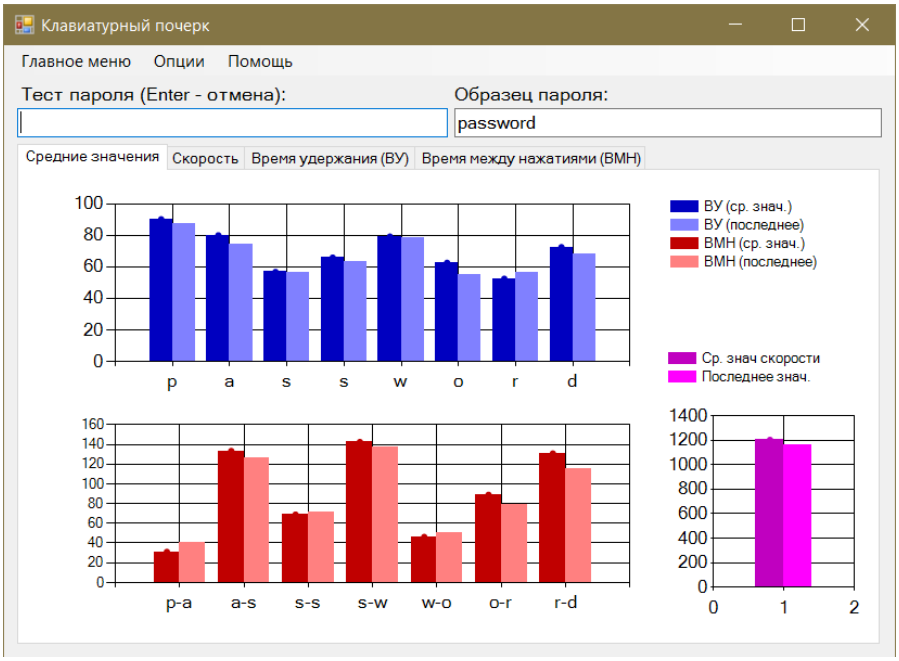


Рис. 1 – Интерфейс программы

В данной программе присутствуют основные элементы клавиатурного почерка:

- образец пароля;
- тест пароля;
- область для отображения информации;
- средние значения отображают показатели ввода пароля, усредненные по нескольким попыткам;
- скорость ввода пароля от начала до завершения;
- время удержания отображает таблицу, в которой указано время в миллисекундах (мс) для каждой клавиши с момента нажатия до момента отпускания кнопки.

Время между нажатиями отображает таблицу, в которой указано время в миллисекундах (мс), прошедшее с момента отпускания предыдущей кнопки до момента нажатия следующей.

В программе использованы методы подсчета дисперсии для определения разброса значений времени нажатия клавиш, нахождения медианы для определения «эталонных» показателей и среднего значения основных показателей.

Для начала пользователь должен ввести образец пароля. Далее необходимо несколько раз ввести пароль в поле «Тест пароля». Таким образом программа запомнит почерк владельца пароля.

Далее необходимо переключить режим в пункте Настройки > Сменить режим. Теперь, если вводить пароль в поле «Тест пароля», программа сверит уже имеющийся почерк его владельца с почерком ввода пользователя в этом режиме. На графике можно увидеть красные или зеленые точки на вершине каждого параметра, сопоставленные друг с другом. Красная точка обозначает, что данный параметр отличается от уже имеющегося в памяти почерка, а зеленые показывают совпадения.

Стоит заметить, что алгоритм допускает некую погрешность, которая вычисляется после нескольких пробных вводов владельцем. Чем большее количество раз пользователь вводил свой пароль, тем лучше его почерк запомнит программа и тем меньше будут погрешности.

На рисунке 2 можно увидеть пример того, что владелец пароля прошел аутентификацию, имея лишь несоответствие во времени удержания клавиш «w», «o» и «r» (рис.2).

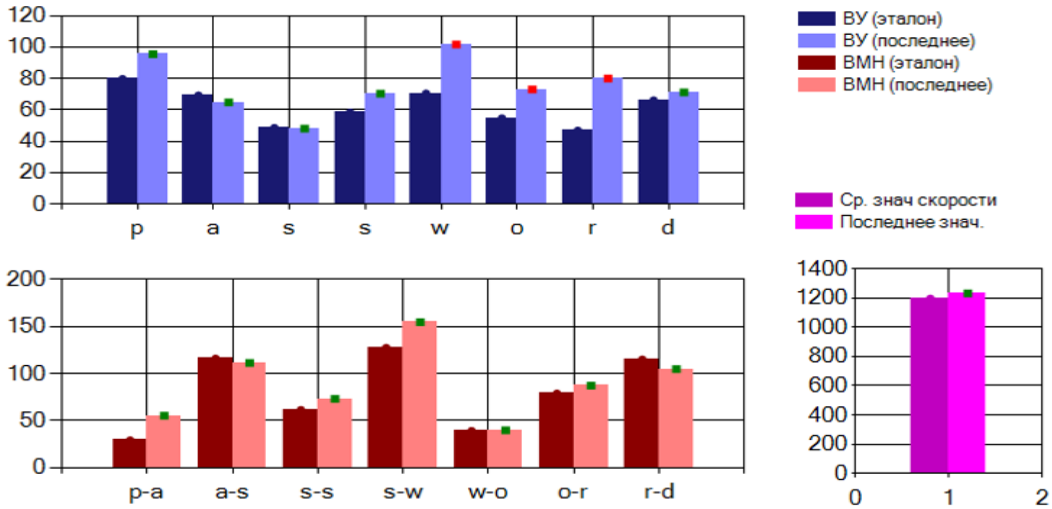


Рис. 2 – Владелец пароля прошел проверку

На рисунке 3 представлен результат попытки аутентификации другим человеком (рис. 3). Ему не удалось повторить почерк владельца, результаты показателей очень сильно отличаются. В частности, есть значительные отличия в средних значениях скорости, и времени нажатия клавиш.

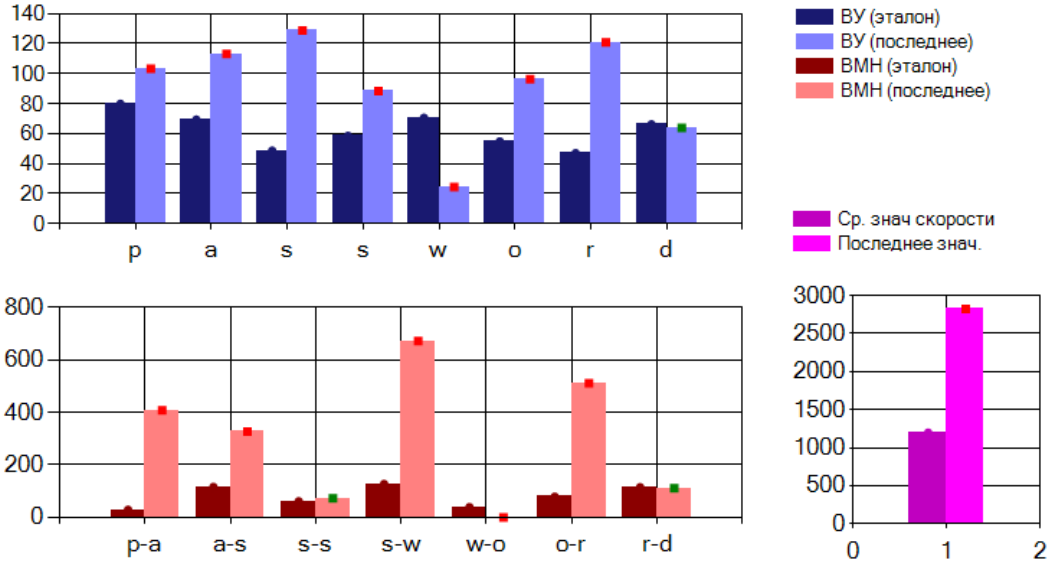


Рис. 3 – Другой человек не смог повторить почерк владельца

При статистической обработке результатов апробации программы были выявлены следующие недочеты: ошибки I и II рода. В некоторых случаях темп ввода пароля пользователя совпадал с темпом злоумышленника, а также были выявлены недочеты в случае изменения состояния, смены клавиатуры испытуемого.

Существующие программные реализации методов распознавания клавиатурного почерка характеризуются недостаточной достоверностью идентификации и аутентификации и высокой вероятностью возникновения ошибок первого и второго

Существуют и другие аналоги программной реализации клавиатурного почерка. Например, авторская программа Игоря Агурьянова, которая способна сравнивать показатели нажатий одного пользователя в зависимости от состояния человека и смены клавиатуры. Но данная программа не предназначена для аутентификации, так как сравнение показателей в вышеупомянутой программе происходит исключительно для одного пользователя. Таким образом, «Клавиатурный почерк» имеет более расширенный функционал.

В дальнейшем планируется доработка программы «Клавиатурный почерк»: улучшение алгоритма распознавания, повышение точности таймера.

Клавиатурный почерк, как утверждают специалисты по безопасности, представляет собой огромное поле для дальнейших исследований. И не смотря на угрозу полной деанонимизации, нельзя не признать, что в качестве инструмента защиты эта технология невероятно эффективна.

Список литературы / References

1. Сарбуков А. Е. Аутентификация в компьютерных системах / А.Е. Сарбуков, А.А. Грушко // Системы безопасности. – 2003. – № 5(53). – С. 118–122.

2. Задорожный В. Обзор биометрических технологий / В.Задорожный // Защита информации. Конфидент. – 2003. – № 5. – С. 26–29.

3. Довгаль В.А. Захват параметров клавиатурного почерка и его особенности /А.В. Довгаль // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Информационные системы и технологии в моделировании и управлении». – Изд-во Типограф. «Ариал», 2017.–С.230-236.

4.Калужин А.С. Подтверждение личности пользователя по его клавиатурному подчерку /А.С. Калужин, Д.Д. Рудер // Известия Алтайского государственного университета. – 2015. – Т. 1. – №85. – С. 158-162.

5.Брюхомицкий Ю.А. Гистограммный метод распознавания клавиатурного подчерка / Ю.А. Брюхомицкий // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. – Т. 11. – №112. – С. 55-62.

6.Мазниченко Н.И. Анализ возможностей систем автоматической идентификации клавиатурного подчерка / Н.И. Мазниченко, М.В. Гвозденко // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование. – 2008. – №24. – С. 77-81.

7.Сидоркина И.Г. Три алгоритма управления доступом к КСИИ на основе распознавания клавиатурного подчерка оператора / И.Г. Сидоркина, А.Н. Савинов // Вестник Чувашского университета. – 2013. – Т.3. – №3. – С. 239-301.

8.Еременко А.В. Двухфакторная аутентификация пользователей компьютерных систем на удаленном сервере по клавиатурному почерку / А.В. Еременко, А.Е. Сулавко // Прикладная информатика. – 2015. – Т. 6. – №60. – С. 48-59.

9.Довгаль В.А. Обзор характеристик производительности наборов данных, используемых для обеспечения информационной безопасности на основе клавиатурного почерка / В.А. Довгаль // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2016. – Т. 4. – №191. – С. 157-163.

10.Мартынова Л.Е. Исследование и сравнительный анализ методов аутентификации / Л.Е. Мартынова, М.Ю. Умницын, К.Е. Назарова и др.// Молодой ученый. – 2016. –№ 19 (123). – С. 90-93.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sarbukov A. E. Autentifikaciya v kompyuternih sistemah [Authentication in computer systems] / A. E. Sarbukov, A. A. Grusho// Sistemi bezopasnosti [Security]. – 2003. – № 5(53). – P.118–122. [in Russian]

2. Zadorojnii V. Obzor biometricheskih tehnologii [An overview of biometric technologies] / V.Zadorojnii // Zaschita informacii. Konfident. [Protection of information. Confidant]– 2003. – № 5. – P. 26–29. [in Russian]

3. Dovgal V.A. Zahvat parametrov klaviaturnogo pocherka i ego osobennosti [Capture settings of the keyboard handwriting and its peculiarities] /A.V. Dovgal // Materiali vserossiiskoi nauchno_prakticheskoi konferencii «Informacionnie sistemi i tehnologii v modelirovanii i upravlenii»[Materials of all-Russian scientific-practical conference "Informational systems and technologies in modeling and control"]. –Izd-vo Tipograf. «Arial», 2017.–P. 230–236. [in Russian]

4. Kaluzhin A.S. Podtverzhdenie lichnosti pol'zovatelya po ego klaviaturnomu podcherku [Proof of identity of the user keyboard podderku] /A.S. Kaluzhin, D.D. Ruder // Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta [News of Altai state University]. – 2015. – T. 1. – № 85. – P.158-162. [in Russian]

5.Bryuhomickij YU.A. Gistogrammnyj metod raspoznavaniya klaviaturnogo podcherka [Histogram method of keyboard handwriting recognition] / YU.A. Bryuhomickij // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [News of southern Federal University. Technical Sciences]. – 2010. – T. 11. – №112. – P. 55-62. [in Russian]

6.Maznichenko N.I. Analiz vozmozhnostej sistem avtomaticheskoj identifikacii klaviaturnogo podcherka [The analysis of possibilities of automatic identification systems keyboard handwriting] / N.I. Maznichenko, M.V. Gvozdenko // Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Har'kovskij politekhnicheskij institut. Seriya: Informatika i modelirovanie [Bulletin of National technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Series: information science and modelling]. – 2008. – № 24. – P. 77–81. [in Russian]

7. Sidorkina I.G. Tri algoritma upravleniya dostupom k KSII na osnove raspoznavaniya klaviaturnogo podcherka operatora [Three algorithms control access to the FIAC on the basis of the handwriting recognition keyboard operator] / I.G. Sidorkina, A.N. Savinov // Vestnik Chuvashskogo universiteta [Bulletin of the Chuvash University]. – 2013. – T.3. – №3. – P. 239–301. [in Russian]

8.Eremenko A.V. Dvuhfaktornaya autentifikaciya pol'zovatelej komp'yuternyh sistem na udalennom servere po klaviaturnomu pocherku [Two-factor authentication of users of computer systems on the remote server for keyboard handwriting] / A.V.Eremenko, A.E. Sulavko // Prikladnaya informatika [Applied Informatics]. – 2015. – T. 6. – № 60. – P. 48–59. [in Russian]

9.Dovgal' V.A. Obzor harakteristik proizvoditel'nosti naborov dannyh, ispol'zuemyh dlya obespecheniya informacionnoj bezopasnosti na osnove klaviaturnogo pocherka [An overview of the performance characteristics of data sets used for information security on the basis of keyboard handwriting] / V.A. Dovgal' // Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki [The Bulletin of Adyghe state University. Series 4: Natural-mathematical and technical Sciences]. – 2016. – T. 4. – № 191. – P. 157-163. [in Russian]

10.Martynova L.E.. Issledovanie i sravnitel'nyj analiz metodov autentifikacii [A study and comparative analysis of authentication methods] / L.E. Martynova, M.YU. Umnicyn, K.E. Nazarova i dr. // Molodoj uchenyj [Young scientist]. – 2016. № 19 (123). – P. 90-93. [in Russian]

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
Science Index

*Мы настоятельно рекомендуем всем нашим авторам зарегистрироваться в системе **Science Index РИНЦ.***

Таким образом, авторы могут более детально контролировать список своих публикаций, не только в нашем журнале, но и во всех научных изданиях, входящих в РИНЦ. Регистрация в системе также позволит узнать индекс научного цитирования автора и его публикаций.

*Подробную инструкцию по регистрации в системе Science Index РИНЦ Вы можете найти на нашем сайте **http://research-journal.org/** в разделе «Полезно знать».*

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.144

Богданов И.А.[1], Веприков А.А.[2], Касьянова А.Н.[3], Моренов В.А.[4]
[1,3]Аспирант, [2]Инженер кафедры электроэнергетики и электромеханики, [4]Ассистент,
Санкт-Петербургский горный университет.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы повышения энергоэффективности комплексов электрогенерации для энергоснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса. Предложена структура когенерационной установки с синхронизацией параметров вырабатываемой электрической энергии параллельно работающих электрогенерирующих установок для осуществления эффективного электроснабжения. Применение предложенного комплекса позволяет наиболее эффективно использовать потенциал первичного энергоносителя, снижая стоимость электрической и тепловой энергии.

Ключевые слова: электроснабжение, активный выпрямитель напряжения, нефтегазопромысел, микротурбинные агрегаты.

Bogdanov I.A.[1], Veprikov A.A.[2], Kasyanova A.N.[3], Morenov V.A.[4]
[1,3] Postgraduate student, [2] Engineer of the Department of Electricity and Electromechanics, [4] Assistant,
St. Petersburg Mining University

INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES OF COGENERATION PLANTS FOR POWER SUPPLY OF OBJECTS OF OIL AND GAS ENTERPRISES

Abstract

The article considers the issues of increasing the energy efficiency of power generation complexes for power supply to enterprises of the mineral and raw materials complex. The structure of the cogeneration unit is proposed with synchronization of the parameters of generated electrical energy in parallel operating electric generating units for the implementation of efficient power supply. The application of the proposed complex allows the most efficient use of the potential of the primary energy carrier, reducing the cost of electrical and thermal energy.

Keywords: power supply, active voltage rectifier, oil and gas industry, microturbine units.

При разработке нефтегазовых месторождений в качестве первичного энергоносителя используется природный или попутный газ. Повышение использования энергии достигается в когенерационных комплексах, осуществляющих генерацию электрической и тепловой энергии. Степень полноты использования первичного энергоносителя для генерации электрической энергии составляет до 35 %, для генерации тепловой энергии до 55 %. Однако, полезное использование тепловой энергии встречает значительные трудности благодаря сезонному характеру ее потребления в зависимости от времени года и времени суток [12]. Для повышения эффективности когенерационных установок используется бинарный цикл, в котором энергия выхлопных газов используется для генерации дополнительного количества электрической энергии. Применение когенерационных систем с бинарным циклом является одним из перспективных средств повышения рентабельности электроэнергии в условиях роста цен на первичный энергоноситель [3].

Когенерационная установка с бинарным циклом для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий включает два генератора: основную (ОЭУ) и вспомогательную электроустановки (ВЭУ). В качестве ОЭУ в условиях нефтегазовых предприятий целесообразно использовать микрогазотурбинную электроустановку, в качестве ВЭУ – паротурбинную установку. Уровень параметров выхлопных газов для привода паровой турбины, при которых имеет место эффективная работа ВЭУ, обеспечивается с помощью дополнительного контура с промежуточной низкокипящей рабочей средой [12].

При отсутствии необходимости в дополнительной электроэнергии, генерируемой ВЭУ, но когда существует потребность в тепловой энергии, например в зимнее время, тепло выхлопных газов и системы охлаждения ОЭУ используется в теплообменнике для нагрева теплоносителя [5].

Рассмотрим возможности реализации режима максимального отбора мощности при параллельной работе ОЭУ и ВЭУ, при котором обеспечиваются полнота использования энергии первичного энергоносителя до 90 %, качество электрической энергии в соответствии с требованиями ГОСТ и количество генерируемой электроэнергии в зависимости от сезонности и параметров графиков нагрузок потребителей [1, С.36-40], [2, С.23-26], [11]. В качестве основной электрогенерирующей установки принят применяемый на нефтегазовых предприятиях микрогазотурбинный электроагрегат Capstone C600, представляющий собой синхронный генератор на постоянных магнитах, ВЭУ – паротурбинный электроагрегат Calnetix WHG125. Основные параметры представленных выше ОЭУ и ВЭУ приведены в таблице 1 [6, С.4], [7, С.282-286]. ВЭУ включается в работу, если электроэнергии генерируемой основной установкой недостаточно для текущих потребностей нагрузки. Вследствие этого система в дальнейшем рассматривается в режиме максимальной генерируемой мощности ОЭУ.

Таблица 1 – Основные характеристики генераторных установок

Основная электрогенерирующая установка	
Максимальная полезная электрическая мощность	600 кВт
Максимальное действующее значение генерируемого напряжения	173 В
Частота вырабатываемого тока	1000 Гц
Скорость вращения турбины, об./мин.	60000
Вспомогательная электрогенерирующая установка	
Максимальная полезная электрическая мощность	125 кВт
Максимальное действующее значение генерируемого напряжения	77 В
Частота вырабатываемого тока	450 Гц

При работе на общую сеть в режиме когенерации возникает необходимость осуществления параллельной работы источников с условно нерегулируемой производимой мощностью [8, С.49] при которой достигается максимальная передача электрической энергии с частотой 50 Гц в нагрузку. Из-за различия частот генерируемых токов и величин выходных напряжений, требуется обеспечить преобразование параметров электроэнергии, генерируемой каждой установкой, для её эффективной передачи в нагрузку. Функциональная схема электротехнической части когенерационной установки с бинарным циклом приведена на рисунке 1.

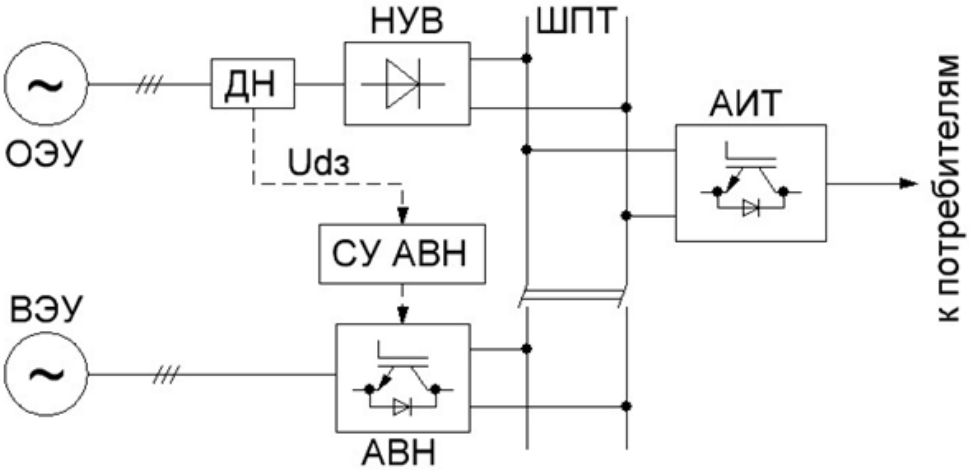


Рис. 1 – Функциональная схема электротехнической части когенерационной установки

ОЭУ питает шины постоянного тока (ШПТ) через неуправляемый выпрямитель (НУВ). Для согласования напряжения на выходе ВЭУ с напряжением ШПТ используется повышающий активный преобразователь по схеме активного выпрямителя напряжения (АВН). От ШПТ получает питание автономный инвертор тока (АИТ), осуществляющий электроснабжение потребителей напряжением 220 В с частотой 50 Гц.

В зависимости от параметров питающего источника и коэффициента модуляции m, напряжение на выходе трёхфазного АВН выражается как:

$$U_d = \frac{\frac{3}{4} m U_1 \frac{R_\varphi}{R_д^2 + X^2}\left(R_д \cos\varphi_m - X \sin\varphi_m\right)}{1 + \frac{3}{8} m^2 \frac{R_д R_\varphi}{R_д^2 + X^2}}, \quad (1)$$

где U_1 – сетевое фазное напряжение, В; R_φ – активное сопротивление, эквивалентное мощности нагрузки, Ом; $R_д$ и X – активное и реактивное сопротивления входного дросселя соответственно, Ом; φ_m – *фаза напряжения модуляции по отношению к напряжению сети, рад [9].*

Коэффициент модуляции выбирается системой управления таким образом, чтобы обеспечить равенство напряжений на выходе НУВ и АВН и исключить протекание уравнительных токов, обеспечивая эффективную передачу энергии в нагрузку. Напряжение на выходе НУВ с учётом коммутационных потерь [10, С.70] определяется из выражения:

$$U_{d1} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_1 - \frac{3X_1}{\pi} I_{d1}, \quad (2)$$

где X_1 – индуктивность коммутационного контура, Ом; I_{d1} – выходной ток НУВ, А. В случае отклонений скорости вращения ОЭУ или колебаний нагрузки величина напряжения на выходе НУВ будет изменяться, АВН скорректирует своё выходное напряжение, опираясь на заданную величину, равную U_{d1}.

Для оценки эффективности работы установки с бинарным циклом разработана компьютерная модель в среде Matlab Simulink (рисунок 2). Блоки Main Generator и Auxilary Generator имитируют ОЭУ и ВЭУ, в ходе моделирования

напряжение на ОЭУ изменялось в пределах 153-173 В. Сопротивление коммутационного контура между ОЭУ и силовым НУВ моделируется блоком Line1, блок (Line2 + Inductor) также учитывает импеданс входных дросселей АВН. Система управления (СУ) АВН с коррекцией коэффициента мощности и плавающим заданием по напряжению реализована по векторному алгоритму в блоке Control System. Блок Uz вычисляет U_{dz}, опираясь на выражение (2). Для проверки эффективности передачи электроэнергии в нагрузку использовалась активно-индуктивная нагрузка Load в звене постоянного тока. В ходе моделирования силовые ключи рассматривались как идеальные элементы (без потерь активной мощности на их внутреннем сопротивлении), а выходное напряжение обоих генераторов принималось симметричным.

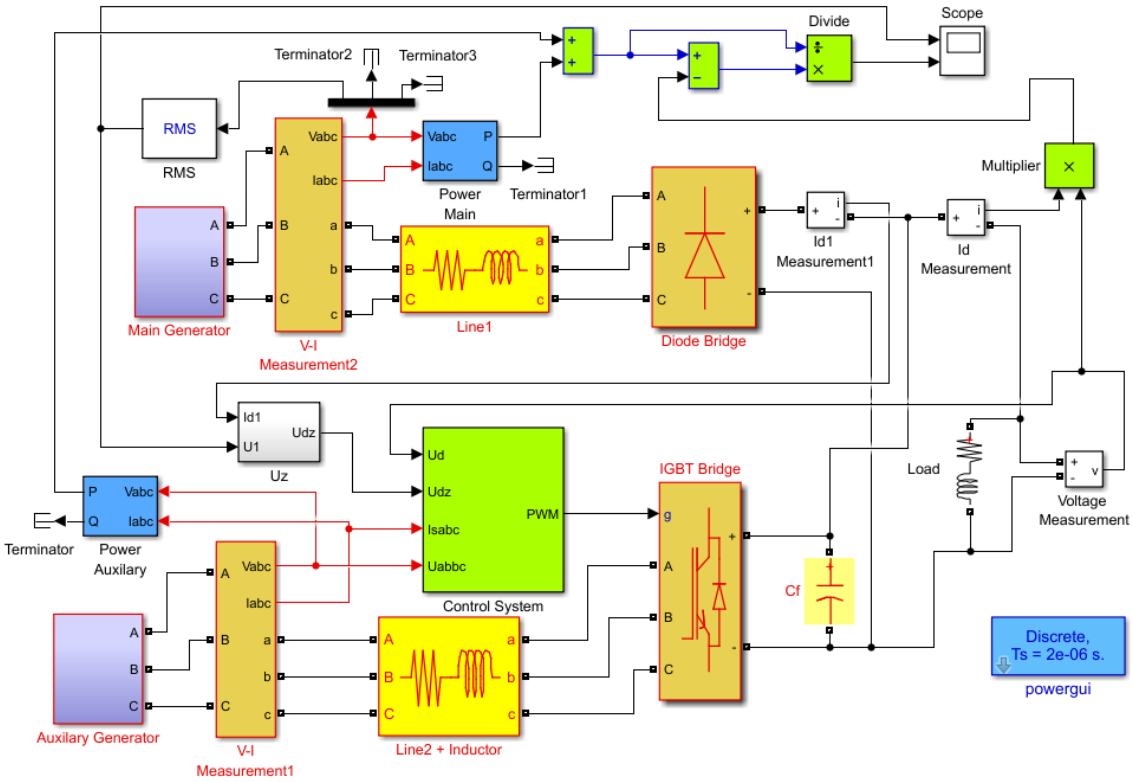


Рис. 2 – Модель когенерационного электротехнического комплекса в среде Matlab Simulink

На вход блока Scope поступает величина относительных потерь η полезной мощности когенерационного комлекса, вызванных работой ЭДС ОЭУ и ВЭУ на внутреннее сопротивление друг друга:

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{ОЭУ}} + P_{\text{ВЭУ}}}, \tag{3}$$

здесь $P_{\text{ОЭУ}}$ и $P_{\text{ВЭУ}}$ – полезная (активная) мощность, генерируемая ОЭУ и ВЭУ соответственно, кВт; $P_{\text{Н}}$ – активная мощность, потребляемая нагрузкой, кВт.

Из приведённых на рисунке 3 графиков видно, что эта величина увеличивается во время колебаний выходного напряжения ОЭУ, что обусловлено инерционностью СУ АВН. Однако даже во время переходных процессов эффективность системы составляет не менее 98 % с учётом потерь в соединительных токопроводах и элементах преобразователя.

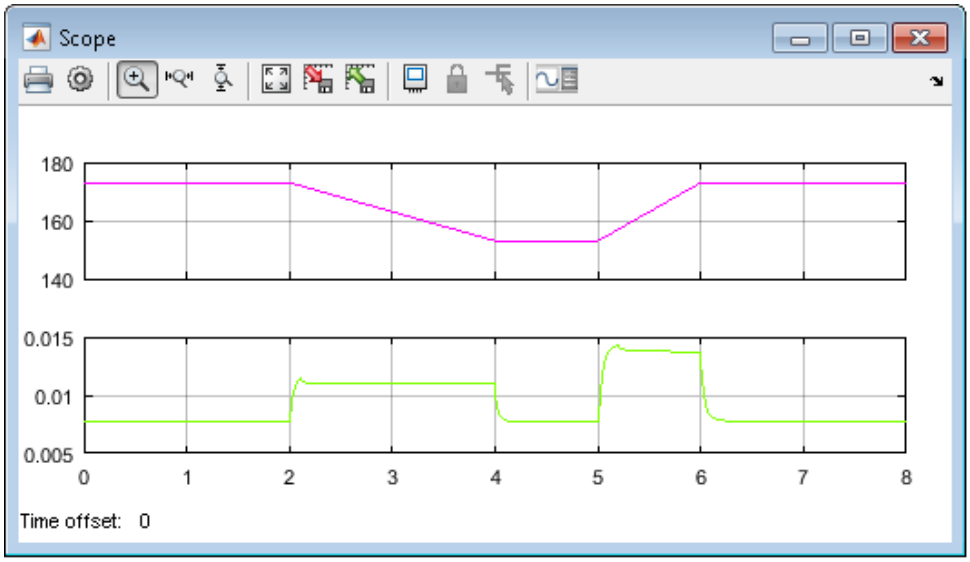


Рис. 3 – Напряжение на выходе ОЭУ и снижение выходной активной мощности в когенерационном комплексе

Проверка обоснованности результатов моделирования параллельной работы ОЭУ и ВЭУ проводилась в промышленных условиях с использованием активных пребразователей, реализованных на IGBT типа SK 15 GB 063 компании Semikron. В результате исследований выявлено, что использование активного повышающего выпрямителя для балансировки выпрямленных напряжений электрогенерирующих установок, позволит максимально эффективно использовать потенциал первичного энергоносителя. Таким образом, электротехнический когенерационный комплекс с бинарным циклом позволяет осуществлять эффективное питание нагрузки при снижениях напряжения ОЭУ в пределах до 12 % от номинального и обеспечивает высокое качество электроэнергии в соответствии с требованиями ГОСТ [11].

Список литературы / References

1. Абрамович Б.Н. Комбинированная энергетическая установка для энергоснабжения горных предприятий / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Моренов В.А. // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. № 4 (122). С. 36-40.

2. Абрамович Б.Н., Гульков Ю.В., Волошкин М.М. Электромагнит-ная совместимость оборудования на предприятиях по транспортировке и пе-реработке нефти и газа при наличии источников высших гармоник // Энерге-тика в нефтегазодобыче. – №1-2, 2005, С.23-26.

3. Забарный Г.Н. Использование бинарных установок для производства электроэнергии / Забарный Г.Н., Шурчков А.В., Горохов М.И., Здор В.А. - ИТТ НАН Украины. – Киев, 2003. – 50 с.

4. Абрамович Б.Н. Электропривод и электроснабжение горных предприятий: Учебное пособие / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов - Санкт-Петербургский государственный горный институт. СПб, 2004. 84 с.

5. Абрамович Б.Н. Электроснабжение нефтегазовых предприятий: Учебное пособие / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов - Санкт-Петербургский государственный горный институт. СПб, 2008. 88 с.

6. Capstone microturbines product catalog, P0212 CAP115, 2010 Capstone Turbine Corporation. – P.4.

7. Пастухов О.В. Повышение эффективности работы астраханской парогазовой установки 110 МВт / О.В. Пастухов // Электроэнергетика глазами молодежи. – Новочеркасск, С.282-286

8. Момот Б.А. Снижение влияния частотно регулируемого привода переменного тока на качество электрической энергии в сетях с автономным источником : дис. канд. тех. наук: 05.09.03: защищена 27.06.14: утв.15.11.14 / Момот Борис Александрович. – Санкт–Петербург, 2014. – 151 с.

9. Герман-Галкин С.Г. ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB–Simulink. Урок 15. Исследование однофазного активного выпрямителя // Силовая электроника. 2012. № 4.

10. Мартынов А.А. Силовая электроника. Ч.I: Выпрямители и регуляторы переменного напряжения: Учебное пособие / А. А. Мартынов. – СПб.: ГУАП, 2011. – 184 с.

11. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

12. Моренов В.А., Полищук В.В., Касьянова А.Н. Когенерационная установка с бинарным циклом для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий // Естественные и технические науки. – 2015. - №5. – С.102-105.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Abramovich B.N., Kombinirovannaja jenergeticheskaja ustanovka dlja jenergosnabzhenija gornyh predprijatij [Combined power plant for power supply of mining enterprises] /Abramovich B.N., Sychev Ju.A., Morenov V.A. // Gornoe oborudovanie i jelektromehanika. 2016. № 4 (122). P. 36-40. [in Russian]

2. Abramovich B.N., Gul'kov Ju.V., Voloshkin M.M. Jelektromagnitnaja sov-mestimost' oborudovanija na predprijatijah po transportirovke i pe-rerabotke nefti i gaza pri nalichii istochnikov vysshih garmonik [Electromagnetic compatibility of equipment at oil and gas transportation and refining enterprises in the presence of sources of higher harmonics] // Jenergetika v neftegazodobyche, №1-2, 2005, p. 23-26. [in Russian]

3. Zabarnyj G.N. Ispol'zovanie binarnyh ustanovok dlja proizvodstva jelektrojenergii [The use of binary plants for the production of electricity] / Zabarnyj G.N., Shurchkov A.V., Gorohov M.I., Zdor V.A. - ITT NAN Ukrainy. – Kiev, 2003. – 50 p. [in Russian]

4. Abramovich B.N. Jelektroprivod i jelektrosnabzhenie gornyh predprijatij: Uchebnoe posobie [Electric drive and power supply of mining enterprises: Textbook] / B.N. Abramovich, D.A. Ustinov - Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj gornyj institut. SPb, 2004. 84 p. [in Russian]

5. Abramovich B.N. Jelektrosnabzhenie neftegazovyh predprijatij: Uchebnoe posobie [Power supply of oil and gas enterprises: Textbook] / B.N. Abramovich Ju.A., Sychev D.A. Ustinov - Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj gornyj institut. SPb, 2008. 88 p. [in Russian]

6. Capstone microturbines product catalog, P0212 CAP115, 2010 Cap-stone Turbine Corporation. – R.4.

7. Pastuhov O.V. Povyshenie jeffektivnosti raboty astrahanskoj parogazovoj ustanovki 110 MVt [Increase of efficiency of work of the Astrakhan combined-cycle plant 110 MW] / O.V. Pastuhov // Jelektrojenergetika glazami molodezhi, Novocherkassk, P. 282-286. [in Russian]

8. Momot B.A. Boris Snizhenie vlijanija chastotno reguliruemogo privoda peremennogo toka na kachestvo jelektricheskoj jenergii v setjah s avtonomnym istochnikom [Reducing the influence of a frequency-controlled AC drive on the quality of electrical energy in grids with autonomous power source]: dis. kand. teh. nauk: 05.09.03: zashhishhena 27.06.14; utv. 15.11.14 / Momot Boris Aleksandrovich. – Sankt–Peterburg, 2014. – 151 p. [in Russian]

9. German-Galkin S.G. Shkola MATLAB. Virtual'nye laboratorii ustrojstv silovoj jelektroniki v srede MATLAB–Simulink. Urok 15. Issledovanie odnofaznogo aktivnogo vyprjamitelja [Virtual laboratories of power electronic devices in the MATLAB–Simulink environment. Lesson 15. Research of single-phase active rectifier] // Silovaja jelektronika. 2012. № 4. [in Russian]

10. Martynov A.A. Silovaja jelektronika. Ch.I: Vyprjamiteli i reguljatory peremennogo naprjazhenija: Uchebnoe posobie [Power electronics. Part I: Rectifiers and AC Voltage Regulators: A Study Manual] / A.A. Martynov. – SPb.: GUAP, 2011. – 184 p. [in Russian]

11. GOST 32144-2013. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnicheskih sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoj jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. [Electrical energy. Electromagnetic compability of technical equipment. Power quality requirements for general power grids] – M.: Standartinform, 2012. – 20 p. [in Russian]

12. Morenov V.A., Polishchuk V.V., Kasyanova A.N. Kogeneracionnaya ustanovka s binarnym ciklom dlya-ehlektrosnabzheniya obektov neftegazovyh predpriyatij [Cogeneration plant with binary cycle for power supply of oil and gas enterprises] / Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical sciences]. – 2015 – №5 – 102-105 P. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.017

Бурова Т.Е.
ORCID: 0000-0001-5400-155X, кандидат технических наук,
Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого,
Высшая школа биотехнологии и пищевых технологий

РАСШИРЕНИЕ АССОРТИМЕНТА СОУСОВ К ЗАМОРОЖЕННЫМ ГОТОВЫМ БЛЮДАМ

Аннотация

Проведено исследование физико-химических показателей молочной сыворотки, кукурузной и овсяной муки. Подобраны количества вносимой кукурузной и овсяной муки на основании исследования реологических характеристик 4 %-ных крахмальных суспензий и соусов-основ. Изготовлены и исследованы томатные соусы по органолептическим и реологическим характеристикам до замораживания и после хранения в замороженном состоянии. Установлено, что на такие органолептические показатели соусов как цвет, вкус, аромат замораживание, хранение в замороженном состоянии и размораживание влияния не оказало. Зафиксировано отсутствие расслоения соусов после размораживания. Показаны перспективы применения молочной сыворотки, кукурузной и овсяной муки при изготовлении соусов для замороженных готовых блюд.

Ключевые слова: соус, молочная сыворотка, кукурузная и овсяная мука, замораживание, качество.

Burova T.E.
ORCID: 0000-0001-5400-155X, PhD in Engineering,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
High School of Biotechnology and Food Technology

SAUCES PRODUCT-LINE EXPANSION FOR FROZEN READY DISHES

Abstract

The study of physical and chemical parameters of milk whey, corn and oat flour is carried out. The quantities of corn and oat flours introduced are made on the basis of the investigation of the rheological characteristics of 4% starch suspensions and base sauces. Tomato sauces are prepared and examined for organoleptic and rheological characteristics before freezing and after storage in a frozen state. It is established that such sensory parameters of sauces as color, taste, aroma freezing, storage in the frozen state and defrosting had no effect. The absence of stratification of sauces after defrosting is fixed. The perspectives of using milk whey, corn and oat flour for sauces for frozen ready meals are shown.

Keywords: sauce, milk whey, corn and oat flour, freezing, quality.

В последнее время производство замороженных готовых блюд выходит на передовые позиции и является даже более перспективным, чем изготовление замороженных полуфабрикатов. Преимущество замороженных готовых блюд заключается в том, что в его состав входят мясная (птица, рыба) часть, гарнир и соус. Такое блюдо требует только разогрева, после которого оно готово к употреблению.

Разнообразия замороженных готовых блюд можно добиться расширением ассортимента соусов. От соуса зависит не только внешний вид, но и питательность пищи.

Основное значение при создании новых композиций соусов имеют выбор и обоснование рецептурных ингредиентов, формирующих новые свойства разрабатываемых изделий.

В качестве жидкой основы чаще всего используются мясные бульоны, которые получают в результате длительной варки костей. Высокая энергоемкость процесса приготовления бульонов заставляет искать им альтернативную и менее затратную жидкую основу. Как альтернативу можно рассматривать молочную сыворотку (МС), обладающую высокой биологической ценностью и низкой калорийностью и придающую продуктам лечебно-профилактические свойства. Кроме того, использование МС в технологии соусов позволяет решить проблему использования вторичных ресурсов молочного производства [1, С. 172].

Замораживание и хранение в замороженном состоянии отрицательно сказываются на качестве соусов, которые при размораживании имеют тенденцию к расслаиванию. Поэтому необходимо разработать технологические рекомендации, позволяющие устранить этот недостаток. Все соусы к замороженным готовым блюдам изготавливают с внесением загустителей, которые препятствуют расслоению соусов после размораживания. Традиционно в качестве загустителя используется пассерованная пшеничная мука [2, С. 65]. В качестве альтернативы предлагается использовать безглютеновые виды муки – рисовую, кукурузную, соевую, не требующие пассерования, что позволяет расширить ассортимент овощных соусов, получить продукт со специфическим вкусом, улучшить консистенцию продукта, повысить содержание сухих веществ в готовом продукте, а также занять долю рынка в связи с возрастающим интересом населения к здоровому питанию. Известно, что мука из зерна крупяных культур (риса, гречихи, проса, овса, ячменя и др.) обладает более ценными физиолого-биохимическими свойствами по сравнению с мукой из традиционных хлебных культур. Мука зерновых культур богата содержанием наиболее ценных природных

компонентов, в том числе аминокислот, отдельных витаминов, микроэлементов (кальция, фосфора, железа, йода), а также β-глюкана, снижающего уровень холестерина в крови [3, С. 47].

Для повышения пищевой ценности используют основу из растительных продуктов, в частности из овощей, ягод, фруктов, бобовых. Чаще всего используются пассерованные овощи [4, С. 212].

Цель работы заключалась в разработке технологии изготовления пригодных для замораживания томатных соусов на базе молочной сыворотки в качестве жидкой основы, кукурузной и овсяной муки в качестве загустителя.

Для осуществления поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

− провести исследование МС промышленного производства по физико-химическим показателям;

− провести исследование кукурузной и овсяной муки по физико-химическим показателям;

− провести исследование 4 %-ных крахмальных суспензий и соусов-основ для установления количества вносимого загустителя;

− предложить рецептуры томатных соусов;

− изготовить томатные соусы согласно предложенным рецептурам и оценить их по органолептическим (внешний вид и консистенция, вкус и аромат, цвет) и реологическим показателям;

− осуществить цикл «замораживание-размораживание» соусов и проанализировать их по тем же показателям;

− дать рекомендации относительно возможности замораживания томатных соусов на молочной сыворотке с внесением кукурузной либо овсяной муки в качестве загустителя.

В работе использовали молочную сыворотку пастеризованную промышленного производства «Зеленый берег». Изготовитель ЗАО ПХ «Красноозерное» 188754, Россия, Ленинградская обл., Приозерский район, дер. Красноозерное, ул. Центральная, 13. Выработана по ТУ 9225-002-7985009-08.

При исследовании химического состава молочной сыворотки «Зеленый берег» получены следующие результаты:

Таблица 1 – Химический состав молочной продукции «Зеленый берег»

Жир	0,07 %
Белок	2,69 %
Лактоза	3,97 %
Соли	0,63 %
Титруемая кислотность (на молочную кислоту)	0,67 %
Содержание сухих веществ	6,20 %
pH	4,67
Плотность	2,769 г/см^3

В качестве альтернативы пассерованной пшеничной муке рассматривались кукурузная и овсяная мука.

В работе использовали муку кукурузную (КМ) «С.Пудовъ», изготовитель Россия, г. Москва ООО «ХЛЕБЗЕРНОПРОДУКТ». Пищевая ценность (г/100 г): жиры – 1,5; белки – 7,0; углеводы – 72,0. Энергетическая ценность 1390 кДж/330 ккал. Мягкая кукурузная мука на ощупь и по виду напоминает пшеничную. Наиболее ценной ее составляющей частью являются белки; от пшеничной она отличается более высокими показателями содержания жира, зольности, кислотности и крупности частичек.

В работе использовали муку овсяную (ОМ) «С.Пудовъ», изготовитель Россия, г. Москва ООО «ХЛЕБЗЕРНОПРОДУКТ». Пищевая ценность (г/100 г): жиры – 7,0; белки –13,0; углеводы – 63,0. Энергетическая ценность 270 ккал. Овсяная мука содержит незаменимые аминокислоты, в том числе тирозин и холин, кальциевые и фосфорные минеральные соли, ферменты, эфирное масло и легко усваиваемые углеводы. Состав овсяной муки включает богатый набор микроэлементов.

При исследовании кукурузной и овсяной муки контролем служила красная мучная пассеровка (КМП). В табл. 2 представлены физико-химические характеристики загустителей.

Таблица 2 – Физико-химические показатели загустителей

Показатель	Вид муки		
	КМП	КМ	ОМ
Массовая доля влаги, %	3,8±0,3	10,5±0,5	9,1±0,2
Кислотность, ºТ	4,7±0,0	6,2±0,0	11,3±0,0
Количество сырой клейковины. %	Отсутствует		
Консистенция	Однородная без посторонних включений и примесей, рассыпчатая		
Цвет	Светло-бежевый однотонный	Светло-желтый однотонный	Белый с серым оттенком
Запах	Хорошо уловимый запах жареного ореха	Свойственный данному виду муки без посторонних запахов	

Анализируя полученные результаты можно заключить, что физико-химические показатели характерны для исследуемых загустителей.

Как известно, КМП при изготовлении соусов вносится в количестве 50 г/1 кг готового продукта. Для установления количеств вносимых КМ и ОМ исследовался процесс клейстеризации 5%-ных крахмальных суспензий исследуемых образцов загустителей путем измерения вязкости с помощью вискозиметра Оствальда в интервале температур 50…90 ºС. Результаты приведены на рис. 1.

Согласно полученным результатам наибольшую температуру клейстеризации имеет красная мучная пассеровка (88…93 °С), а наименьшую – овсяная мука (67…72 °С), что не противоречит литературным данным [5, С. 61]. Отмечено, что измерить вязкость суспензий ОМ и КМ при температурах 70 и 80 ºС соответственно измерить не удалось ввиду значительного набухания крахмала. Таким образом, исследование процесса клейстеризации 5%-ных крахмальных суспензий показало, что КМ и ОМ дают более вязкие растворы, следовательно, при изготовлении соусов они должны вноситься в меньших количествах.

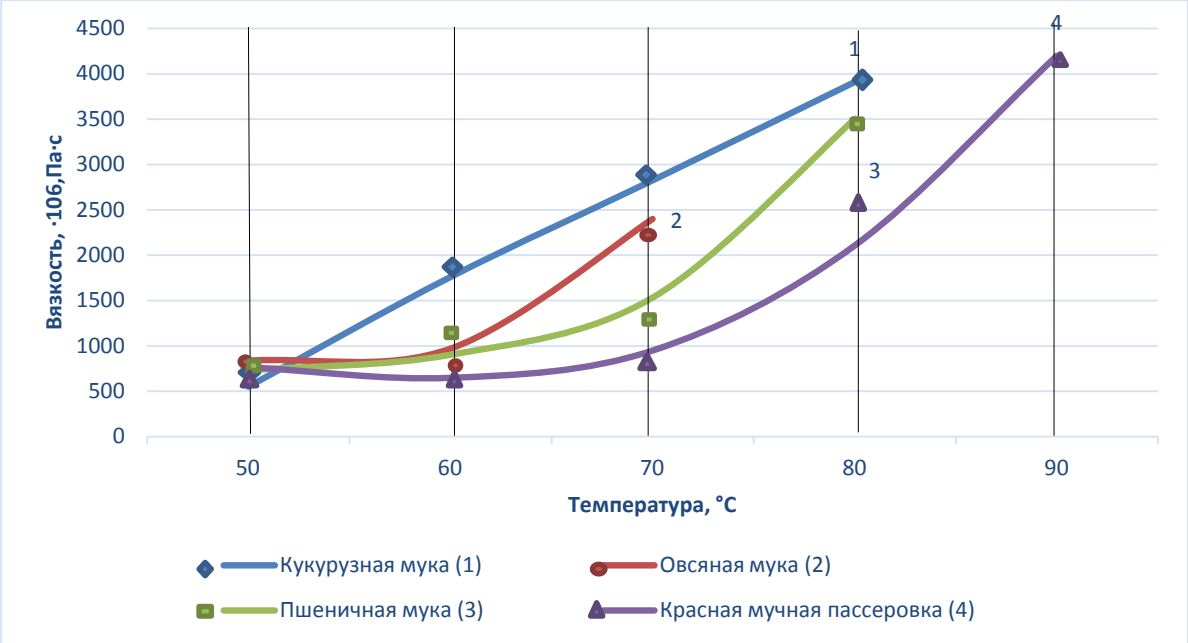


Рис. 1 – Зависимость вязкости 5%-ных крахмальных суспензий от температуры

Для уточнения количества вносимых загустителей изготавливались соусы-основы из КМП (контроль), КМ и ОМ муки. Разные виды муки брались в определенных концентрациях с учетом замены одного крахмала другим [5, С. 63]. Для изготовления соусов-основ исследуемые образцы загустителей брали в количествах: КМП – 5,0 г/100 г; КМ – 4,25 г/100 г; ОМ – 4,00 г/100 г. Образцы муки разводили водой, температура которой составляла 40…50 °С, подвергали кипячению в течение 2 мин, а затем определяли вязкость и плотность [6, С. 42].

Определение вязкости соусов-основ проводилось с помощью ротационного вискозиметра Fungilab серии SMART. Единицы измерения вязкости – сантипуазы (сР), единицы измерения температуры – градусы Цельсия (°С).

В табл. 3 представлены данные по исследованию вязкости и плотности соусов-основ при различных концентрациях загустителя.

Таблица 3 – Показания вязкости (сР) и плотности (кг/м^3) соусов-основ при различных концентрациях загустителя

Образец муки	Количество загустителя, %	Вязкость	Плотность
КМП	5,00	228,5	900
КМ	4,25	218,1	883
ОМ	4,00	325,5	855

Как показывают результаты табл. 2, вязкости соусов-основ КМП и КМ очень близки, а вязкость соуса-основы ОМ выше вязкости эталона на 51,2 %. В связи с этим, было принято решение уменьшить количество добавляемого загустителя при изготовлении соусов с использованием в качестве загустителя ОМ до 3, 75 г/100 г готового продукта.

Для приготовления соусов были использованы овощи, широко выращиваемые в Северо-Западном регионе, – морковь, тыква, лук репчатый [7, С. 24, 41, 53].

Технология приготовления овощных соусов включала следующие операции.

1. Пассерование овощей и томат-пасты.

2. Приготовление соусов

В молочную сыворотку, нагретую до 50 ºС, вносили загуститель – КМП (КМ, ОМ), затем в соответствии с рецептурами – пассерованные овощи и томат-пасту, соль, сахар. Варка готового соуса не превышала 20 мин.

3. Протирание и гомогенизация

Готовый соус протирали через сито, затем гомогенизировали для создания однородной (гомогенной) структуры, препятствующей расслоению.

Готовые соусы исследовали по органолептическим и реологическим показателям.

Рецептуры соусов представлены в табл. 3.

Во всех изготовленных соусах исследовали органолептические (табл. 5) и реологические (табл. 6) и характеристики.

Таблица 4 – Рецептуры томатных соусов

Ингредиенты	Количество ингредиентов, кг/кг		
	№ 1 (ОМ)	№ 2 (КМ)	№ 3 (КМП)
МС	0,3401	0,3395	0,3390
КМП	–	–	0,0500
КМ	–	0,0425	–
ОМ	0,0375	–	–
Томат-паста	0,4519	0,4477	0,4413
Лук репчатый	0,0280	0,0280	0,0280
Морковь	0,0280	0,0280	0,0280
Белые коренья	0,0291	0,0290	0,0287
Масло растительное	0,0851	0,0850	0,0847
Соль поваренная	0,0003	0,0003	0,0003
Итого	1,0000	1,0000	1,0000

Результаты органолептического анализа трех образцов готовых соусов полностью удовлетворяют требованиями ГОСТ 17471-83 «СОУСЫ ТОМАТНЫЕ. Технические условия. Tomato-sauces. Specifications» [8].

Все изготовленные соусы были заморожены до температуры –18 °С и хранились в замороженном виде при этой же температуре в течении 3-х мес. По истечению этого срока соусы были разморожены и подогреты до температуры 50 °С. В размороженных соусах определяли плотность, вязкость и органолептические показатели.

Таблица 4 – Органолептические характеристики томатных соусов

Показатель	Вид муки		
	№ 1 (ОМ)	№ 2 (КМ)	№ 3 (КМП)
Консистенция	Пастообразная		
Однородность	Однородный, без комков		
Цвет	Оранжево-красный	Красный с коричневатым оттенком	Красный
Вкус	Кисло-сладкий с хорошо выраженным вкусом томата и овощей		
Аромат	Характерный для томатных соусов		

Таблица 5 – Вязкости (сР) и плотности (кг/м^3) томатных соусов

Вид загустителя	До замораживания		После замораживания и хранения	
	Вязкость	Плотность	Вязкость	Плотность
КМП	164,46	752	188,13	772
КМ	154,22	763	178,32	795
ОМ	181,77	765	197,35	791

Существенным изменениям подверглась вязкость соусов, причем после размораживания томатные соусы имели более густую консистенцию по сравнению с исходными. Следует отметить, что увеличение этого показателя в контрольном варианте (КМП) и в случае применения КМ и ОМ составляло 9...14 %, что, с одной стороны, обусловлено потерей влаги при разогреве, а с другой – незначительным уплотнением крахмальных студней, не приводящим, однако, к развитию ретроградации.

Анализируя органолептические показатели соусов после размораживания можно констатировать, что соусы всех вариантов выдержали замораживание и хранение в замороженном состоянии. После размораживания была отмечена однородная консистенция соусов всех вариантов без какого-либо расслоения, следовательно, система является стабильной.

Стабильность системы зависит от наличия в ней эмульгатора и стабилизатора. В качестве эмульгатора, возможно, может выступать молочная кислота, в качестве стабилизатора – загуститель – крахмал кукурузной или овсяной муки.

Известно, что молочная кислота, входящая в состав сыворотки, может вступать во взаимодействие с жирными кислотами, образуя при этом лактилированные эфиры жирных кислот, которые можно рассматривать как пищевые эмульгаторы [9, С. 34]. Поставщиком жирных кислот является растительное масло, входящее в рецептуры всех соусов.

Реакция карбоксильной группы молочной кислоты с гидроксильной группой производных жирных кислот используется в промышленности для получения эмульгаторов, известных как лактилированные моноглицериды (Е472b) – продукты реакции молочной кислоты с моноглицеридами, которые в нормативных документах FDA обозначаются как эфиры глицерина и молочной и жирных кислот. Этот эмульгатор характеризуется хорошими эмульгирующими свойствами, относится к категории прямых пищевых добавок, безопасен для человека.

Кроме того, эмульгирующими свойствами обладают и белки молочной сыворотки. Основная роль белков в соусах совпадает с функцией эмульгаторов. Белки оказывают воздействие на продукт в целом, т.к. они способны формировать сетчатую структуру продукта, если присутствуют в достаточном количестве. Известно применение молочных сывороточных белков в качестве эмульгаторов и стабилизаторов. Они устойчивы к изменению pH, менее устойчивы к нагреванию, применяются в разных концентрациях, придают молочный и сливочный вкус продукту [1, С. 33].

При производстве замороженных пищевых продуктов, в которых крахмал играет роль загустителя, например, соусов, необходимо считаться с ретроградацией амилозы в процессе размораживания. Поэтому для таких изделий предпочтительно использовать крахмал с наиболее высоким содержанием амилопектина, поскольку растворы амилопектина менее склонны к ретроградации [10, С. 163].

Таким образом, не используя никаких искусственных добавок, не проводя добавочных технологических операций, в составе готового соуса образуется натуральный эмульгатор. Возможно, с помощью именно этого эмульгатора и сохраняется структура соуса, подвергнутого циклу «замораживание-дефростация».

В заключение можно сказать, что для расширения ассортимента овощных соусов, применяемых при изготовлении замороженных готовых блюд, можно использовать молочную сыворотку в качестве жидкой основы, кукурузную и овсяную муку в качестве загустителя. Предложенные соусы обладают хорошими органолептическими свойствами и способны выдерживать цикл «замораживание–размораживание».

Список литературы / References

1. Технология продуктов из вторичного молочного сырья: Учебное пособие. А. Г. Храмцов [и др.]. – СПб.: ГИОРД, 2009. – 424 с.

2. Справочник по гидроколлоидам / Г. О. Филлипс, П. А. Вильямс (ред.). Пер. с англ. под ред. А. А. Кочетковой и Л. А. Сарафановой. – СПб.: ГИОРД, 2006. – 536 с.

3. Хосни Р. К. Зерно и зернопродукты / К.Р. Хосни; пер. с англ. под общ. ред. Н. П. Черняева. – СПб.: Профессия, 2006. – 336 с.

4. Справочник по разделке мяса, производству полуфабрикатов и быстрозамороженных готовых мясных блюд / Б. Е. Гутник, Н. К. Шагаева, В. Ф Юрина и др.; под ред. Б. Е. Гутника. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1984. – 344 с.

5. Технология производства продуктов общественного питания. Учеб. пособие для для технол. фак. торг. вузов. – М.: Экономика, 1975. – 460 с.

6. Исагулян Э. А., Куликов И. А., Сакун Г. В., Ефимов А. Н. Исследование качества соусов // Известия вузов. Пищевая технология. – № 2-3. – 2001. – С. 42-44.

7. Плотникова Т. В., Позняковский В. М., Ларина Т. В., Елисеева Л. Г. Экспертиза свежих плодов и овощей: Учебное пособие. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2001. – 302 с.

8. ГОСТ 17471-83 «СОУСЫ ТОМАТНЫЕ. Технические условия. Tomato-sauces. Specifications». – М.: Изд-во стандартов, 1990.

9. Пищевые эмульгаторы и их применение / Под ред. Дж. Хазенхюттля, Р. Гартела; пер. с англ. В. Д. Широкова под науч. ред. канд. техн. наук Дорожкиной Т. П., ведущего специалиста представительства компании Danisco в России. – СПб.: Профессия, 2008. – 288 с.

10. Пищевая химия / Нечаев А. П., Траубенберг С. Е., Кочеткова А. А. и др. Под ред. А. П. Нечаева. – СПб.: ГИОРД, 2001. – 592 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Tekhnologiya produktov iz vtorichnogo molochnogo syr'ya: Uchebnoye posobiye [Technology of Products of Secondary Dairy Products: Textbook.] A. G. Khramtsov [and others]. - St. Petersburg: GIORD, 2009. - 424 p. [In Russian]

2. Spravochnik po gidrokolloidam [Handbook on Hydrocolloids] / G.O. Phillips, P.A. Williams (ed). Trans. form English by A.A. Kochetkova and L.A. Sarafanova. - SPb.: GIORD, 2006. - 536 p. [In Russian]

3. Hosni R.K. Zerno i zernoprodukty [Grain and Grain Products] / R.K. Hosni; Trans. from English by N. P. Chernyaeva. - SPb.: The profession, 2006. - 336 p. [In Russian]

4. Spravochnik po razdelke myasa, proizvodstvu polufabrikatov i bystrozamorozhennykh gotovykh myasnykh blyud [Handbook on Meat Cutting, Production of Semi-finished and Quick-frozen Ready-made Meat Dishes] / B.E. Gutnik, N.K. Shagaeva, V. F Yurina, et.al.; Ed. by B.E. Gutnik. - Moscow: Light and Food Industry, 1984. - 344 p. [In Russian]

5. Tekhnologiya proizvodstva produktov obshchestvennogo pitaniya. Ucheb. posobiye dlya dlya tekhnol. fak. torg. vuzov [Technology of Catering Products Production. Textbook. for Technology Faculties. Of Trading Universities]. - Moscow: Economics, 1975. - 460 p. [In Russian]

6. Isagulyan E.A., Kulikov I.A., Sakun G.V., Efimov A.N. Issledovaniye kachestva sousov [Research of the sauces quality] // Izvestiya Vuzov. Food technology. – No. 2-3. - 2001. - P. 42-44. [In Russian]

7. Plotnikova T.V., Poznyakovskiy V.M., Larina T.V., Eliseeva L.G. Ekspertiza svezhikh plodov i ovoshchey: Uchebnoye posobiye [Examination of fresh fruits and vegetables: Textbook.] - Novosibirsk: Sib. Univ. publishing house, 2001. - 302 p. [In Russian]

8. GOST 17471-83 «SOUSY TOMATNYYe. Tekhnicheskiye usloviya. Tomato-sauces. Specifications». [GOST 17471-83 "TOMATO SAUCES". Technical conditions. Tomato-sauces. Specifications».] - Moscow: Publishing Standards, 1990. [In Russian]

9. Pishcheviye emulgatory i ikh primeneniye [Food Emulsifiers and Their Application], Ed. by J. Hazenhüttl, R. Garthel; trans. from English by V.D. Shirokova, Ed. by PhD in Engineering, Dorozhkina T.P., leading specialist of the representative office of Danisco in Russia. - SPb.: Profession, 2008. - 288 p. [In Russian]

10. Pishchevaya khimiya [Food Chemistry] / Nechaev A.P., Traubenberg S.E., Kochetkova A.A., etc. Ed. by A. P. Nechaev. - St. Petersburg: GIORD, 2001. - 592 p. [In Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.143

Волощенко Л.В.[1], Шевченко Н.П.[2]
[1]Кандидат сельскохозяйственных наук, [2]кандидат технических наук,
Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина

ЛАМИНАРИЯ КАК ЙОДСОДЕРЖАЩИЙ КОМПОНЕНТ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОДУКТА

Аннотация

Проведен сравнительный анализ химического и минерального составов, показателей безопасности ламинарии японской и слоевищ ламинарии для изучения возможности их использования в технологии мясных продуктов. Изучены их функционально-технологические свойства. Определены нормы введения ламинарии и разработаны рецептуры нового вида мясных полуфабрикатов. Проведённые на готовых продуктах исследования показали, что потребление 200 г разработанного нового вида рубленых полуфабрикатов плескавиц «Морских» и «Морских оригинальных» позволит компенсировать суточную норму потребления йода при достаточно высоких пищевых показателях.

Ключевые слова: ламинария японская и слоевища ламинарии, модельные фаршевые системы, функционально-технологические свойства функциональный продукт, плескавицы.

Voloshhenko L.V.[1], Shevchenko N.P.[2]
[1]PhD in Agriculture, [2] PhD in Engineering,
Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin

LAMINARIA AS IODINE-CONTAINING COMPONENT IN FUNCTIONAL PRODUCT PRODUCTION

Abstract

The paper presents the comparative analysis of the chemical and mineral compositions, safety parameters of Japanese laminaria and laminaria's thallus to study the possibility of their usage in a meat products technology. Their functional and technological properties are studied as well. The norms for the introduction of laminaria have been determined and the recipes for a new type of meat semi-finished products have been developed. The studies were carried out on finished products and showed that the consumption of 200 g of the developed new type of chopped semi-finished products of pleskavicas "Sea" and "Sea original" will compensate for the daily amount of iodine intake at sufficiently high food indices.

Keywords: Japanese laminaria and laminaria's thallus, model forcemeat systems, functional and technological properties of the functional product, pleskavicas.

Широко известно, что современные биологически активные добавки производятся на основе природных компонентов, как правило, растительного и минерального происхождения. Истинным кладезем биологически активных веществ являются морские водоросли.

Ламинария имеет в своём составе большое количество легко усваиваемого йода (в среднем до 0,3% от сухого веса), связанного с органическими молекулами. Поэтому он легко усваивается организмом человека, нормализуя функции щитовидной железы. По содержанию йода ламинария далеко опережает все известные наземные лекарственные растения [1, С. 59].

Йод относится к числу микроэлементов, образующих биологически активные соединения, которые имеют большое значение для жизни и здоровья человека.

К основным методам алиментароной коррекции йодной недостаточности можно отнести прямое йодирование продуктов препаратами органического и неорганического йода, а также использование в пищевых технологиях комплексных соединений йода с различными пищевыми продуктами и веществами.

Поэтому, в настоящее время целесообразно внедрение в состав мясопродуктов сырья, содержащего йод, так как они позволяют решать одну из главные проблем современного человека – дефицит йода в организме человека [2, С. 90], [10].

Проанализировав проблемы йододефицита, было решено разработать новый вид продукта функционального назначения за счет введения ламинарии в рецептуру рубленых полуфабрикатов из мяса птицы, т.к. рынок полуфабрикатов из мяса птицы имеет тенденцию развития и большого спроса, а продукты функционального назначения сейчас очень актуальны. Также новым является изучение функционально-технологических свойств на данной группе продуктов и определение остаточное содержание йода после термической обработки.

На первых этапах исследования, для обоснования целесообразности использования ламинарии для обогащения мясных продуктов органической формой йода и расчета оптимальной дозировки внесения ее в продукт, был проведен сравнительный анализ химического, минерального состава и показателей безопасности ламинарий**.**

Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав, содержание минеральных веществ и витаминов в ламинариях

Анализируемый показатель	Результат испытаний		Суточная потребность в витаминах и минералах
	Слоевища ламинарии (Laminaria thalli)	Ламинария японская (Laminaria japonica)	
Влага	10,84 %	6,80 %	-
Зола	17,25 %	38,60 %	-
Жир	0,76 %	0,38%	-
Протеин	12,22 %	10,88%	-
Клетчатка	8,42 %	0,89%	-
БЭВ	50,51 %	42,45%	-

Продолжение Таблицы 1

Анализируемый показатель	Результат испытаний		Суточная потребность в витаминах и минералах
	Слоевища ламинарии (Laminaria thalli)	Ламинария японская (Laminaria japonica)	
Витамин «А»	0,821 мг/г	0,802 мг/г	0,75–1,5 мг
Витамин «С»	2,552 мг/г	0,686 мг/г	50-70 мг
Витамин «Е»	0,01119 мг	0,00459 мг	8-10 мг
Кальций	1,505 %	0,696%	800-1000 мг
Фосфор	0,415 %	0,373%	1600 мг
Калий	4,48 %	12,6%	1-1,2 г
Натрий	0,786 %	1,63%	500-1200 мг/кг
Сера	15,07 г/кг	11,30 г/кг	1,5 г
Магний	6,37 г/кг	5,01 г/кг	0,5 г
Железо	123,93 мг/кг	422,5 мг/кг	15 мг
Цинк	27,40 мг/кг	17,6 мг/кг	10-15 мг
Йод	327,79 мг/кг	372,0 мг/кг	0,15-0,2 мкг

Наличие большого количества минеральных веществ в ламинарии (в норме превышающие суточную), позволяет использовать ее как добавку функционального назначения в мясных продуктах, с целью профилактики недостатка потребности некоторых особо важных элементов в организме человека, в частности йода. Сравнительный анализ химического, минерального составов, показателей безопасности ламинарии японской (Laminaria japonica) и слоевищ ламинарии (Laminaria thalli), показал, что ламинария японская в своем химическом составе имеет большее содержание йода, поэтому ее целесообразней использовать в технологии функциональных мясопродуктов.

Пищевые продукты из водорослей значительно уступают пищевым продуктам, приготовленным из наземных растений, по содержанию и качественному составу белков и углеводов. Однако они обладают ценными свойствами, которыми не обладает растительное пищевое сырье наземного происхождения. К таким свойствам относится:

способность поглощать большое количество воды и увеличиваться при этом в объеме;

содержание специфичных для морской растительности коллоидных полимеров (агар, альгиновые кислоты, и другие) и маннита;

более высокое, чем в наземных растениях, содержание разнообразных макро- и микроэлементов.

Способность поглощать значительные количества влаги обуславливает ее эффективное применение в качестве стабилизатора фаршевой структуры при изготовлении продуктов, содержащих гидратированные животные и растительные белки и эмульсии на их основе [4, С.23], [5,С.253].

На следующем этапе были проведены исследования по изучению функционально-технологических свойств ламинарии японской Laminaria japonica) и слоевищи ламинарии (Laminaria thalli) (таблица 2).

Таблица 2 – Функционально-технологические свойства ламинарий

Показатель	(Laminaria japonica)	(Laminaria thalli)
Водопоглощающая способность, %	159	146
Жиропоглощающая способность, %	120	109
Степень набухаемости, %	558	682
Индекс растворимости, $см^3$	4	9
Концентрация водородных ионов (pH)	7,16	7,14
Эмульгирующая способность, г жира на 1 г ламинарии	600	500

Согласно данным полученным в ходе исследований, водопоглощающая способность выше у ламинарии японской (159%), чем у слоевищ ламинарии (146%). Следовательно, можно сделать вывод о хорошей способности ламинарии японской поглощать большое количество воды, что позволит сверх рецептуры на мясное сырье, добавлять воду.

Концентрация водородных ионов (pH) у образцов в среднем равна 7,15. На функциональные характеристики мясного сырья, этот показатель должен влиять положительно, т.е. не оказывать действие на стабильность фаршевых систем[8].

Степени набухаемости у слоевищ ламинарии выше, чем у ламинарии японской на 124 %, что свидетельствует о более высокой степени поглощаемости воды матрицей белка ламинарии.

Индекс растворимости, показывает, что 1,25 г сухой ламинарии японской не растворяется в воде, а наоборот увеличивает ее объем до 4 $см^3$ из возможных 10$см^3$. Однако у слоевищ ламинарии выявлена наименьшая растворимость. Объем осадка составил 9 $см^3$.

Для оценки влияния степени гидратации ламинарии на качество и выход готовых изделий была изучена водоудерживающая и гелеобразующая способность при различных уровнях гидратации, которую проводили в соотношении от 1:6 до 1:20. Образцы были гидратированы водой и выдержаны при комнатной температуре 17 часов, после чего часть набухшей ламинарии была взята на определение водоудерживающей способности, а часть на гелеобразующую способность. Обладание этими свойствами обуславливает ее эффективное применение в качестве стабилизатора фаршевой структуры при изготовлении продуктов, содержащих гидратированные животные и растительные белки и эмульсии на их основе [4,С 27], [9].

В ходе эксперимента были получены данные по выходным параметрам водоудерживающей способности, обуславливающие степень гидратации ламинарии[6]. Полученные экспериментальные данные представлены в графике на рисунке 1.

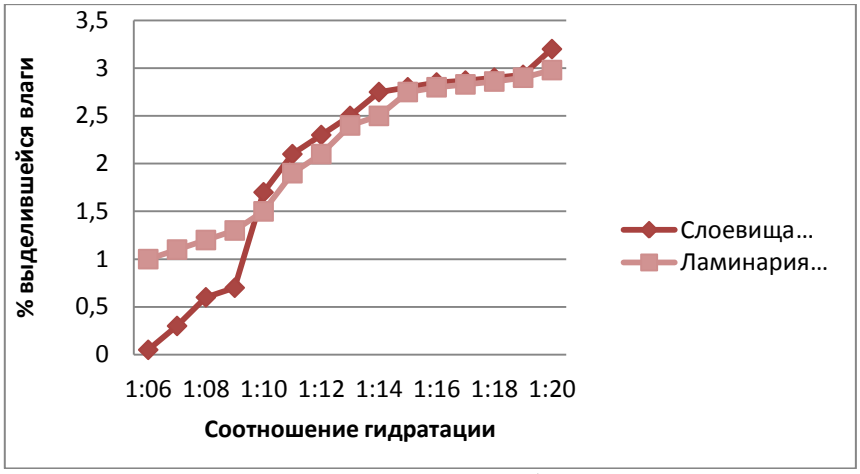


Рис. 1 – Водоудерживающая способность ламинарии

По полученным данным видно, что количество отделившейся влаги возрастает с увеличением гидратации ламинарии. Анализируя полученный график, установлено, что резкое изменение отделившейся влаги наблюдается при гидратации слоевищ ламинарии – 1:10, а при гидратации ламинарии японской – 1:6. Следовательно, можно отметить, что наилучшая степень гидратации находится в промежутке 1:6 и 1:9.

Подведя итоги проведенных исследований, выяснили, что ламинария обладает хорошей способностью удерживать воду, что в дальнейшем должно положительно повлиять на количественные (выход) и качественные (сочность, вкус, консистенция) показатели готовых изделий.

Было установлено, что в сухой ламинарии содержится йода 372,0 мг/кг [7]. Переводя это значение в микрограммы, получаем содержание йода в 1 кг ламинарии 372000 мкг/кг, а суточная норма потребления йода составляет 150-200 мкг. Следовательно, чтобы удовлетворить эту норму необходимо употребить 0,00025 кг сухой ламинарии.

На основании проведенных расчетов произвели выработку мясных рубленых полуфабрикатов. За контрольные образцы были взяты: рецептуры плескавицы «Столичной» (Контроль 1) и плескавицы с огурцами и сыром «Фантазия» (Контроль 2), на основании которых были выработаны опытные образцы с 30 % введением 1:6 ламинарии частично заменив мяса механической обвалки.

Для определения влияния термической обработки на остаточное количество йода в продукте произвели термическую обработку следующими способами: обжаривание в жиру, запекание, варка на пару.

Остаточное содержание йода после термической обработки представлены в таблице 4.

Таблица 3 – Остаточное содержание йода в охлажденных и термически обработанных образцах

№ п/п	Название образца	Пересчет	Влага, %	Сухое вещество, %	Йод, мкг %
1	Плескавица охлажденная «Столичная»	п	70,68		2,11
		с		29,32	7,20
2	Плескавица охлажденная «Морская»	п	70,20		5,69
		с		29,80	19,10
3	Плескавица охлажденная с огурцами и сыром «Фантазия»	п	71,60		1,85
		с		28,94	6,40
4	Плескавица охлажденная «Морская оригинальная»	п	71,90		5,51
		с		28,10	19,60
5	Плескавица на пару «Морская»	п	68,06		6,20
		с		31,94	19,40
6	Плескавица на пару «Морская оригинальная»	п	68,09		3,80
		с		31,91	11,90
7	Плескавица запеченная «Морская»	п	67,01		4,68
		с		32,99	14,20
8	Плескавица запеченная «Морская оригинальная»	п	68,36		6,20
		с		31,64	19,60
9	Плескавица обжареная «Морская»	п	67,39		7,15
		с		32,64	21,90
10	Плескавица обжареная «Морская оригинальная»	п	69,08		7,39
		с		30,92	23,90

Анализируя полученные результаты по содержанию йода в образцах, установили, что наибольшая концентрация йода у образца плескавицы обжаренной в жиру «Морской оригинальной», т.к. в данном образце были наибольшие потери при термообработке (рисунок 2). Устанавливая прямую зависимость концентрации йода от потерь влаги при термической обработки, видим, что образцы, приготовленные на пару, имеют наименьшее количество йода, хотя потери влаги в данных образцах наименьшие.

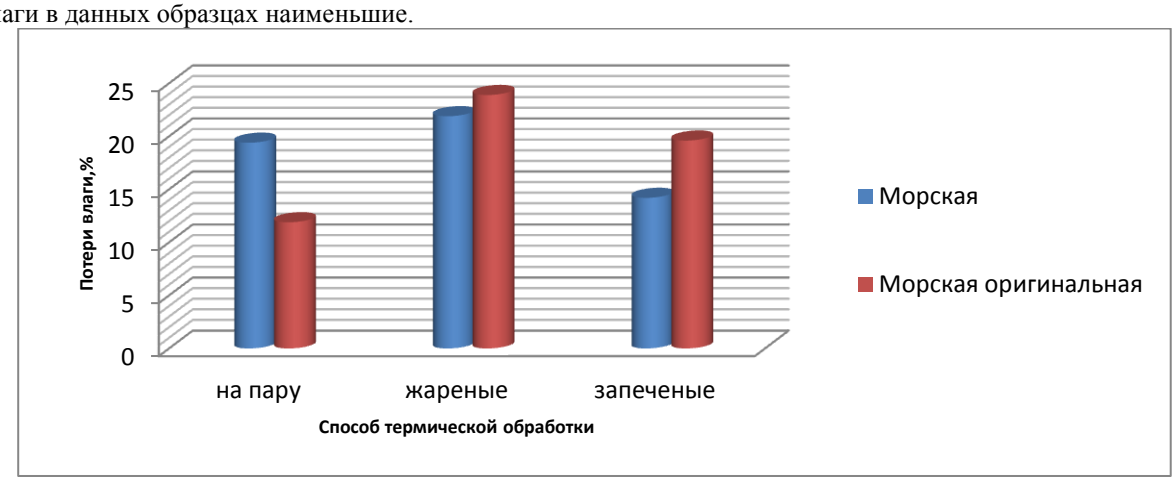


Рис. 2 – Зависимость потерь влаги новых видов мясных рубленых полуфабрикатов от вида обработки

Устанавливая прямую зависимость концентрации йода от потерь влаги при термической обработки, видим, что образцы, приготовленные на пару, имеют наименьшее количество йода, хотя потери влаги в данных образцах наименьшие.

Остаточное содержание йода в опытных образцах, по сравнению с контрольными образцами, больше в 3 раза, что свидетельствует о целесообразности производства нового вида продукта и его функциональном назначении. При употреблении 200 грамм плескавицы «Морской» жаренной (традиционная термическая обработка для рубленых полуфабрикатов), поступление йода в организм составит 40 мкг, которые составляют 15- 50% от суточной нормы. Следовательно, разработанный продукт является функциональным и рекомендуется различным группами населения с целью йодпрофилактики, в том числе взрослым и подросткам и особенно беременным и кормящим женщинам [3, С.57].

Проведенная органолептическая оценка готовых изделий, дала возможность сделать вывод о том, что введение ламинарии японской в рецептуру плескавиц на вкусовые характеристики мясопродуктов не оказало большого влияния. На разрезе ламинария визуализировалась частично в виде небольших зеленых вкраплений, что придавало эстетический вид, который комиссия расценила как введение в рецептуру плескавиц традиционных петрушки или укропа, однако термическая обработка в значительной мере разъединила мнения дегустаторов – предпочтение получили образцы жаренные.

Результаты исследования послужили основанием для разработки проекта ТУ, ТИ на новый вид продукта функциональной направленности - плескавицы «Морские» и «Морские оригинальные».

Список литературы/ References

1. Волощенко Л.В. Йодсодержащие мясные продукты функциональной направленности [текст] / Л.В. Волощенко, Н.П. Шевченко // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство», 9-10 ноября 2017г., с.58-62.

2. Маслова Е.Ю. Разработка технологии йодсодержащих мясных полуфабрикатов [Текст] / Маслова Е.Ю., Салаткова Н.П., Каледина М.В., Лупандина Н.Д.// Вестник Северо-Кавказского федерального университета, №1. - 2014. - С.89-92.

3. Цыб А.Ф. Новые подходы к решению проблемы ликвидации йоддефицитных состояний [Текст] / А. Ф. Цыб, В. А. Тутельян, Т.В. Онищенко, В.В. Шахтарин // Пищевая промышленность. – 2004. – №12.- с.53-57.

4. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Научные основы производства продуктов питания» [Текст] / Н.П. Салаткова, Н.Н Селезнева, Л.В Волощенко. – Белгород: БелГСХА, 2009.

5. Антипова Л.В. Методы исследования мяса и мясных продуктов [Текст] /Л.В. Антипова, И.А. Глотова, И.А. Рогов // – М.:Колос, 2001. – 376 с.

6. ГОСТ 33319-2015. Мясо и мясные продукты. Метод определения массовой доли влаги [Текст]. – Введ. 2016-07-01. – М:.Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Стандартинформ, 2016. –7с.

7. ГОСТ Р 52689-2006 Продукты пищевые. Инверсионно-вольтамперометрический метод определения массовой концентрации йода. [Текст]. – Введ. 2008-01-01. – М:. Госстандарт России: Стандартинформ, 2007. –14с.

8. ГОСТ Р 51478-99. Мясо и мясные продукты. Контрольный метод определения концентрации водородных ионов (pH) [Текст]. – Введ. 2001-01.01. – М:. Госстандарт России: Издательство стандартов, 2000; Стандартинформ, 2010. – 6с.

9. Горбатов А.В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов /А.В.Горбатов, А.М.Маслов и др.//– М.: Легкая и пищевая промышленность – 2002. –№4.

10. Лаврова, Л.Ю. Натуральные ингредиенты для обогащения мясных изделий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.meatbranch.com/publ/view/ 534.html.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Voloshchenko L.V. Jodsoderzhashchie myasnye produkty funkcional'noj napravlennosti [Tekst] [Iodine-containing meat products functional orientation] // L.V. Voloshchenko, N.P. SHevchenko // Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Innovacionnye tekhnologii v pishchevoj promyshlennosti: nauka, obrazovanie i proizvodstvo» [Materials of the IV International Scientific

and Technical Conference "Innovative Technologies in the Food Industry: Science, Education and Production"], 9-10 noyabrya 2017g., P.58-62. [in Russian]

2. Maslova E.YU. Razrabotka tekhnologii jodsoderzhashchih myasnyh polufabrikatov [Tekst] [Development of technology of iodized meat products]. / Maslova E.YU., Salatkova N.P., Kaledina M.V.,Lupandina N.D.// Vestnik Federal University]. №1. - 2014. - P. 89-92. [in Russian]

3. Cyb A.F. Novye podhody k resheniyu problemy likvidacii joddeficitnyh sostoyanij [Tekst] [New approaches to the problem of elimination of iodine deficiency disorders] / A. F. Cyb, V. A. Tutel'yan, T.V. Onishchenko, V.V. SHahtarin // Pishchevaya promyshlennost' [Food industry]. – 2004. – №10. – P. 53 – 57. [in Russian]

4. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornyh rabot po discipline [Tekst] [Nauchnye osnovy proizvodstva produktov pitaniya» Scientific foundations of food production]. / N.P. Salatkova, N.N Selezneva, L.V Voloshchenko. – Belgorod: BelGSKHA, 2009. [in Russian]

5. Antipova L.V. Metody issledovaniya myasa i myasnyh produktov [Tekst] [Methods for researching meat and meat product] L.V. Antipova, I.A. Glotova, I.A. Rogov //– M.:Kolos, 2001.P. 376. [in Russian]

6. GOST 33319-2015. Myaso i myasnye produkty. Metod opredeleniya massovoj doli vlagi [Tekst]. [Meat and meat products. Method for determining the mass fraction of moisture] – Vved. 2016-07-01. – M:.Mezhgos. sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii: Standartinform [Council on Standardization, Metrology and Certification: Standartinform], 2016. –7p. [in Russian]

7. GOST R 52689-2006 Produkty pishchevye. Inversionno-vol'tamperometricheskij metod opredeleniya massovoj koncentracii joda. [Tekst] [Food products. Inversion-voltammetric method for determining the mass concentration of iodine] – – Vved. 2008-01-01. – M:. Gosstandart Rossii: Standartinform [Gosstandart of Russia: Standartinform], 2007. –14p. [in Russian]

8. GOST R 51478-99. Myaso i myasnye produkty. Kontrol'nyj metod opredeleniya koncentracii vodorodnyh ionov (pH) [Tekst] [Meat and meat products. Control method for determining the concentration of hydrogen ions (pH)] – Vved. 2001-01.01. – M:. Gosstandart Rossii: Standartinform, [Gosstandart of Russia: Standartinform], 2010. – 6p. [in Russian]

9. Gorbatov A.V. Strukturno-mekhanicheskie harakteristiki pishchevyh produktov [Structural and mechanical characteristics of food products] L.V. Antipova, I.A. Glotova, I.A. Rogov //– M.:Kolos, 2001.P. 376. [in Russian]

10. Lavrova, L.YU. Natural'nye ingredienty dlya obogashcheniya myasnyh izdelij [Natural ingredients for the enrichment of meat products] [Elektronic resuorce] – URL: www.meatbranch.com/publ/view/ 534.html. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.121

Глинянова И.Ю.[1], Фомичев В.Т.[2]

[1]ORCID: 0000-0003-1388-1233, кандидат педагогических наук, доцент

[2]ORCID: 0000-0002-7382-6474, доктор технических наук, профессор

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННОГО ИЗВЕСТНЯКОВОГО ЩЕБНЯ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Аннотация

Исследованы прочностные характеристики модифицированного известнякового щебня из карьера «Биюк-Янкойский, Симферопольского района республики Крым. Проведен эксперимент по модификации крымского известнякового щебня низкой прочности (марка 600) с разными фракциями (5; 5-10; 20-40; 40-70) диспергированным раствором отхода гидролизного производства – лигносульфонатом техническим (ЛСТ). Диспергация раствора ЛСТ проводилась способом ультразвуковой и гидродинамической кавитации. Испытания модифицированного известнякового строительного щебня осуществлялись в соответствии с ГОСТ 8267-93 по определению его прочности по дробимости или потери массы. Результаты исследований прочности крымского модифицированного известнякового щебня показали переход марки 600 в марку 1000 (фракции: 5-10; 20-40; 40-70) и марки 600 в марку 1200 (фракция: 5). Предложены перспективы использования модифицированного известнякового щебня в республике Крым.

Ключевые слова: модифицированный известняковый щебень, лигносульфонат технический, кавитация, тиксотропия, эффект Ребиндера.

Glinyanova I.Yu.[1], Fomichev V.T.[2]

[1]ORCID: 0000-0003-1388-1233, PhD in Pedagogy, Associate professor

[2]ORCID: 0000-0002-7382-6474, PhD in Engineering, Professor

Volgograd State Technical University, Volgograd

INVESTIGATION OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF MODIFIED LIMESTONE CRUSHED STONES FROM REPUBLIC OF CRIMEA

Abstract

The strength characteristics of modified limestone crushed stones from the "Biyuk-Yankoysky quarries, Simferopol district of the Republic of Crimea, are investigated. An experiment on the modification of the Crimean limestone crushed stones of low strength (grade 600) of different fractions (5, 5-10, 20-40, 40-70) with a dispersed solution of the hydrolysis production waste – the technical lignosulfonate (TLS) – was carried out. Dispergation of the TLS solution was carried out by ultrasonic and hydrodynamic cavitation. Tests of modified limestone crushed stones were carried out in accordance with GOST 8267-93 to determine its crushing strength or weight loss. The results of studies of strength of the Crimean modified limestone crushed stones showed the transition of the grade 600 to the grade 1000 (fractions: 5-10, 20-40, 40-70) and grade 600 to grade 1200 (fraction: 5). Prospects for the use of modified limestone crushed stones in the Republic of Crimea are suggested.

Keywords: modified limestone crushed stones, technical lignosulfonate, cavitation, thixotropy, Rehbinder effect.

Нерудные полезные ископаемые республики Крым, в частности, щебень, имеют важное экономическое значение для полуострова.

Известняковый щебень используется в производстве бетона и конструкций из него, в фундаментных работах, при заливке мостовых конструкций и мостового полотна, дорожных и аэродромных покрытий; применяется в производстве железобетонных конструкций, в строительстве автодорог и железных дорог, трамвайных линий, при возведении производственных зданий; массивных конструкций; при строительстве основания для железнодорожных путей и др.

Другие виды известняков являются сырьем для производства извести, флюсов для металлургической, цементной и электропромышленности, для производства комбикормов, абразивов, кровельных материалов и в производстве сухих строительных смесей.

На инвестиционном портале Республики Крым позиционируются основные отрасли промышленности, где добывающая промышленность с карьерами щебня занимает 10 % [1] .

В Крыму месторождения строительных известняков разрабатываются более чем 38 карьерах [2, С.194], по другим источникам - в ста карьерах, общая площадь которых составляет 13 тыс. га (0,5 % площади полуострова) [3, С.43] .

Многие карьеры известнякового щебня Республики Крым имеют низкую прочность и марку – 400 – 600.

В качестве материала для исследования был использован известняковый щебень марки 600 из карьера «Биюк-Янкойский», с. Мраморное, Симферопольского района республики Крым, следующих фракций: 5-10 мм; 20-40 мм; 40-70 мм. [4].

Верхнеюрские отложения, как и отложения ранней и средней юры, характеризуются резкими изменениями также фациального состава по латерали, о чем упоминали в своих исследованиях [5, С. 39].

Известняки данного месторождения представлены краснобурыми, розоватыми и серыми известняками, с многочисленными включениями белых кальцитизированных раковин и веточек кораллов и окрашены в серые, красные, бурые, белые, желтые цвета.

Декоративные свойства известняков обусловлены наличием глинистых минералов, дисперсных примесей Fe, Mn и других химических элементов, о чем неоднократно упоминали в своих работах многие авторы: [6, С. 301] .

Лигносульфонаты технические – это многотоннажные отходы целлюлозно-бумажных комбинатов, производные лигнина природного происхождения, обладают высокой растворимостью в воде, образуются в результате сульфитной делигнификации древесных материалов. ЛСТ – это анионные поверхностно-активные вещества.

На основании исследований прочностных характеристик модифицированного известнякового щебня Волгоградской области, было показано, что модифицировать щебень низкой прочности целесообразно в 10-40 % р-рах лигносульфонатов технических, (табл. 1), [7, С. 160], [8].

Таблица 1 – Сравнительная характеристика зависимости потери массы при испытании щебня от концентрации р-ра ЛСТ

Р-р ЛСТ, %	**Марка щебня по дробимости**	**Потеря массы при испытании щебня, %**
0	400	21
5	600	15,56
7,5	800	13,2
10	**1000**	**12,62**
20	**1000**	**12,52**
40	**1000**	**12,59**

Статистическая обработка экспериментальных данных зависимости потери массы известнякового щебня от концентрации водного раствора технических лигносульфонатов показала, что наилучшую аппроксимацию дает следующая модель с аппроксимирующей формулой $y \approx 1/(a + be^{-x})$.

Результаты линеаризации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты линеаризации модели

i	1	2	3	4	5
x_i'	0,006738	0,0005531	4,54E-05	2,061E-09	4,248E-18
y_i'	0,06427	0,07576	0,07924	0,07987	0,07937

Результаты аппроксимации представлены в таблицах 2,3.

Таблица 3 – Результаты аппроксимации модели

i	1	2	3	4	5
x_i	5	7,5	10	20	40
y_i	15,6	13,2	12,6	12,5	12,6
$\widehat{y}_i$	15,6	12,9	12,7	12,7	12,7

Оценки параметров и остаточная сумма квадратов для данной модели: a = 0,078927, b = −2,19906, $S_{ost}^2 = 0,0358137.$

Апроксимирующая кривая, соответствующая этим данным изображена на рисунке 1.

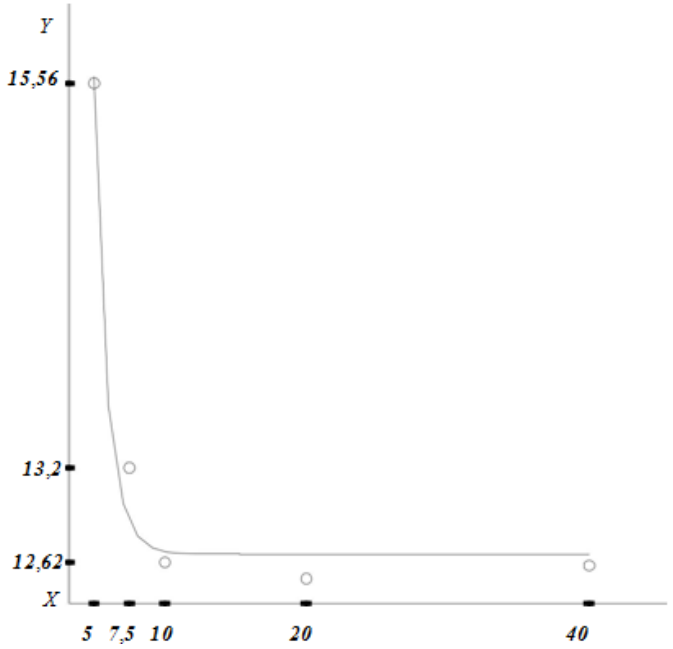


Рис.1 – Модель 1/(a + be−X). Исходные данные и аппроксимирующая кривая

Совершенствуя изобретение по пропитке известнякового щебня низкой прочности, в дальнейшем, был разработан способ модификации известнякового щебня кавитационным способом [9], который позволил добиться высоких марок известнякового щебня и снижению процента дробимости с течением времени.

Способ приготовления модифицированного строительного известнякового щебня из карьера «Биюк-Янкойский», с. Мраморное, Симферопольского района республики Крым был аналогичным как и в экспериментах с волгоградским известняковым щебнем низкой прочности.

Модификация известнякового щебня из республики Крым проводилась также в четыре стадии. На первой стадии его в течение 15 минут подвергают ультразвуковой кавитации воды до температуры 40-60 ^{0}С при частоте 20-40 кГц. На второй стадии в кавитационную горячую воду вводились 10 % порошкообразные ЛСТ и подвергали диспергированию ультразвуком (20-40 кГц) до полного растворения в течение 10-15 минут.

На третьей стадии полученный водный раствор лигносульфонатов технических подвергался гидродинамической кавитации при скорости потока жидкости 12-13 м/с в течение 1-3 минут, на четвертой стадии - в кавитационный водный раствор лигносульфонатов технических погружался малопрочный известняковый щебень и обрабатывался ультразвуком при частоте 20 кГц в течение 15-30 минут.

Испытания модифицированного известнякового щебня проводили в соответствии с ГОСТ 8267-93 [10, С.3] по определению его прочности по дробимости или потери массы при испытании щебня (табл. 4).

Таблица 4 – Испытания крымского модифицированного известнякового щебня

№	Фракция известнякового щебня (мм)	Модифицированный известняковый крымский щебень		Требования ГОСТ 8267-93			
				Для изверженных интрузивных пород		Для осадочных и метаморфических пород	
		Марка щебня по дробимости	Потеря массы при испытании щебня, %	Марка щебня по дробимости	Потеря массы при испытании щебня, %	Марка щебня по дробимости	Потеря массы при испытании щебня, %
1	5	1200	10,64	1400	До 12	1200	До 11 включ.
2	5-10	1000	11,32	1400	До 12	1000	Свыше 11 до 13
3	20-40	1000	11,35	1400	До 12	1000	Свыше 11 до 13
4	40-70	1000	11,40	1400	До 12	1000	Свыше 11 до 13

Как видно из Таблицы 4 фракции: 5-20 мм, 20-40 мм, 40-70 мм крымского известнякового щебня увеличили свою прочность в два раза и из марки 600 перешли в марку 1000. Фракция: 5 мм крымского известнякового щебня увеличила свою прочность в три раза и из марки 600 перешли в марку 1200.

Характерно, что с течением времени после обработки модифицированный известняковый щебень набирает прочность и через два месяца уже находится в переходном состоянии из марки 1000 в 1200, из марки 1200 в марку 1400, исходя из потери массы при испытании щебня.

Так, в рамках эксперимента были дополнительно проведены исследования динамики набора прочности крымского модифицированного известнякового щебня в течение нескольких месяцев. Для этого известняковый щебень после пропитки модифицированным раствором лигносульфонатов технических выгружали из раствора и сушили в естественных условиях в течение 56 дней.

Для эксперимента выбран модифицированный известняковый щебень фракции: 5-10 мм и осуществлена проверка на прочность по временным этапам.

Как следует из заданных таблицы 5, с 14-го дня по 56 -ой день модифицированный крымский известняковый щебень, фракция: 5-10 мм (карьер «Биюк-Янкойский» Симферопольского района) плавно набирает свою прочность и на 56 –ой день уже находится в переходном состоянии из марки 1000 (11,32%) в марку 1200 (до 11%).

Таблица 5 – Динамика набора прочности модифицированного крымского известнякового щебня

Параметры	Динамика набора прочности модифицированного известнякового щебня (10% водного р-ра ЛСТ) по дням					
	По дням					
	1	7	14	21	28	56
Марка модифицированного известнякового щебня	600	800	1000	1000	1000	1000
Потеря массы при испытании известнякового щебня, %	15,45	13,1	12,60	12,53	12,31	11,32

Исследования прочностных характеристик модифицированного известнякового щебня разных фракций показали увеличение его прочности в течение 56 дней и переход в щебень высокой прочности М-1000-1200 по сравнению с исходным материалом.

По нашему мнению, такие высокие результаты были достигнуты в результате действия ультразвуковой и гидродинамической кавитации.

Наблюдаемый эффект упрочнения возможно объяснить с позиции П.А. Ребиндера – путь к прочности материала лежит через его разрушение [11], связанного с представлением о двух основных этапах пространственных структур: коагуляционных и конденсационно-кристаллизационных.

С этих позиций поверхность щебня можно представить в виде поверхностного слоя, покрытого сеткой микро- и макротрещин и основы камня щебня с ненарушенной структурой.

Раствор технических лигносульфонатов, обладающий поверхностно-активными свойствами (57-58 мДж/м2), самопроизвольно внедряется в микротрещины, разрыхляя внешний слой с образованием коагуляционной и тиксотропной структуры.

Как следует из табл. 1, увеличение марки дробимости щебня, при его обработке раствором ЛСТ, связано с тем, что щебень с меньшей маркой имеет более развитую сетку трещин и, как следствие, большую потерю массы при интенсивной обработке щебня в растворе под действием ультразвукового гидравлического воздействия. Внешний коагуляционный слой поверхности щебня снимается, обнажая кристаллическую структуру, подвергаемую одновременно протекающими процессами самоуплотнения – синерезиса в зонах дефектов очищенной поверхности. Протекание этих процессов продолжается во времени, сопровождаемое увеличением прочности.

Чем прочнее исходная марка щебня, тем меньшее влияние на него оказывает ультразвуковое воздействие.

Представленные исследования являются основой рекоменлации к использованию полученных результатов в практических целях.

Перспективными исследованиями в этой области являются также изучение возможностей многократного использования раствора ЛСТ при модификации известнякового щебня и сокращение время его пропитки в несколько раз, что в значительной степени снизит себестоимость модифицированного известнякового щебня Республики Крым.

Список литературы / References

1. Инвестиционный портал Республики Крым. – URL: http://old.investincrimea.ru/show_content.php?alias=passport_prom&mid=1&m2=464 (дата обращения: 23.10.2017).

2. Матюшкина О. П. Закономерности распространения и вещественный состав декоративных разновидностей верхнеюрских мраморизованных известняков Крыма // Геотехнічна механіка. – 2013. – № 112. – С. 186-195.

3. Подгородецкий П. Д. Крым : Природа : справ. изд. – Симферополь : Таврия, 1988. – 192 с., 16 л. ил.

4. Биюк-Янкойский карьер, Мраморное село, Симферопольский район, Республика Крым, Россия. – URL : http://webmineral.ru/deposits/item.php?id=2299 (дата обращения: 23.10.2017).

5. Ключевые проблемы стратиграфии восточной части Горного Крыма. Новые микропалеонтологические данные датирования флишевых пород / Е. Шеремет [и др.] // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36, № 2. – С. 35-56.

6. География самоцветов и коллекционных камней Крыма / П. Н. Баранов [и др.] // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Т. 10, № 2 (13). – С. 300-304.

7. Глинянова, И. Ю. Повышение прочностных характеристик известнякового щебня наномодифицированным отходом производства / И. Ю. Глинянова, И. П. Минченко // Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития в условиях Волгоградской области : материалы 2-й Всерос. науч.-техн. конф., г. Волгоград, 17-18 дек. 2009 г. / ВолГУ. – Волгоград, 2009. – С. 159-161.

8. Пат. 2408550 Российская Федерация, МПК C04B24/18. Способ приготовления известнякового строительного щебня / И. Ю. Глинянова [и др.] ; патентообладатель Глинянова И. Ю. – № 2009135997/03, заяв. 28.09.2009 ; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

9. Заявка на Пат. № 2017121520 Российская Федерация, Способ приготовления модифицированного строительного известнякового щебня/ И.Ю. Глинянова; патентообладатель ООО «НПК-ЭМОНОЛИТ», заяв. 19.06.2017

10. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями № 1-4). – Москва : Стандартинформ, 2008. – 17 с.

11. Ребиндер П.А. Основные проблемы физико-химической механики дисперсных и высокомолекулярных структур// Рефераты УШ Мендел.съезда по общей и прикл.химии, секц. Коллоидн.химии / М.: Изд-во АН СССР, 1959. - С.87-89.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Investicionnyj portal Respubliki Krym [Investment portal of the Republic of Crimea] [Electronic resource]. – URL: http://old.investincrimea.ru/show_content.php?alias=passport_prom&mid=1&m2=464 (Reference date: 23.10.2017). [in Russian]

2. Matjushkina O.P. Zakonomernosti rasprostranenija i veshhestvennyj sostav dekorativnyh raznovidnostej verhnejurskih mramorizovannyh izvestnjakov Kryma [Regularities of distribution and material composition of decorative varieties of the Upper Jurassic marble limestones of the Crimea] // Geotechnical mechanics. – 2013. – No 112. – P. 186-195. [In Russian]

3. Podgorodeckij P.D. Krym. Priroda: spravochnoe izdanie [Crimea. Nature: reference edition]. – Simferopol': Tavrija, 1988. – 192 p. [In Russian]

4. Bijuk-Jankojskij kar'er, Mramornoe selo, Simferopol'skij rajon, Respublika Krym, Rossija [Biyuk-Yankoy quarry, Marble village, Simferopol district, Republic of Crimea, Russia] [Electronic resource]. – URL: http://webmineral.ru/deposits/item.php?id=2299 (Reference date: 23.10.2017). [In Russian]

5. Kljuchevye problemy stratigrafii vostochnoj chasti Gornogo Kryma. Novye mikropaleontologicheskie dannye datirovanija flishevyh porod [Key problems of stratigraphy of the eastern part of the Mountainous Crimea. New micropaleontological dating data of the flysch rocks] / E. Sheremet [et al.] // Geophysical Journal. – 2014. – Vol. 36, No 2. – P. 35-56. [In Russian]

6. Geografija samocvetov i kollekcionnyh kamnej Kryma [Geography of semiprecious stones and collection stones of Crimea] / P.N. Baranov [et al.] // Geopolitics and ecogeodynamics of regions. – 2014. – Vol. 10, No. 2 (13). – P. 300-304. [In Russian]

7. Glinjanova, I.Ju. Povyshenie prochnostnyh harakteristik izvestnjakovogo shhebnja nanomodificirovannym othodom proizvodstva [Increase of strength characteristics of limestone crushed stone with nanomodified production waste] / I.Ju. Glinjanova, I.P. Minchenko // Nanotechnologies and nanomaterials: the current state and development prospects in the conditions of the Volgograd region: materials of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Conference, Volgograd, 17-18 December 2009 / VolSU. – Volgograd, 2009. – P. 159-161. [In Russian]

8. Pat. 2408550 Russian Federation, MPK C04B24/18. Sposob prigotovlenija izvestnjakovogo stroitel'nogo shhebnja [Method of preparation of limestone building crushed stone] / I.Ju. Glinjanova [et al.]; the patentee Glinjanova I.Ju. – № 2009135997/03, appl. 28.09.2009 ; publ. 10.01.2011, Bul. No. 1. [In Russian]

9. Application for Pat. № 2017121520 Russian Federation, Sposob prigotovlenija modificirovannogo stroitel'nogo izvestnjakovogo shhebnja [Method for the preparation of modified limestone crushed stone] / I.Ju. Glinjanova; the patentee LLC «NPK-Emonolit», appl. 19.06.2017 [In Russian]

10. GOST 8267-93. Shheben' i gravij iz plotnyh porod dlja stroitel'nyh rabot. Tehnicheskie uslovija [Crushed stone and gravel from dense rocks for construction works. Technical conditions] (with changes No. 1-4). – Moskva: Standartinform, 2008. – 17 p. [In Russian]

11. Rebinder P.A. Osnovnye problemy fiziko-himicheskoj mehaniki dispersnyh i vysokomolekuljarnyh struktur [The main problems of the physicochemical mechanics of disperse and high-molecular structures] / P.A. Rebinder // Reports of the Ush Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry, Section of Colloid Chemistry. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1959. – P.87-89. [In Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.120

Джумаев А.Я.[1], Сарыев К.А.[2], Джумаев Б.А.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-2297-1989,кандидат физико-математических наук,
[2]ORCID: 0000-0002-0724-8397, соискатель,
[3]ORCID: 0000-0003-1580-5824, аспирант,
Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары, Туркменистан

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ В РЕГИОНАХ ТУРКМЕНИСТАНА

Аннотация

Наличие устойчивого и надежного электропитания играет важную роль, определяя энергетическую дорожную карту области. Это может быть достигнуто через различные методы. В нашей работе мы проанализировали гибридную электростанцию, которая состоит из двух возобновляемых источников энергии: солнечный и энергия ветра. Гибридная электростанция установлена на и посвящена для экспериментального дома, который построен на территории нашего института. Кроме того эта бумага включает ценную информацию о солнечном коллекторе, который стремится снабжать жителей горячей водой. В пределах исследования непрерывно наблюдались поведения и особенности установленного оборудования. Информацией, полученной от гибридной электростанции, может быть модель и центр внимания для дальнейших осуществляющих возобновимых электростанций в Марыйской области Туркменистана.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, гибридная электростанция, устойчивое электропитание, эффективность использования энергии, солнечный коллектор.

Jumayev A.Y.[1], Saryyev K.A.[2], Jumayev B.A.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-2297-1989, PhD in Physics and Mathematics,
[2]ORCID: 0000-0002-0724-8397, Postgraduate student,
[3]ORCID: 0000-0003-1580-5824, Postgraduate student,
State Energy Institute of Turkmenistan, Mary, Turkmenistan

COMPLEX USAGE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE REGIONS OF TURKMENISTAN

Abstract

Having stable and reliable power supply plays an important role while defining the energy roadmap of the region. This can be achieved through various methods. In our work we analyzed a hybrid power station which consists of two renewable energy sources: solar and wind energy. The hybrid power station is mounted on and dedicated for an experimental house that is built in the territory of our institute. Moreover, this paper includes a valuable information about a solar collector which aims to supply residents with a hot water. Within the research, behaviors and characteristics of installed equipment were continuously observed. The information gained from the hybrid power station can be a model and a spotlight for further implementing renewable power stations in Mary region of Turkmenistan.

Keywords: renewable energy sources, hybrid power station, stable power supply, energy efficiency, solar collector.

Introduction

Discrete and periodic behavior of its sources or inconsistent accessibility to energy potential is one of the reasons for limited usage of renewable energy sources (RES). Thus, in many cases their usage results in difficulty and does not support required parameters of energy demand. At State Energy Institute of Turkmenistan (SEIT) there are being carried out scientific and technical researches related to main directions of renewable energy sources and system of energy accumulation. The accumulators are used to compensate the renewable energy loss or shortage and they guarantee the reliability of energy supply system. As a result, the efficiency of the system increases.

The aim of this research was to compute efficiency of the hybrid power station, located in Mary region, and to define optimum parameters of the station.

Complex power systems based on RES

At the State Energy Institute of Turkmenistan there was prepared a complex power system and energy accumulation system based on RES. The system was subjected to numbers of scientific-research works. As a result, there was built an experimental living house with independent energy and hot water supply. Efficiency of usage was calculated for different kinds of complex power systems based on RES in various climatic zones of Turkmenistan. Among them more appropriate system is shown below in Fig. 1 and Fig. 2.

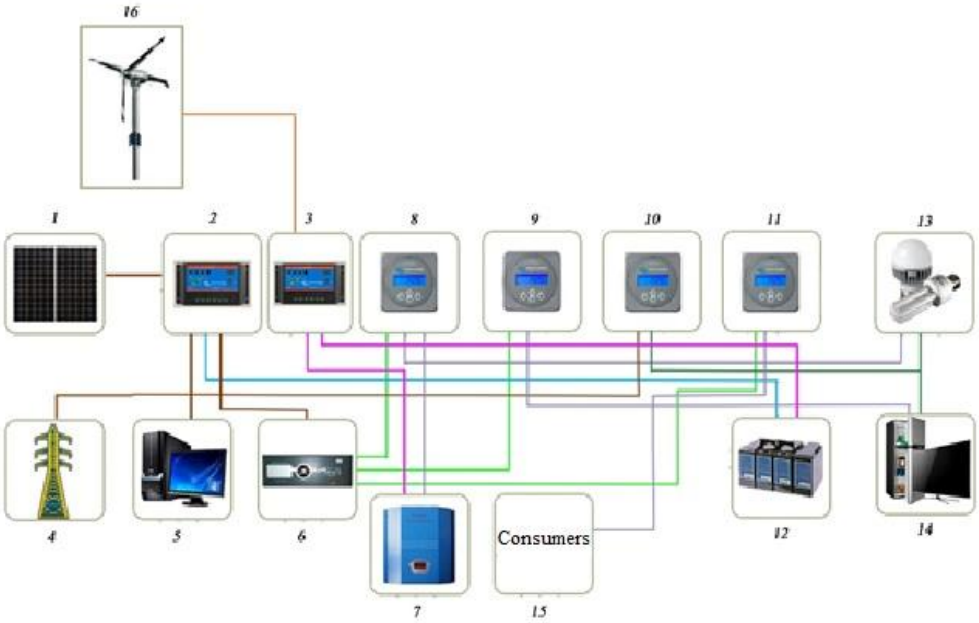


Fig. 1 – Schematic drawing of the complex power system

Schematic drawings of the consisting elements and working principle of the complex power system, used to provide energy and hot water supply, are shown in the Fig. 1 and Fig. 2.

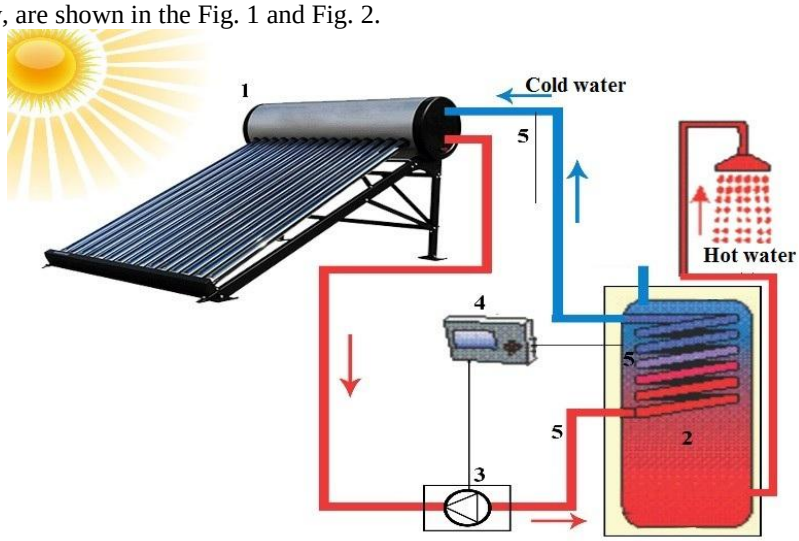


Fig. 2 – System of hot water supply

The complex or hybrid power system includes following elements: photoelectrical power station (PPS) 2 kW of power gain and wind power station (WPS) each with 2 kW of power gain, solar panels with active area of 1.6 m^2, electro-chemical accumulating batteries with 200 A*h of capacity (8 pieces). Technical parameters and elements of PPS are shown on Table 1. Photoelectrical power station contains 16 pieces of solar panels each with 130 Watts of power output, controller, invertor and 8 pieces of accumulators each having 200 A*h capacity. Similarly, technical parameters and elements of WPS are shown on Table 2. WPS contains L-2000 wind installation and hybrid controller. Technical characteristics of the system of hot water supply are shown on Table 3.

As a result of carried out experiments, scientific research and number of calculations, optimal operating regimes or classes of such power systems were defined. Our calculations show that under constant angle of inclination annual solar energy per 1m^2, coming to solar panel, was around 2040.1 kW*hour. Whereas this results was 2164.9 kW*hour if the angle of inclination was changed twice a year. The angle was different during summer season than it was during winter season. Obviously, there is no so much difference between these various power outputs. Therefore, it is economical to build a solar power station with fixed angle of inclination. In our case, optimal angle of inclination was chosen to be 36^0 directed to South. Because the efficiency of solar panel is only 16%, under fixed angle, solar panel annually generates around 326 kW*h (16% of 2040.1 kW*hour) [1, P. 20-22].

As shown in Fig. 1, hybrid power generating system consisting of solar and wind power stations generates electrical energy, which afterwards is delivered to consumers through an automated system designed for controlling the regimes of this power system [2, P. 12-18]. Firstly, accumulating batteries are charged which are then used to supply lamps and appliances with electrical energy.

Table 1 – Technical parameters and including elements of PPS

Electrical and Mechanical Data	**Remarks**
Solar module, Canadian Solar	Model type: CS6C-130
Quantity solar modules	16
Nominal Maximum Power (P_{max})	130 W
Optimum Operating Voltage (V_{mp})	17.6 V
Optimum Operating Current (I_{mp})	7.38 A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	22.1 V
Short Circuit Voltage (I_{sc})	7.95 A
Maximum System Voltage	1000 V
Maximum Series Fuse Rating	15 A
Fire Rating	CLASS C
Application Class	CLASS A
Operating Temperature	-40^0 - + 80^0 C
Power Tolerance	±5 W
Dimensions	1485x666x40 mm
Weight	12.0 kg
Solar Power Controller	LB01, PWM 01, 2 kW, 48V, 60 A
Power Inverter	YGDY, 2.5 kW, 1.2 kW
Quantity Solar Battery, VRLA Gel, 200 A•h, 12 V	8

Table 2 – technical parameters and elements of WPS

Electrical and Mechanical Data	**Remarks**
Wind station L-2000	Model: WWS20-48-NOO
Rated power (W)	2000
Rated voltage (V)	96
Wheel diameter (m)	3.3
Start up wind speed (m/s)	3
Rated wind speed (m/s)	10
Survival wind speed (m/s)	45
TOP NG (kg)	48
Body material	Casting aluminum
Blades material	Reinforced glass fiber
Generator	Three phase AC permanent magnet generator
Number of blades	3
Protection	Electronic magnet/mechanic furling
Lubrication	Lubrication grease
Working temperature	-40^0 – $+80^0$ C
Tower type	Guyed tower
Wind/solar Hybrid Controller	1
Rated battery Volt	48 V_{DC}
Rated Wind Power	2 kW
Rated PV Power	0.6 kW
Dump-load Voltage	58 V
Wind Brake Current	42 A

Table 3 – technical parameters of hot water supply system

№	**Parameters with their units**	**Remarks**
1	Solar collector, vacuum tubes, mm	58x1800
2	Size of the solar collector, mm	1880x280x240
3	Size of the reservoir, mm	1160x490x490
4	Effective area of the solar collector, m^2	1.6
5	Amount of vacuum tubes	12
6	Amount of solar collectors in the system	1
7	Type of the absorber	Vacuum tube
8	Capacity of the reservoir, liters	200
9	Type of the solar collector	SR-868C6
10	Minimum temperature of the environment, ^{0}C	From 0 down to -20
11	Type of the pump	Wilo RS 25/6

Solar collectors are mainly used in order to maintain the hot water demand and because demand for hot water to be used in household stuffs decreases during hot weather, especially in summer season, it can be used in a cooling system of a house [7, P. 234].

Working principle of such solar collectors is simple and analogous with traditional central heating system. It is a closed system, thus a liquid takes away heat from the copper tips which are heated up to temperature 350-380 ^{0}C, and then a hot liquid are pumped over through a coil of the accumulator and heats up water.

Cycle of transforming heat energy from collector into electrical energy and storing it in accumulator takes place during daytime. Operation of the pump is controlled by electronic controller which follows the command of the system. Thermal sensors are located in the collector and accumulator which is used to show the temperature of the system. Other than this, expansion container protects the system from extra high pressure, which occurs when the hot water is not used for a long time and as a result of rise in temperature.

In the given system temperature control in the solar collector and in the storage container plays an important role. Moreover, depending on the range of temperature, an optimum operating mode of the system is another significant issue. Dedicated for these purposes, the controller fulfills the basic functions, regulates a heat-carrier stream through the heat exchanger and defines the direction of heat flow. In order to circulate the heat, it is necessary to use the pump [8, P. 276]. This pump is controlled by sensors automatically. Because the rate of the water flow in the system does not exceed 2 liters per minute, a pump, working with a relatively low power, is enough to overcome this task.

Energy parameters and monitoring performance of the power installation

The experimental living house is located in State Energy Institute of Turkmenistan, in city of Mary (geographical coordinates: 37.6^0 North, 61.8^0 East). Solar panels are located on the roof of this experimental house and directed to South with 36^0 of angle of inclination [2, P. 12-18].

Technical characters and features of the system of hot water supply based on solar collector is shown on the Table 3.

In order to define the efficiency of using the solar collector, calculations of key parameters of hot water supply have been carried out. In addition, it was computed the amount of power gain through the solar collector.

While calculating the falling solar energy, the database of NASA has been used. Moreover, Louis-Gordon method was used to compute the average solar radiation towards the inclined surface [3, P. 80-92]. The results of these calculations can be seen on Table 4. In parallel with the data of NASA related to solar collector having 36^0 of inclination, during a daytime average amount of solar energy falling to the surface of 1 m^2 is around 5.58 kW*h, while it is 271.33 kW*h within a month.

The efficiency of the solar collector is estimated to be almost 60%. Under these conditions, average thermal energy developed by the solar collector, having 1.6m^2 of active area, becomes 162.8 kW*h.

Table 4 – Useful thermal energy (kW*h) which can be obtained by the solar collector

Month	**Direct solar radiation falling on 1m^2 of surface per day**	**Solar energy falling on 1m^2 of inclined surface (with 36^0 of inclination) per day**	**Solar energy falling on 1m^2 of inclined surface (with 36^0 of inclination) per month**	**Developed thermal energy per month (1.6 m^2)**	**Monthly demand for hot**
January	2.30	4.59	227.66	136.6	160
February	3.25	5.37	240.58	144.35	160
March	4.10	5.44	269.82	161.89	160
April	5.22	5.61	269.28	161.57	160
May	6.33	5.87	291.15	174.69	140
June	7.0	6.08	291.84	175.10	120
July	6.93	6.22	308.51	185.11	120
August	6.27	6.31	312.98	187.79	120
September	5.21	6.36	305.28	183.15	120
October	3.75	5.77	286.19	171.71	140
November	2.66	5.04	241.92	145.15	140
December	2.02	4.25	210.8	126.48	140
Annually developed thermal energy by the solar collector:			1953.59		1680

Researches of influence of environmental conditions, i.e. influence of cloudy weather, air dust content on operational parameters of photoelectric power station are conducted, and also low power characteristics of sunlight during winter time demand the overestimated capacities of converters of solar energy that leads to their inefficient use during the summer period, i.e. summertime accumulators are quickly charged and therefore the controller disconnects charging process of the accumulator [4, P. 496], [5, P. 62-66]. Dynamics of charging process of accumulators during the summer period is shown in Fig. 3 and Fig. 4. As it can be seen from these figures, on sunny days the accumulators are quickly charged up, therefore when they reach the peak point, the controller disconnects them from the circuit. Otherwise, accumulators will get seriously damaged [9, P. 96], [10, P. 75].

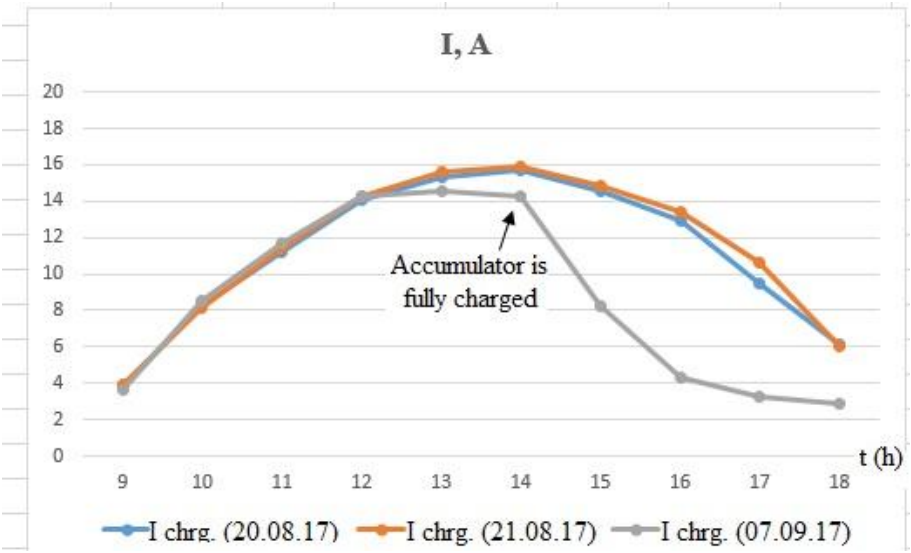


Fig. 3 – Variations of charging process depending on loads connected to the system

As a result, the efficiency decreases. The graph in Fig. 3 shows the variations of electrical current as loads are connected to the system before and after 12:00 AM. In the Fig. 4, depending on consumers of electrical energy, it is shown how fast the accumulators charge up during night time.

Experimental data has shown that during the demand of electrical energy higher than 6 kW*h at night, four accumulators connected in series operates with higher efficiency. Monitoring fragment of electrical energy demand within a month is shown in Fig. 5.

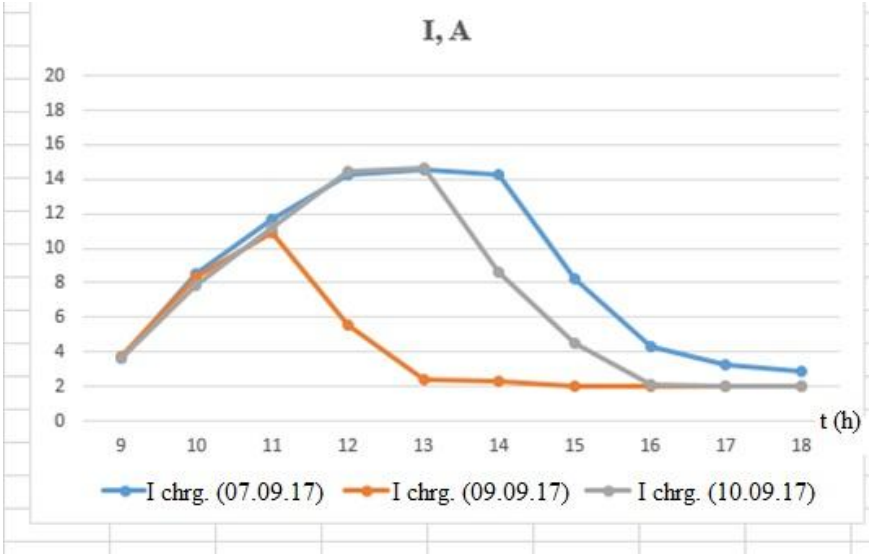


Fig. 4 – Variations of charging process of accumulator during different conditions of energy consumption

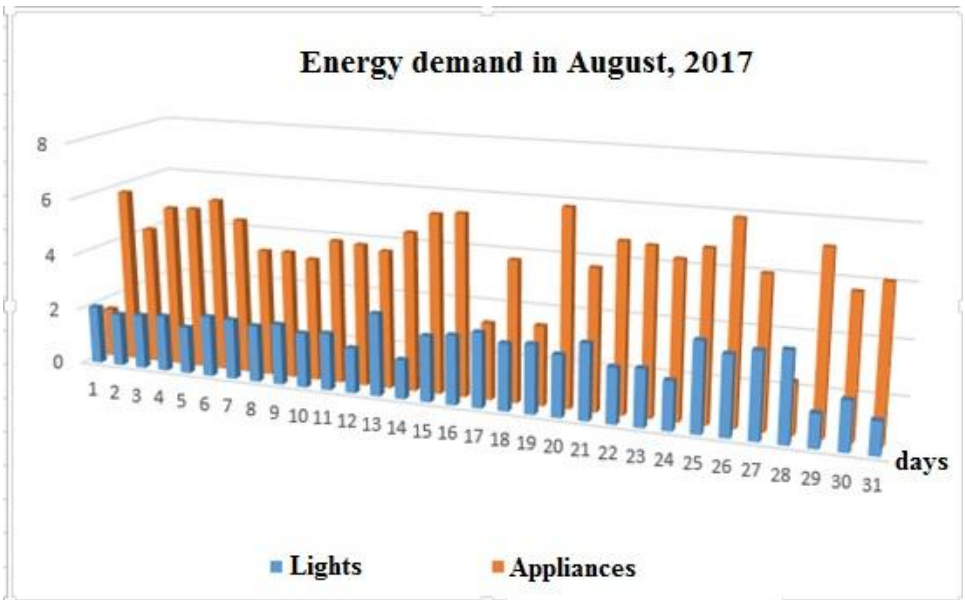


Fig. 5 – Monitoring fragment of electrical energy demand within a month

Annual operation of such complex power supply system in Mary region of Turkmenistan have shown that complex power systems for inhabited and industrial targets at the configuration corresponding to the given climatic zone, and at the account of all factors stated above such systems are effective enough in operation on all territory of Turkmenistan [6, P. 255].

After defining optimum usage of the equipment used in complex power plant, it can be concluded that the system cannot be operated at fully autonomous regime during winter season, while this can be achieved during summer season in Mary and Lebap region of Turkmenistan.

Conclusions

1. Complex power systems for inhabited and industrial targets at the configuration corresponding to the given climatic zone, and at the account of all factors stated above such system is effective enough in operation on all territory of Turkmenistan.
2. Optimum angle of inclination of solar panels, located in city of Mary, from horizontal surface is calculated to be 17^0 during summer season while it is 61^0 during winter season. In case of fixed angle of inclination, the optimum angle was estimated to be 36^0 from horizontal surface. Under fixed angle of inclination, solar panel annually generates around 326 kW*h of electrical energy per $1m^2$ of effective area.
3. Researches show that using solar collectors, to supply consumers with hot water, is so effective that it decreases former expenses by 70%.
4. The data of the researches proves the importance of using solar collectors as an alternative energy resource. In connection with inevitable growth of tariffs for electrical or thermal energy and the prices of fuel, and also aspiration of consumers to increase reliability of a heat supply at the expense of creation of own sources of thermal energy, usage of solar collectors will steadily increase.

Список литературы / References

1. Джумаев А. Я., Кадыров Э. Д. Исследование эксплуатационных параметров фотоэлектрической солнечной станции в условиях Туркменистана / А. Я. Джумаев, Э. Д. Кадыров // Автоматизация в промышленности. – 2015. – №11. – С. 20-22.

2. Джумаев А. Я., Кадыров Э. Д. Автоматизированная система управления автономным энергоснабжением / А. Я. Джумаев, Э. Д. Кадыров // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2016. – №12(89). – С. 12-18.

3. Jumayev A. Y. Scientific-technical and methodological aspects of an estimation of resources of solar energy in Turkmenistan / A. Y. Jumayev // International Conference on European Science and Technology: materials of the XI international research and practice conference. Munich: October 21-22, 2015. – P. 80-92.

4. Стребков Д. С. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане / Д. С. Стребков, А. М. Пенджиев, Б. Д. Мамедсахатов. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012. – 496 с.

5. Пенджиев А. М., Мамедсахатов Б. Д. Основные условия и факторы развития фотоэнергетики в Туркменистане / А. М. Пенджиев, Б. Д. Мамедсахатов // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2007. – №7(51). – С. 62-66.

6. Nourqolipour R., Komaki C. B. Planning the best locations for solar electric generating systems in Turkmenistan / R. Nourqolipour, C. B. Komaki // Science, Technology and Innovative Technologies in the prosperous epoch of the powerful state. – Ashgabat : Ylym, 2015. – 255 p.

7. Лосюк Ю. А., Кузьмич В. В. Нетрадиционные источники энергии / Ю. А. Лосюк, В. В. Кузьмич. – Мн.: УП «Технопринт», 2005. – 234 с.

8. Batukhtin A. G. Development of the method heat supply increase with the use of heat exchange efficiency / A. G. Batukhtin, S. G. Batukhtin, P. G. Safronov, M. G. Baranovskaya // European Science and Technology. – 2015. – Vol. 2. – P. 275-279.

9. Solanki C. S. Solar photovoltaic technology and systems / C. S. Solanki. – Delhi: PHI Learning Private Limited, 2016. – 96 p.

10. Solanki C. S. Solar Photovoltaics: Fundamentals, technologies and applications / C. S. Solanki. – Delhi: PHI Learning Private Limited, 2015. – 75 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Jumayev A. Y., Kadyrov E. D. Issledovaniye ekspluatasionnyh parametrov fotoelektriceskoy solnecnoy stansii v usloviyah Turkmenistana [Research on implementation parameters of photoelectrical solar station under conditions of Turkmenistan] / A. Y. Jumayev, E. D. Kadyrov // Awtomatizasiya v promyshlennosti [Automation in industry]. – 2015. – №11. – P. 20-22. [in Russian]

2. Jumayev A. Y. Kadyrov E. D. Awtomatizirowannaya sistema uprawleniya awtonomnym enegosnabzeniyem [Automatical control system of autonomous energy supply] / A. Y. Jumayev, Kadyrov E.D. // Awtomatizasiya i IT v energetike [Automation and IT in power engineering sector]. – 2016. – №12(89). – P. 12-18. [in Russian]

3. Jumayev A. Y. Scientific-technical and methodological aspects of an estimation of resources of solar energy in Turkmenistan / A. Y. Jumayev // International Conference on European Science and Technology: materials of the XI international research and practice conference. Munich: October 21-22, 2015. – P. 80-92.

4. Strebkov D. S. Razvitie solnechnoy energetiki v Turkmenistane [Development of solar energy in Turkmenistan] / D. S. Strebkov, A. M. Penjiyev, B. D. Mamedsahatov. – M.: GNU VIYeSH, 2012. – 496 p. [in Russian]

5. Penjiyev A. M., Mamedsahatov B. D. Osnovnie uslovie i faktory razvitiya fotoenergetiki v Turkmenistane [Main conditions and factors of developing photoenergy in Turkmenistan] / A. M. Penjiyev, B. D. Mamedsahatov // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2007. – №7(51). – P. 62-66. [in Russian]

6. Nourqolipour R., Komaki C. B. Planning the best locations for solar electric generating systems in Turkmenistan / R. Nourqolipour, C. B. Komaki // Science, Technology and Innovative Technologies in the prosperous epoch of the powerful state. – Ashgabat : Ylym, 2015. – 255 p.

7. Losyuk Y. A., Kuzmich V. V. Netradisionniye istochniki energii [Untraditional resources of energy] / Y. A. Losyuk, V. V. Kuzmich. – Minsk.: UP «Технопринт» [“Technoprint”], 2005. – 234 p. [in Russian]

8. Batukhtin A. G. Development of the heat supply method efficiency of which increase with the use of heat exchange / A. G. Batukhtin, S. G. Batukhtin, P. G. Safronov, M. G. Baranovskaya // European Science and Technology. – 2015. – Vol. 2. – P. 275-279.

9. Solanki C. S. Solar photovoltaic technology and systems / C. S. Solanki. – Delhi: PHI Learning Private Limited, 2016. – 96 p.

10. Solanki C. S. Solar Photovoltaics: Fundamentals, technologies and applications / C. S. Solanki. – Delhi: PHI Learning Private Limited, 2015. – 75 p.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.152

Егорова Ю.Б.[1], Давыденко Л.В.[2], Чибисова Е.В.[3], Шмырова А.В.[4]

[1]ORCID: 0000-0002-3111-9499, профессор, доктор технических наук;

[3]ORCID: 0000-0002-6201-9984, Ступинский филиал МАИ;

[2]ORCID: 0000-0002-1175-3409, доцент, кандидат технических наук, Московский политехнический университет;

[4]ORCID: 0000-0002-2269-0482, ПАО «Научно-производственное предприятие «Аэросила»

ПСЕВДО β-ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация

На основе обобщения опубликованных литературных данных проведены статистические исследования температуры полиморфного превращения, фазового состава и механических свойств деформированных полуфабрикатов из титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al. Методом регрессионного анализа получены уравнения для расчёта температуры полиморфного превращения и количества первичной α-фазы после закалки. Установлены статистические взаимосвязи механических свойств, позволяющие оценить возможные комбинации трещиностойкости, прочностных и пластических характеристик.

Ключевые слова: химический состав, механические свойства, термическая обработка, применение сплава Ti-10V-2Fe-3Al (Ti-10-2-3).

Yegorova Yu.B.[1], Davydenko L.V.[2], Chibisova E.V.[3], Shmyrova A.V.[4]

[1]ORCID: 0000-0002-3111-9499, Professor, PhD in Engineering;

[3]ORCID: 0000-0002-6201-9984, Stupino branch of MAI;

[2]ORCID: 0000-0002-1175-3409, Associate professor, PhD in Engineering, Moscow Polytechnic University;

[4]ORCID: 0000-0002-2269-0482, PJSC Research and Development Enterprise, Aerosila

PSEUDO β-TITANIUM ALLOY FOR HIGH-LOADED PARTS OF AERONAUTICAL ENGINEERING

Abstract

Based on the generalization of data, presented in other works, the statistical research of the temperature of polymorphic transformation, phase composition, and mechanical properties of deformed semi-finished products from Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloy are carried out. The regression analysis is used to obtain equations for calculating the temperature of the polymorphic transformation and the amount of the primary α-phase after quenching. The statistical interrelations of mechanical properties have been established, they make it possible to evaluate possible combinations of crack resistance, strength and plastic characteristics.

Keywords: chemical composition, mechanical properties, heat treatment, use of Ti-10V-2Fe-3Al (Ti-10-2-3) alloy.

Сплав Ti-10V-2Fe-3Al (сокращенное обозначение Ti-10-2-3) – это высокопрочный псевдо β-титановый сплав, разработанный в 80-х годах прошлого века в США и предназначенный для изготовления высоконагруженных деталей авиационного назначения (конструкций планеров самолетов, шасси, пилонов, дверей, шарниров, цапф, подшипников, деталей вертолетов и др.) [1], [2], [3]. В РФ в начале 2000-х годов было налажено производство различных полуфабрикатов из этого сплава для компании Боинг. В настоящее время из него изготавливают слитки, кованые билеты и более ста шифров штампованных поковок массой от 20 до 3200 кг [4]. Следует отметить, что сплав Ti-10-2-3 в отличие от других титановых сплавов не имеет российских аналогов, поэтому в отечественной научной литературе практически полностью отсутствует какая-либо доступная информация, за исключением самых общих сведений, приведенных в справочниках [1], [2]. Данная статья восполняет, хотя бы частично, этот пробел. В качестве литературных источников были использованы уникальный по объему информации американский справочник [3], труды Международных конференций по титану [5-12], монография [13], справочные издания [1], [2] и некоторые другие источники [14-19].

Цель исследования состояла в обобщении литературных данных и статистическом исследовании фазового состава, температуры полиморфного превращения (ТПП) и механических свойств сплава Ti-10-2-3.

Исходными данными для статистического анализа послужили следующие факторы: содержание легирующих элементов и примесей, температура полиморфного превращения ($T_{ПП}$); температура нагрева под закалку $T_з$; количество первичной α-фазы после закалки, механические свойства (условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности $\sigma_в$, относительное удлинение δ, относительное сужение ψ, вязкость разрушения K_{1c}). Статистические исследования, проведенные с помощью пакета «Statistica», включали в себя первичную статистическую обработку и корреляционно-регрессионный анализ по стандартным методикам [20].

Химический состав сплава по американским спецификациям авиационного назначения AMS приведен в табл. 1. Средние типичные значения интегральных характеристик химического состава: коэффициент β-стабилизации $k_β$=1,1,

структурные эквиваленты по алюминию $[Al]^{стр}_{экв}$ =4,0% и молибдену $[Mo]^{стр}_{экв}$ =12,1 [2]. По данным американского справочника [3] температура полиморфного превращения (ТПП) соответствует 790-805°С. Однако обзор опубликованных работ показывает, что ТПП может изменяться в более широком диапазоне 780 – 840^{0}С [9, с. 948-955; 10, с. 529-536; 11, с. 1164-1170, 1187-1194, 1219-1226; 12, с. 443-446, 529-536; 13; 15-17]. Для стабилизации разброса ТПП в пределах партии однотипных слитков необходимо, чтобы величина суммарных колебаний химического состава, эквивалентного алюминию и молибдену, была на уровне не более 2,5 % [21, 22]. Для оценки ТПП можно использовать соотношение:

ТПП = 890 + 22,3Al – 13,9V – 8,0Fe.

Таблица 1 – Химический состав сплава Ti-10-2-3 по спецификациям AMS 4983, AMS 4984, AMS 4986, AMS 4987 [3]

Основные компоненты, % по массе					Примеси (не более, %)				
Ti	V	Fe	Al	Y	C	O	N	H	Прочие
Основа	9,0–11,0	1,6–2,2	2,6–3,4	≤0,005	0,05	0,13	0,05	0,015	0,3

Фазовый состав сплава Ti-10-2-3 в равновесном состоянии после простого отжига представлен ~30-40% α-фазы и ~60-70% β-фазы [2, с. 53]. Параметры решётки α-фазы: *a* = 0,293595 нм, *c* = 0,467454 нм; β-фазы: *a* = 0,3238 нм [3]. Сплав обладает высокими технологическими свойствами при обработке давлением. Из него изготавливают различные виды полуфабрикатов: биллеты, плиты, прутки, поковки, которые обычно используют в термически упрочненном состоянии (табл. 2). Для этого применяют закалку, обработку на твердый раствор или β-отжиг, после чего следует старение или перестаривание (табл. 2). Сплав Ti-10-2-3 обладает сквозной прокаливаемостью в деталях толщиной до 125 мм и имеет значительный эффект термического упрочнения.

Таблица 2 – Промышленные режимы термической обработки сплава Ti-10-2-3 [2], [3]

Специфи-кация	Термическая обработка	Закалка			Старение*
		Т, °С	τ, ч	Охлаждение	Т, °С
AMS 4983A	Старение для снятия напряжений	–	–	–	480–510
AMS 4984	Закалка +старение	ТПП – (15÷40)^{0}С	≥0,5	вода	480–510
AMS 4986	Закалка +старение	ТПП– (15÷40)^{0}С	≥0,5	вода	510–540
AMS 4987	Закалка + перестаривание	ТПП – (15÷40)^{0}С	≥0,5	вода	565–620

Примечание: * охлаждение на воздухе, ≥ 8 часов.

При повышении температуры нагрева под закалку количество α-фазы уменьшается и после закалки с температур выше ТПП структура сплава представлена метастабильной β-фазой (с когерентной по отношению к матрице ω-фазой). Количество первичной α-фазы, формирующейся в процессе закалки в интервале температур от 700^{0}С до ТПП, можно оценить по соотношению:

$n_\alpha = (0,3\pm0,02)\cdot(ТПП - T_з)$, %.

В промышленных условиях применяют нагрев под закалку не до β-области, а до температур α+β-области ниже ТПП на 15-70°С [2, 3], так что фазовый состав после закалки представлен первичной α-фазой и метастабильной β-фазой, а после старения - первичной и вторичной α-фазами и β-фазой равновесного состава. Количество фаз и прочностные свойства сплава в процессе старения могут как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от температуры нагрева под закалку, температуры старения и длительности старения. По данным работы [10, с.1147-1154] после закалки (760^{0}С, 1ч, вода) и старения (495-520^{0}С, 8ч, воздух) фазовый состав сплава представлен 23-28% первичной α-фазы, 41-47% β-фазы и 30-33% вторичной α-фазы. Старение при температурах ниже 475°С не применяют во избежание образования ω-фазы, резко снижающей пластичность. Максимальный эффект упрочнения наблюдается после старения при температурах 480-540°С [3].

Механические свойства поковок после стандартной термической обработки должны соответствовать требованиям, приведенным в табл. 3.

Таблица 3 – Гарантированные механические свойства штампованных поковок сплава Ti-10-2-3 при комнатной температуре [2], [3]

Нормативная документация	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	K_{1C}, МПа·м$^{1/2}$	Толщина поковки, мм
AMS 4983	1103	1240	4	факульта-тивно	-	<25
AMS 4984	1100	1190	4		44	<75
AMS 4986	1000	1100	6		60	-
AMS 4987	895	965	8		88	-

Комплекс механических свойств сплава Ti-10-2-3 можно варьировать в довольно широких пределах путем термической обработки. По данным, обобщенным в справочнике [2], предел прочности различных полуфабрикатов из сплава Ti-10-2-3 может изменяться от 842 до 1545 МПа, относительное удлинение – от 0 до 38%, поперечное сужение – от 0 до 60%, вязкость разрушения – от 30 до 100 МПа·м$^{1/2}$. Путем закалки и старения можно получить довольно высокий уровень временного сопротивления разрыву (более 1550 МПа). Однако при этом почти полностью утрачиваются пластические свойства, резко падает вязкость разрушения (рис. 1). Поэтому сплав чаще всего применяют в состоянии небольшого перестаривания.

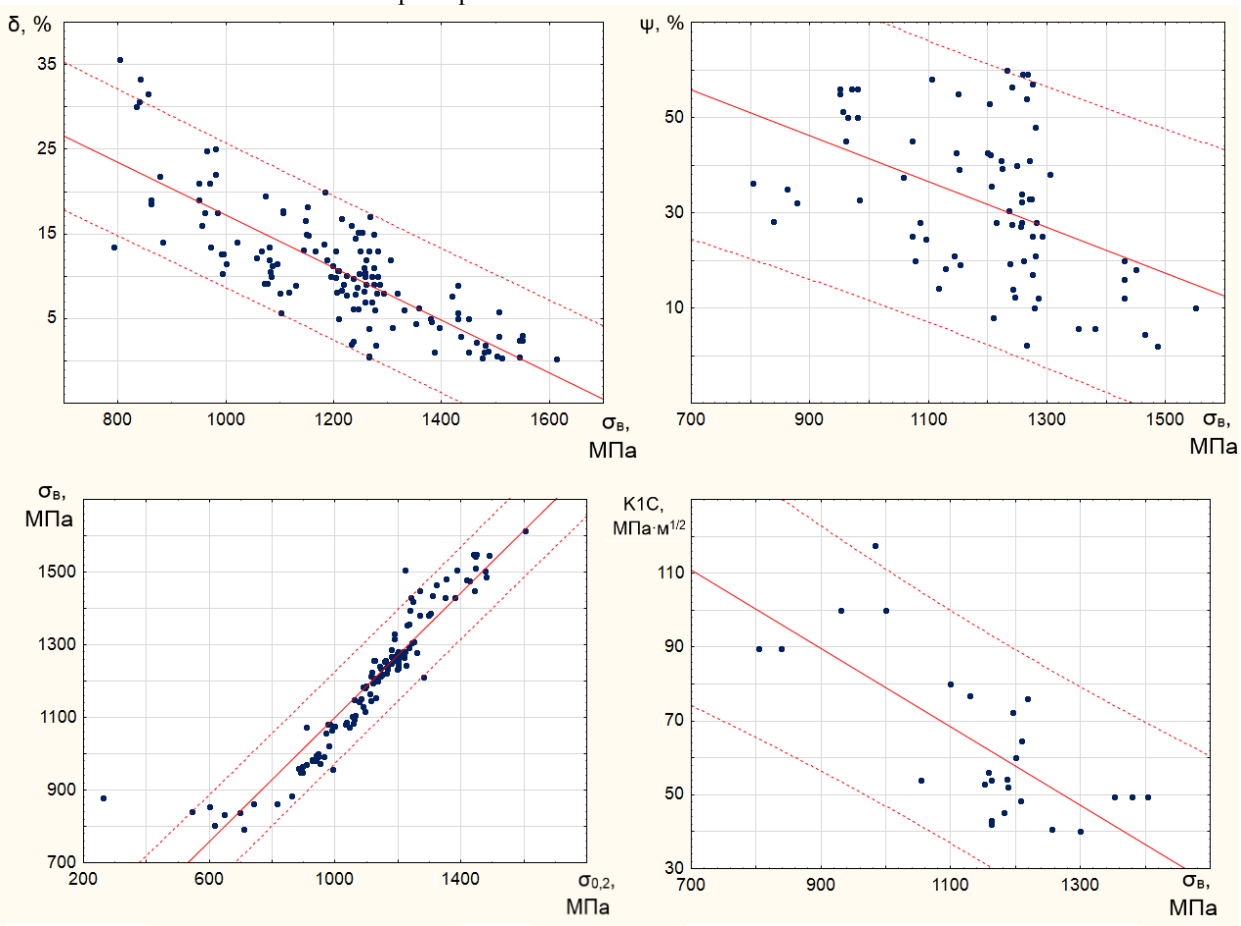


Рис. 1 – Регрессионные взаимосвязи механических свойств сплава Ti-10V-2Fe-3Al после различной термической обработки

Из полученных данных следует, что увеличение предела прочности на 100 МПа приводит к снижению относительного удлинения на 3%, поперечного сужения на 6%, вязкости разрушения в среднем на 14 МПа·$\sqrt{\text{м}}$ (табл. 4). Для оценки надежности конструкций в эксплуатации применяют параметр $K_{IC}/\sigma_{0,2}$, поэтому вязкость разрушения целесообразно прогнозировать в зависимости от условного предела текучести, а не предела прочности. В этом случае увеличение $\sigma_{0,2}$ на 100 МПа приводит к снижению K_{IC} на 8 МПа·$\sqrt{\text{м}}$.

При уровне прочности $\sigma_в$=800 МПа относительное удлинение лежит в интервале 15-35 %, поперечное сужение 30-60%, вязкость разрушения 90-120 МПа·$\sqrt{\text{м}}$ (рис. 1). При $\sigma_в$=1400 МПа эти характеристики снижаются до значений δ=2-7 %, ψ=5-30%, K_{IC}= 30-50 МПа·$\sqrt{\text{м}}$.

Таблица 4 – Результаты регрессионного анализа взаимосвязей механических свойств деформированных полуфабрикатов из сплава Ti-10V-2Fe-3Al после термической обработки

№	Регрессионная модель	R	S	n
1	$\delta = 43{,}8 - 0{,}03\cdot\sigma_{0,2}$	0,83	4,0 %	132
2	$\delta = 48{,}3 - 0{,}03\cdot\sigma_в$	0,8	4,3 %	132
3	$\psi = 70{,}4 - 0{,}03\cdot\sigma_{0,2}$	0,39	15,3 %	74
4	$\psi = 89{,}6 - 0{,}05\cdot\sigma_в$	0,46	14,7 %	74
5	$\sigma_{0,2} = -119 + 1{,}03\cdot\sigma_в$	0,94	70 МПа	132
6	$K_{1C} = 149{,}4 - 0{,}08\cdot\sigma_{0,2}$	0,69	17,8 МПа·$\sqrt{\text{м}}$.	12
7	$K_{1C} = 185{,}3 - 0{,}11\cdot\sigma_в$	0,72	15 МПа·$\sqrt{\text{м}}$.	27

Примечание: R – коэффициент корреляции, S – статистическая ошибка, n – объем выборки.

На основе проведенных статистических исследований можно оценить возможные комбинации трещиностойкости, прочностных и пластических характеристик деформированных полуфабрикатов после различной термической обработки.

Список литературы / References

1. Кершенбаум В.С. Международная инженерная энциклопедия: Международный транслятор современных сталей и сплавов / под ред. В.С. Кершенбаума. - М.: Наука и техника. 1992. - 650 с.

2. Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. - М.: ВИЛС–МАТИ. 2009. - 520 с.

3. Boyer R. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys. / Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. – OH, USA, ASM International: Materials Park, 1994. – 1176 p.

4. Кондрашов Е.Н. Исследование структуры кристаллизации сплава Ti-10V-2Fe-3Al при ВДП / Е.Н. Кондрашов, М.О. Ледер, К.А. Русаков // Титан. - 2017. - № 1 (55). - С. 22-27.

5. Jaffee R.I. Titanium Science and Technology: Proceedings of the 2nd International Conference on Titanium / Ed. by R.I. Jaffee and H.M. Burte. – New York: Plenum Press, 1973. – Vol. 3. – P. 1945-1956, P. 1993-1995.

6. Титан. Металловедение и технология: Труды 3-й международной конференции по титану. – М.: ВИЛС, 1977-1978. - Т. 1 – С. 199-204, С. 281-293, Т.2 – С. 513-524, С. 665-678, С. 697-707.

7. Titanium'80: Science and Technology: Proceedings of the Fourth International Conference on Titanium. – Kyoto, Japan, May 19-22, 1980. - Vol. 1. – P. 469-475, Vol. 2. – P. 1571-1581.

8. Titanium'84: Science and Technology: Proceedings of the Fifth International Conference on Titanium. – FRG, Munich, 1984. - Vol. 2. – P. 1261-1267, 1307-1313.

9. Titanium'95: Science and Technology: Proceedings 8th World Conference on Titanium. – Birmingham, UK, London, 1996. - Vol. 1. – P. 948-955, 1147-1154. - Vol. 2. – P. 1243-1250, 1371-1378.

10. Titanium'99: Science and Technology: Proceedings 9th World Conference on Titanium. – Saint-Petersburg, Russia, 7-11 July 1999. - Vol. 1. – P. 487-492, 529-536. - Vol. 2. – P. 1164-1170, 1187-1194, 1219-1226. - Vol. 3. – P. 1548-1552.

11. Titanium'2003: Science and Technology: Proceedings 10th World Conference on Titanium. – Hamburg, Germany, 13-18 July 2003. - Vol. 1. – P. 470-477. - Vol. 2. – P. 1219-1226. - Vol. 3. – P. 1895-1902. - Vol. 4. – P. 2051-2057, 2615-2626, 2643-2653, 2713-2717. - Vol. 5. – P. 3059-3066.

12. Titanium'2007: Science and Technology: Proceedings 11th World Conference on Titanium. – Kyoto, Japan, 3-7 June 2007. - Vol. 1. – P. 95-98, 443-446, 529-536, 571-575. - Vol. 2. – P. 929-932, 1255-1262, 1295-1300.

13. Natraj Y. Heattreatment-Microstructure and Tensile behavior of Ti-10V-3Fe-3Al / Y. Natraj, N. Rao GVS, TK Nandy // Germany, Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. - 2011. – 54 p.

14. Rosenberg H.W. Ti-10V-2Fe-3Al: A forging alloy development / H.W. Rosenberg // Proceedings of the Metal Society Conference on Forging and Properties of Aerospace Materials, The Metals Society, London. - 1978. - P. 279-299.

15. Duerig T.W. Shape memory in Ti-10V-2Fe-3Al / T.W. Duerig, D.F. Richter, J. Albrecht // Scripta Metallurgica. - 1982. - Vol. 16, - P. 957-961.

16. Zhongquan D. Study on optimizing Isothermal Forging Technological parameters of Ti-10V-2Fe-3Al by Way of Computer Programme / D. Zhongquan, C. Yuxiu, W. Gaochao, W. Yimin // Advanced Technology of Plasticity. - 1990. - Vol. 1, - P. 279-283.

17. Boyer R.R. Processing Properties relationships of Ti-10V-2Fe-3Al / R.R. Boyer, G.W. Kuhlman // Metallurgical Transactions A. - 1987. - Vol. 18. - Issue 12. - P. 2095–2103.

18. Toyama K. The Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Ti-10V-2Fe-3Al / K. Toyama, T. Maeda // Transactions Iron and Steel Institute of Japan. - 1986. - Vol. 26. - P. 814-821.

19. Göken J. Strain-dependent damping of Ti–10V–2Fe–3Al at room temperature / J. Göken, S. Fayed, P. Skubisz // Acta Physica Polonica A. - 2016. - Vol. 130. - No. 6. - P. 1352–1357.

20. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных / А.П. Кулаичев. – М: ФОРУМ: ИНФРА-М. 2006. – 512 с.

21. Егорова Ю.Б. Прогнозирование температуры полиморфного превращения промышленных слитков титановых сплавов по их химическому составу / Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, Е.В. Чибисова, С.Б. Белова // Электрометаллургия. - 2016. - №12. - С. 7-15.

22. Егорова Ю.Б. Исследование стабильности температуры полиморфного превращения промышленных слитков титановых сплавов / Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, И.М. Мамонов // Международный научно-исследовательский журнал International Research Journal. - 2016. - №5(47). - Ч. 3. - С. 92-94.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kershenbaum V.S. Mezhdunarodnaja inzhenernaja jenciklopedija: Mezhdunarodnyj transljator sovremennyh stalej i splavov [International Engineering Encyclopedia: International translator of modern steels and alloys] / ed. by. V.S. Kershenbaum. - M.: Nauka i tehnika. 1992. - 650 p. [in Russian]

2. Il'in A.A. Titanovye splavy. Sostav, struktura, svojstva. Spravochnik [Titanium alloys. Composition, structure, properties. Directory] / A.A. Il'in, B.A. Kolachev, I.S. Pol'kin. - M.: VILS–MATI. 2009. - 520 p. [in Russian]

3. Boyer R. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys. / Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. – OH, USA, ASM International: Materials Park, 1994. – 1176 p.

4. Kondrashov E.N. Issledovanie struktury kristallizacii splava Ti-10V-2Fe-3Al pri VDP [Investigation of the crystallization structure of the Ti-10V-2Fe-3Al alloy at the VAR] / E.N. Kondrashov, M.O. Leder, K.A. Rusakov // Titan [Titanium]. - 2017. - № 1 (55). - P. 22-27. [in Russian]

5. Jaffee R.I. Titanium Science and Technology: Proceedings of the 2nd International Conference on Titanium / Ed. by R.I. Jaffee and H.M. Burte. – New York: Plenum Press, 1973. – Vol. 3. – P. 1945-1956, P. 1993-1995.

6. Titan. Metallovedenie i tehnologija: Trudy 3-j mezhdunarodnoj konferencii po titanu [Titanium. Metal Science and Technology: Proceedings of the 3rd International Conference on Titanium] – M.: VILS, 1977-1978. Vol. 1 – P. 199-204, P. 281-293, - Vol.2 – P. 513-524, P. 665-678, P. 697-707. [in Russian]

7. Titanium'80: Science and Technology: Proceedings of the Fourth International Conference on Titanium. – Kyoto, Japan, May 19-22, 1980. - Vol. 1. – P. 469-475, Vol. 2. – P. 1571-1581.

8. Titanium'84: Science and Technology: Proceedings of the Fifth International Conference on Titanium. – FRG, Munich, 1984. - Vol. 2. – P. 1261-1267, 1307-1313.

9. Titanium'95: Science and Technology: Proceedings 8th World Conference on Titanium. – Birmingham, UK, London, 1996. - Vol. 1. – P. 948-955, 1147-1154. - Vol. 2. – P. 1243-1250, 1371-1378.

10. Titanium'99: Science and Technology: Proceedings 9th World Conference on Titanium. – Saint-Petersburg, Russia, 7-11 July 1999. - Vol. 1. – P. 487-492, 529-536. - Vol. 2. – P. 1164-1170, 1187-1194, 1219-1226. - Vol. 3. – P. 1548-1552.

11. Titanium'2003: Science and Technology: Proceedings 10th World Conference on Titanium. – Hamburg, Germany, 13-18 July 2003. - Vol. 1. – P. 470-477. - Vol. 2. – P. 1219-1226. - Vol. 3. – P. 1895-1902. - Vol. 4. – P. 2051-2057, 2615-2626, 2643-2653, 2713-2717. - Vol. 5. – P. 3059-3066.

12. Titanium'2007: Science and Technology: Proceedings 11th World Conference on Titanium. – Kyoto, Japan, 3-7 June 2007. - Vol. 1. – P. 95-98, 443-446, 529-536, 571-575. - Vol. 2. – P. 929-932, 1255-1262, 1295-1300.

13. Natraj Y. Heattreatment-Microstructure and Tensile behavior of Ti-10V-3Fe-3Al / Y. Natraj, N. Rao GVS, TK Nandy // Germany, Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. - 2011. – 54 p.

14. Rosenberg H.W. Ti-10V-2Fe-3Al: A forging alloy development / H.W. Rosenberg // Proceedings of the Metal Society Conference on Forging and Properties of Aerospace Materials, The Metals Society, London. - 1978. - P. 279-299.

15. Duerig T.W. Shape memory in Ti-10V-2Fe-3Al / T.W. Duerig, D.F. Richter, J. Albrecht // Scripta Metallurgica. - 1982. - Vol. 16, - P. 957-961.

16. Zhongquan D. Study on optimizing Isothermal Forging Technological parameters of Ti-10V-2Fe-3Al by Way of Computer Programme / D. Zhongquan, C. Yuxiu, W. Gaochao, W. Yimin // Advanced Technology of Plasticity. - 1990. - Vol. 1, - P. 279-283.

17. Boyer R.R. Processing Properties relationships of Ti-10V-2Fe-3Al / R.R. Boyer, G.W. Kuhlman // Metallurgical Transactions A. - 1987. - Vol. 18. - Issue 12. - P. 2095–2103.

18. Toyama K. The Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Ti-10V-2Fe-3Al / K. Toyama, T. Maeda // Transactions Iron and Steel Institute of Japan. - 1986. - Vol. 26. - P. 814-821.

19. Göken J. Strain-dependent damping of Ti–10V–2Fe–3Al at room temperature / J. Göken, S. Fayed, P. Skubisz // Acta Physica Polonica A. - 2016. - Vol. 130. - No. 6. - P. 1352–1357.

20. Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannyh [Methods and means of complex data analysis] / A.P. Kulaichev. – M: FORUM: INFRA-M. 2006. – 512 p. [in Russian]

21. Egorova Ju.B. Prognozirovanie temperatury polimorfnogo prevrashhenija promyshlennyh slitkov titanovyh splavov po ih himicheskomu sostavu [Forecasting the beta transus temperature of industrial ingots of titanium alloys by their chemical composition] / Ju.B. Egorova, L.V. Davydenko, E.V. Chibisova, S.B. Belova // Jelektrometallurgija [Electrometallurgy]. - 2016. - №12. - P. 7-15. [in Russian]

22. Egorova Ju.B. Issledovanie stabil'nosti temperatury polimorfnogo prevrashhenija promyshlennyh slitkov titanovyh splavov [Investigation of the beta transus temperature stability of industrial ingots of titanium alloys] / Ju.B. Egorova, L.V. Davydenko, I.M. Mamonov // International Research Journal. - 2016. - №5(47). - Ch. 3. - S. 92-94. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.150

Извеков Ю.А.[1], Гугина Е.М.[2]
[1]ORCID: 0000-0002-1892-4055, кандидат технических наук, доцент, [2]Кандидат педагогических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КРАНОВ

Аннотация

Представляется актуальным разработка и создание согласованных по целям и задачам отдельных моделей конструкционного риска. Структура таких моделей предполагает разложение R-характеристик. Описана концептуальная расчетная модель потенциальных зон разрушения несущих конструкций металлургических мостовых кранов. Определены задачи для корректного описания такой модели. Предложенные теоретические модели могут быть использованы в решении практических задач конструкционного риск-анализа такой группы объектов как специальные тяжелые металлургические мостовые краны.

Ключевые слова: конструкционный риск-анализ, технический риск, несущие конструкции, потенциальные зоны разрушения, металлургические мостовые краны, сложная техническая система.

Izvekov Yu.A.[1], Gugina E.M.[2]
[1]ORCID: 0000-0002-1892-4055, PhD in Engineering, Associate professor, [2]PhD in Pedagogy,
Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova

DESIGN MODEL OF POTENTIAL DESTRUCTION ZONES OF METALLURGICAL CRANES BEARING STRUCTURES

Abstract

Development and creation of individual models of structural risk agreed by the purposes and tasks are topical. The structure of such models implies the decomposition of R-characteristics. The conceptual design model of potential destruction zones of metal bridge cranes bearing structures is described. The problems for the correct description of such a model are determined. The proposed theoretical models can be used in solving practical problems of structural risk analysis of such a group of objects as special heavy metallurgical bridge cranes.

Keywords: structural risk analysis, technical risk, load-bearing structures, potential destruction zones, metallurgical bridge cranes, complex technical system.

На сегодняшний день предствляется проблематичным и маловероятным построение всеобъемлющей модели конструкционного риска. Актуальным представляется разработка и создание согласованных по целям и задачам отдельных моделей конструкционного риска [1, С. 522], [5, С. 265]. Структура таких моделей предполагает разложение R-характеристик по следующей форме [1, С. 524]:

$$R_{\sum} \rightarrow \{R_i\} \rightarrow \{R_{ij}\} \rightarrow \{R_{ijk}\}, \quad (1)$$

где $R_{\sum}$ - конструкционный риск; R_i - подсистемный риск; R_{ij} – элементный риск; R_{ijk} - критериальный риск.

Решением такого разложения будет критериальный риск – как вероятность ущерба W, связанного непосредственно с разрушением конструкции по заданному виду предельного состояния:

$$R = P\{W|F_{N,l,t}\{\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, l, N, t, T\} = F_c\}, \quad (2)$$

где

σ_{ij} – компоненты напряжений; ε_{ij} – компоненты деформаций; l – размер технологического дефекта или трещины; N – число циклов; t – время нагружения; T – температура среды; F_c – критическое значение функции или вероятность катастрофы по заданному виду предельного состояния:

$$P_f = P\{F_{N,l,t}\{\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, l, N, t, T\} = F_c\}, \quad (3)$$

Точное решение разложения (1) найти пока не представляется возможным, так как наносимый разрушениями ущерб определяется конкретными схемами повреждений структуры различных конструкций.

Рассмотрим конструкционный риск-анализ таких сложных технических систем как краны литейные (миксерные, заливочные, разливочные) – краны мостового типа, обрудованные механизмами подъема и опрокидывания литейного ковша, предназначенные для разливки и заливки жидкого металла. Механизм главного подъема имеет два привода, соединенные между собой кинематически и имеющих храповые передачи для возможности работы одного привода при аварийной остановке другого.

Опишем конструкцию таких кранов исходя из позиций целостности и иерархичности. Выделим в конструкции расматриваемых кранов два уровня: на первом разделим конструкцию на блоки, локальные по множеству критериальных функций; на втором – выделим блоки, локальные по множеству варьируемых параметров, определяющих критериальные функции.

Подсистема 1 – металлоконструкция моста: пролетные и концевые балки главного и вспомогательного мостов; зоны приварки кронштейнов проходных галерей моста к стенкам балок; нижние пояса балок;

подсистема 2 – пролетные балки вспомогательного моста: общие деформации балок; местные деформации нижних поясов;

подсистема 3 – траверса механизма главного подъема: крюки; металлоконструкция траверсы;

подсистема 4 – храповая передача механизма главного подъема: храповое колесо; собачки; оси крепления собачек; прижимные пружины; осевое крепление храпового колеса.

Таким образом, имеем 4 блока (подсистемы) первого уровня и десять элементов второго уровня.

Будем рассматривать два крайних случая: суммирование ущербов и умножение ущербов в процессе эскалации повреждений.

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{4} a_i \sum_{j=1}^{10} a_{ij} \sum_k R_{ijk}; \quad (4)$$

$$R_{\Sigma} = \prod_{i=1}^{4} \left\{ \prod_{j=1}^{10} \left(\prod_k R_{ijk}^{a_{ijk}} \right)^{a_{ij}} \right\}^{a_i} \quad (5)$$

Коэффициенты а представляют собой веса значимости всех подсистем и элементов конструкции, они должны удовлетворять следующим условиям:

$$\sum_{i=1}^{4} a_i = 1; \sum_{j=1}^{10} a_{ij} = 1; \sum_k a_{ijk} = 1. \quad (6)$$

Для рассматриваемой группы конструкций будем учитывать следующее:

- анализу подвергаются маловероятные события;
- большая неопределенность, обусловленная случайным характером внешних воздействий и процессов в элементах конструкций, а также отсутствие четких целей и критериев безопасности;
- ограниченность во времени – на стадии проектирования – срок проекта, на стадии эксплуатации – время реагирования на чрезвычайную или аварийную ситуацию.

Будем считать все четыре подсистемы потенциальными зонами разрушения Z_k:

$$\sum = \bigcup_k Z_k = \bigcup_4 Z_k. \quad (7)$$

Тогда, с учетом (7) критериальную функцию риска можно представить в виде:

$$R_{\Sigma}(t) = P\{t: H|var[Z_k] \notin \Omega_s\}. \quad (8)$$

Таким образом, достаточно исследовать вариации $var[Z_k]$ состояний этих четырех потенциальных зон разрушения и определить вероятности выхода этих вариаций из области безопасности Ω_s. Это позволяет нам снизить размерность задачи конструкционного риск-анализа.

Сформируем базовую параметрическую модель, основываясь на аппарате механики разрушения [1, С. 524], [5, С. 264]. При построении параметрической модели зоны Z_k в общем случае возникают три задачи.

Первая задача – определение характера нагрузки, действующий на элемнт конструкции, примем $q(t) \epsilon Q$, так как нагрузка является внешним параметром.

Вторая задача – выбор модели дефекта, определяющая его тип, вид и размеры. Можно предположить [1, С. 531], что практический интерес для конструкционного риск-анализа представляют полуэллиптические и эллиптические трещины, которые по размерам могут быть сопоставимы с размерами элемнтов самой конструкции. Другие дефекты в процессе эксплуатации выявляются и устраняются. Определяемые виды и размеры дефектов могут быть приняты к расчетам при использовании методических указаний по обследованию специальных металлургических кранов РД 10-112-6-03.

Третья задача – выбор уравнения состояния потенциальной зоны разрушения Z_k. Для этого выделим в элементе конструкции некоторый объем, соответствующий зоне разрушения. Входные параметры – напряжения σ_{ij} *и* деформации ε_{ij} [3, С. 32] от нагрузки q(t); размеры дефекта $l = \{l_x, l_y, l_z\}$. Выходные параметры – силовые, деформационные и энергетические характеристики напряженно-деформированного состояния в области вершины дефекта.

Для описания полей напряжений и деформаций будем использовать энергетический подход. После соответствующего интегрирования по объему V произведение $\sigma \times \varepsilon$ приводит к конечной энергии деформации, которая характеризуется J- интегралом. На основании HRR-решения напряжения и деформации запишем:

$$\{\sigma_{ij}\} = \sigma_t \left(\frac{JE}{I\alpha\sigma_t^2} \right)^{\frac{1}{m+1}} * \widetilde{\sigma_{ij}}(\theta, m), \quad (9)$$

$$\{\varepsilon_{ij}\} = \frac{\alpha\sigma_t}{E} \left(\frac{JE}{I\alpha\sigma_t^2} \right)^{\frac{m}{m+1}} * \widetilde{\varepsilon_{ij}}(\theta, m), \quad (10)$$

где $I, \sigma_{ij}(\theta, m), \varepsilon_{ij}(\theta, m)$ - безразмерные функции;

σ_t – предел текучести;

α, m - параметры диаграммы деформирования;

J – энергетический контурный интеграл.

В таком случае критериальное условие предельного состояния будет:

$$F(J_i, i = 1,3; J_c) = 0; \quad (11)$$

где J_c - критическое значение J-интеграла.

Преимуществом J-интеграла является его выражение через коэффициенты интенсивности напряжений и сохранение инвариантности при упругом и упругопластичесеком деформировании, а также учет стадии стабильного подрастания трещины до наступления критического состояния.

Таким образом, для правильного описания потенциальной зоны разрушения необходимо:

- определить вид и размеры дефекта $l = \{l_x, l_y, l_z\}$;
- определить поля напряжений σ_{ij} *и деформаций* ε_{ij} при заданной нагрузке q(t);
- с учетом сингулярности выбрать уравнения состояния и определить коэффициенты интенсивности напряжений $\{K_i\}$ *и* K_c, коэффициенты интенсивности деформаций $\{K_{ie}\}$ *и* K_{ce}, энергетические характеристики $\{J_i\}$ *и* J_c.

Кроме этого, полученная расчетная (теоретическая) модель потенциальных зон разрушения несущих конструкций металлургических кранов позволит развить дальше методологию конструкционного риска и провести расчеты с целью построения норм рисков для определенного класса оборудования. Это позволит существенно влиять на обеспечение техногенной безопасности и управление ею, прогнозирование изменений механических характеристик материала конструкции на всех этапах жизненного цикла.

Список литературы / References

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях. // Ч.1. Основы анализа и регулирования безопасности: Научн. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2006. – 640 с: ил.

2. Бархоткин В.В., Извеков Ю.А., Миникаев С.Р. Обзор аварий на крановом оборудовании металлургических производств // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 10(1). – стр.9-11.URL: www.rae.ru/upfs/?section=content&op=show_article&article_id=4040 (дата обращения: 10.11.2017).

3. Бирюков М.П. Динамика и прогнозирующий расчет механических систем. “Вышэйшая школа”, Минск, 1980. – 192 с: ил.

4. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: в 2 т //М, Мир. – 1984.

5. Извеков Ю.А., Кобелькова Е.В., Лосева Н.А. Анализ динамики и вопросы оптимизации металлургических мостовых кранов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6 (2). – стр. 263-266. URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10000704 (дата обращения: 01.11.2017).

6. Крылова Е.А., Извеков Ю.А. О подходе к оценке техногенной безопасности металлургического производства // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6 – С. 32-33. URL: www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=9999573 (дата обращения: 01.11.2017).

7. Kumamoto, H. and E.J. Henley, 1996. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. Second Edition. New York: IEEE Press, pp: 598.

8. Taguchi, G., (1985). «Quality Engineering in Japan», Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, Vol 19 No (4), pp: 237-242.

9. Boulding, K.E., 1956. General Systems Theory – The Skeleton of Science. Management Science, 2: 197-208.

10. Sorensen Arthur Gr. A statistical analysis of product reliability due to random vibration. Proc. Ann. Reliab. AndMaint. Symp. – Philadelphia, 1973.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bezopasnost' Rossii. Pravovye, social'no-jekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Analiz riska i problem bezopasnosti. V 4-h chastjah [Security of Russia. Legal, Social an Economic, Scientific and Technical Aspects. Risk and Security Analysis. In 4 Parts.] // Ch.1. Osnovy analiza i regulirovanija bezopasnosti [P.1. Fundamentals of Safety Analysis and Regulation: Sc. leadership]: Nauchn. rukovod. K.V. Frolov. – M.: MGF «Znanie», 2006. – 640 p.: il. [in Russian]

2. Barhotkin V.V. Obzor avarij na kranovom oborudovanii metallurgicheskih proizvodstv [Overview of Accidents at Crane Equipment of Metallurgical Industries] / V.V. Barhotkin, Ju.A. Izvekov, S.R. Minikaev // International Journal of Applied and Fundamental Research] [Electronic resource. – 2013. – No. 10(1). – P. 9-11. URL: www.rae.ru/upfs/?section=content&op=show_article&article_id=4040 (Reference date: 10.11.2017). [in Russian]

3. Birjukov M.P. Dinamika i prognozirujushhij raschet mehanicheskih system [Dynamics and predictive calculation of mechanical systems]. Minsk: “Vyshjejshaja shkola”, 1980. – 192 p.: il. [in Russian]

4. Gilmor R. Prikladnaja teorija katastrof: v 2 t [Applied theory of catastrophes: in 2 volumes]. – M.: Mir. – 1984. [in Russian]

5. Izvekov Ju.A. Analiz dinamiki i voprosy optimizacii metallurgicheskih mostovyh kranov [Analysis of dynamics and optimization of metallurgical bridge cranes] / Ju.A. Izvekov, E.V. Kobel'kova, N.A. Loseva // Fundamental research [Electronic resource]. – 2013. – No. 6 (2). – P. 263-266. URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10000704 (Reference date: 01.11.2017). [in Russian]

6. Krylova E.A. O podhode k ocenke tehnogennoj bezopasnosti metallurgicheskogo proizvodstva [About the Approach to the Assessment of the Technogenic Safety of Metallurgical Production] / E.A. Krylova, Ju.A. Izvekov // Successes of modern natural science [Electronic resource]. – 2012. – No. 6 – P. 32-33. URL: www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=9999573 (Reference date: 01.11.2017). [in Russian]

7. Kumamoto H. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. Second Edition / H. Kumamoto, E.J. Henley. – 1996. – New York: IEEE Press. – 598 p.

8. Taguchi G. Quality Engineering in Japan // Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering. – 1985. – Vol 19, No (4), P.: 237-242.

9. Boulding K.E. General Systems Theory – The Skeleton of Science. Management Science. – 1956. – P. 197-208.

10. Sorensen A.G. A statistical analysis of product reliability due to random vibration // Proc. Ann. Reliab. AndMaint. Symp. – Philadelphia, 1973

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.149

Каменчуков А.В.
ORCID: 0000-0001-7997-3195, кандидат технических наук,
Тихоокеанский государственный университет

ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ДОРОГ

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы контроля качества работ строительства и эксплуатации дорог сельскохозяйственного назначения. Выделены основные причины необходимости строительного контроля качества работ. Последовательно разобраны все этапы контроля качества дорожной одежды из каменных материалов. Приведены фактические последствия нарушения качества строительно-монтажных работ и методы устранения дефектов. Представлены и обоснованы рекомендации по повышению долговечности дорог сельскохозяйственного назначения с применением новых строительных материалов.

Ключевые слова: контроль качества, дорога, защита окружающей среды, транспорт.

Kamenchukov A. V.
ORCID: 0000-0001-7997-3195, PhD in Engineering,
Pacific States University

TO THE QUESTION OF INCREASE OF QUALITY OF FARM ROADS

Abstract

The article deals with the quality control of construction and operation of farm roads. The main reasons for quality control of works are singled out. All stages of quality control of pavement made of stone materials are consistently analyzed. Relevant consequences of the violation of the quality of construction and installation works and methods for eliminating defects are given. Recommendations on increasing the longevity of agricultural roads with the use of new building materials are presented and justified.

Keywords: quality control, road, environmental protection, transport.

Дороги сельскохозяйственного назначения, как правило, устраивают из местных каменных или дисперсных строительных материалов. Ось дороги прокладывают в нулевых отметках, стараясь избегать насыпей более 1 м и выемок глубже 0,5 м. Средняя толщина покрытия дороги из прочных каменных материалов составляет 25-30 см, при этом применение органических и неорганических вяжущих веществ запрещено (битум, цемент, золошлаковые вяжущие), чтобы избежать загрязнения почвы [1], [2].

Строительство дорог в нулевых отметках и запрет на применение вяжущих и стабилизирующих добавок приводит к потребности частого ремонта и восстановления очертания дорог, и к значительному сокращению межремонтного срока службы дорог сельскохозяйственного назначения. По сравнению с автомобильными дорогами общего пользования. Так же на срок службы влияет близость источников увлажнения в виде грунтовых вод и верховодке, а так же средств искусственного орошения почвы.

Кроме этого избыточное увлажнение дисперсных слоев конструкции в период весеннего оттаивания приводит к значительному снижению прочности и несущей способности дорожной одежды [3, С. 16]. Результаты проведённых исследований [4, С. 61] показали что прочность дисперсных материалов применяемых в слоях основания дорожной одежды не линейно зависит от влажности и при увеличении влажности на 10-15 % выше расчетной прочность уменьшается в 1,5-2 раза. Аналогичные выводы представлены в исследовании [5, С. 80-82] в которых представлены результаты изменения прочности и влажности слоев основания дорожной одежды для центральных районов Российской Федерации.

Вышеперечисленные причины приводят к необходимости частого контроля транспортно-эксплуатационного качества дорог и работ по ремонту и восстановлению потребительских свойств дорог.

В 2016 г были выполнены работы по строительно-технической экспертизе объекта реконструкции: «Строительство и реконструкция автомобильной дороги М-60 «Уссури» от Хабаровска до Владивостока. Реконструкция автомобильной дороги А-370 «Уссури» Хабаровск – Владивосток км 355 – км 366, Приморский край». В рамках работы выполнялось обследование и контроль качества строительства сельскохозяйственных дорог с покрытием из щебеночно-гавийно-песчаной смеси С-1.

Диагностик дорог выполнялась в соответствии с ОДМ 218.0.006 [6]. Требования к контролю качества дорог представлены в СП 78.13330 [1] и СП 37.13330 [2].

Высота отметок по оси дороги является первостепенной характеристикой и косвенно может подтверждать завышении объемов работ и недоуплотнение материалов. В тех случаях, когда земляное полотно отсыпается из пучинистых грунтов строительный контроль качества работ должен производиться как в год завершения работ (в осенний период), как и в последующий год после весеннего оттаивания конструкции. Это требование связано с недопущением развития предельных пучинистых деформаций в грунте, которые в естественных условиях не должны превышать ±5 см в год. Сводные результаты контроля высотных отметок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Контроль высоты отметки по оси дороги

Количество измерений	Количество отклонений в пределах		
	± 10 мм	от ± 10 до ±20 мм	более ± 20 мм
127	74	41	12
Доля показателей	**58,3 %**	**32,3 %**	**9,4 %**

Ширина верха покрытия дорожной одежды из щебеночно-гавийно-песчаной смеси С-1 определялась дорожной рулеткой от правой кромки дорожного полотна к левой перпендикулярно оси дороги через каждые 50 м. Точность измерений до 1 см. Сводная таблица результатов измерений приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Контроль ширины покрытия дорожной одежды

Количество измерений	Количество отклонений в пределах		
	от минус 5 см до плюс 10 см	до ±10 мм	более ± 10 мм
87	37	17	33
Доля показателей	**42,6 %**	**19,5 %**	**37,9 %**

Поперечные уклоны не измерялись, так как по фотографиям видно, что продольная ровность не выдержана на значительном протяжении объекта исследования (рисунок 1).

Рис. 1 – Вид участка сельскохозяйственного проезда

Измерения продольной ровности производится путем определения просветов под трехметровой рейкой с помощью клина (промерника) который прикладывается в пяти контрольных точках, расположенных на расстоянии 0,5 м от концов рейки и друг от друга. На крайних точках рейки измерения не производятся. Детальное измерение продольной ровности выполнялось по полосам наката на расстоянии 0,5 – 1,0 м от кромки покрытия (с каждой стороны). Сводные результаты измерений продольной ровности приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Контроль продольной ровности

Количество измерений	Количество отклонений в пределах		
	до 7 мм	до 15 мм	более 15 мм
174	63	49	62
Доля показателей	**36,2 %**	**28,2 %**	**35,6 %**

Кроме измерения геометрических параметров необходимо было установить толщину слоя дорожной одежды и проверить соответствие каменного материала требованиям ГОСТ 25607-2009 [7].

Для проведения лабораторных испытаний было взято 6 проб материала покрытия. Исследования образцов проводилось в специализированной лаборатории строительных материалов по ГОСТ 25607-2009, ГОСТ 5180-2015 [8] и ГОСТ 12536-2014 [9].

Результаты испытаний показали, что ни один из 6 образцов не соответствовал требованиям предъявляемым к щебеночно-гравийно-песчаным смесям по ГОСТ [7], поэтому в соответствие с ГОСТ [8], [9] материал был классифицирован как грунт крупнообломочный щебенистый малосвязный с суглинком (супесью) тяжёлым песчаным твердым.

В результате выполненных работ было установлено, что сельскохозяйственные проезды не соответствуют требованиям контроля качества работ, объемы работ завышены, а материал покрытия не может использоваться для устройства покрытия дорожных одежд. Строительная организация за свой счет должна привести сельскохозяйственные проезды в соответствие с требованиями проектной и нормативно технической документации. Ущерб от недоброкачественно выполненных работ составил более 10 млн. р.

Наиболее перспективным способом восстановления и усиления дорог с переходным и низшим типом покрытия, к которым относятся дороги сельскохозяйственного назначения, является применение объемных геосинтетических материалов [10], таких как материалы геосотовые пластмассовые скрепленные марки «НЭОВЭБ» [11].

Геосинтетический материал пространственной «сотовой» структуры, образованный из соединенных ультразвуковой сваркой рифленых перфорированных или неперфорированных полос геосинтетического материала, изготовленных из полимерного нано-композитного сплава «НЭОЛОЙ», выпускаемый в виде складывающегося модуля и поставляемый в виде пакетов в сложенном состоянии. Они представляют собой объемную сотовую конструкцию из соединения в шахматном порядке ультразвуковой сваркой полимерных полос на рисунке 2.

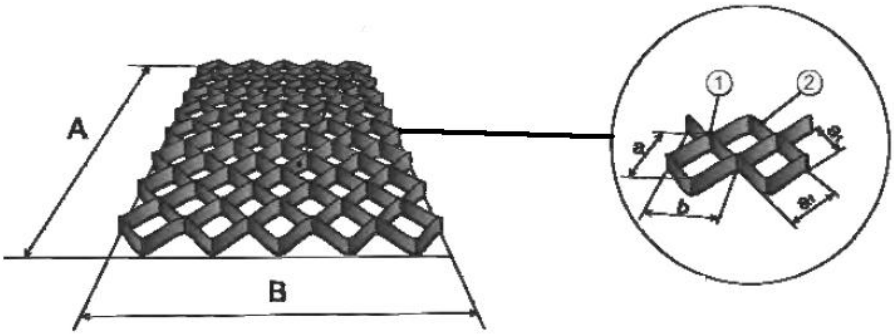


Рис. 2 – Конструктивная схема геосот НЭОЛОЙ»

Применение геосот в верхних слоях конструкции позволяет перераспределить нагрузку от транспортного средства, повысить устойчивость и сопротивляемость покрытия деформациям сдвига (рисунок 3).

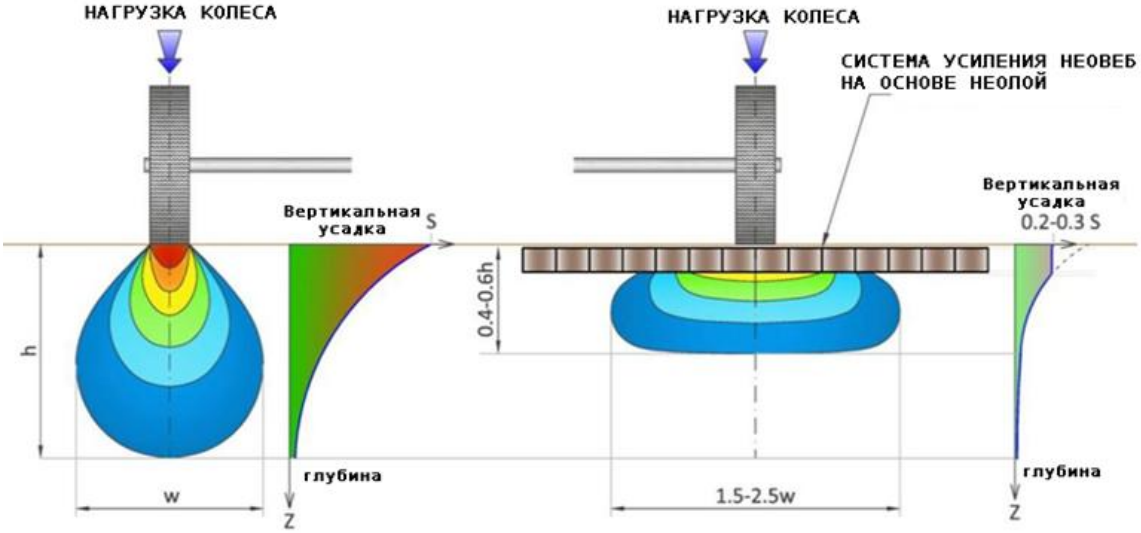


Рис. 3 – Эффект перераспределения нагрузки

Усиление конструкции дороги геосотами позволит не только повысить ее прочность и надежность, но и снизить расход дорогостоящего каменного материала (рисунок 4 и таблица 4).

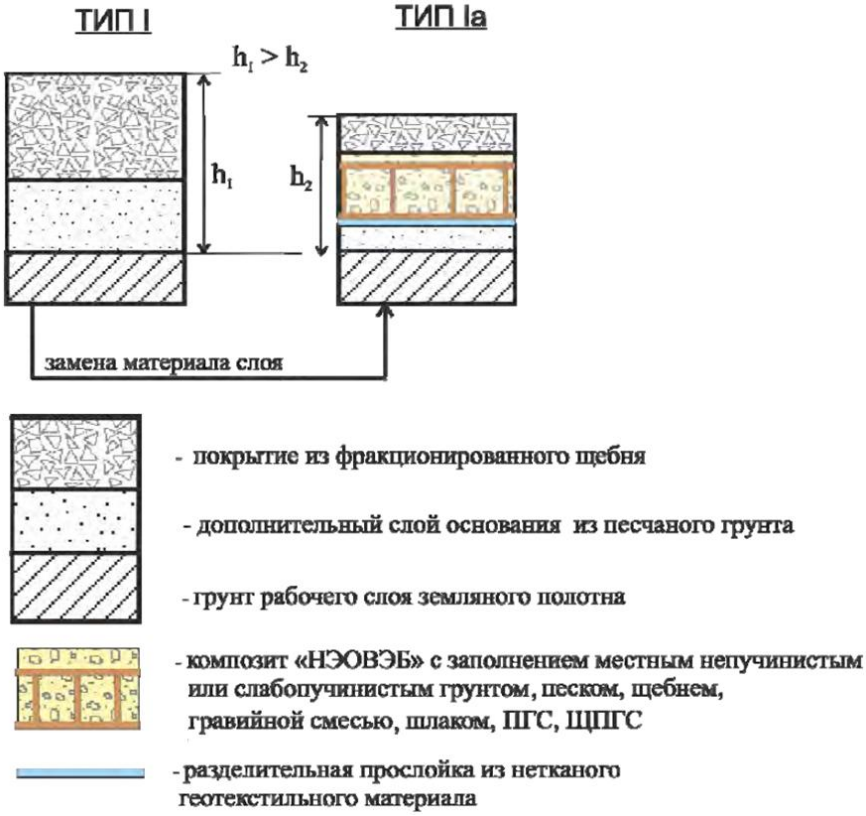


Рис. 4 – Конструктивная схема усиления дорожной одежды

Таблица 4 – Пример конструкции дорожной одежды

Наименование материала	Толщина слоя, см	Общий модуль упругости, МПа
Исходный вариант		
Щебеночно-гравийно-песчаная смесь С-1	40	155
Песок средней крупности	40	
Земляное полотно – супесь легкая		
Вариант с геосотами		
Щебеночно-гравийно-песчаная смесь С-1	25	167
Защитный слой из песка средней крупности	5	
Геосоты «НЭОВЕБ» заполненные песком	15	
Песок средней крупности	10	
Земляное полотно – супесь легкая		

Таким образом, применение геосотовых систем позволяет снизить расход строительных материалов, повысить прочность и устойчивость дорожных одежд и продлить межремонтный срок службы дороги. Кроме этого применение геосотовых систем не причиняет вред окружающей экосистеме и не приводит к загрязнению окружающей среды, что крайне важно для дорог сельскохозяйственного назначения.

Список литературы / References

1. СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 – Введ. 2013. –М: Информавтодор – 68 с.

2. СП 37.13330.2012 Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91*. – Введ. 2013. – М: Информавтодор – 184 с.

3. Ярмолинский В.А. Пути повышения надежности работы автомобильных дорог Дальнего Востока / В.А. Ярмолинский, А.В. Каменчуков // Наука и техника в дорожной отрасли. 2017. № 3. – С. 14-17.

4. Каменчуков А.В. Оценка работоспособности дорожных одежд / А.В. Каменчуков, К.И. Богдановская // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : международный сборник научных трудов / под ред. А. И. Ярмолинского – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – № 15. – С. 59-62.

5. Горячев М.Г. Оценка степени снижения модуля упругости связных грунтов в результате их весеннего разуплотнения для прогнозирования состояния дорожных одежд / М.Г. Горячев // Вестник МАДИ. -2013. – Выпуск 4 (35). – С. 77-82.

6. ОДН 218.0.006-2002 Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог (взамен ВСН 6-90). – Введ. 2002. –М: Информавтодор – 139 с.

7. ГОСТ 25607-2009 Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. – Введ. 2010. –М: Информавтодор – 13 с.

8. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введ. 2016. –М: Информавтодор – 17 с.

9. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – Введ. 2015. –М: Информавтодор – 22 с.

10. ОДМ 218.3.032-2013 Методические рекомендации по усилению конструктивных элементов автомобильных дорог пространственными георешетками (геосотами). – Введ. 2013. –М: Информавтодор – 128 с.

11. СТО 67977419-002-2014 Материал геосотовый пластмассовый скрепленный марки «НЭОВЭБ». Типовые решения по применению в дорожном строительстве. – М: Югра Маркетинг. 2014. – 75 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. SP 78.13330.2012 Avtomobil'nye dorogi. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 3.06.03-85 [SP 78.13330.2012 Car roads. Updated version of BCR 3.06.03-85] – Intr. 2013. –M: Informavtodor – 68 p. [in Russian]

2. SP 37.13330.2012 Promyshlennyy transport. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.07-91* [SP 37.13330.2012 Industrial transport. Updated version of BCR 2.05.07-91*] – Intr. 2013. –M: Informavtodor – 184 p. [in Russian]

3. YArmolinskiy V.A. Puti povysheniya nadezhnosti raboty avtomobil'nykh dorog Dal'nego Vostoka [Ways to improve the reliability of the roads of the Far East] / V.A. YArmolinskiy, A.V. Kamenchukov // Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli [Science and technology in the road industry]. 2017. № 3. – P. 14-17. [in Russian]

4. Kamenchukov A.V. Otsenka rabotosposobnosti dorozhnykh odezhd [Evaluation of the performance of road clothes] / A.V. Kamenchukov, K.I. Bogdanovskaya // Dal'niy Vostok. Avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizheniya : mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov / pod red. A. I. YArmolinskogo [Far East. Roads and traffic safety: an international collection of scientific papers / ed. A.I. Yarmolinsky] – KHabarovsk : Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta, 2015. – № 15. – P. 59-62. [in Russian]

5. Goryachev M.G. Otsenka stepeni snizheniya modulya uprugosti svyaz-nykh gruntov v rezul'tate ikh vesennego razuplotneniya dlya prognozirovaniya sostoyaniya dorozhnykh odezhd [Estimation of the degree of reduction of the modulus of elasticity of cohesive soils as a result of their spring decompaction to predict the condition of road clothes] / M.G. Goryachev // Vestnik MADI [Bulletin of MADI]. -2013. – V 4 (35). – P. 77-82. [in Russian]

6. ODN 218.0.006-2002 Pravila diagnostiki i otsenki sostoyaniya avtomobil'nykh dorog (vzamen VSN 6-90) [ODN 218.0.006-2002 Rules for diagnosis and assessment of the state of highways (instead of DPN 6-90)] – Intr. 2002. –M: Informavtodor – 139 p. [in Russian]

7. GOST 25607-2009 Smesi shchebenochno-graviyno-peschanye dlya pokrytiy i osnovaniy avtomobil'nykh dorog i aerodromov. Tekhnicheskie usloviya [GOST 25607-2009 Mixtures of crushed stone-gravel-sand for coatings and bases of highways and airfields. Technical conditions] – Intr. 2010. –M: Informavtodor – 13 p. [in Russian]

8. GOST 5180-2015 Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik [GOCT 5180-2015 Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics] – Intr. 2016 –M: Informavtodor – 17 p. [in Russian]

9. GOST 12536-2014 Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava [GOST 12536-2014 Soils. Methods for laboratory determination of granulometric (grain) and micro aggregate composition] – Intr. 2015 –M: Informavtodor – 22 p. [in Russian]

10. ODM 218.3.032-2013 Metodicheskie rekomendatsii po usileniyu konstruktivnykh elementov avtomobil'nykh dorog prostranstvennymi ge-oreshetkami (geosotami) [ODM 218.3.032-2013 Methodical recommendations for strengthening structural elements of highways by spatial geogrids (geosots)] – Intr. 2013 –M: Informavtodor – 128 p. [in Russian]

11. STO 67977419-002-2014 Material geosotovyy plastmassovyy skreplennyy marki «NE'OVE'B». Tipovye resheniya po primeneniyu v dorozhnom stroitel'stve [STO 67977419-002-2014 Material geotextile plastic fastened with the brand "NEOVEB". Typical solutions for use in road construction.] – M: YUgra Marketing. 2014 – 75 p. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.129

Ладанова Е.О. [1], Ямашкин С.А.[2]
[1]Преподаватель, [2]Кандидат технических наук, старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева»

СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ФАКТОВ ИЗ ТЕКСТОВЫХ СООБЩЕНИЙ

Аннотация

В статье приведено описание процесса разработки эффективного алгоритма семантического и синтаксического анализа текстовой информации для выделения фактов и программного комплекса, работающего на его основе. Научно-технический продукт, о котором говорится в статье, планируется использовать для решения ряда функциональных задач в области анализа текстовой информации и извлечения фактов. В рамках описываемого исследования будет создана методика анализа данных на основе концепции Ensemble Learning.

Ключевые слова: Ensemble Learning, анализ текста, семантический анализ.

Ladanova E.O.[1], Yamashkin S.A.[2]
[1]Teacher, [2]PhD in Engineering, Senior Lecturer,
FSBEI of Higher Education “Ogarev Mordovia State University”

SEMANTIC ANALYZER FOR THE SELECTION OF FACTS FROM TEXT MESSAGES

Abstract

The article describes the process of developing an effective algorithm for the semantic and syntactic analysis of textual information for the identification of facts and a software complex running on its basis. The scientific and technical product mentioned in the article is planned to be used to solve a number of functional problems in the field of analyzing textual information and extracting facts. Data analysis methodology based on the Ensemble Learning concept will be created as a part of this study.

Keywords: *Ensemble Learning*, text analysis, semantic analysis.

Целью данной статьи является описание процесса разработки эффективного алгоритма семантического анализа текстовой информации для выделения фактов и программного комплекса, работающего на его основе. Программный комплекс позволит предоставлять услугу семантического анализа текста через графический и REST API интерфейсы по гибкой модели монетизации.

Семантический анализ текста в последние годы получил значительную актуальность. Развитие информационных ресурсов сети Internet многократно усилило проблему информационной перегрузки. Еще в начале XXI века количество страниц в сети Internet превысило 4 миллиарда, и с каждым днем оно увеличивается на 7 миллионов. Неструктурированные данные составляют большую часть информации, с которой имеют дело пользователи, поэтому многие организации и частные лица, в частности, владельцы ГИС-ресурсов [4], [5], [6], [7], [8], заинтересованы в эффективных технологиях автоматизированного семантического анализа текстовой информации, представленной на естественном языке.

На международном рынке в данный момент существует множество программных продуктов, которые позволяют проанализировать текст с точки зрения семантики. Среди отечественных стоит выделить АОТ и Semantic Analyzer Group, позволяющие строить синтактико-семантическую сеть текста. Из зарубежных – мощный инструмент анализа текстов IBM Text Miner, содержащий утилиты классификации, кластеризации, поиска ключевых слов и составления аннотации текстов. Российская система Яндекс Новости позволяет автоматически группировать данные в новостные сюжеты и составлять аннотации статей на основе кластера документов. Сервис InfoStream обеспечивает доступ к оперативной информации с учетом семантической близости документов. Также одним из аналогов системы является мобильный агрегатор Summly, купленный в марте 2013 компанией года Yahoo!, однако данное приложение абсолютно неприменимо для обработки текстов на русском языке.

Таким образом, существующие на сегодняшний день программные системы полностью не решают поставленную проблему. Объяснением этого является сложность и неоднозначность решения задачи семантического анализа для различного вида текстов. Разрабатываемое решение призвано устранить недостатки существующих систем. Основная идея заключается в разработке нового подхода к обработке текстов, основанного на методологии Ensemble Learning.

Научно-технический продукт будет успешно использован для решения следующих функциональных задач:

- каталогизация новостей;
- геопривязка событий по неструктурированному описанию;
- эффективная фильтрация спама и нежелательного контента;
- детектирование террористических переписок;
- сбор и составление статистики;
- любое другое выделение информации из больших объемов текста.

Ключевыми потребители научно-технического продукта станут владельцы новостных ресурсов и сайтов-агрегаторов, ФСБ и ФСО, архивы и библиотеки, разработчики ПО, которые заинтересованы в использовании создаваемого компонента по API. Реализация проекта предполагает получение результатов, которые характеризуются научной новизной:

- будет создана новая методика автоматического семантико-синтаксического анализа текстовой информации, включающая оптимальный алгоритм [2], [9], [10] формирования деревьев синтаксического разбора и онтологического анализа, позволяющая значительно повысить полноту и точность в сравнении с существующими реализациями за счет внедрения компонентов обучаемости на основе методологии Ensemble Learning.
- будут сформированы новые полные онтологические модели [1] различных предметных областей и моделей правил извлечения грамматики и генерации утверждений, основанных на коммуникативной грамматике русского языка. Внедрение компонента автоматизированного поиска шаблонов правил на основе цепей Маркова.
- на основе научных положений программной инженерии планируется создать информационную веб-систему, которая обладает удобным адаптивным графическим интерфейсом, программными REST API интерфейсами и сделает возможным получение услуги семантического анализа и извлечения фактов по модели SaaS [3].

Результатом научно-исследовательской работы будут являться алгоритм семантического анализа текста, построенный на принципах универсальности, модифицируемости и расширяемости и программный продукт, основанный на работе алгоритма. Особенности программного продукта: предоставление сервиса семантического анализа по модели Software as a Service; оплата работы ПО по временным периодам или задействованным ресурсам; удобный веб-интерфейс; гибкая настройка параметров анализа; сохранение и экспорт результатов семантического анализа. расширение возможностей продукта через загрузку собственных словарей. Качественные характеристики: удобство внедрения и использования алгоритма сторонними разработчиками; качество сопроводительной документации (мануалы); гибкость модель монетизации. Количественные характеристики: абсолютная и относительная точность фильтрации и каталогизации сообщений; показатель доли ошибочно выделенных фактов; быстродействие алгоритма.

Конкурентным преимуществом предлагаемого решения будет сочетание следующих характеристик: повышенная точность выделения фактов, достижение которой возможно благодаря эффективному применению описанных методик; гибкость настройки параметров функционирования алгоритма и легкость использования программного решения, не требующего наличия специальных навыков; возможность автоматизированного анализа больших информационных массивов и составления статистики; представление результатов анализа и их экспорт в удобном, гибко настраиваемом формате; предоставление удобных REST API интерфейсов для обеспечение удобной интеграции решения со сторонними разработками; эффективная модель монетизации с оплатой по времени использования, количеству вызовов, числу используемых компонентов.

План реализации проекта включает следующие этапы:

- проведение обзора литературных источников и изучения отечественного и зарубежного опыта в области вопросов семантического анализа текстов;
- первый этап разработки методики анализа текстовой информации для выделения фактов, формирование синтаксических и семантических словарей;
- реализация созданной методики в виде комплекса программ;
- тестирование разработанного комплекса программ и апробация эффективности предлагаемого решения при анализе больших объемов данных;
- доработка на базе экспериментальных данных методики анализа текстовой информации для выделения фактов, формирование более полных словарей.
- развитие программного комплекса через внедрение веб-интерфейсов. Результат – web-система, способная предоставлять услугу анализа текста по модели SaaS.

В ходе работ над проектом будут получены научные и технические решения, которые характеризуются новизной и требуют патентной защиты: новая методика синтаксического и семантического анализа текстовой информации для выделения фактов; программный продукт, реализованный на базе созданной методики с использованием современных методов и средств программного инжиниринга; база данных лексических, синтаксических и семантических конструкций и словарей, позволяющих эффективно выделять сущности и факты из текста.

Список литературы / References

1. Афонин В. В. Методы моделирования и оптимизации с примерами на языке C/C++ и MATLAB. Том. Часть 1. Методы моделирования / В. В. Афонин, В. В. Никулин. – Саранск : ИП Афанасьев Вячеслав Сергеевич, 2017. – 188 с.

2. Афонин В. В. Методы моделирования и оптимизации с примерами на языке C/C++ и MATLAB. Том. Часть II. Методы безусловной оптимизации / В. В. Афонин, В. В. Никулин. – Саранск : ИП Афанасьев Вячеслав Сергеевич, 2017. – 232 с.

3. Егунова А. И. Проектирование развивающего сайта молодёжных квестов / А. И. Егунова, Е. О. Ладанова, С. А. Ямашкин и др. // Образовательные технологии и общество. – 2017. – т. 20. – № 3. – С. 292-298.

4. Ямашкин С. А. Гибридная система анализа данных дистанционного зондирования Земли / С. А. Ямашкин // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 173–175.

5. Федосин С. А. Технологический процесс решения задачи моделирования структуры землепользования на базе данных ДЗЗ / С. А. Федосин, С. А. Ямашкин // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 356–358.

6. Вдовин С. М. Получение, хранение и распространение геоданных как единый информационный процесс / С. М. Вдовин, С. А. Федосин, А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // Природные опасности: связь науки и практики : материалы II Международной науч.-практ. конф. / отв. ред. С. М. Вдовин. – Саранск, 2015. – С. 82–90.

7. Вдовин, С.М. Университетские геопорталы как инструмент решения экологических проблем / С.М. Вдовин, А.А. Ямашкин, С.А. Ямашкин // Экологические проблемы. Евразийское пространство. – М., 2014. – С. 552–567.

8. Ямашкин, С. А. Структура регионального геопортала, как инструмента публикации и распространения геопространственных данных / С. А. Ямашкин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 6. – С. 223–225.

9. Афонин В.В. Моделирование систем / В.В. Афонин, С.А. Федосин. – М.: Интуит, 2016. – 231 с.

10. Афонин В.В., Методы моделирования и оптимизации с примерами на языке C/C++ и MATLAB. Ч. I. Методы моделирования. / В. В. Афонин, В. В. Никулин. – Саранск, 2015.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Afonin V. V. Metody modelirovaniya i optimizacii s primerami na yazyke C/C++ i MATLAB. Tom. Chast 1. Metody modelirovaniya [Methods of modeling and optimization with examples in C/C ++ and MATLAB. Vol. Part 1. Methods of modeling] / V. V. Afonin, V. V. Nikulin. – Saransk : IP Afanasev Vyacheslav Sergeevich, 2017. – 188 p. [in Russian]

2. Afonin V. V. Metody modelirovaniya i optimizacii s primerami na yazyke C/C++ i MATLAB. Tom. Chast II. Metody bezuslovnoj optimizacii [Methods of modeling and optimization with examples in C/C ++ and MATLAB. Vol. Part 2. Unconditional optimization methods] / V. V. Afonin, V. V. Nikulin. – Saransk : IP Afanasev Vyacheslav Sergeevich, 2017. – 232 p. [in Russian]

3. Egunova A. I. Proektirovanie razvivayushchego sajta molodyozhnyh kvestov [Design of developing site of youth quests] / A. I. Egunova, E. O. Ladanova, S. A. Yamashkin and others. // Obrazovatelnye tekhnologii i obshchestvo [Educational technologies and society]. – 2017. – vol. 20. – № 3. – P. 292-298. [in Russian]

4. Yamashkin S. A. Gibridnaya sistema analiza dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli [The hybrid system of data analysis remote sensing of the Earth] / S. A. Yamashkin // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya [Scientific and technical Gazette of the Volga region]. 2015. № 4. P. 173–175. [in Russian]

5. Fedosin S. A. Tehnologicheskij process reshenija zadachi modelirovanija struktury zemlepol'zovanija na baze dannyh DZZ [The technological process of solving the problem of land-use modeling based on remote sensing data] / S. A. Fedosin, S. A. Yamashkin // Nauch.-tehn. vestn. Povolzh'ja [Scientific and technical Gazette of the Volga region]. – 2014. – № 6. – P. 356–358. [in Russian]

6. Vdovin S. M. Poluchenie, hranenie i rasprostranenie geodannyh kak edinyj informacionnyj process [Receiving, storage and distribution of geo-information as a single process] / S. M. Vdovin, S. A. Fedosin, A. A. Yamashkin, S. A. Yamashkin // Prirodnye opasnosti: svjaz' nauki i praktiki : materialy II Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf. / otv. red. S. M. Vdovin [Natural hazards: the connection between science and practice: proceedings of the II International scientific-practical. conf. / edited by S. M. Vdovin]. – Saransk, 2015. – P. 82–90. [in Russian]

7. Vdovin, S.M. Universitetskie geoportaly kak instrument resheniya ekologicheskih problem [University geoportals as a tool for solving environmental problems] / S.M. Vdovin, A.A. Yamashkin, S.A. Yamashkin // Ekologicheskie problemy. Evrazijskoe prostranstvo [Ecological problems. The Eurasian space]. – M., 2014. – S. 552–567. [in Russian]

8. Yamashkin, S.A. Struktura regionalnogo geoportala, kak instrumenta publikacii i rasprostraneniya geoprostranstvennyh dannyh [The structure of the regional geoportal as a tool for publishing and disseminating geospatial data] / S. A. Yamashkin // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya [Scientific and technical Gazette of the Volga region]. – 2015. – № 6. – S. 223–225. [in Russian]

9. Afonin V.V. Modelirovanie system [Modeling systems] / V.V. Afonin, S.A. Fedosin. – M.: Intuit, 2016. – 231 c. [in Russian]

10. Afonin V.V., Metody modelirovaniya i optimizacii s primerami na yazyke C/C++ i MATLAB. Ch. I. Metody modelirovaniya. [Methods of modeling and optimization with examples in C/C ++ and MATLAB. Part 1. Methods of modeling] / V. V. Afonin, V. V. Nikulin. – Saransk, 2015. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.133

Левкин Ю.С.[1], Лушкин И.А. [2]
[1]Соискатель, [2]кандидат технических наук,
Тольяттинский государственный университет ТГУ.

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ ОДНОЯЧЕЕЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НОМОГРАММ НИЗКОЧАСТОТНЫХ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗОН ПОЛОГОСТИ ВОЛНЫ

Аннотация

В настоящей работе показана связь графической иллюстрации с экспериментально-расчетными её характеристиками. Отсутствие проекционной связи между плоскостями пространственной модели с геометрической ей продукцией, хоть и лишает рассматриваемую номограмму некоторых преимуществ, однако оперативность построения базовой программы MS Excel показывает связь графически и аналитики. В работе даны, физиографические и графоаналитические, анализы номографической пространственной аксонометрической модели, которая определяет физику генезиса эксперимента. Графически и аналитически описаны низкочастотная и высокочастотная зоны. Особое место в работе занимает переходная зона. Эта зона имеет аномальную характеристику точечных замеров. Графическое решение этого случая невозможно т.к. рассмотрение неразрывной струи не предполагает нарушение её структуры. Безусловно, выброс капель из области гребня в зону воздушной фазы, лишает возможности плавного перехода пологости волны, при плавном варьировании вибрационных параметров. Этот случай рассмотрен в работе при совершенно другой структуре газожидкостного вибрационного режима [8, С.39-44]. Получены эмпирические формулы, характеризующие влияние вибрационных параметров, как при низкочастотных, так и при высокочастотных колебаниях.

Ключевые слова: графоаналитическая одноячеечная пространственная номограмма, низкочастотные и высокочастотные колебания, начертательная геометрия, косая плоскость, геометрические образы, поверхность, экспериментальные и расчётные характеристики.

Levkin Yu.S.[1] Lushkin I.A.[2]
[1]External Doctorate Student, [2]PhD in Engineering,
Togliatti State University TSU

CONSTRUCTION OF GRAPHOANALYTICAL SINGLE-CELL SPATIAL NOMOGRAMS OF LOW-FREQUENCY AND HIGH-FREQUENCY ZONES OF WAVE FLATNESS

Abstract

In this paper, we show the relationship between a graphic illustration and its experimentally calculated characteristics. The lack of a projection relationship between the planes of the spatial model with geometric products deprives the nomogram of some advantages, but the efficiency of creating a basic MS Excel program shows a link graphically and analytically. The work contains physiographic and graphoanalytical analysis of the nomographic spatial axonometric model, which determines the physics of the genesis of the experiment. Low-frequency and high-frequency zones are graphically and analytically described. Special place in the work is given to the transition zone. This zone has an anomalous characteristic of point measurements. The graphical solution of this case is impossible as the consideration of an inseparable jet does not imply the violation of its structure. The ejection of drops from the region of the crest into the air phase zone excludes the possibility of smooth transition of wave flatness with a smooth variation of the vibration parameters. The work considers this case with a completely different structure of the gas-liquid vibration regime [8, P.39-44]. Empirical formulas characterizing the influence of vibration parameters are obtained, both for low-frequency and high-frequency oscillations.

Keywords: graphoanalytical single-column spatial nomogram, low-frequency and high-frequency oscillations, descriptive geometry, oblique plane, geometric images, surface, experimental and design characteristics.

В 1906-1908 годах впервые в Росси начал заниматься вопросами номографии Н.М. Герсеванов. Большая заслуга в деле развития теории номограмм и организации номографирования инженерных расчетов принадлежит Н.А. Глаголеву, возглавившему советскую номографическую школу [11, С. 3].

Номограммы используются в прикладных дисциплинах, таких как в медицине – номограмма для определения площади тела, в литературе акростих – номограмма, в строительстве – номограмма для определения количества автомобилей и т.д. [3, С.7].

На базе начертательной геометрии [1, С. 15], [12, С. 7], [4, С. 18], [5, С. 9] при успешном развитии современных компьютерных технологий, создалась ситуация при которой, сложные геометрические образы являются определяющим фактором оценки физической сути эксперимента. Несмотря, на отсутствие визуальной проекционной ортогональной связи между плоскостями пространственной модели с геометрической их продукцией, номограммы подобного типа могут быть востребованы при программировании.

Одним из ключевых параметров гидрогазодинамики является определение структур двухфазных потоков, в решении которых помогает одноячеечная пространственная номограмма. Вибрационное поле некоторых частот аномально негативно воздействует на структуры газожидкостных потоков. Такая зона становится аналитически не контролируемой в рамках рассматриваемой структуры. Только номографическая развёртка позволяет видеть физическую ситуацию проводимого эксперимента [8, С. 39–44].

В гидравлике открытых водоёмов, как пологость , так и обратная ей крутизна волны являются относительными величинами, которые зависят от силы ветра, фронта волны, глубины водоёма и других физических характеристик. В замкнутых гидравлических системах, нами рассматриваемых, эти величины характеризуют несколько иной физический смысл. Изучение трансформации таких параметров связано с формированием новых структур двухфазных потоков. Вибрационная длина волна (λв) это производная от частоты вибрации (fв), а вибрационные ускорение (nв) варьирует высоту волн двухфазных потоков (hв) и (hг) [6, С. 169-175.].

Для построения одноячеечной пространственной номограммы необходимо провести аналитические расчёты в программе MS Excel.

По результатам проведённого анализа экспериментальных данных табл. 1 видно, что в области частот fв = 30÷60 (Гц) числовые данные могут быть аппроксимированы семейством прямых. [14, С.113].

По той же табл. 1. области частот fв = 90÷200 (Гц) носит более сложный характер, однако закономерность прослеживается, и они могут быть рассмотрены. В указанных областях превалируют различные динамические механизмы возникновения и распространения волны.

В переходной области fв = 70÷80 (Гц) процесс образования волн происходит нестабильно, однако и такой механизм волнообразования будет оптимальным, т.к. определяется случайными факторами. Эту область из рассмотрения исключаем, т.к. течение газожидкостного потока, не имеющего структуры неразрывной струи, лишено его закономерностей.

Переходная зона fв = 70÷80 (Гц) при вибрационных ускорениях nв = 7÷5 (g) подробно описана [8, С 39–44.], где она является слабо дисперсной структурой. Аномалии, связанные с пологостью волны объясняются выбросом капель в газообразную фазу.

Таблица 1 – Зависимость влияния вибрации на пологость волны (λ /h) жидкой фазы псевдоламинарного потока. Экспериментальные данные [7, С. 107-111]

$n_в$, g	$f_в$, Гц									
	Низкочастотная область				*Переходная область*		*Высокочастотная область*			
	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200
1	6	5	5	2,6	5	2	-	-	-	-
2	4,5	4,5	3	2,5	3,5	1,6	-	5	3,5	-
3	3	4	2,7	1,8	1,9	-	2	3,5	2,1	-
4	-	-	-	-	1,1	-	1,7	3	1,9	1,5
5	-	-	-	-	1	-	1,4	2,5	1,8	1,2
7	-	-	-	-	-	-	-	2	1,5	1,1

Таблица 2 – Зависимость влияния вибрации на пологость волны (λ /h) жидкой фазы псевдоламинарного потока. Результаты расчета по (89) и (25)

$n_в$, g	$f_в$, Гц									
	Низкочастотная область				*Переходная область*		*Высокочастотная область*			
	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200
1	1	6,13	5,12	4,10	3,08	-	-	4,29	6,84	5,61
2	4,85	4,10	3,34	2,59	-	-	2,70	4,31	3,54	2,20
3	3,56	3,08	2,59	2,10	-	-	2,06	3,29	2,70	1,68
4	2,28	2,06	1,83	1,61	-	-	1,70	2,72	2,23	1,39
5	0,99	1,04	1,08	1,12	-	-	1,47	2,34	1,92	1,20
7	-	-	-	-	-	-	1,17	1,87	1,54	0,96

В таблицах 1 и 2 приведены результаты экспериментальных и расчётных данных [10, С. 69], на базе чего построен рис. 1 – зависимость низкочастотной области вибрации на пологость волны.

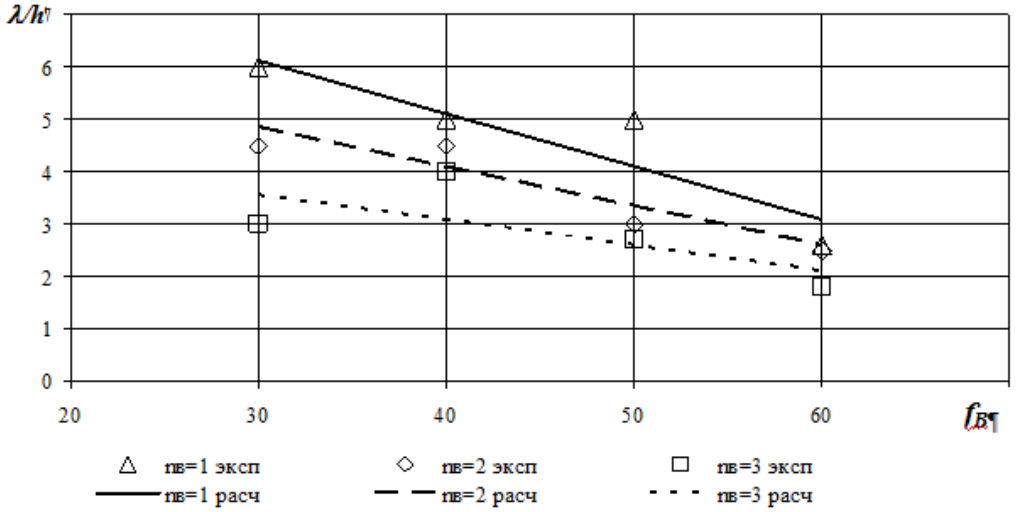


Рис. 1 – Влияние частоты вибрации fв (Гц) на пологость волны псевдоламинарного двухфазного потока. Соответствие расчета эксперименту в низкочастотной области

Физиографический анализ номограммы низкочастотных колебаний

Перед всесторонним анализом номограммы дадим характеристику её осей. Ось аппликат, как правило, является функциональной осью (λ/h), варьируемые переменные параметры, лежат на рабочей горизонтальной плоскости, с определяющими её аргументирующими осями fв (Гц) и nв (g).

1. Номографическая пространственная модель (рис. 2) является графической зависимостью изменений пологости волны псевдоламинарного двухфазного потока в низкочастотной области от вибрационных параметров частоты fв (Гц) вибрации и вибрационных ускорений nв (g).

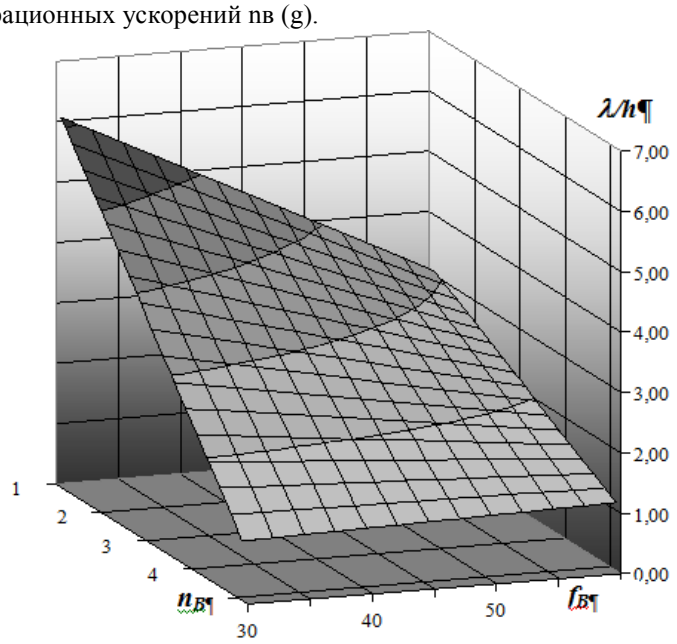


Рис. 2 – Зависимость изменений пологости волны λ /h двухфазного псевдоламинарного потока низкочастотных вибрационных параметров

2. Рассматриваемая область номографической пространственной модели варьирует в диапазоне 30 ÷ 60 (Гц) на горизонтальной плоскости.

3. Зависимость изменений пологости волны λ/h псевдоламинарного двухфазного потока в низкочастотной области от вибрационных параметров характеризуется плоскостью двойного параллелизма (фронтальной и профильной).

4. Прямые принадлежащие плоскости и параллельные фронтальной плоскости характеризуют плоскость, как плоскость фронтального параллелизма и демонстрируют линейку данных, которая предусматривает, при постоянных вибрационных ускорениях nв (g), изменения частоты вибрации fв (Гц), каждая траектория точек прямых соответствует траекториям точек функциональным значениям пологости волны λ /h.

5. Прямые принадлежащие плоскости и параллельные профильной плоскости характеризуют плоскость, как профильную плоскость параллелизма и демонстрируют линейку данных, которая предусматривает, при постоянных частотах вибрации fв (Гц), изменения вибрационных ускорений nв (g), каждая траектория точек прямой соответствует траекториям точек функциональным значениям пологости волны λ /h.

6. Траектории точек кривых, равно удаленных от горизонтальной плоскости, и принадлежащие плоскости параллелизма пересекают сетку взаимно параллельных прямых, позиционируют себя как кривые уровня. На рис. 2. эти кривые показывают раздел между тонами штриховок. Каждый цвет штриховки проградуирован сеткой взаимно пересекающихся прямых, которая является ценой деления параметра λ /h.

Кривые пересекающие сетку косой плоскости, являются плоскостями уровня, которые соответствуют функциональным значениям одного аппликатного замера, а воображаемые перпендикуляры, исходящие из этих точек, проецируясь на горизонтальную плоскость показывают при каких вибрационных параметрах fв (Гц) и nв (g) возникают те или иные графические решения определения пологости волны λ/h.

Безусловно, рассматриваемый способ, не претендует на безукоризненную точность определения найденной функции. Его оценочные характеристики, при оптимально допустимой точности позволяют использование номографических иллюстраций. Произвольно взятые вибрационные параметры fв (Гц) и nв (g) на горизонтальной плоскости, при помощи восстановленного перпендикуляра, дадут встречу с косой плоскостью двойного параллелизма, однако эта встреча не может являться обязательно с плоскостью уровня. Такая ситуация требует построение, из этой точки пересечения, плоскости уровня методом интерполяции.

Графоаналитический анализ номограммы низкочастотных колебаний, в программе MS Excel

Образующие профильной плоскости параллелизма при постоянных частотах фиксируют обратно пропорциональную зависимость вибрационных ускорений от пологости волны. Образующие фронтальной плоскости параллелизма при постоянных вибрационных ускорениях направлены также обратно пропорционально пологости волн псевдоламинарного двухфазного потока.

Таблица 3 – Коэффициенты линейных уравнений

$n_в$ (g)	А	Б
1	9,24	0,102
2	7	0,075
3	5,08	0,049

Аппроксимация данных низкочастотной области fB = 30÷60(Гц). Данные табл. 1. аппроксимируются удовлетворительно, прямыми линиями рис. 1. Зависимость коэффициентов табл. 3. от числа nв также хорошо описывается линейными уравнениями [14, рис. 2.6.6. и 2.6.7, С.70]. Коэффициенты (C, m, k) [14, рис. 2.6.5 – 2.6.7, С.71] хорошо описываются линейными уравнениями прямых где y – соответствующий коэффициент; x – вибрационное ускорение nв. Перейдя к экспериментальным обозначениям величин, получим эмпирическую формулу (1) определения пологости волны низкочастотной области λ /h:

$$\frac{\lambda}{h} = 0{,}03 n_B f_B - 0{,}3 f_B - 2{,}1 n_B + 11{,}7. \quad (1)$$

III. Физиографический анализ высокочастотной номограммы

Как и в предыдущем анализе, номограмма рис. 2. даёт характеристику осям рис. 3. Ось аппликат является функциональной осью (λ /h) Переменные параметры лежат, на рабочей горизонтальной плоскости, с определяющими её аргументирующими осями fв (Гц) и nв (g). Расчетные и экспериментальные кривые (рис. 3) идентичны:

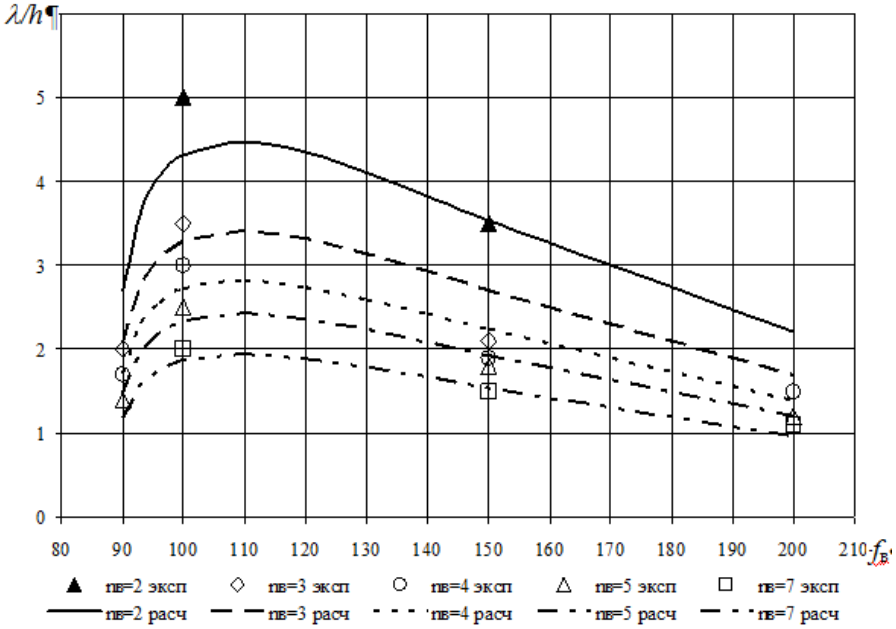


Рис. 3 – Зависимость пологости волны λ/h псевдоламинарного двухфазного потока от высокочастотной вибрации

1. Максимальные значения пологости волны на рис. 3. фиксируются в диапазоне fв = 100÷120 Гц.
2. Увеличение частоты вибрации приводит к уменьшению пологости волн.
3. Графически зоны с низко и высокочастотных колебаний выражены совершенно разными геометрическими образами (рис. 2 и 4).
4. Низкочастотная область представлена косой плоскостью параллелизма. Высокочастотная область представлена поверхностью.
5. Область высокочастотных колебаний рис. 4. имеет все свойства и признаки, которые имеет номограмма низкочастотных колебаний рис. 2.

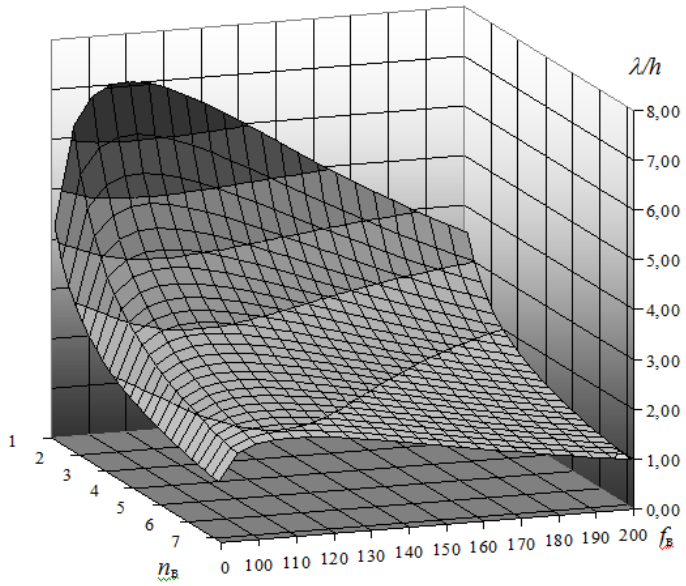


Рис. 4 – Зависимость изменений пологости волны □/h псевдоламинарного двухфазного потока в высокочастотной области от вибрационных параметров fв (Гц) и nв (g) для высокочастотной области

VI. Графоаналитический анализ номограммы высокочастотных колебаний, в программе MS Excel

Аппроксимация данных высокочастотной области fв = 90÷200 (Гц) (рис. 3), при nв = 7, 5 и 4 (g), есть максимум при fв = 100 (Гц). Подобный максимум имеется и при меньших значениях вибрационного ускорения,

В табл. 4. дана высокочастотная область. Интерполируем недостающие точки по имеющимся экспериментальным данным (интерполированные точки показаны в табл. 4. жирным).

Таблица 4 – Аппроксимация данных высокочастотной области

λ/h	$f_в$, Гц			
	90	100	150	200
1	4	7	5	
2	2,5	5	3,5	
3	2	3,5	2,1	
4	1,7	3	1,9	1,5
5	1,4	2,5	1,8	1,2

Подобные кривые хорошо описываются функцией Грановского [2, С.122].

$$y = Cx^{m}e^{kx} \quad . \qquad (2)$$

Перейдя к безразмерной частоте F при условии, что максимуму λ/h (fв) при fв =100 (Гц) соответствует F = 1, и добавив фиктивную точку Б пересечения с осью абсцисс получаем

$$F = (f - Б)/Б \qquad (3)$$

Наилучшее соответствие эксперименту получено при Б = 89.

Значения коэффициентов формулы (2) для каждого вибрационного ускорения представлены в табл. 5. Данные получены с использованием надстройки «Поиск решения» программы MS Excel [13, С.111-116].

Коэффициенты m и k изменяются незначительно и незакономерно, поэтому в окончательной формуле берем их средние значения.

Коэффициент С изменяется закономерно и хорошо аппроксимируется выражением.

$$C = 13{,}3nв - 0{,}7 \qquad (4)$$

Окончательно на основании уравнений (2-4) и средних значений табл. 5, перейдя к принятым обозначениям величин, получим эмпирическую формулу (5) определения пологости волны □/h высокочастотной области

fв = 90÷200 (Гц):

$$\frac{\lambda}{h} = 13{,}1n_{B-0{,}7}\left(\frac{f_B - 89}{89}\right)^{0{,}2}\exp\left(-1{,}1\frac{f_B - 89}{89}\right). \qquad (5)$$

Таблица 5 – Значения коэффициентов в формуле (2)

$n_в$	C	m	k
1	11,83019	0,234311595	-0,98062
2	9,952622	0,299663655	-1,23431
3	5,821369	0,227848776	-1,07698
4	5,389333	0,248516052	-1,18234
5	4,792481	0,268636857	-1,20434
7	3,261441	0,200501717	-0,94535
Среднее		0,24657978	-1,104

Выводы:

1. Переходная зона является характерной чертой зависимости пологости волны от вибрационных параметров, в которую укладываются частоты 70÷110 (Гц). Между этими параметрами существуют совершенно разные (рис. 2 и рис. 4) зависимости, первая из которых – косая плоскость, вторая – поверхность.
2. Преимущества этих моделей – всеобъемлющее решение задач, связанных с нахождением пологости, присущей тем или иным параметрам вибрации.
3. Горизонтальные плоскости уровня (кривые на рис. 2), являются функциональными параметрами определения пологости волны.

Список литературы / References

1. Гордон В.О. Курс начертат6ельной геометрии. [Текст] / В.О. Гордон, М.А. Семенцов – Огиевский // - М. - 1988, 2002. - С. 272.

2. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В.А. Грановский. // Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., - 1990. – С. 288.

3. Глаголев Н.А. Курс номографии учебное пособие [Текст] / Н.А Глаголев.// Высшая школа, - 2-е издание - М - 1961. - 270с.

4. Климухин А.Г. Начертательная геометрия. [Текст] / А.Г Климухин. М.. - 1973. - С. 368.

5. Колотов С.М. Начертательная геометрия [Текст] / С.М. Колотов, М.Ф. Вестефеев, В.Е. Мехайленко и др.// Киев: Вища школа, - 1975. - 262с.

6 Левкин Ю.С. Метод определения высоты волны псевдоламинарного двухфазного потока от вибрационных воздействий [Текст]/ Ю.С. Левкин // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов. - Т 4. – Тольятти, - 2011. – С. 169-175.

7. Левкин Ю.С. Визуально-логическая характеристика совместного истечения жидкости и газа в трубах с поперечной вибрацией. [Текст] / Ю.С. Левкин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук: - Специальный выпуск ”ELPIT” - Том 2. - 2005. - С107-111.

8. Левкин Ю.С. Режим слабой дисперсности. [Текст] / Ю.С. Левкин // Труды XI Международной научно-практической конференции Водоснабжение водоотведение качество и эффективность Кемерово - 2008. - С. 39–44.

9. Левкин Ю.С. Некоторые структуры газожидкостных потоков в поле вибрации [Текст] /Ю.С. Левкин // - 200 экз. – Монография. – 2016. - С113.

10. Левкин. Ю.С. Псевдоламинарный двухфазный режим. [Текст] / Ю.С. Левкин // - 200 экз. – Монография. – Самарский государственный авиационный университет - 2013. - С 94.

11. Зуева Н.М. Номограммы МБОУ– 2013. -15с .

12. Начертательная геометрия [Текст] / Четверухин Н.Ф., Левицкий В.С., Прянникова З.И., и др. М.: Высшая школа, 1963.

13. Хрипунов Н.В. Применение EXCEL для обработки результатов инженерного эксперимента [Текст] / Н.В. Хрипунов, О.Я. Асанова, Е.В. Панюкова // Проведение научных исследований в области машиностроения. Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. -ТГУ- 3ч. - Тольятти - 2009 - С.111-116.

14. Хрипунов Н.В. Компьютерные технологии в науке и производстве. [Текст]/ Н.В. Хрипунов, Д.И Панюков // – ТГУ, Тольятти, - 2013. – С.113.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gordon V.O. Kurs nachertatelnoi geometrii. [Course of Descriptive Geometry.] / V.O. Gordon, M.A. Sementsov - Ogievsky // - M. - 1988, 2002. - P. 272. [In Russian]

2. Granovskii V.A. Metody obrabotki eksperimentalnykh dannykh pri izmereniyakh [Methods for Processing Experimental Data in Measurements] / V.A. Granovsky. // Siraya. - L.: Energoatomizdat, Leningr. otd., - 1990. - P. 288. [In Russian]

3. Glagolev N.A. Kurs nomografii. Uchebnoe posobie [Course of Nomographs. Textbook] / N.A. Glagolev.// Vysshaya Shkola, - 2nd edition - M - 1961. - 270p. [In Russian]

4. Klimukhin A.G. Nachertatelnaya geometriya. [Descriptive Geometry.] / A.G. Klimukhin. M. - 1973. - P. 368. [In Russian]

5. Kolotov S.M. Nachertatelnaya geometriya [Descriptive Geometry.] / S.M. Kolotov, M.F. Vestefeev, V.E. Mekhailenko and others. Kyiv: Vyshcha Shkola, - 1975. - 262p. [In Russian]

6. 6 Levkin Yu.S. Metod opredeleniya vysoty volny psevdolaminarnogo dvukhfaznogo potoka ot vibratsionnykh vozdeistvii [Method for Determining the Height of a Wave of a Pseudo-Laminar Two-Phase Flow from Vibration Influences] / Yu.S. Levkin // Ecology and Life Safety of Industrial Taansport Complexes. - V. 4. - Togliatti, - 2011. - P. 169-175. [In Russian]

7. Levkin Yu.S. Vizualno-logicheskaya kharakteristika sovmestnogo istecheniya zhidkosti i gaza v trubakh s poperechnoi vibratsiei. [Visually-Logical Characteristic of the Joint Outflow of Liquid and Gas in Pipes with Transverse Vibration.] / Yu.S. Levkin // News of the Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: - Special Issue of "ELPIT" - Volume 2. - 2005. - P.107-111. [In Russian]

8. Levkin Yu.S. Rezhim slaboi dispersnosti. [Mode of Weak Dispersion.] / Yu.S. Levkin // Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference Water Supply Water Disposal Quality and Efficiency. Kemerovo - 2008. - P. 39-44. [In Russian]

9. Levkin Yu.S. Nekotorye struktury gazozhidkostnykh potokov v pole vibratsii [Some Structures of Gas-Liquid Flows in the Field of Vibration] / Yu.S. Levkin // - 200 copies. - Monograph. - 2016. - P.113. [In Russian]

10. Levkin. Yu.S. Psevdolaminarnyi dvukhfaznyi rezhim. [Pseudo-Laminar Two-Phase Mode.] / Yu.S. Levkin // - 200 copies. - Monograph. - Samara State Aviation University - 2013. - P. 94. [In Russian]

11. Zueva N.M. Nomogrammy MBOU [Nomograms of Municipal Budget Educational Institution] – 2013. -15 p. [In Russian]

12. Nachertatelnaya geometriya [Descriptive Geometry] / Chetverukhin N.F., Levitsky V.S., Spryannikova Z.I., et al. M.: Vysshaya Shkola, 1963. [In Russian]

13. Khripunov N.V. Primenenie EXCEL dlia obrabotki rezultatov inzhenernogo eksperimenta [Application of EXCEL for Processing the Results of an Engineering Experiment] / N.V. Khripunov, O.Ya. Asanova, E.V. Panyukova // Conducting Scientific Research in the Field of Mechanical Engineering. Collection of Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with Elements of a Scientific School for Youth. -TSU-3 p. - Togliatti - 2009 - P.111-116. [In Russian]

14. Khripunov N.V. Kompiuternye tekhnologii v nauke i proizvodstve. [Computer Technologies in Science and Production.] / N.V. Khripunov, D.I. Panyukov // - TSU, Togliatti, - 2013. - P.113. [In Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.148

Макеев С.А.[1], Краснощеков С.А.[2]
[1]ORCID:0000-0002-2915-982X, доктор технических наук,
[2]ORCID: 0000-0002-6695-1648, доктор технических наук,
Сибирский автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БЕСКАРКАСНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗЕРНОХРАНИЛИЩ ТЕХНОЛОГИИ ZEMAN, АВСТРИЯ

Аннотация

Приведены результаты автоматизированного расчета в авторском программном комплексе «АРКА», реализованном в общедоступном табличном процессоре MS Excel, цилиндрического бескаркасного покрытия сооружений хранения урожая зерновых культур пролетом 18 м со стрелой 6 м на базе тонкостенного арочного проката трапециевидного сечения по технологии группы компаний Zeman (Австрия). Расчет выполнен для III снегового климатического района, II ветрового климатического района (г. Омск). В соответствие с СП 20.13330.16 рассмотрены два варианта действия снеговой нагрузки. В результате расчета получены коэффициент использования несущей способности по первой группе предельных состояний. ПК «АРКА» позволяет в диалоговом режиме оперативно выполнять вариантные расчеты несущей способности цилиндрических бескаркасных покрытий зернохранилищ на базе тонкостенного арочного проката трапециевидного сечения технологии группы компаний Zeman (Австрия) в любом районе строительства.

Ключевые слова: бескаркасный, хранение урожая зерна, зернохранилище, арочный тонкостенный прокат, несущая способность.

Makeev S.A.[1], Krasnoshchekov S.A.[2]
[1]ORCID:0000-0002-2915-982X, PhD in Engineering,
[2]ORCID: 0000-0002-6695-1648, PhD in Engineering,
Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI)

CALCULATION OF CARRYING CAPACITY OF UNIVERSAL RIBLESS GRANARY OF ZEMAN TECHNOLOGY, AUSTRIA

Abstract

The article presents the results of automated calculation of cylindrical frameless covering the storage facilities of grain crops by a span of 18 m with an arrow of 6 m on the basis of thin-walled arched rolled trapezoidal cross-section by the technology of the group of Zeman companies (Austria) in the author's software package "ARKA", implemented in the public MS Excel spreadsheet. The calculation was carried out for the III snow climatic region, II wind climatic region (Omsk). Two options for the action of snow load are considered in accordance with SP 20.13330.16. As a result of calculation, the coefficient of using the bearing capacity for the first group of limit states was obtained. PC "ARKA" allows to perform optional calculations of load-bearing capacity of cylindrical frameless coatings of granaries based on the thin-walled arch trapezoidal cross-section technology of the Zeman group of companies (Austria) in any area of construction in on-line mode.

Keywords: ribless, grain storage, granary, arched thin-walled rolling, bearing capacity.

В мировой практике строительства объектов для временного и постоянного хранения урожая зерновых культур все большее применение находят бескаркасные быстровозводимые зернохранилища, отличающиеся своей экономичностью и малыми сроками строительства. Для реализации цилиндрической формы покрытия таких сооружений в основном используют два типа ограждающих конструкций из тонкостенного арочного проката трапециевидного или корытообразного профиля:

- профили производства и технологии MIC-120, 140 (США) и ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова [1, С. 2], [2. С. 10];
- профили производства и технологии группы компаний Zeman, Австрия [3, С. 13].

Обе технологии в качестве сырья использует рулонный листовой прокат из оцинкованной стали толщиной от 0,6 до 1,5 мм с односторонним или двусторонним полимерным покрытием по каталогу цветов RAL.

При этом обе технологии предполагают производство профилей, как стационарном прокатном оборудовании собственного производства, так и на мобильных профилегибочных установках, с возможностью их транспортировки к объекту строительства и выпуска требуемого проката непосредственно на стройплощадке.

Однако представленные технологии имеют принципиальные отличия.

По технологии MIC США и ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова на первой стадии производят трапециевидный прямолинейный прокат корытообразного сечения. Далее прямолинейный профиль в дополнительном модуле пластически деформируют с получением арочных заготовок, которые сшивают между собой автоматизированным забортовочным аппаратом с последующей установкой блоков в проектное положение и сшивкой их между собой (рис. 1).

Рис. 1 – Сшивка блоков по технологии MIC США и ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова

Область применения объектов, выполненных по технологии MIC США и ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова – зернохранилища, спортивные сооружения, объекты военного назначения (рис. 2).

Рис. 2 – Примеры арочных сооружений технологии MIC США и ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова

Одним из основных недостатков системы MIC США и ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова является принудительное создание в профиле зон местной потери устойчивости полок и стенок профиля с введением материала профиля в пластическое состояние непосредственно при формообразовании арки (рис. 1). На этой стадии производятся множественные надломы профиля с образованием обширных зон пластического деформирования тонколистовой стали.

Именно по этой причине расчет такого типа сооружений на прочность, жесткость, устойчивость представляет значительные трудности, в виду неопределенности значений геометрических характеристик сечений профилей, которые не возможно определить теоретическим, расчетным путем.

Для определения геометрических характеристик сечений арочных профилей технологии MIC США и ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова требуется проведения большого объема экспериментальных исследований на реальных профилях с разработкой методики расчета [2, С. 10].

Технология Zeman, Австрия на первой стадии также как и ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова изготавливает из листового проката прямолинейные профили трапециевидного сечения (рис. 3).

Рис. 3 – Прокат прямолинейных профилей: технология и оборудование Zeman, Австрия

При этом Zeman представляет также прокатное оборудование, совмещающее последовательное производство прокатом в последовательной системе роликов прямолинейных и арочных профилей в непрерывном процессе, когда на последней клети ролики принудительно смещены вниз на величину, обеспечивающую гибку при прокате с формированием арочного профиля без образования зон потери местной устойчивости полок и стенок (рис. 4).

Рис. 4 – Прокатный стан ZEMAN, совмещающий производство прямолинейного и арочного проката

В итоге арочный профиль производства Zeman, Австрия имеет гладкие поверхности (рис. 5), что позволяет расчетным путем определять геометрические характеристики сечений стандартными методами сопротивления материалов.

Рис. 5 – Вид арочного профиля производства Zeman, Австрия

Это является неоспоримым преимуществом профилей технологии Zeman, Австрия, перед технологией MIC США и ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова.

В результате работы Российских ученых в 2006 году были выполнены расчеты геометрических характеристик сечений арочных профилей технологии Zeman, производимых в России с выпуском ТУ «Профили стальные гнутые арочные с трапециевидными гофрами» и выполнением серии экспериментальных работ, подтверждающих работоспособность данных конструкций (рис. 6) [3, С. 13].

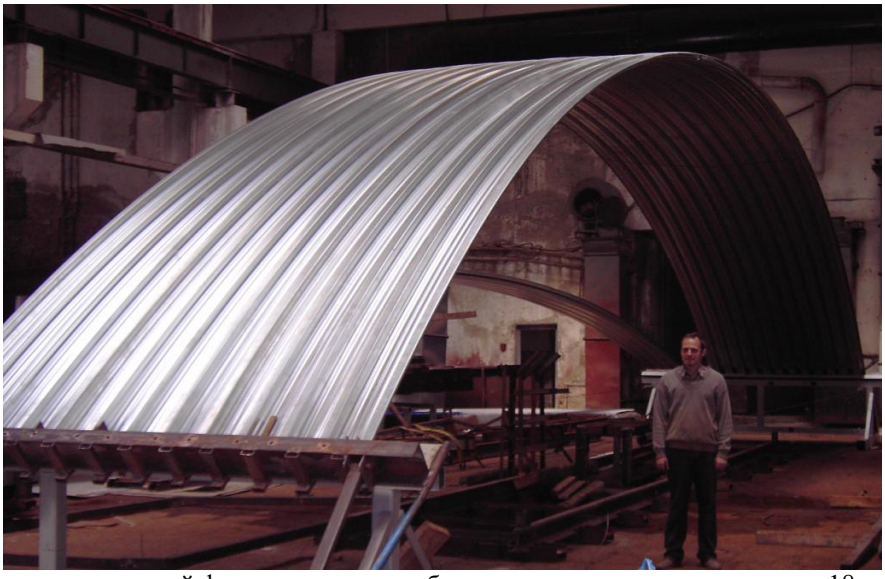


Рис. 6 – Вид на экспериментальный фрагмент арочного бескаркасного покрытия пролетом 18 м и стрелой 3,5 м из профиля А-Н60х1

На базе обобщения отечественных исследований, анализа техник и технологий расчета данных покрытий [4, С. 6], [5, С. 41], [6, С. 37], [7, С20], [8, С.38] авторами работы предложен и реализован в MS Excel алгоритм численного интегрирования системы дифференциальных уравнений математической модели напряженно-деформированного состояния модели цилиндрического покрытия зернохранилища:

- при жестком закреплении профилей в ленточном фундаменте (рис. 7);
- при шарнирном закреплении профилей к обвязочным балкам на колоннах с устройством затяжек, компенсирующих усилия распора.

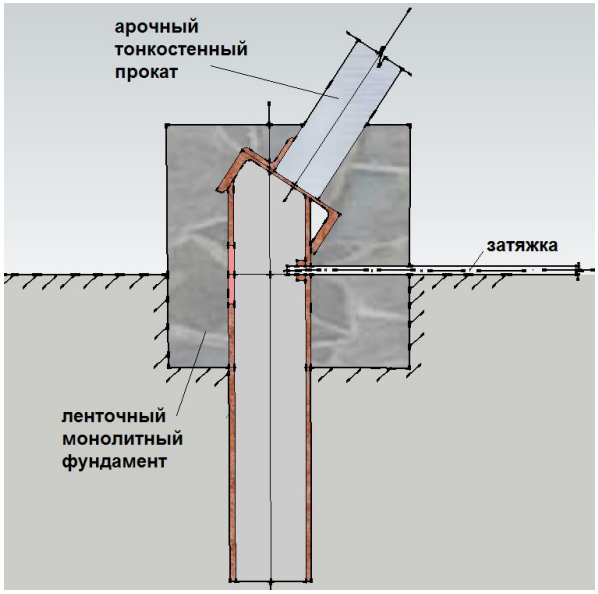


Рис. 7 – Узел соединения арочных профилей с монолитным фундаментом зернохранилища

Разработанный алгоритм реализован программным комплексом (ПК) под названием «АРКА».

В качестве нагрузок при расчете цилиндрического покрытия зернохранилищ по первой и второй группам предельных состояний в ПК «АРКА» в соответствие с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» принимаются в любом сочетании следующие (рис. 8):

- собственный вес покрытия (профиля);
- снеговая нагрузка в двух вариантах, ветровая нагрузка в зависимости от климатического района строительства [9, С. 260], [10, С/ 500];
- сосредоточенная нормативная нагрузка 100 кг в наиболее опасном для изгиба месте конструкции.

В данной статье в качестве примера выполнен статический расчет покрытия зернохранилища бескаркасной конструкции на базе арочных профилей ZEMAN [2, С. 13], пролетом 18 м, высотой стрелы 6 м, район строительства г. Омск.

В соответствие с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» выполнен расчет снеговых, ветровых нагрузок на сооружение, данные заведены в ПК «АРКА», выполнены вариантные статические расчеты с подбором необходимого профиля из сортамента арочных профилей ZEMAN (рис. 8, 9).

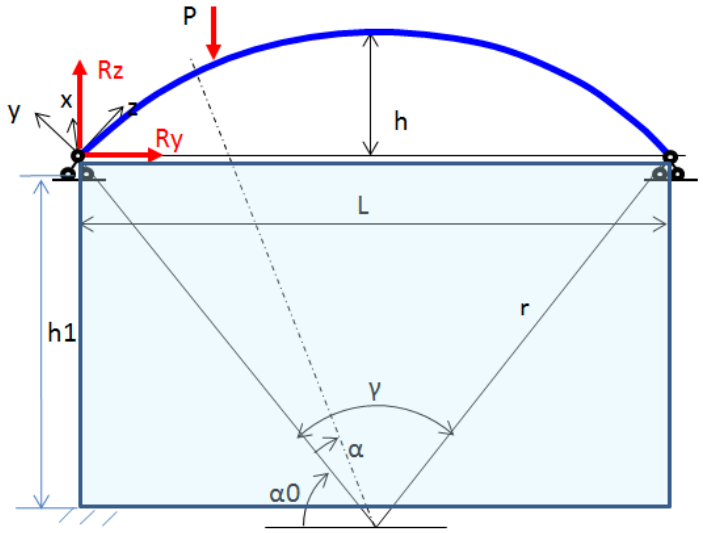
В ПК «АРКА» расчеты выполняются в соответствие с СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции».

ИСХОДНАЯ ГЕОМЕТРИЯ АРОЧНОГО ПОКРЫТИЯ		
Пролет L =	18000	мм
Стрела h =	6000	мм
h / L =	0.33	-
r / L =	0.54	-
Высота стен здания h1	0	мм
h1/L	0.00	
Ширина расчетной заготовки B	1000	мм
НАГРУЗКИ		
Расчетная снеговая нагрузка, кгс/м2		210
Расчетная снеговая нагрузка, Н/мм-м		2.1000
Нормативная ветровая нагрузка кгс/м2		60
Расчетная ветровая нагрузка, кгс/м2		84
Расчетная ветровая нагрузка, Н/мм-м		0.84
Аэродинамические коэффициенты	Ce1 =	0.42
	Ce2 =	-1.03
	Ce =	-0.4
Сосредоточенная сила P, н		-1000

КОНСТАНТЫ МАТЕРИАЛА	
Плотность стали, Н/мм3	0.0000785
Модуль упругости E, н/мм2 (МПа)	210000
Ry стали, Н/мм2 (МПа)	230
Допускаемый прогиб, мм	90

Расчетные геометрические параметры покрытия		
Радиус арки (профиля) r, мм		9750.00
Угол раскрытия γ, рад		2.35
град		134.76
γ/2, град		67.38
Угол начала α0, град		22.62
Длина дуги арки (профиля), мм		22932.10
Δα, рад/град	0.011760	0.67
Δℓ, мм, м	114.66	0.115

Расчетная схема арочного покрытия



Коэффициенты сочетаний нагрузок

Коэффициенты нагрузки	
1	Ветер
0	Снег - 1
1	Снег -2
1	Собственный вес покрытия

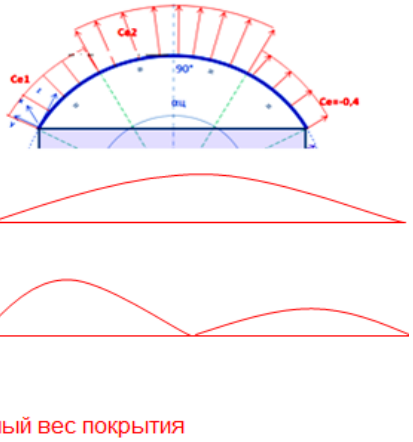
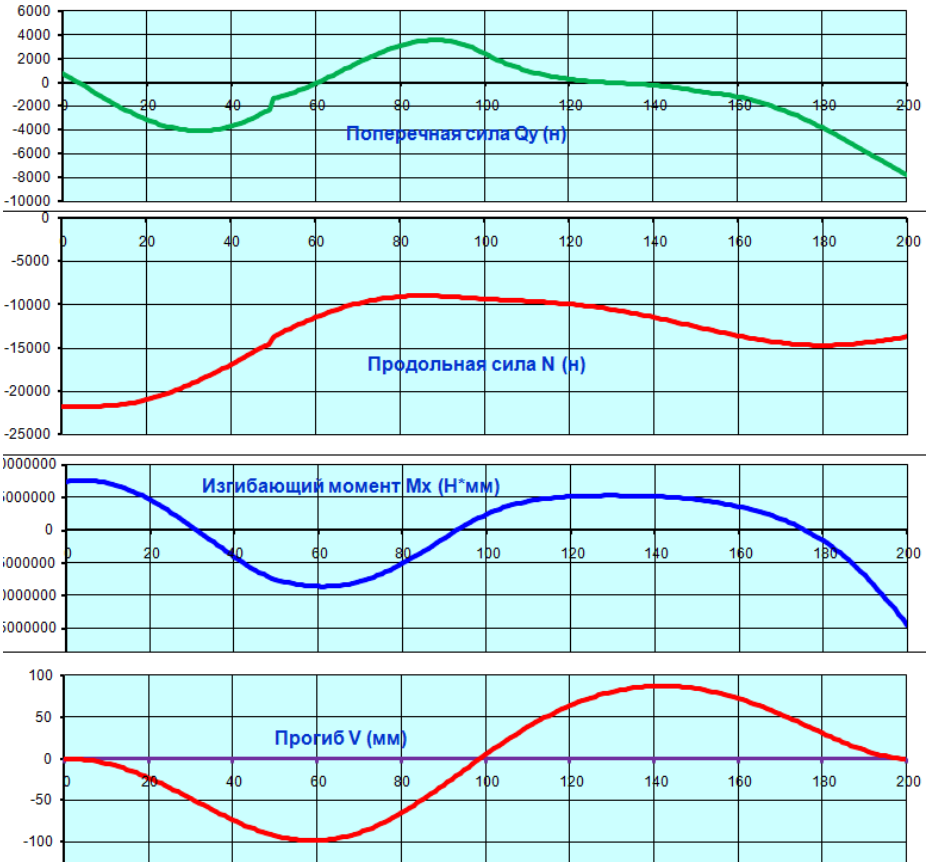


Рис. 8 – Фрагмент расчетного листа ПК «АРКА» с загружением собственным весом, ветром, сосредоточенной силой 100 кг, снегом 2



РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА			
Прогиб оси арки, max/min, мм	87.32	-98.28	
Максимальный изгибающий момент /Mx/, нмм		14569108	
Макс. норм. напряж. изгиба, н/мм2 (МПа)		207.30	
Максимальная продольны сила /N/, т		2.18	
Максим. напряжения сжатия, н/мм2 (МПа)		-9.11	
		Верх. полка	Ниж. полка
Коэффициент использования несущей способности профиля по нормальным напряжениям		0.926	0.876
Коэффициент использования несущей способности профиля по жесткости		1.03	
Ry, тс/м =	1.982	Rz, тс/м =	0.934

Рис. 9 – Результаты расчета в ПК «АРКА» с загружением собственным весом, ветром, сосредоточенной силой 100 кг, снегом 2 (эпюры поперечных, продольных сил, изгибающих моментов и прогибов, коэффициенты использования несущей способности по нормальным напряжениям и по жесткости)

В процессе расчета ПК «АРКА» в автоматическом режиме строит эпюры поперечных и продольных сил, изгибающих моментов и прогибов исходя из расчета профиля метровой ширины (рис. 9).

В результате вариантных расчетов предложенной в качестве примера расчета конструкции покрытия принят профиль А-Н107х1,5 с получением расчетного значения коэффициента использования несущей способности профиля по нормальным напряжениям 0,926 (запас прочности 7 %, первая группа предельных состояний) и незначительным дефицитом по второй группе предельных состояний: максимальный прогиб покрытия 92,8 мм при допустимом значении 18000/200 = 90 мм.

Таким образом, предложен алгоритм и реализован программным комплексом «АРКА» в MS Excel расчета несущей способности цилиндрического бескаркасного покрытия объектов кратковременного и длительного хранения урожая зерновых культур на базе тонкостенного арочного проката трапециевидного сечения технологии Zeman, Австрия. ПК позволяет в диалоговом режиме выполнять вариантные расчеты несущей способности покрытия по первой и второй группам предельных состояний, искать оптимальные решения. Приведен реальный пример расчета покрытия зернохранилища пролетом 18 м со стрелой 6 м на базе арочного профиля А-Н107х1,5.

Список литературы / References

1. Еремеев П.Г. К проектированию бескаркасных конструкций арочных сводов из холодногнутых тонколистовых стальных профилей / П.Г. Еремеев, Д.Б.Киселев, М.Ю. Арменский // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2004. – № 7. – С. 2-3.

2. Еремеев П.Г. Натурные испытания фрагментов панелей из холодногнутых тонколистовых стальных профилей для арочных сводов / П.Г. Еремеев, Д.Б. Киселев, М.Ю. Арменский // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2004. – № 9. – С. 10-13.

3. ТУ 1112-001-49529858-2005. Профили стальные гнутые арочные с трапециевидными гофрами. Технические условия. – Введ. 2005-12-10. – Новосибирск: Изд-во СибНИИстрой, 2005. –18 с.

4. Макеев С.А. Математическая модель бескаркасного двухслойного арочного свода из холодногнутых тонколистовых стальных профилей / С.А. Макеев, А.В. Рудак // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 2. – С. 2—6.

5. Красотина Л.В. Использование арочного профнастила при реконструкции зданий / Л.В. Красотина, Ю.В. Краснощеков, Ю.М. Мосенкис // Вестник СибАДИ. – № 4 (14). – 2009. – С. 41-45.

6. Макеев, С. А. Численный анализ прочности и местной устойчивости арочных профилей трапециевидного сечения с учетом остаточных напряжений продольного гиба / С. А. Макеев, Н. А. Гришаев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 2. – С. 37-40.

7. Макеев С.А. Методы расчета и испытаний легких ограждающих конструкций: Монография / С.А. Макеев, Ю.В. Краснощеков, Л.В. Красотина и др. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. – 124 с.

8. Красотина Л.В. Результаты экспериментального поведения несущего арочного покрытия из трапециевидного профиля / Л.В. Красотина, Ю.В. Краснощеков, С.А. Макеев, А.В. Селиванов // Омский научный вестник. – 2007. – № 2 (56). – С. 38-42.

9. Пат. 2455622 Российская Федерация: МПК G 01L 1/06 (2006.01): Способ определения остаточных напряжений [Текст] / Макеев С.А., Кузьмин Д.А., Гришаев Н.А.; заявитель и обладатель СибАДИ. – № 2011105715/28; заявл. 15.02.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 4 с.

10. Горев В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 2. Конструкции зданий / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов. – М.: Высш. Шк., 2002. – 258 с. ISBN 5-06-003696-0

11. Кудишин Ю.И. Металлические конструкции / Ю.И. Кудишин, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева. – М. : Издательский центр «Академия», 2011. – 688 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Eremeev P.G. K proektirovaniju beskarkasnyh konstrukcij arochnyh svodov iz holodnognutyh tonkolistovyh stal'nyh profilej [On Design of Frameless Constructions of Arch Arches from Cold-formed Thin Sheet Steel Profiles] / P.G. Eremeev, D.B. Kiselev, M.Ju. Armenskij // Assembly and special works in construction. – 2004. – No. 7. – P. 2-3. [in Russian]

2. Eremeev P.G. Naturnye ispytanija fragmentov panelej iz holodnognutyh tonkolistovyh stal'nyh profilej dlja arochnyh svodov [Full-scale Tests of Fragments of Panels from Cold-bent Sheet Steel Profiles for Arched Vaults] / P.G. Eremeev, D.B. Kiselev, M.Ju. Armenskij // Assembly and special works in construction. – 2004. – No. 9. – P. 10-13. [in Russian]

3. TC 1112-001-49529858-2005. Profili stal'nye gnutye arochnye s trapecievidnymi goframi. Tehnicheskie uslovija [Steel Curved Arched Profiles with Trapezoidal Corrugations. Technical Conditions]. – Accepted 2005-12-10. – Novosibirsk: Izd-vo SibNIIstroj, 2005. – 18 p. [in Russian]

4. Makeev S.A. Matematicheskaja model' beskarkasnogo dvuhslojnogo arochnogo svoda iz holodnognutyh tonkolistovyh stal'nyh profilej [Mathematical Model of Frameless Two-layer Arch of Cold-formed Thin Sheet Steel Profiles] / S.A. Makeev, A.V. Rudak // Construction mechanics and calculation of structures. – 2009. – No. 2. – P. 2-6. [in Russian]

5. Krasotina L.V. Ispol'zovanie arochnogo profnastila pri rekonstrukcii zdanij [Use of Arched Corrugated Board during Reconstruction of Buildings] / L.V. Krasotina, Ju.V. Krasnoshhekov, Ju.M. Mosenkis // Bulletin of SibADI. – No. 4 (14). – 2009. – P. 41-45. [in Russian]

6. Makeev S.A. Chislennyj analiz prochnosti i mestnoj ustojchivosti arochnyh profilej trapecievidnogo sechenija s uchetom ostatochnyh naprjazhenij prodol'nogo giba [Numerical Analysis of Strength and Local Stability of Arched Profiles of Trapezoidal Cross-section with Allowance for Residual Stresses of Longitudinal Bending] / S.A. Makeev, N.A. Grishaev // Construction mechanics and calculation of structures. – 2010. – No. 2. – P. 37-40. [in Russian]

7. Makeev S.A. Metody rascheta i ispytanij legkih ograzhdajushhih konstrukcij: Monografija [Methods for Calculating and Testing Lightweight Enclosing Structures: Monograph] / S.A. Makeev, Ju.V. Krasnoshhekov, L.V. Krasotina et al. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2016. – 124 p. [in Russian]

8. Krasotina L.V. Rezul'taty jeksperimental'nogo povedenija nesushhego arochnogo pokrytija iz trapecievidnogo profilja [Results of Experimental Behavior of Bearing Arch Cover from Trapezoidal Profile] / L.V. Krasotina, Ju.V. Krasnoshhekov, S.A. Makeev, A.V. Selivanov // Omsk scientific bulletin – 2007. – No. 2 (56). – P. 38-42. [in Russian]

9. Pat. 2455622 Russian Federation: MPK G 01L 1/06 (2006.01): Sposob opredelenija ostatochnyh naprjazhenij [Tekst] [Method for Determination of Residual Stresses [Text]]/ S.A. Makeev, D.A. Kuz'min, N.A. Grishaev; the applicant and the patentee SibADI. – No. 2011105715/28; appl. 15.02.2011; publ. 10.07.2012, Bul. No. 19. – 4 p. [in Russian]

10. Gorev V.V. Metallicheskie konstrukcii. V 3 t. T. 2. Konstrukcii zdanij [Metal Constructions. In 3 Vol. V. 2. Constructions of Buildings] / V.V. Gorev, B.Ju. Uvarov, V.V. Filippov. – M.: Vyssh. Shk., 2002. – 258 p. ISBN 5-06-003696-0[in Russian]

11. Kudishin Ju.I. Metallicheskie konstrukcii [Metal Constructions] / Ju.I. Kudishin, E.I. Belenja, V.S. Ignat'eva. – M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2011. – 688 p. [in Russian]

Нгуен М.Х.
Кандидат технических наук автоматического управления,
Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куй Дона, г. Ханой, Вьетнам

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО АВТОПИЛОТНОГО БЛОКА НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Аннотация

Автопилотный блок играет ключевую роль в контуре управления. Сможет ли ракета входить в траекторию? Это зависит от качества автопилотного блока, поскольку он обеспечивает, чтобы ракета соблюдала упраленческие команды, полученные от навигационной системы. В данной статье предложен метод расчета коэффициентов автопилотного блока для самонаводящихся ракет на основе генетических алгоритмов, в которых критериием оценки оптимальности автопилотного блока считаются параметры качества автопилотного блока. В статье также проводится моделирование с целью сравнения и выделения оптимальности коэффициентов автопилотного блока, полученных из предложенного метода расчета коэффициентов, и из обычного метода.

Ключевые слова: автопилотный блок, генетический алгоритм, система управления полетом, автопилот.

Nguyen M. H.[1]
Nguyen Minh Hong – PhD in Automatic Control,
Le quy don technical university, Hanoi, social republic of Vietnam

OPTIMAL AUTOPILOT DESIGN ON THE BASIS OF GENETIC ALGORITHM

Abstract

Autopilot plays a key role in the control loop. Whether or not the missile enters the trajectory depends on the quality of the autopilot because it is responsible for ensuring that the missile follows the commands received from the guiding system. A method for designing autopilot's coefficients for homing missile on the basis of genetic algorithm, in which the criteria for evaluating the optimality of obtained autopilot are the characteristic quality parameters of the autopilot, will be proposed in this article. Simulations are conducted for the purpose of comparing and highlighting the optimality of autopilot's coefficients obtained from the proposed design method and from the conventional design method.

Keywords: Autopilot plays, genetic algorithm, flight control system, autopilot.

Introduction

The flight control system is one element in the missile homing loop with four basic elements: autopilot, actuator, airfame dynamics and inertial measurement unit (IMU) [1], in which the autopilot is the most important element which is responsible for ensuring that the missile follows guiding commands. Therefore, the autopilot must be able to respond quickly to the mobility of the target and to ensure the stability of the system when facing impacts from random factors. Mathematically, the autopilot is a set of equations receiving guiding commands and response signals from IMU which will be calculated according to the equations to determine the control task command [1]. Typically, the design of a autopilot is a process of determining autopilot's coefficients. In order to determine the autopilot's coefficients, the flight control system has been analyzed in both frequency and time domains to find the constraints between the autopilot's coefficients and the open loop cutoffs, time constants and attenuation coefficients of the flight control system in document [2], thence the set of equations has been solved to determine the autopilot's coefficients. Therefore, the obtained quality of the autopilot is not as accurate as the original expectation. In addition, according to document [3], the guiding system must operate under frequent influences of random factors which may increase the frequency and lead to system instability.

Since it is difficult to accurately determine the quality of autopilot on the basis of cutting frequency, it is necessary to find a method to determine the autopilot's coefficients based on its basic task which is following guiding command. A method for designing optimal autopilot's coefficients based on genetic algorithm (GA) with the objective function is the function of two parameters that demonstrate clearly the quality of autopilot: set time and undershoot will be proposed in this article. The set time indicates the system's rapid response, while the undershoot represents the "non-minimum phase" effect which is typical for homing missile with control task located at the tail. The non-minimum phase effect is interpreted as the response of the system at the initial stage of the reverse control process to the desired response, which not only causes some difficulties in controlling process but also reduces the system's rapid response. As for the method for designing autopilot's coefficients proposed in document [2], the author did not solve this problem. However, by applying the undershoot parameter to the objective function when performing GA, the autopilot's coefficients will be optimized to reduce the influences of this effect on the controlling process.

The obtained autopilot from the proposed design method will be verified through simulations in both frequency and time domains in order to clearly identify the advantages of this method over the design method used in document [2].

Flight control system model

A three-loop autopilot for homing missile with control task located at the tail, as shown in figure 1, will be used in this article.

Fig. 1 – Homing missile with control task located at the tail

During the design process, the autopilot will be considered in connection with other elements of flight control system. Then, the input of the flight control system will be the missile normal acceleration command n_c and the output will be the received missile normal acceleration n_L. The diagram of flight control system with autopilot is shown in figure 2 [2, 8].

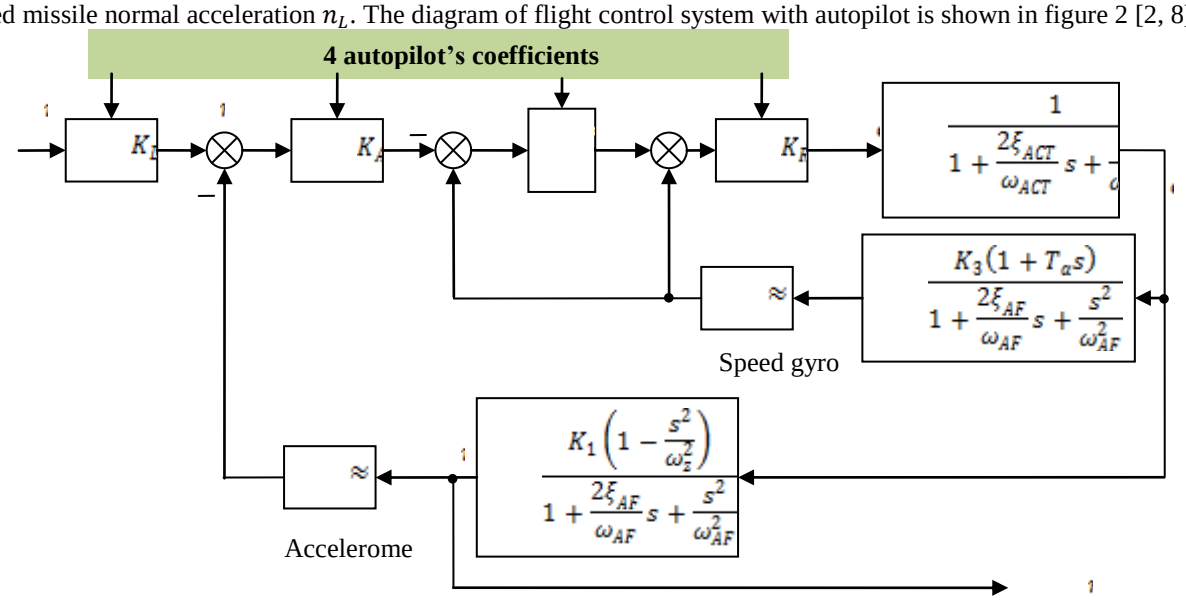


Fig. 2 – Structure diagram of the flight control system

In which:

- K_A, ω_I, K_{DC} and K_R are four autopilot's coefficients. The values of these coefficients depend on each method of autopilot design.
- ξ_{ACT} and ω_{ACT} are damping coefficient and free oscillation frequency of autopilot.
- ψ is the declination of missile longitudinal axis.
- δ_c and δ are the deviations of control tasks.
- Speed gyro and accelerometer are elements of autopilot and their dynamics are approximated 1.
- ξ_{AF} and ω_{AF} are damping coefficient and free oscillation frequency of missile, these two parameters depend on different flight conditions according to the following expression [2]:

$$\omega_{AF} = \sqrt{-M_\alpha}\,; \qquad \xi_{AF} = \frac{Z_\alpha \omega_{AF}}{2M_\alpha} \tag{1}$$

- K_1 and K_3 are amplification coefficients of the missile by angle channel and normal acceleration channel, they are defined as follows [2]:

$$K_1 = -\frac{V_M[M_\alpha Z_\delta - Z_\alpha M_\delta]}{M_\alpha}\,; \qquad K_3 = -\frac{[M_\alpha Z_\delta - Z_\alpha M_\delta]}{M_\alpha} \tag{2}$$

- ω_z is determined by expression (3) [2]:

$$\omega_z = \sqrt{\frac{M_\alpha Z_\delta - Z_\alpha M_\delta}{Z_\delta}} \tag{3}$$

- T_α is determined by expression (4) [2]:

$$T_\alpha = \frac{M_\delta}{M_\alpha Z_\delta - Z_\alpha M_\delta} \tag{4}$$

In expressions (1), (2), (3) and (4), V_M is missile speed, M_α, M_δ, M_q, Z_α and Z_δ are aerodynamic coefficients depending on different flight conditions of missile.

It can be seen from figure 2 that Raytheon autopilot has three feedback loops: speed feedback loop, stability feedback loop and normal acceleration feedback loop and the normal feedback loop. Corresponding to those three feedback loops are three autopilot's coefficients: K_R, ω_I and K_A. K_{DC} coefficient is responsible for ensuring that the set value of missile normal acceleration is equal to the input normal acceleration command value of flight control system, thus K_{DC} will be calculated by K_R, ω_I and K_A. Then, the design of autopilot is actually the determination of three autopilot's coefficients: K_R, ω_I and K_A. In the next part of the article, the method for determining these three autopilot's coefficients based on GA will be presented.

Optimization of autopilot by genetic algorithm

Before optimizing two autopilot's coefficients, the closed-loop transmission function of the flight control system will be defined in this article. For this purpose, the flight control system is represented as an open loop in figure 3.

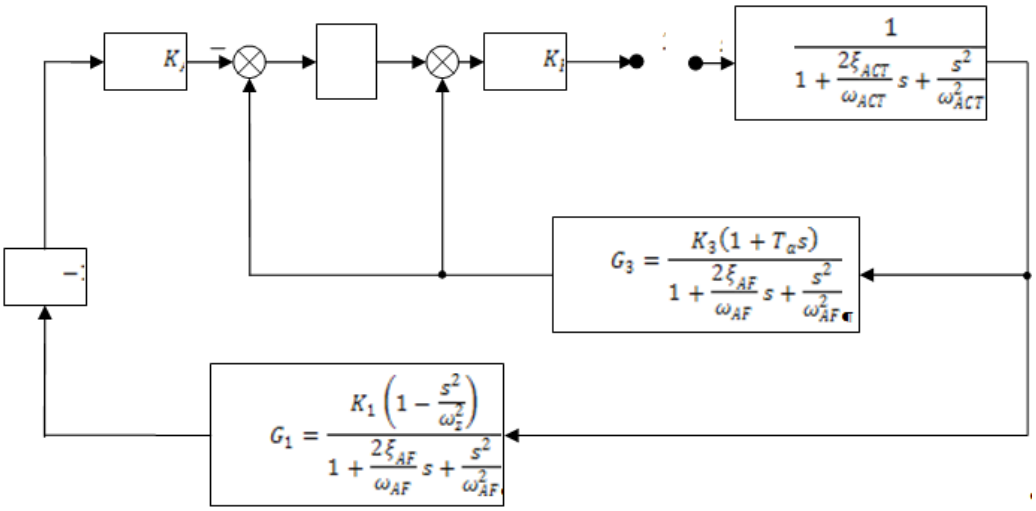


Fig. 3 – Open structure diagram of the flight control system

From figure 3, after the algebraic transformations, we have the shortened open-loop transmission function of the flight control system as follows:

$$H_{ol}(s)=-K_0\frac{\left(1+\frac{2\xi_0}{\omega_0}s+\frac{s^2}{\omega_0^2}\right)}{s\left(1+\frac{2\xi_{AF}}{\omega_{AF}}s+\frac{s^2}{\omega_{AF}^2}\right)\left(1+\frac{2\xi_{ACT}}{\omega_{ACT}}s+\frac{s^2}{\omega_{ACT}^2}\right)} \tag{5}$$

with

$$K_0=K_R\omega_I K_A\left(\frac{K_3}{K_A}+K_1\right);\quad \frac{2\xi_0}{\omega_0}=\frac{K_3+\omega_I K_3 T_\alpha}{\omega_I K_3+K_A\omega_I K_1};\quad \frac{1}{\omega_0^2}=\frac{K_3T_\alpha-\frac{K_A\omega_I K_1}{\omega_z^2}}{\omega_I K_3+K_A\omega_I K_1} \tag{6}$$

Then, the closed loop transmission function of the flight control system is defined as follows:

$$H_{cl}(s)=\frac{n_L}{n_c}=K_{DC}.\frac{\delta}{n_c}.\frac{n_L}{\delta}=K_{DC}.\left[\frac{-\frac{K_AK_R\omega_I}{s}}{1+H_{ol}}\right].\left[\frac{K_1\left(1-\frac{s^2}{\omega_z^2}\right)}{1+\frac{2\xi_{AF}}{\omega_{AF}}s+\frac{s^2}{\omega_{AF}^2}}\right] \tag{7}$$

in which K_{DC} is determined according to [2] to ensure that the response value of the flight control system is 1. Accordingly:

$$K_{DC}=\frac{K_0}{K_AK_R\omega_I K_1} \tag{8}$$

The idea of applying the principles of evolution in nature to the artificial intelligence system was mentioned about 4 decades ago. GA was only officially introduced by John Holland after 1970. Nowadays, GA is used to solve complex problems in various areas: optimization, automatic programming, machine learning, economics, evolution research, etc. The following advantages have contributed to the success of GA: good searching capability, capability to work in large and unknown searching space despite the lack of information; capability to work on the basis of random elements rather than rules, capability to solve problems that have many partial roots or are affected by noise; capability to simultaneously find many solutions for one problem [4]; etc.

GA has several different versions such as: binary GA, denary GA or real-coded GA. Real-coded GA will be used in this article to determine autopilot's coefficients because it allows direct coding of parameters to be optimized, which creates the shortest chromosome length. Therefore, in general, the time to implement real-coded GA is the fastest among the three above GA versions. The implementation structure of genetic algorithm is shown below in figure 4 [5]:

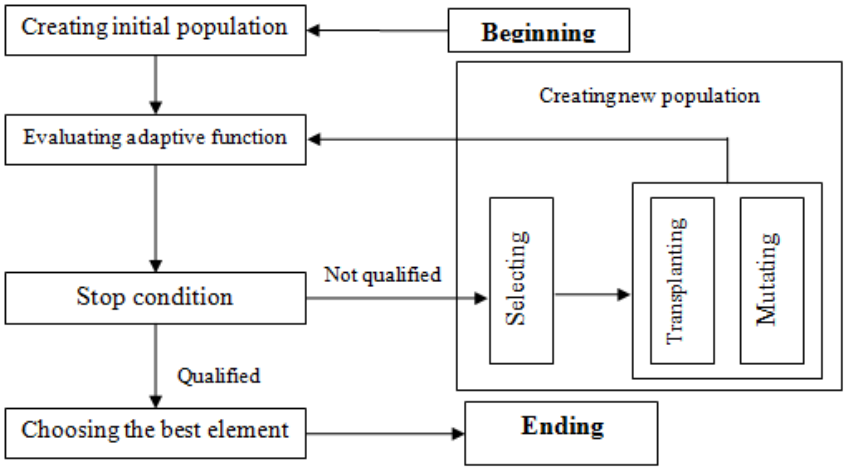


Fig. 4 – Flowchart for implementation of GA

- Creating initial population: the initial population was randomly created with a population size of N = 50, each individual in the population contains a chromosome with three genes corresponding to three autopilot's coefficients K_A, ω_I and K_R.

- Adaptive function: adaptive function is the function of set time t_s and lower mutation M_u. Adaptive function $f(t_s, M_u)$ is as follows:

$$f(t_s, M_u) = \frac{1}{k_1 t_s + k_2 M_u} \tag{9}$$

in which k_1 and k_2 are the two weights that determine the role of t_s and M_u during GA optimization process.

- Stop condition: GA implementation process will stop at 100 generations or after 30 generations whose adaptive function changes do not exceed 10^{-6}.

- Genetic operations: Linear ranking selection; BLX -α and $\alpha = 0.5$ transplantation with transplantation probability p_c= 0.8; non-identical mutation with the parameter b = 5 and mutation probability $p_m = 0.01$.

Survey results

For the purpose of comparing the proposed design method with the design method in document [2], simulations will be conducted under the same flight conditions as in [2]. Specifically, the response of the flight control system at two amplitude values of 0 m and 15240 m, ω_{ACT} = 150, ξ_{ACT} = 0.7, V_M = 914 m/s will be surveyed in this article. Then, at each amplitude value, the following airfame dynamics parameters are obtained:

Table 1 – Values of airfame dynamics parameters at different amplitudes

	0 m	**15240 m**
ω_{AF} **(rad/s)**	25.3398	9.9531
ξ_{AF}	0.0580	0.0268
ω_Z **(rad/s)**	43.2067	18.8720
T_α **(s)**	0.4571	2.3962
K_1	-3.0715	-0.5595
K_3	-1.8890	-0.3441

Survey results at amplitude of 0 m

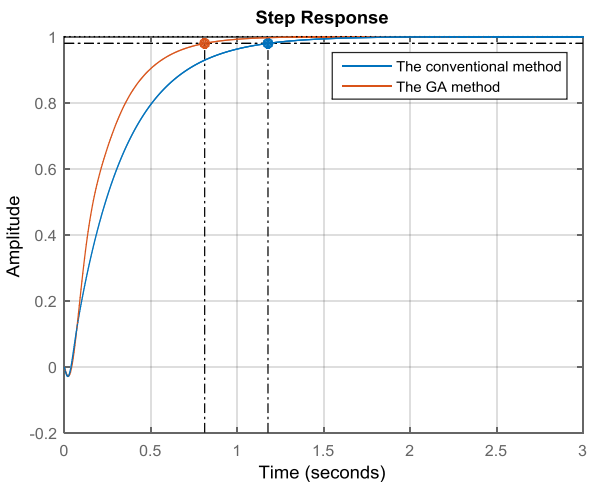


Fig. 5 – Response function of flight control system

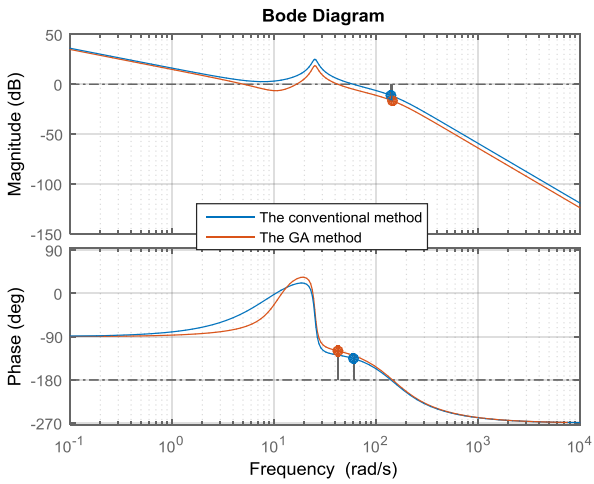


Fig. 6 – Bode diagram of flight control system

Table 2 – Values of characteristic parameters of flight control system quality at amplitude of 0 m

	Conventional method	**GA method**
Time (s)	1.1781	0.8117
Lower mutation (%)	2.9472	2.8220
Magnitude (dB)	11.1104	16.4700
Phase (deg)	44.5983	60.3656
Frequency (rad/s)	60.5439	42.6158

Survey results at amplitude of 15240 m

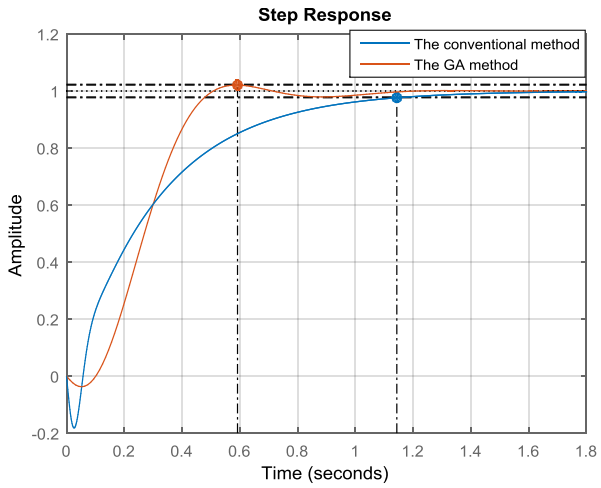


Fig. 7 – Response function of flight control system

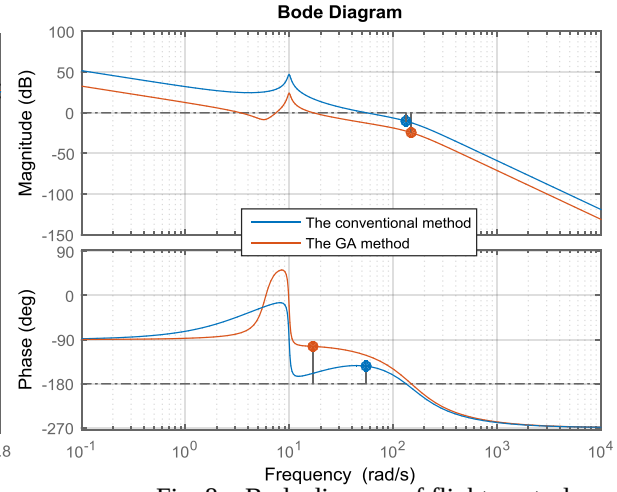


Fig. 8 – Bode diagram of flight control system

Table 3 – I Values of characteristic parameters of flight control system quality at amplitude of 15420 m

	Conventional method	GA method
Time (s)	1.1435	0.5920
Lower mutation (%)	18.1689	3.7229
Magnitude (dB)	10.3013	24.4088
Phase (deg)	35.9076	76.0804
Frequency (rad/s)	54.8731	16.8954

It can be observed from figure 5 and figure 7 that when the flight amplitude increases, the non-minimum phase effect increases. However, as for the autopilot obtained by the proposed method, the increase of this effect is insignificant (from 2.8% at 0 m to 3.7% at 15240 m) while as for the one obtained by conventional method, the increase of this effect is significant (from 2.9% at 0 m to 18.2% at 15240 m) [6]. Moreover, the rapid response of the autopilot obtained by GA optimization method is much better than that of the autopilot obtained by the method proposed in [2].

Although the process of designing autopilot by GA method is only performed in time domain, when surveying the autopilot obtained in frequency domain, the magnitude and phase values are all higher than those of autopilot by conventional method. This is clearly shown in figure 6, figure 8, table 2 and table 3. Furthermore, the frequency value of the flight control system by proposed method is lower than that of flight control system by conventional method. All these advantages increase the stability of the flight control system [7].

Conclusion

The proposed method for designing autopilot's coefficients has increased the rapid response, the magnitude and phase as well as reduced the frequency of the flight control system in comparison with those of the flight control system by proposed design method in [2]. This has increased the stability of the system under influences of random factors. In addition, by incorporating the percent of overshoot parameter into the adaptive function, the influences of the non-minimum phase effect on the quality of the flight control system [8,9,10], which were not solved in document [2], have been reduced.

Список литературы / References

1. Paul B. J. Overview of Missile Flight Control Systems / B. J. Paul, Johns Hopkins // APL Technical Digest. – 2010. - Vol. 29. - № 1. – P. 9-24.

2. Zarchan P. Tactical and strategic missile guidance / P. Zarchan, Reston V.A. // American Institute of Aeronautics and Astronautics. - 2002. - 889 p.

3. Nesline F. W. Why modern controllers can go unstable in practice / F. W. Nesline, P. Zarchan // J. Guid Control Dyn. – 1984. - № 7(4). – P. 495–500.

4. Huynh T. H. Smart control system / T. H. Huynh // Vietnam National University: Ho Chi Minh City. – Publisher. - 2014. – P. 115–217.

5. Nguyen D. T. Artificial Intelligence: Evolutionary programming - Data structure + Genetic algorithm = Evolutionary program / D. T. Nguyen // Education Publishing House. - 2008. – P. 46-58.

6. White B.A. Missile autopilot design using quasi-LPV polynomial eigenstructure assignment / B.A. White, L. Bruyere, A. Tsourdos // IEEE Transaction on Aerospace and Electronic. – 2007. - Vol. 43. - № 4. - P. 1470–1483.

7. Tsourdos A. Adaptive flight control design for nonlinear missile / A. Tsourdos, B.A.White // Control Engineering Practice. – 2005. - Vol. 13. - No. 3. - P. 373–382.

8. Nichols R.A. Gain scheduling for H∞ controllers: a flight control example / R.A. Nichols, R.T. Reichert, W.J. Rugh // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 1993. - Vol. 1. - № 1. - P. 69–79.

9. Rajabioun R. Cuckoo optimization algorithm / R. Rajabioun // Applied Soft Computing Journal. – 2011. - Vol. 11. - № 8. - P. 5508–5518.

10. Siouris G.M. Missile Guidance and Control Systems / G.M. Siouris // Springer Science & Business Media. - New York. - 2004. - 684 p.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.126

Панфилова М.И.[1], Зубрев Н.И.[2], Леонова Д.А.[3], Звездкин Б Е.[4], Панфилова И.С.[5]
[1]ORCID: 0000-0001-5939-7717, кандидат химических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) г. Москва
[2]ORCID: 0000-0002-3620-051x, кандидат технических наук, профессор,
ФГБО ВО МГУПС (МИИТ) Императора Николая II
[3]ORCID: 0000-0002-5933-7954, старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) г. Москва
[4]ORCID: 0000-0001-8179-8349, начальник лаборатории, ООО «БРОК-БЕТОН»
[5]специалист, Московский финансово-юридический университет, г. Москва

КОМПОЗИТНЫЕ РАСТВОРЫ ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Аннотация

Рассмотрено влияние добавок алюмосиликатных нанотрубок (АНТ) на структурообразование бентонито-цементных композитных растворов. Установлено, что введение добавок алюмосиликатных нанотрубок к массе цемента приводит к изменению прочности композитов, а именно, с увеличением содержания АНТ происходит увеличение прочности композитной системы, а затем ее снижение. Прочность системы возрастает при введении 0,125% АНТ к массе цемента, скорость ультразвуковых колебаний увеличивается в 1,22 раза по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует об уплотнении структуры материала и создании дополнительных контактов между частицами, а, следовательно, происходит уплотнение слоев за счет заполнения пустот.

Ключевые слова: композитные материалы, алюмосиликатные нанотрубки, кинетика, структурообразование, прочность композитного раствора, ультразвуковой метод.

Panfilova M.I.[1], Zubrev N.I.[2], Leonova D.A.[3], Zvezdkin B.E.[4], Panfilova I.S.[5]
[1]ORCID: 0000-0001-5939-7717, PhD in Chemistry, Associate professor,
FSBEI of HE National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
[2]ORCID: 0000-0002-3620-051X, PhD in Engineering, Professor,
FSEI of HE Emperor Nicholas II Moscow State University of Railway Engineering
[3]ORCID: 0000-0002-5933-7954, Senior lecturer,
FSBEI of HE National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
[4]ORCID: 0000-0001-8179-8349,
Head of BROK-BETON LLC laboratory
[5]Specialist, Moscow University of Finance and Law, Moscow

COMPOSITE SOLUTIONS FOR INCREASED SAFETY OF CONSTRUCTION

Abstract

The effect of aluminosilicate nanotubes additives (ANT) on the structure formation of bentonite-concrete composite solutions is considered in the paper. It is established that the introduction of aluminosilicate nanotubes additives to cement mass leads to a change in the strength of the composites, namely, as the ANT content increases, the strength of the composite increases, and then decreases. The strength of the system increases with the introduction of 0.125% ANT to the cement mass, the speed of ultrasonic vibrations increases by 1.22 times compared to the control sample, which indicates the compaction of the material structure and the creation of additional contacts between the particles, and, therefore, the layers are consolidated by filling voids.

Keywords: composite materials, aluminosilicate nanotubes, kinetics, structure formation, strength of composite solution, ultrasonic method.

Эффективное использование подземного пространства, осуществляемое в последние десятилетия, с каждым годом приобретает все более широкое распространение во всех странах мира, в том числе и в России. В тоже время, интенсивные нагрузки на городские инженерные коммуникации тоннелей приводят к износу железобетонных конструкций и, как следствие, к их аварийному состоянию.

Для достижения эффективного и безотказного функционирования железобетонных конструкций и увеличения срока их эксплуатации необходимы своевременные работы по выявлению первоочередности ремонта, реконструкции или модернизации в зависимости от их физического состояния. Традиционные методы ремонтных работ не всегда предоставляют необходимый результат в долгосрочной перспективе.

Обеспечение качества строительных конструкций, зданий и сооружений различного назначения на протяжении всего жизненного цикла – проблема, требующая комплексного решения.

Современное строительство все в большей мере основывается на высокотехнологичных конструкционных и многофункциональных материалах, на новых композитных материалах, технологии получения которых основаны на достижениях фундаментальных и общеинженерных наук; на процессах их структурообразования, рассматриваемых на масштабных уровнях строения: от структуры материала в структуре конструкции до нано- и атомно-молекулярного строения. Структура материалов нового поколения является следствием управления развитием механико-химических и физико-химических процессов в сложных многокомпонентных смесях. Условия эксплуатации строительных конструкций, действие на них экстремальных факторов среды требуют от современных и перспективных строительных композитов нового уровня конструкционных и функциональных свойств. Новая структура и рецептура высокотехнологичных и высокопрочных строительных материалов предопределяет новые уровни качеств и свойств.

С учетом этого начальным и во многом определяющим в теоретических и прикладных исследованиях является разрешение ключевых проблем, связанных с отличающимся поведением высокопрочных строительных материалов. Отправной точкой для создания структуры строительного материала являются требования к уровню его прочности.

В связи с этим, актуальным и перспективным направлением исследований является разработка безопасных композитных материалов с применением нанодобавок, введение которых позволяет обеспечить высокую прочность, водонепроницаемость, трещиностойкость и долговечность конструкции.

Наиболее перспективными наноматериалами являются углеродные нанотрубки (УНТ), при использовании которых, происходит улучшение физико-механических свойств цементных композитов [1, С. 19]. УНТ являются центрами направленной кристаллизации, и способны выполнять роль армирующего материала, при этом цементный камень превращается в высокопрочную композитную систему [2, С. 100].

Введение УНТ в количестве 1-2 %, и даже 0,1-0,3 % приводит к возрастанию модуля упругости и прочности цементного камня в разы [3, С. 1625], [4, С. 96].

С учетом этого начальным и во многом определяющим в теоретических и прикладных исследованиях является разрешение остроактуальных проблем, связанных с отличающимся поведением высокопрочных композитов [5, С. 491], [6, С. 87].

Целью данного исследования является изучение влияния добавок АНТ на процесс структурообразования цементных композитов во времени. В состав изучаемого раствора входили: бентонит, АНТ, цемент и жидкое стекло.

В работе в качестве наноструктурированного материала использовали АНТ с химической формулой $Al_2[Si_2O_5](OH)_4 \times nH_2O$, где n=0÷2, бентонит марки $П2Т_2А$ содержащий: монтмориллонит 75-80%, кварц 15-17%, каолинит 1-2% и гидрослюду мусковитового типа 1-2%.

Связующим материалом в композитном растворе являлся портландцемент М500, с целью уменьшения сроков схватывания в раннем возрасте твердения – жидкое стекло ГОСТ13078-81, универсал, марка ТЕКС. В композитной системе водоцементное соотношение составляло 2:1.

Для подготовки качественного композитного раствора (КР) смешивали сухую смесь: бентонит с нанотрубками, затем, перемешивая механизированным способом со скоростью 600 об/мин, добавляли воду и готовили 5 % суспензию. После этого вносили цемент и 5 % жидкого стекла к весу смеси.

Структурообразование КР на основе бентонита марки $П2Т_2А$ при длительном хранении исследовали при различном содержании АНТ, которое варьировалось от 0,000% до 1,000% к массе цемента.

В результате измерения предела прочности на сжатие и изгиб, в зависимости от количества наномодификатора, было установлено, что около 70% конечной прочности обеспечивается за 7 суток, а через 14 суток она достигает 90%.

Исключительное значение структурообразование нанодисперсной системы приобретает в первоначальный период гидратации цемента, так как с момента объединения первичных частиц происходит формирование сначала коагуляционной, а далее и кристаллизационной структуры цементного камня.

Так как основная прочность цементно-бентонитового раствора образуется через 7 суток, то исследовали влияние добавок АНТ на скорость структурообразования на начальной стадии формирования КР. Скорость структурообразования определяли по тангенсу угла наклона кривых. По полученным данным строили график изменения скорости структурообразования от содержания АНТ к массе цемента (рис.1).

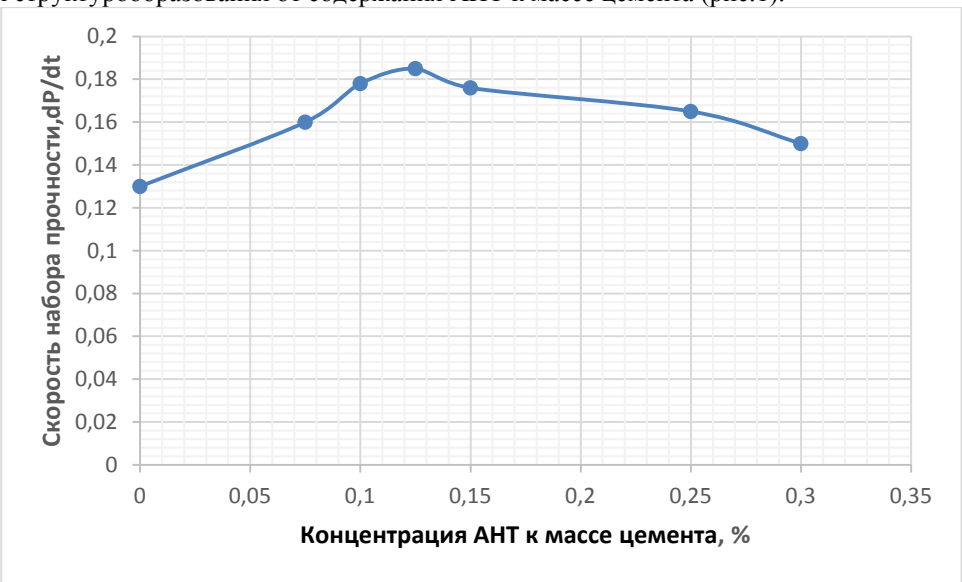


Рис. 1 – Кинетика структурообразования от содержания нанотрубок

Из рис. 1 видно, что наибольшая скорость структурообразования достигается при концентрации нанотрубок 0,125% к массе цемента. По сравнению с контрольным образцом скорость структурообразования возрастает почти в 1,5 раза. Этот эффект достигается благодаря взаимодействию нанотрубок с клинкерными минералами в зоне контакта частиц этих компонентов [7, С. 173], [8, С. 11]. [9, С. 40].

Очевидно, оптимальное содержание нанотрубок приводит к получению плотной упаковки цементного камня, в результате чего увеличивается прочность КР.

Согласно проведенным исследованиям установлено, что добавки малых концентраций нанотрубок способствуют изменению кинетики структурообразования и росту прочности композитного раствора.

В строительстве требуется проведение проверки качества конструкций. Это связано с тем, что мог быть использован некачественный раствор, либо в ходе эксплуатации нарушилась структура из-за промерзания. Даже при качественной подготовке растворов конструкция может таить в себе опасность разрушения всего объекта. Поэтому применяют специальные способы контроля его структуры и состава.

Наиболее практичными являются неразрушающие методы, которые позволяют получить максимум информации [10, С. 46]. Самым эффективным среди них является ультразвуковой метод, основанный на измерении скорости прохождения волн ультразвуковой частоты сквозь КР и последующем сравнении с контрольным образцом. По времени прохождения звука сквозь материал определяется скорость прохождения звуковой волны сквозь конструкцию, которая позволяет судить о её прочности. Достоинством метода является его высокая чувствительность к изменению структуры твердеющих цементных паст и возможность его использования как для изучения кинетики процесса структурообразования, так и для оценки прочности.

Характеристикой упругих свойств материала является скорость распространения ультразвуковых колебаний. Независимо от режима твердения по характеру изменения скорости ультразвукового сигнала определяют характер нарастания прочности, следовательно, ультразвуковой метод позволяет получать устойчивую информацию о твердении строительных материалов.

Основой данного метода является чувствительность скорости ультразвука к образованию в материале на всех стадиях его твердения контактов различной природы.

В связи с вышесказанным, была измерена скорость ультразвуковых колебаний в зависимости от концентрации АНТ на ультразвуковом измерителе прочности бетона «ПУЛЬСАР 1.1». На основании полученных данных была построена табл.1.

Таблица 1 – Скорость ультразвуковых колебаний от концентрации АНТ

Концентрация АНТ к массе цемента, %	0,000	0,100	0,125	0,150	0,300	0,400	0,450	0,600
Скорость ультразвуковых колебаний, V, м/с	1379	1597	1680	1659	1387	1295	1265	1207
Прочность, Р, МПа	**1,38**	**2,95**	**3,2**	**2,83**	**2,55**	**2,17**	**1,97**	**1,7**

По данным табл.1 был построен график зависимости скорости распространения звуковых колебаний и прочности КР от содержания АНТ %, к массе цемента (рис.2).

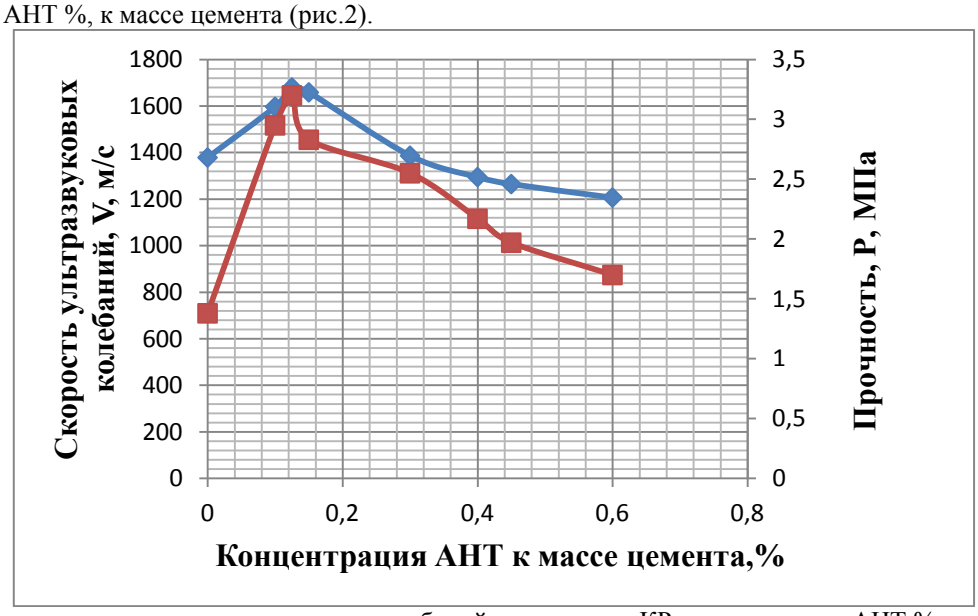


Рис.2 – Скорость распространения звуковых колебаний и прочность КР от содержания АНТ %, к массе цемента

Установлено, при введении 0,125% АНТ к массе цемента достигается максимум прочности композитной системы (КС) и одновременно наблюдается возрастание скорости ультразвуковых колебаний в 1,22 раза по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует об уплотнении структуры материала и созданию дополнительных контактов между частицами, а, следовательно, происходит заполнение пустот.

Таким образом, доказано, что введение добавок АНТ в композитный раствор привело к упрочнению КС за счет проникновения наночастиц в мелкие поры цементного камня.

Список литературы / References

1. Староверов В.Д. Структура и свойства наномодифицированного модифицированного камня. / В.Д.Староверов // Автореф. дис. канд. техн. наук. СПб., – 2009. – С.19.

2. Яковлев Г.И. Модификация поризованных цементных матриц углеродными нанотрубками / Г.И. Яковлев, Г.Н. Первушин, А.Ф. Бурьянов, и др. // Строительные материалы. 2009.- №3.- С.99-102.

3. Coleman J.N., Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites. / J.N. Coleman, U. Khan, W.J. Blau, // Carbon. -2006. -V. 44- № 9.- P. 1624–1652.

4. Панфилова М.И. Наномодифицированные цементно-бентонитовые композиты / М.И. Панфилова, Н.И. Зубрев, Д.А Леонова и др.// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс.- 2015.-№5(27) -С.95-98.

5. Thostenson, E.T. Nanocomposites in context. / E.T. Thostenson, et al. // Composites Science and Technology. – 2005. – №65. – p. 491-516.

6. Королев Е.В. Параметры ультразвука для гомогенизации дисперсных систем с наноразмерными модификаторами / Е.В. Королев, М.И. Кувшинова // Строительные материалы. – 2010. – №9. – С. 85-88.

7. Панфилова М.И. Перспективные направления развития композитов с добавками серы / М.И. Панфилова, Н.И. Зубрев, Д. А. Леонова и др. // Научное обозрение. -2015,- №14,- стр. 172-175.

8. Перфилов В.А. Применение модифицирующих микроармирующих компонентов для повышения прочности ячеистых материалов / В.А. Перфилов, А.В. Аткина, О.А. Кусмарцева // Известия вузов -2010. – №9. – С.11-14.

9. Урханова Л.А. Бетоны на композиционных вяжущих с нанодисперсной фуллеренсодержащей добавкой / Л.А.Урханова, С.Л.Буянтуев, С.А.Лхасаранов, и др. // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – №1. – С. 39-45).

10. Пономарев А.Н. Исследование многослойных полиэдрических наночастиц фуллероидного типа – астраленов / А.Н.Пономарев, В.А.Никитин, В.В.Рыбалко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2006. – №5. – С. 44-47.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Staroverov V.D. Struktura i svojstva nanomodificirovannogo modificirovannogo kamnja.[Structure and properties of modified stone nanomodified] / V.D.Staroverov // Avtoref. dis. kand. tehn. Nauk .[Dissertation of the candidate of technical sciences]. SPb., – 2009. – P. 19. [in Russian]

2. Jakovlev G.I. Modifikacija porizovannyh cementnyh matric uglerodnymi nanotrubkami [Modification of porous cement matrix carbon nanotubes]/ G.I. Jakovlev, G.N. Pervushin, A.F. Bur'janov, i dr. // Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. 2009.- №3.- P. 99-102. [in Russian]

3. Coleman J.N., Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites. / J.N. Coleman, U. Khan, W.J. Blau, // Carbon. -2006. -V. 44- № 9.- P. 1624–1652. [in English]

4. Panfilova M.I. Nanomodificirovannye cementno-bentonitovye kompozity [Nanomodified cement-bentonite composites] / M.I. Panfilova, N.I. Zubrev, D.A Leonova i dr.// XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus[XXI century: the results of past and present problems plus].- 2015.-№5(27) -P. 95-98. [in Russian]

5. Thostenson, E.T. Nanocomposites in context. / E.T. Thostenson, et al. // Composites Science and Technology. – 2005. – №65. – P. 491-516. [in English]

6. Korolev E.V. Parametry ul'trazvuka dlja gomogenizacii dispersnyh sistem s nanorazmernymi modifikatorami [Ultrasound parameters for homogenisation of disperse systems with nanoscale modifiers] / E.V. Korolev, M.I. Kuvshinova // Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. – 2010. – №9. – P. 85-88. [in Russian]

7. Panfilova M.I. Perspektivnye napravlenija razvitija kompozitov s dobavkami sery [Future direction of composites with additions of sulfur] / M.I. Panfilova, N.I. Zubrev, D. A. Leonova i dr. // Nauchnoe obozrenie [scientific Review]. -2015,- №14,- P. 172-175. [in Russian]

8. Perfilov V.A. Primenenie modificirujushhih mikroarmirujushhih komponentov dlja povyshenija prochnosti jacheistyh materialov [Application microarming modifying components to enhance the strength of porous materials] / V.A. Perfilov, A.V. Atkina, O.A. Kusmarceva // Izvestija vuzov [Proceedings of the universities] 2010. – №9. – P. 11-14. [in Russian]

9. Urhanova L.A. Betony na kompozicionnyh vjazhushhih s nanodispersnoj fullerensoderzhashhej dobavkoj [Concrete on composite knitting Nanostructured fullerene additive] / L.A.Urhanova, S.L.Bujantuev, S.A.Lhasaranov, i dr. // Nanotehnologii v stroitel'stve. [Nanotechnology in Construction] – 2012. – №1. – P. 39-45). [in Russian]

10. Ponomarev A.N. Issledovanie mnogoslojnyh polijedricheskih nanochastic fulleroidnogo tipa – astralenov [Investigation of multilayer polyhedral nanoparticles fulleroid type - astralenes] / A.N.Ponomarev, V.A.Nikitin, V.V.Rybalko // Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovanija [Surface. X-ray, synchrotron and neutron research]. – 2006. – №5. – P. 44-47. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.136

Потапова М.В.[1], Потапов М.Г.[2]
[1]ORCID: 0000-0001-8404-4243, кандидат технических наук,
[2]ORCID: 0000-0002-2818-6835, кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ МЕТАЛЛОШИХТЫ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Аннотация

Современная базовая технология производства стали включает три составные части: выплавка полупродукта в сталеплавильном агрегате из предварительно подготовленных железосодержащих шихтовых материалов, основным из которых является жидкий чугун; ковшевая обработка жидкого расплава газообразными, твердыми материалами и вакуумом; непрерывная разливка на МНЛЗ. Энергетический и экологический факторы остаются определяющими при выплавке стали. Функции агрегатов для производства стали сближаются. Изменение структуры металлошихты в сталеплавильных агрегатах в условиях высоких цен на металлический лом и повышенные требования к качеству металлопродукции вызывают необходимость увеличения доли чугуна в металлошихте и поиска альтернативных шлакообразующих и железосодержащих материалов (например, сидеритовую руду).

Ключевые слова: конвертер, дуговая сталеплавильная печь, структура металлошихты, доля жидкого чугуна, тепловой режим плавки, сидеритовая руда.

Potapova M.V.[1], Potapov M.G.[2]
[1]ORCID: 0000-0001-8404-4243, PhD in Engineering,
[2]ORCID: 0000-0002-2818-6835, PhD in Engineering,
FSBEI of HE Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk

RESTRUCTURING RESULTS ANALYSIS OF METAL STOCK OF STEEL FACILITIES

Abstract

The modern basic technology of steel production includes three constituent parts: smelting of a semi-finished product in a steel facilities unit from preliminary prepared iron-containing charge materials, the main of which is liquid iron; the ladle treatment of liquid melt by gaseous, solid materials and vacuum; continuous ladling on CC machine. Energy and environmental factors remain decisive in steel smelting. The functions of the aggregates for steel production are approaching. The change in the structure of the metal charge in steelmaking units under the conditions of high prices for scrap metal and increased requirements for the quality of metal products necessitate an increase in the share of pig iron in the metal charge and the search for alternative slag-forming and iron-containing materials (for example, siderite ore).

Keywords: converter, arc steel-making furnace, structure of metal charge, fraction of liquid iron, thermal melting mode, siderite ore.

Современный этап роста черной металлургии по-прежнему базируется на достижениях в областях создания и эксплуатации технических средств, энергетики, контроля и научных знаниях о природе веществ и закономерностях их взаимодействий. Достижения в одной из этих областей всегда способствуют прогрессивным решениям в области металлургии железа.

История развития черной металлургии говорит о цикличном характере появления новшеств в технологиях металлургии черных металлов. Так, середина 19 века знаменуется появлением томасовского и мартеновского способов сталеплавильного производства, середина 20 века – применением газообразного кислорода кислорода и электрической энергии и способов ее преобразования в тепловую.

В пределах каждого цикла развития наблюдаются отклонения от монотонного и стабильного наращивания объемов производства и потребления продуктов металлургии черных металлов. В начале 21 века наблюдался стремительный рост цен на энергию, газ, нефть, коксующиеся угли, было отмечено обострение экологической ситуации. Последующее падение цен на энергоносители, рост цен на металлический лом и ужесточение требований к качеству стали небольших объемов потребления с ухудшением экологических факторов, перераспределение рынков сбыта потребовало вносить оперативные меры по реструктуризации не только металлургического производства, но и технологических процессов. В этих условиях конкурентоспособность производителей металлопродукции достигается за счет снижения материальных и энергетических затрат на производство, повышения качества продукции и производительности труда.

В 21 веке двухстадийный способ производства железосодержащих сплавов: чугуна и стали остается доминирующим вариантом технологии по объемам промышленного производства черной металлургии. При этом конвертерные процессы получения стали хорошо сочетаются с доменным процессом производства чугуна. Конвертерные технологии относительно просто адаптируются к переработке обычного передельного, низкомарганцовистого, фосфористого и ванадиевого чугунов. Жидкий чугун всегда составлял основу металлошихты конвертеров и как главный источник железа и как поставщик физического и химического тепла. Другие железосодержащие материалы (металлический лом, техногенные отходы, металлизованные окатыши, железо прямого восстановления и др.) выполняют роль охладителей процесса окислительного рафинирования чугуна. От их количества и качества, и в целом от структуры металлошихты, зависят технико-экономические показатели производства стали в конвертерах [1, С. 32].

В электросталеплавильном производстве, как известно, основу металлошихты составляет металлический лом, на переработку которого требуются внешние источники тепла: электрическая энергия, газообразное и твердое топливо. Эффективность использования источников тепла в этих условиях во многом будет зависеть от соотношения цен на энергоносители. Повышенные требования к качеству стали на фоне снижения качества металлического лома и роста

его цены заставляют электрометаллургов также увеличивать долю жидкого чугуна в металлошихте. Физическое и химическое тепло чугуна изменяет структуру теплового баланса электроплавки и усиливает роль окислительного рафинирования технологического процесса [2, С. 78].

Главными системными факторами, определяющими индустриальное развитие в 21 веке, остаются энергетический и экологический факторы. В этих условиях сложилась базовая технология производства стали. Она включает три составные части: выплавка полупродукта в сталеплавильном агрегате из предварительно подготовленных железосодержащих шихтовых материалов, главным из которых является жидкий чугун; внепечная обработка жидкого расплава газообразными, твердыми материалами и вакуумом; разливка готовой стали на МНЛЗ.

Задачи первой части выплавки стали заключаются в получении металлического расплава с заданным химсоставом и температурой с минимальными затратами материальных и энергетических ресурсов, не зависящими от типа сталеплавильного агрегата. В связи с этим наблюдается тенденция изменения структуры металлошихты как при производстве конвертерной стали, так и при выпоавке металла в электрических дуговых печах в сторону увеличения доли чугуна как в жидком, так и в твердом виде. Чугун становится доминирующим железосодержащим сырьем для получения стали.

На сегодняшний день производство стали в кислородном конвертере сохранило свою основу – окислительное рафинирование металла газообразным кислородом. Во время продувки в конвертерной ванне активно взаимодействуют кислородное дутье, находящиеся там металлические шихтовые материалы, футеровка и дополнительные реагенты . Вметаллургической промышленности реализуется несколько вариантов подачи кислородного дутья в рабочее пространство конвертера: сверху, снизу, сбоку, комбинированно в различных сочетаниях с другими реагентами. Продувка, как правило, ведется через водоохлаждаемую фурму сверху с удельной интенсивностью 2,5 – 4,0 м3/(т.мин).

Накопленный опыт мировых производителей конвертерной стали позволяет уточнять и развивать знания о механизме процессов окислительного рафинирования и использовать их в других агрегатах в сопоставимых условиях [1, С. 50], [3, С. 82].

Состояние конвертерной ванны перед продувкой и степень ее нагретости зависят от соотношения между загруженными шихтовыми материалами, их температур, температуры поверхности футеровки и времени проведения технологических операций. При поступлении кислорода начинается активное взаимодействие высокоскоростных газовых струй с ванной в отдельных локациях. Каждая струя дутья формирует свою реакционную зону, состоящую по крайней мере из двух частей: первичной и вторичной .

Первичная реакционная зона - это область непосредственного взаимодействия струи кислорода с расплавом. Элементы металлического расплава (железо, кремний, марганец, углерод и др.) превращаются в оксиды, основу которых составляют оксиды железа. В первичной реакционной зоне наблюдаются самые высокие температуры (2500 – 2600 оС), близкие к температуре кипения металлического расплава. Это способствует растворению в металле значительных количеств газов, в том числе и кислорода. При этих температурах происходит интенсивное испарение веществ.

По уровню температур вторичная реакционная зона - это переходная область между основной массой металла и первичной реакци¬онной зоной. Поэтому здесь наряду с оксидами железа в окислительных процессах участвует и кислород, выделяющийся из переокисленного металла при более низких температурах. Здесь преимущественно окисляется углерод.

За пределами вторичной реакционной зоны в объеме конвертерной ванны формируется циркуляционное движение жидкого расплава (зона циркуляции), где происходит массо- и теплообмен между движущимися потоками реакционной зоны и остальным объемом конвертерной ванны. Здесь избыточный кислород реакционной зоны участвует в окислительных процессах там, где имеются благоприятные физико-химические условия.

Корольки металла в слое шлака также подвергаются окислительному воздействию оксидов железа.

Энергичная циркуляция металла и шлака в пределах реакционной зоны, газовыделение в ней и на поверхности корольков, высокие градиенты температур и связанные с ними изменения плотности и вязкости жидких фаз образуют газо-шлако-металлическую эмульсию. Эта эмульсия заполняет большую часть рабочего пространства и в моменты интенсивного окисления углерода поднимается до уровня горловины конвертера. Интенсивность газовыделения во время продувки зависит от скорости окисления углерода и изменяется по ходу продувки. Любые изменения в распределении кислорода между взаимодействующими фазами и элементами металла приводят к изменениям скорости окисления углерода. Оксиды железа, образующиеся в реакционной зоне, служат посредником в передаче кислорода от дутья к элементам металла, а в шлаке - активным растворителем извести.

Скорости и полнота протекания массообменных процессов, условия перемешивания ванны, состав образующихся газов и характер пылевыделения заметно изменяются при подаче кислородного дутья снизу или сбоку. Увеличение количества реакционных зон и интенсификация зон циркуляции повышают эффективность процессов окислительного рафинирования.

В комбинированных процессах кислород дутья полностью или в большей его части подают сверху, а газообразные, твердые, жидкие реагенты или их смеси в различных сочетаниях – снизу. При этом сохраняется возможность управления процессом распределения кислорода между металлической, шлаковой и газовой фазами в рабочем пространстве конвертера, меняя режим подачи кислородного дутья, и дополнительно интенсифицировать процессы в объеме конвертерной ванны различными реагентами.

Техническое состояние конвертера, надежность его систем обслуживания, квалификация персонала во многом определяют конечные результаты плавки. Однако до сих пор нет надежных средств для непрерывного измерения температуры и состава металла и шлака в конвертерной ванне. По ходу продувки состояние конвертерной ванны и характер протекающих в ней процессов можно оценить по косвенным показателям: внешний вид, поведение и состав газа над горловиной конвертера, уровень шума дутья, вибрации корпуса конвертера и кислородной фурмы,

интенсивность образования и форма искр, уровень подъема шлако-металлической эмульсии, электросопротивление в рабочем пространстве и др. Обычно газоотводящий тракт конвертеров оборудуется средствами контроля состава газа, информация о котором непрерывно передается на пост управления. Однако эта полезная информация поступает с запаздыванием и отражает процессы, одновременно протекающие в конвертере и в газоотводящем тракте.

В последнее время при выплавке стали расширяется практика промежуточного удаления шлака из конвертера во время продувки. Это связано с необходимостью улучшения процессов шлакообразования (количества и состава шлака) с целью повышения качества и выхода годного металла, экономии материальных ресурсов. Очевидно, что с увеличением доли жидкого чугуна в металлошихте промежуточный спуск шлака станет необходимой технологической операцией.

На ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») с начала второго десятилетия 21 века активно продолжаются работы по вводу новых мощностей по производству стали и совершенствованию технологических процессов. Кислородно-конвертерный цех ОАО «ММК» (ККЦ) является одним из основных звеньев в структуре производства готовой металлопродукции акционерного общества, ориентированной на сортамент трубных, судовых и автомобильных марок стали для новых прокатных станов «5000» горячей и «2000» холодной прокатки, построенных в 2009 – 2012 гг. В злектросталеплавильном цехе ОАО «ММК» находятся в эксплуатации две 180-т ДСП. Особенностью выплавки стали в этих печах является использование жидкого чугуна в количествах от 20 до 40 % в металлошихте. При расходе чугуна 20 – 25 % удельный расход электроэнергии составляет 270 – 290 кВт•ч/т, цикл плавки – 42 – 48 мин. Мощность трансформатора – 150 МВА (вторичное напряжение 800 – 1236 В). В цехе работает двухванный сталеплавильный агрегат с использованием в металлошихте жидкого чугуна и зашлакованного скрапа [4, С. 35].

Изменение структуры металлошихты в сталеплавильных агрегатах в условиях высоких цен на металлический лом вызывает необходимость поиска альтернативных шлакообразующих и железосодержащих материалов. Так, при выплавке стали в конвертерах представляет интерес применение сырого сидерита. В этом материале основной рудный минерал представлен в виде карбоната железа $FeCO_3$ [5, С. 34]. Кроме этого в сырой руде содержатся карбонаты магния, кальция и марганца. Так, в кусковой руде фракции 13 – 60 мм Бакальского месторождения, поступающей на обогащение, в среднем содержится 29,73 % Fe, 11,0 % MgO, 4,8 % CaO, 1,5 % MnO, 8,4 % SiO_2, 33,9 % п.п.п. Такую руду можно использовать как шлакообразующий материал и охладитель в качестве заменителя известняка, сырого доломита, металлического лома и ожелезненного доломита.

Расчеты показывают, что при выплавке стали марки 08пс в 370-тонном конвертере ККЦ ОАО «ММК» при загрузке около 50 т собственного оборотного металлолома и заливке 360 т жидкого чугуна с температурой 1390 С потребуется 8 т сидеритовой руды [6,С. 9-10]. В этом случае на выпуске полупродукт массой около 365 т будет иметь температуру порядка 1660 С и средний химический состав: 0,043 % C, 0,045 % Mn, 0,016 % S, 0,008 % P, 0,022 % Cr, 0,023 % Ni, 0,046 % Cu. Состав шлака: 39,5 % CaO, 15,8 % SiO_2, 10,7 % MgO, 2,6 % MnO, 22,3 % FeO, 4,6 % Fe_2O_3, 1,4 % Al_2O_3, 1,0 % P_2O_5, 0,3 % Cr_2O_3, 1,9 % V_2O_5. При этом 8 т сидеритовой руды могут заменить 8,3 т известняка и 7,6 т ожелезненного доломита. За счет дополнительного прихода железа из сидеритовой руды выход жидкого металла на каждой плавке повышается на 3 т [7, С. 24].

Были определены охлаждающие эффекты используемых шихтовых материалов: 1 % сидерита от массы металлошихты (4 т) снижает температуру металла примерно на 37 С, в то время как известняк – на 28 С, сырой доломит - на 31 С, ожелезненный доломит и лом – на 14 С° [8, 35-37].

Интересные результаты выплавки стали в ДСП с повышенной долей жидкого чугуна в металлошихте получены на металлургическом предприятии «Уральская Сталь» (г. Новотроицк, Оренбургская область), которое выпускает более ста марок углеродистой легированной и низколегированной стали; толстолистового, универсального широкополосного и сортового проката [9, С. 44; 10, С. 93].

В состав ЭСПЦ этого комбината входят две дуговые электропечи вместимостью 120 т и мощностью трансформаторов 95 МВт. Разливка стали осуществляется на слябовой одноручьёвой МНЛЗ радиального типа (около 80% от выплавленной стали) и в изложницы. По действующей технологии в ЭСПЦ при производстве стали текущего сортамента в ДСП применяется жидкий чугун, содержащий в среднем 0,58 % Si, 0,33 % Mn, 0,07 % P, 0,01% S, 0,08 % Cr и 0,02 % Ti. Заливка чугуна в печь производится сверху через 5-10 минут после начала расплавления металлошихты.

Первоначально масса заливаемого в ДСП чугуна составляла от 15 до 24 т, затем расход чугуна увеличили до 30 – 40 т, а в ноябре-декабре 2015 г. увеличили массу чугуна до 100 т на плавку.

Анализ результатов работы ДСП с таким расходом чугуна показал, что с увеличением расхода заливаемого в печь чугуна общая продолжительность плавки увеличивается, а расход электроэнергии уменьшается. Так, средняя продолжительность плавки в ДСП при расходе жидкого чугуна 36 – 44 т на плавку составила 42 мин, а при 95 – 105 т – 55 минут. Расход электроэнергии при заливке 36 – 44 т чугуна составил 236 кВт•ч/т, а при 95 – 105 т – 139 кВт•ч/т. Однако, наблюдается некоторое увеличение содержание фосфора в металле из-за снижения окисленности шлака в ДСП, дополнительного поступления фосфора с чугуном, а также более быстрого нагрева металла за счет физического и химического тепла жидкого чугуна. Химический состав стали перед выпуском из ДСП показан в таблице.

Таким образом, на современном этапе развития сталеплавильного производства наблюдается тенденция к изменению структуры металлошихты конвертеров и дуговых сталеплавильных печей на предприятиях с полным металлургическим циклом: увеличивается доля жидкого чугуна.

Таблица 1 – Химический состав стали перед выпуском

Расход чугуна на плавкут	Число плавок, шт	Средний расход жидкого чугуна, т	Химический состав стали, %							
			C	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
36-44	50	40	0,06	0,065	0,003	0,018	0,03	0,067	0,082	0,0076
95-105	35	100	0,06	0,055	0,004	0,020	0,01	0,015	0,03	0,0058

При этом функции сталеплавильных агрегатов сблизились: получение жидкого полупродукта с заданными параметрами [8, С. 36]. В конвертерной плавке в качестве дополнительного охладителя, шлакообразующего материала и источника железа можно использовать сырую сидеритовую руду. В электроплавке необходимо использовать опыт проведения дутьевого режима конвертеров с верхней подачей дутья. Очевидно, в условиях значительного изменения структуры металлошихты сталеплавильных агрегатов возможно дальнейшее развитие двухкорпусных их конструкций типа CONARC.

Список литературы / References

1. Колесников Ю.А. Металлургические технологии в высокопроизводительном конвертерном цехе: учеб. пособие / Б.А. Буданов, А.М.Столяров; под ред. В.А. Бигеева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – 379 с.

2. Рощин В.Е. Электрометаллургия и металлургия стали: учебник / А.В. Рощин. – 4-е изд.,перераб. и доп. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 572 с

3. Потапова М.В. Производство стали в кислородных ковертерах: учеб. пособие / Макарова И.В., Писчаскина А.В., Потапов М.Г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. – 94 с.

4. Бигеев. В.А. От двухванного сталеплавильного агрегата к агрегатам типа CONARC / Ю.А. Колесников, И.А. Агзамов // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVI Международной конференции: в 2 ч. Под ред. В.Е. Рощина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Ч.1. С. 35-41.

5. Колесников Ю.А. Анализ технологических параметров выплавки стали в конвертере с использованием сидеритовой железной руды / Б.А. Буданов, Д.С. Сергеев // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. Вып. 1. С 34-36.

6. Вусихис А.С. Применение сидеритовых руд бакальского месторождения в производстве чугуна и стали / Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З. // Металлург. 2017. № 2. С. 27-31.

7. Рощин В.Е. Технология и оборудование для прямой комплексной переработки кусковой сидеритовой руды при производстве стали / Брындин С.А., Салихов С.П., Рощин А.В. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016. № 1. С. 22-27.

8. Бигеев. В.А. Сближение технологий выплавки стали в кислородном конвертере и дуговой сталеплавильной печи / Ю.А. Колесников, А.Н. Федянин, М.В. Потапова, А.В. // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. Вып. 2. С 35-39.

9. Глынина А.В. Оптимизация технологии выплавки стали в условиях ЭСПЦ ОАО «Уральская Сталь» / Шаповалов А.Н. // Наука и производство Урала. 2010. № 6. С. 43-48.

10. Солодилов Д.Ю. Оценка формирования себестоимости продукции и анализ резервов ее снижения (на примере электросталеплавильного цеха ОАО «Уральская Сталь») / Жантлисова Е.А. // Наука и производство Урала. 2013. № 9. С. 193-196.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kolesnikov Yu.A. Metallurgicheskiye tekhnologii v vysokoproizvoditel'nom konverternom tsekhe [Metallurgical technologies in high-efficiency converter shop] / B.A. Budanov, A.M. Stolyarov // Uchebnoye posobiye [Training Manual]. – 2015. – 379 P. [in Russian]

2. Roshchin V.Ye. Elektrometallurgiya i metallurgiya stali [Electrometallurgy and metallurgy of steel] / A.V. Roshchin // Uchebnik [Textbook]. – 2013. - 572 p. [in Russian]

3. Potapova M.V. Proizvodstvo stali v kislorodnykh koverterakh [Production of steel in oxygen koverterah] / Makarova I.V., Pischaskina A.V., Potapov M.G. // Uchebnoye posobiye [Training Manual]. – 2016. – 94 P. [in Russian]

4. Bigeyev V.A. Ot dvukhvannogo staleplavil'nogo agregata k agregatam tipa CONARC [From double-bath open-hearth furnace to the CONARC type units] / Yu.A. Kolesnikov, I.A. Agzamov // Sovremennyye problemy elektrometallurgii stali: Materialy XVI Mezhdunarodnoy konferentsii [Modern problems of electrometallurgy of steel materials of the XVI International Conference]. – 2015. – P. 35-41. [in Russian]

5. Kolesnikov Yu.A. Analiz tekhnologicheskikh parametrov vyplavki stali v konvertere s ispol'zovaniyem sideritovoy zheleznoy rudy [Analysis of the technological parameters of steel smelting in a converter using siderite iron ore] / B.A. Budanov, D.S. Sergeev // Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhregional'nyy sbornik nauchnykh trudov [Theory and technology of metallurgical production: interregional collection of scientific papers]. – 2014. V. 1. P. 34-36. [in Russian]

6. Vusihis A.S. Primeneniye sideritovykh rud bakal'skogo mestorozhdeniya v proizvodstve chuguna i stali [Application of siderite ores of the baskal deposit in the production of iron and steel] / Leontiev L.I., Kudinov D.Z. // Metallurg [Metallurgist]. - 2017. № 2. P. 27-31. [in Russian]

7. Roshchin V.Y. Tekhnologiya i oborudovaniye dlya pryamoy kompleksnoy pererabotki kuskovoy sideritovoy rudy pri proizvodstve stali [Technology and equipment for direct complex processing of lumpy siderite ore in steelmaking] / Bryndin S.A., Salikhov S.P., Roshchin A.V. // Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya [Problems of ferrous metallurgy and materials science]. - 2016. № 1. P. 22-27. [in Russian]

8. Bigeyev V.A. Sblizheniye tekhnologiy vyplavki stali v kislorodnom konvertere i dugovoy staleplavil'noy pechi [Convergence of steelmaking technologies in an oxygen converter and an electric arc furnace] / Kolesnikov Yu.A., Fedyanin A.N., Potapova M.V. // Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhregional'nyy sbornik nauchnykh trudov [Theory and technology of metallurgical production: interregional collection of scientific papers]. – 2015. V. 2. P. 35-39. [in Russian]

9. Glynina A.V. Optimizatsiya tekhnologii vyplavki stali v usloviyakh ESPTS OAO «Ural'skaya Stal'» [Optimization of the technology of steel smelting in conditions of EAF Plant of OJSC "Ural Steel"] / Shapovalov A.N. // Nauka i proizvodstvo Urala [Science and production of the Urals]. 2010. № 6. P. 43-48. [in Russian]

10. Solodilov D.Yu. Otsenka formirovaniya sebestoimosti produktsii i analiz rezervov yeye snizheniya (na primere elektrostaleplavil'nogo tsekha OAO «Ural'skaya Stal'») [Evaluation of the formation of production costs and analysis of reserves for its reduction (by the example of the electric steelmaking plant of OJSC "Ural Steel")] / Zhantlisova EA // Nauka i proizvodstvo Urala [Science and production of the Urals]. 2013. № 9. P. 193-196. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.145

Пукса А.О.
ORCID: 0000-0003-2964-8081, аспирант,
ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»

УМЕНЬШЕНИЕ ПИК-ФАКТОРА OFDM СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА ОГРАНИЧЕНИИ СИГНАЛОВ

Аннотация

Рассмотрен вопрос уменьшения пик-фактора OFDM сигнала с помощью методов, основанных на ограничении сигналов. Разработана программа в MatLab для моделирования передачи OFDM сигнала через канал с аддитивным белым Гауссовским шумом. При приёме сигнала производится расчёт его параметров, строится спектр. Для принятого сигнала разработаны алгоритмы мягкого ограничения, с помощью весовых функций и жёсткого ограничения. Выполнено имитационное моделирование для 12 оконных функций. Рассчитана величина энергетического выигрыша.

Ключевые слова: OFDM модуляция, пик-фактор, оконная функция, мягкое ограничение, жёсткое ограничение сигнала.

Puksa A.O.
ORCID: 0000-0003-2964-8081, Postgraduate student,
FSBEI of HE Omsk State Technical University

REDUCTION OF PEAK-FACTOR OF OFDM SIGNAL BY METHODS BASED ON SIGNAL LIMITATION

Abstract

The problem of reduction of the peak-factor of OFDM signal with the use of methods based on signal constriction is considered in the paper. The appliation for simulating the transmission of OFDM signal via the channel with additive white Gaussian noise is developed in MatLab environment. When the signal is received, its parameters are calculated, and the spectrum is constructed. Soft constriction algorithms are developed for the received signal, which use the weight functions and strict constraints. Simulation modeling is performed for 12 window functions. The value of the energy gain is calculated.

Keywords: OFDM simulation, peak-factor, window function, soft limit, hard limit of signal.

В настоящее время OFDM является одним из популярных способов формирования сигнала, который используется для проектирования систем высокоскоростной передачи данных. Технология была изобретена достаточно давно, в 1966 году Робертом Чэнгом и запатентована в 1970 году [9]. Не смотря на это, OFDM используется в большом количестве действующих стандартов связи, таких как DVB-C2 (стандарт цифрового кабельного вещания), IEEE 802.11 (набор стандартов беспроводной связи), DVB-T и DVB-T2 (стандарты цифрового эфирного телевидения), DVB-H и DVB-H2 (стандарты мобильного телевидения), DRM (система цифрового радиовещания), LTE (стандарт беспроводной связи 4 поколения), IEEE 802.16 и IEEE 802.20 (беспроводные системы связи) и др. [7, С. 36] [3, С. 242].

Метод OFDM используется для модемных/ADSL приложений, в которых он сосуществует с телефонной линией. Для использования ADSL, канал, телефонная линия, фильтруется, чтобы обеспечить высокое отношение сигнал/шум (SNR).

Такое распространение OFDM модуляции связано с её достоинствами:

- Высокая эффективность использования радиочастотного спектра;
- Простая аппаратная реализация;
- Высокая устойчивость к межсимвольной интерференции;
- Возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей.

Однако, помимо преимуществ данный метод формирования сигнала не лишен и некоторых недостатков. Наиболее существенный из них это нерациональное, по сравнению с последовательными формами сигналов, использование мощности передатчика. Это связано с использованием защитного интервала для защиты от межсимвольной

интерференции и высоким пик-фактором сигнала, который при увеличении количества поднесущих стремится к пик-фактору белого шума [10, С. 25].

Пик-фактор определяется как отношение пиковой мгновенной мощности сигнала к его средней мощности:

$$PAPR = \frac{P_{max}}{P_{av}}$$

Пиковая мощность определяется выражением:

$P_{max} = \max\,(\mathrm{x[i]})_{\mathrm{i=1...N}}$;

где i – значение текущего отчёта, N – длина сигнала.

Средняя мощность – это усреднённая мощность для текущего временного интервала. [8, С. 98]

Например, для OFDM сигнала, имеющего 128 несущих, каждая из которых имеет нормированную мощность 1 Вт, максимальное PAPR может быть равно log(128) или 21 дБ. Это в тот момент, когда амплитуды всех 128 несущих находятся в точке максимума, что маловероятно, но возможно. RMS (среднеквадратическое) PAPR будет равно примерно половине этого числами 10-12 дБ. [1, С. 20]

Большие значения пик-фактора отрицательно сказываются на конструкции изделия, вынуждая использовать более дорогие комплектующие. Например, чем выше отношение PAPR, тем больше требования к используемым цифро-аналоговым преобразователям (ЦАП), аналого-цифровым преобразователям (АЦП), усилителям мощности [2, С. 149] [6, С. 7].

Так как OFDM применяется в большом количестве действующих стандартов, было разработано и запатентовано много решений по борьбе с недостатками технологии, включая проблему высокого пик-фактора сигнала. Существует несколько основных групп методов, применяемых для уменьшения величины пик-фактора:

Методы, основанные на амплитудном ограничении сигнала. Амплитудное ограничение осуществляется, например, с помощью оконных функций.

Методы с использованием кодов или методы с выборочным преобразованием. Метод основан на перемножении сигнала данных набором кодов, производится обратное преобразование Фурье каждого результата, а затем выбирается 1 с наименьшим пик-фактором. Чем больше раз будет повторена эта операция, тем больше будет вероятность получить наилучший результат. [1, С. 21]

Частичное ОБПФ. Метод основан на разделении сигнала на кластеры (блоки). Для каждого кластера производится операция обратного преобразования Фурье, а затем кластеры объединяются.

Таким образом, если мы разделим 128 несущих на четыре группы по 32 несущие в каждой, максимальное PAPR будет 12 дБ для каждой группы вместо 21 дБ для всех несущих сразу. [2, С. 150]. Метод наложения оконных функций относится к группе методов, основанных на амплитудном ограничении сигнала. Для исследования это метода разработана модель для передачи OFDM сигналов через канал с аддитивным белым Гауссовским шумом [4, С. 51] [5, С. 83]. Исходные параметры сигнала взяты из стандарта DRM.

Алгоритм метода заключается в вычислении участков сигнала, которые увеличивает значение параметра мгновенной мощности сигнала, т.е. участков пиковых значений сигнала. Для сглаживания, на этот участок накладывается оконная функция. Итоговый сигнал является результатом произведения оконной функции на исходный сигнал. Применение оконных функций вносит некоторые искажения, увеличивая уровень внеполосного излучения, этот уровень зависит от типа окна, его формы и параметров.

Параметры исходного сигнала без обработки: пик-фактор 12,4 дБ, уровень внеполосного излучения на расстоянии 0,5 от ширины OFDM сигнала составляет -52 дБ.

Самым простым методом, основанным на амплитудном ограничении сигнала, является метод жёсткого ограничения, используя который, пики амплитуды сигнала обрезаются по некоторому желаемому уровню [2, стр. 152]. Главным недостатком метода является сильное увеличение внеполосного излучения. Применение жёсткого ограничения сигнала аналогично наложению прямоугольного окна, т.е. всё что выше прямоугольной функции отсекается. Использование метода приводит к снижению значения пик-фактора до 6,6 дБ, и увеличению внеполосного излучения на 25,6 дБ. Для уменьшения пик-фактора сигнала и минимальному увеличению внеполосных излучений необходимо использовать оконные функции и чем меньше будет длина окна, тем меньше будет внесёно внеполосных искажений.

Рассмотрим метод мягкого ограничения сигнала на примере оконной функции Блэкмана. Оно является окном высокого разрешения и описывается выражением:

$$w(n) = a_0 - a_1 cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \quad (2)$$

На рисунке 1 изображено представление окна Блэкмана длинной 3 и 51 во временной области и его амплитудный спектр.

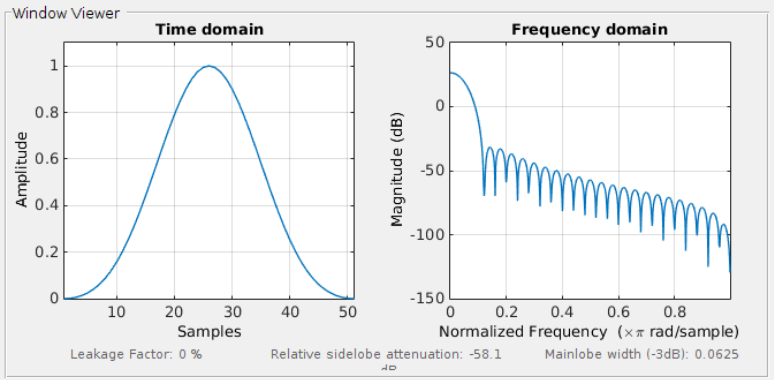


Рис. 1 – Окно Блэкмана при длине окна равной 51

Результатом проведённого моделирования являются графики помехоустойчивости системы и выходных сигналов, полученные для окон различной длины и изображённые на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

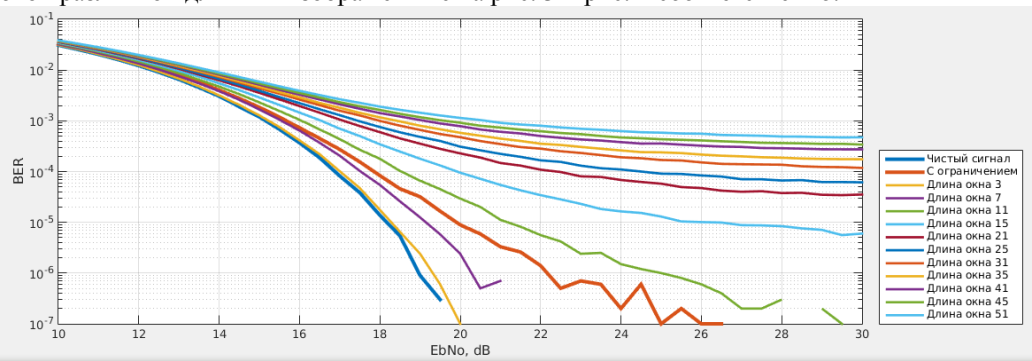


Рис. 3 – Помехоустойчивость системы

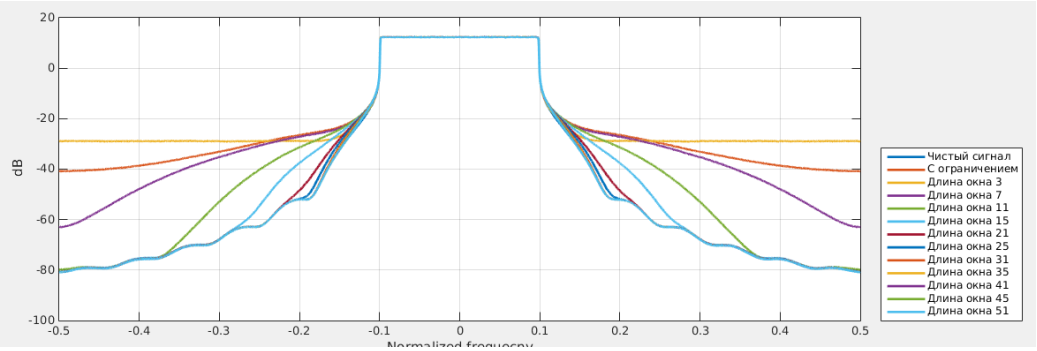


Рис. 4 – Спектры выходных сигналов

Были получены 2 зависимости: зависимость уровня снижения пик-фактора сигнала для различный длин окна в дБ и зависимость ухудшения ОСШ по вероятности ошибки 10^{-3}. Общий энергетический выигрыш определяется как разница между этими 2 зависимостями.

Результаты моделирования для исследуемых окон представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики окон оптимальной длины

	Длина окна	Выигрыш, дБ	Уровень внеполосного излучения
Жёсткое ограничение сигнала	-	5,81	-26,44
Окно Бартлетта	11	2,96	-35,22
Окно Бомена	11	2,99	-30,98
Окно Блэкмана	11	2,98	-31,3
Окно Блэкмана-Харриса	15	2,9	-30,08
Окно Гаусса	11	2,93	-33,81
Окно Парзена	11	3	-32,57
Окно Тьюки	11	2,79	-34,58
Окно Кайзера	11	2,96	-32,11
Окно Чебышева	11	2,95	-32,2
Окно Хана	11	2,8	-34,44
Окно Хэмминга	11	2,81	-35,8
Треугольное окно	7	3	-32,41

Максимальный выигрыш достигается при применении жесткого ограничения и составляет 5,8 дБ. Но при этом увеличивается уровень внеполосного излучения на 25,6 дБ. Полученный выигрыш, при использовании оконных функций, составляет от 2,7 дБ до 3 дБ, а уровень внеполосного излучения увеличивается на значения от 16,8 дБ до 21,9 дБ.

Список литературы / References

1. Charan Langton, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Tutorial, 2009. – 22 с.
2. Prasad R., OFDM for wireless communication systems – Artech House, 2004. – 289 с.
3. Schulze H., Luders C., Theory and Applications of OFDM and CDMA - John Wiley & Sons, 2005. – 408 с.
4. Chiueh T., Tsai P., OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications - John Wiley & Sons(Asia), 2007. – 258 с.
5. Hanzo L., Munster M., OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting - John Wiley & Sons, 2003. – 978 с.
6. Hanzo L., OFDM and MC-CDMA a primer - John Wiley & Sons, 2006. – 411 с.
7. Bahai R., Saltzberg R., Multi-Carrier Digital Communications 2nd - Theory and Applications of OFDM - Kluwer Academic Publishers., 2002. – 216 с.
8. Yang, Multicarrier Communications - John Wiley & Sons Ltd., 2009. - 581 с.
9. LaSorte T., Barnes W., The History of Orthogonal Frequency Division Multiplexing - IEEE "GLOBECOM"., 2008
10. Li Y., Stuber G., Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications – Springer., 2006. – 306 с.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.138

Седов С.С.[1], Щербакова Т.Ф.[2], Галимзянов Э.Р.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-9417-3919, доцент, кандидат технических наук, доцент,
[2]ORCID: 0000-0002-1733-968X, доцент, кандидат технических наук, доцент,
[3]ORCID: 0000-0002-6500-4366, старший преподаватель,
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева –КНИТУ-КАИ

АНАЛИЗ ПОЗДНИХ ПОТЕНЦИАЛОВ ЖЕЛУДОЧКОВ СЕРДЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРТАТИВНЫХ КАРДИОАНАЛИЗАТОРОВ

Аннотация

Статья посвящена вопросу расширения функциональных возможностей портативного кардиоанализатора при анализе поздних потенциалов желудочков сердца на основе метода Симсона. Портативный кардиоанализатор регистрирует электрокардиосигнал, снятый только с I стандартного отведения, тогда как по методу Симсона требуется зарегистрировать сигнал с трех ортогональных отведений X, Y, Z. Поэтому, форма исследуемого нами сигнала отличается от сигнала, полученного стандартным методом Симсона. В работе мы ставим и решаем задачу определения новых пороговых значений для параметров метода Симсона в применении к электрокардиосигналу, зарегистрированному в I стандартном отведении.

Ключевые слова: портативный кардиоанализатор, электрокардиосигнал, метод Симсона, поздние потенциалы желудочков, электрокардиографические отведения.

Sedov S.S.[1], Shcherbakova T.F.[2], Galimzyanov E.R.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-9417-3919, Associate professor, PhD in Engineering,
[2]ORCID: 0000-0002-1733-968X, Associate professor, PhD in Engineering,
[3]ORCID: 0000-0002-6500-4366, Senior Lecturer,
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU-KAI)

ANALYSIS OF LATE POTENTIALS OF HEART VENTRICLES WITH USE OF PORTABLE CARDIO ANALYZERS

Abstract

The article is devoted to the issue of extending the functionality of a portable cardiac analyzer in the analysis of late heart ventricles potentials on the basis of the Simson method. The portable cardiac analyzer registers an electrocardiac signal taken only from the 1st standard lead, whereas by the Simson method it is required to register a signal from three orthogonal leads X, Y, Z. Therefore, the shape of the signal we are testing is different from the signal obtained by the standard Simson method. In this paper, we set and solve the problem of determining new threshold values for the parameters of the Simson method in application to the electrocardiac signal recorded in the 1st standard lead.

Keywords: portable cardio analyzer, electrocardiogram, Simson method, late ventricular potentials, electrocardiographic leads.

Введение

В настоящее время современная электрокардиография активно развивается в области регистрации и анализа низкоамплитудных потенциалов (НАП) сердца. Это направление носит название электрокардиографии высокого разрешения (ЭКГ ВР) [1], [2, С. 15-21]. Анализ НАП позволяет получить важные дополнительные сведения о состоянии сердца пациента. Одним из видов НАП являются поздние потенциалы желудочков сердца (ППЖ). Их возникновение на электрокардиосигнале (ЭКС) в конце QRS-комплекса и начале ST-сегмента означает повышенный (до 50%) риск развития аритмий сердца у данного пациента, в том числе и опасных для жизни. Однако, проблема заключается в том, что на обычной кардиограмме ППЖ не удается обнаружить, так как их уровень ниже уровня шумов.

В рамках ЭКГ ВР стандартным методом регистрации и анализа ППЖ является метод Симсона [3, С. 235-242], [4, С. 26-29], основанный на временном синхронном накоплении множества кардиоциклов и последующем анализе усредненного сигнала. В результате временного накопления мы повышаем отношение сигнал/шум в требуемое количество раз, так как полезный сигнал складывается при этом синфазно. Согласно данному методу сначала проводится регистрация ЭКС с поверхности тела человека по трем биполярным ортогональным отведениям X, Y, Z [5, С. 79-87]. Далее сигнал усредняется во времени и фильтруется в определенной области частот. Затем вычисляется амплитуда вектора ЭДС сердца, называемая фильтрованным QRS-комплексом, для которой вычисляются три амплитудно-временных параметра [3, С. 236-237]. Если любые два из этих трех параметров превышают определенные пороговые значения, то делается вывод о наличии ППЖ на исследуемом ЭКС. Указанные параметры и их пороговые значения имеют следующие названия и значения:

- D_{QRS} – длительность фильтрованного QRS-комплекса (duration of QRS); D_{QRS}>120 мс;
- LAS – длительность низкоамплитудной конечной части (ниже 40 мкВ) фильтрованного QRS-комплекса (low amplitude signals); LAS>39 мс;
- RMS – среднеквадратическая амплитуда последних 40 мс фильтрованного QRS-комплекса (root mean square); RMS<25 мкВ.

Цель и задачи работы

Целью настоящей работы является модификация метода Симсона для анализа ППЖ в портативных кардиоанализаторах. Такие кардиоанализаторы используются в больницах, коммерческих клиниках, а также частными лицами в качестве персонального устройства для контроля состояния сердца. Очень важна при этом задача расширения функциональных возможностей портативных кардиоанализаторов. Так, например, если у человека обнаружены ППЖ, то можно своевременно принять меры к устранению риска возникновения аритмий. Таким образом, цель работы весьма актуальна.

Однако кардиоанализаторы регистрируют ЭКС, как правило, только в одном – I стандартном отведении [6, С. 412-414], [7, С. 1-2]. Поэтому форма фильтрованного QRS-комплекса, полученного с одного отведения, будет отличаться от формы фильтрованного QRS-комплекса, полученного с трех ортогональных отведений X, Y, Z. Применять стандартные пороговые значения параметров метода Симсона при использовании одного отведения нельзя. Следовательно, необходимо получить новые пороговые значения для трех амплитудно-временных параметров метода Симсона при новой форме фильтрованного QRS-комплекса. В работе [8, С. 253] мы получили предварительные пороговые значения для небольшого количества записей ЭКС (149) из базы данных www.physionet.org. Поэтому задачей данной работы является уточнение указанных пороговых значений на основе статистического анализа большего количества сигналов.

Научная новизна работы заключается в применении известного метода обнаружения низкоамплитудных потенциалов – метода Симсона для обнаружения и последующего анализа НАП на ЭКС с I стандартного отведения. Полученные при этом новые пороговые значения амплитудно-временных параметров метода Симсона являются научными знаниями, представляющими практический интерес.

Материалы и методы

Для исследования были взяты 290 записей ЭКС из базы данных PTB Diagnostic ECG Database [9]. Все сигналы были проанализированы с использованием стандартного метода Симсона на наличие или отсутствие ППЖ по трем биполярным ортогональным отведениям X, Y, Z. Результаты анализа сигналов – наличие (51 случай) и отсутствие ППЖ (239 случаев) – примем за основу для дальнейших исследований. То есть разбиение всего массива данных на 2 класса – наличие ППЖ и отсутствие ППЖ по результатам обработки стандартным методом Симсона по трем отведениям мы принимаем достоверным. Далее был проведен анализ этих же записей (290 ЭКС) на наличие или отсутствие ППЖ с использованием метода Симсона, но по I стандартному отведению. При этом в отличие от стандартного метода, вычисление фильтрованного QRS-комплекса проводилось по сигналу одного отведения. А пороговые значения амплитудно-временных параметров были взяты из работы [8, С. 253].

Результаты

В результате проведенного анализа в 16,2% случаев заключение о наличии или отсутствии ППЖ на ЭКС по I стандартному отведению не совпало с заключением, взятым за основу. Следовательно, необходимо провести уточнение пороговых значений параметров метода Симсона для анализа ЭКС по I стандартному отведению.

На примере параметра длительности фильтрованного QRS-комплекса D_{QRS} покажем принцип получения нового порогового значения. В первую очередь на одном графике были построены две гистограммы распределения параметра D_{QRS} для случаев наличия и отсутствия ППЖ.

При этом разбиение на классы ППЖ+ и ППЖ- проводилось на основе стандартного анализа по трем ортогональным отведениям X, Y, Z. А длительности фильтрованных QRS-комплексов – D_{QRS} были взяты из набранной нами статистики (290 случаев ЭКС) по I стандартному отведению. С помощью проверки статистических гипотез [10, С. 244-262] было определено, что математические ожидания двух построенных гистограмм с доверительной вероятностью p=0.95 значимо различаются. После этого с помощью построенных гистограмм был определен порог принятия решения по критерию максимального правдоподобия. В результате получили новое пороговое значение для параметра длительности фильтрованного QRS-комплекса $D_{пор}$, равное 105 мс.

Новые пороговые значения двух других амплитудно-временных параметров метода Симсона были определены аналогичным способом. Эти параметры – длительность низкоамплитудной части (менее 40 мкВ) фильтрованного QRS-комплекса – LAS и среднеквадратическая амплитуда последних 40 мс фильтрованного QRS-комплекса – RMS. Новые пороговые значения для этих параметров, полученные так же, как и вышеописанный порог $D_{пор}$, составили: $LAS_{пор}$ – 39 мс; $RMS_{пор}$ – 18 мкВ.

С учетом новых уточненных пороговых значений амплитудно-временных параметров был проведен повторный анализ реализаций ЭКС на наличие ППЖ. В результате процент ошибочных заключений снизился до 12%. Это

значение является приемлемым с практической точки зрения для автоматизированных алгоритмов анализа биоэлектрических сигналов сердца.

Заключение

В результате проведенного исследования были определены новые пороговые значения амплитудно-временных параметров метода Симсона для анализа ЭКС, зарегистрированного по I стандартному отведению с целью определения наличия поздних потенциалов желудочков сердца. Модифицированный таким образом метод Симсона может быть использован в портативных кардиоанализаторах. В дальнейшем мы планируем реализацию указанного метода в разрабатываемом портативном кардиоанализаторе. Это, безусловно, расширит его функциональные возможности.

Список литературы / References

1. Иванов Г.Г. Электрокардиография высокого разрешения / Г.Г. Иванов, С.В. Горячева, А.Л. Сыркина – М.: «Triad -X», 2003. – 304 с.

2. Куламбаев Б.Б. Электрокардиография высокого разрешения: некоторые методические подходы при анализе поздних потенциалов желудочков / Б.Б. Куламбаев, Г.Г. Иванов, Д.У. Акашева и др. // Кардиология. – 1994. – Т. 34, № 5-6. – С. 15-21.

3. Simson M.B. Use of signals in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction // Circulation. – 1981. – Vol. 64. – P. 235-242.

4. Галимзянов Э.Р. Оптимизация метода обработки электрокардиосигналов для выявления низкоамплитудных потенциалов сердца. // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2011. – Вып. 13. – С. 26-29.

5. Дехтярь Г.Я. Электрокардиографическая диагностика. М.: Медицина, 1966. – 543 с.

6. Sherbakova T.F. Cardiac arrhythmia analysis used in the system of electrocardiosignal transmission to the supervision center» / Sherbakova T.F., Sherbakov G.I., Sedov S.S. // 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – Kharkiv, 2015. – P. 412-414. doi: 10.1109/ICATT.2015.7136904

7. Korobkov A.A. A portable device for registration and transfer of patient's electrocardiogram using microwave technologies / Korobkov A.A., Ulanov A.V. // 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – Kharkiv, 2015. – P. 1-2. doi: 10.1109/ICATT.2015.7136900.

8. Седов С.С. Расширение функциональных возможностей портативных кардиоанализаторов / Седов С.С., Щербакова Т.Ф., Зарипов Б.А. // XVII Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» ПТиТТ-2016. – Самара, 2016. – С. 252-253.

9. PhysioNet [Electronic resource] / PTB Diagnostic ECG Database. – URL: https://physionet.org/physiobank/database/ptbdb/ (дата обращения: 12.05.2017)

10. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский – М.: Наука, 1969. – 511 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ivanov G.G. Jelektrokardiografija vysokogo razreshenija [High-resolution electrocardiography] / G.G. Ivanov, S.V. Gorjacheva, A.L. Syrkina – M.: «Triad -X», 2003. – 304 p. [in Russian]

2. Kulambaev B.B. Jelektrokardiografija vysokogo razreshenija: nekotorye metodicheskie podhody pri analize pozdnih potencialov zheludochkov [High-resolution electrocardiography: some methodical approaches in the analysis of late potentials of the ventricles.] / B.B. Kulambaev, G.G. Ivanov, D.U. Akasheva and others // Kardiologija [Cardiology]. – 1994. – Vol. 34, № 5-6. – P. 15-21. [in Russian]

3. Simson M.B. Use of signals in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction // Circulation. – 1981. – Vol. 64. – P. 235-242. [in English]

4. Galimzyanov E.R. Optimizacija metoda obrabotki jelektrokardiosignalov dlja vyjavlenija nizkoamplitudnyh potencialov serdca [Optimization of method for electrical cardiac signal processing to detect low-amplitude potentials of the heart] // Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii [Methods and devices of information transmission and processing]. – 2011. – №13. – P. 26-29. [in Russian]

5. Dehtjar' G.Ja. Jelektrokardiograficheskaja diagnostika [Electrocardiography diagnostics]. M.: Medicina, 1966. – 543 p. [in Russian]

6. Sherbakova T.F. Cardiac arrhythmia analysis used in the system of electrocardiosignal transmission to the supervision center» / Sherbakova T.F., Sherbakov G.I., Sedov S.S. // 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – Kharkiv, 2015. – P. 412-414. doi: 10.1109/ICATT.2015.7136904 [in English]

7. Korobkov A.A. A portable device for registration and transfer of patient's electrocardiogram using microwave technologies / Korobkov A.A., Ulanov A.V. // 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – Kharkiv, 2015. – P. 1-2. doi: 10.1109/ICATT.2015.7136900 [in English]

8. Sedov S.S. Rasshirenie funkcional'nyh vozmozhnostej portativnyh kardioanalizatorov [The expansion of the functionality of portable cardiac analyzers] / Sedov S.S., Shherbakova T.F., Zaripov B.A. // XVII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Problemy tehniki i tehnologij telekommunikacij» PTiTT-2016 [XVII International scientific and technical conference "Problems of telecommunications engineering and technologies" PTEaT-2016]. – Samara, 2016. – P. 252-253. [in Russian]

9. PhysioNet [Electronic resource] / PTB Diagnostic ECG Database. – URL: https://physionet.org/physiobank/database/ptbdb/ (accessed: 12.05.2017) [in English]

10. Smirnov N.V. Kurs teorii verojatnostej i mate-maticheskoj statistiki [Course of the theory of probability and mathematical statistics] / N.V. Smirnov, I.V. Dunin-Barkovskij – M.: Nauka, 1969. – 511 p. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.142

Сеньков А.В.[1], Сорокин Е.В.[2], Марголин М.С.[3]
[1]ORCID: 0000-0001-9707-4425, кандидат технических наук, [2]аспирант,[3]аспирант,
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-37-60059, а также Совета по грантам Президента РФ в рамках научного проекта МК-6184.2016.8

АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация

В работе предложена архитектура интеллектуальных имитационных программных средств для моделирования сложных организационно-технических систем, рассмотрены функции отдельных элементов такой системы, а также процесс её функционирования. Построенные подобным образом программные средства могут применяться как самостоятельно для моделирования сложных организационно-технических систем, так и в составе программных комплексов в условиях автоматического взаимодействия различных моделей между собой.

Ключевые слова: сеть Петри, бизнес-процесс, интерпретатор диаграмм, среда моделирования нечетких бизнес-процессов.

Senkov A.V.[1], Sorokin E.V.[2], Margolin M.S.[3]
[1]ORCID: 0000-0001-9707-4425, PhD in Engineering, [2]Postgraduate student, [3]Postgraduate student,
Branch of FSBEI of HE Moscow Power Engineering Institute (National Research University) in Smolensk

The work was carried out with the partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 16-37-60059, as well as the Grant Council of the President of the Russian Federation within the framework of the scientific project MK-6184.2016.8

ARCHITECTURE OF INTELLECTUAL IMITATION SOFTWARE FOR MODELING COMPLEX ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEMS

Abstract

The paper proposes the architecture of intellectual simulation software for modeling complex organizational and technical systems, considers the functions of individual elements of such system, as well as the process of its functioning. The software tools constructed in this way can be used both independently for modeling complex organizational and technical systems, and as part of software complexes in the conditions of automatic interaction of different models.

Keywords: Petri net, business process, diagram interpreter, modeling environment of fuzzy business processes.

Решению задач моделирования сложных систем посвящено множество работ, как отечественных [1], [2], [3], так и зарубежных авторов [4], [5]. Однако, в современных условиях, на первый план, при проектировании имитационных программных средств выходит не эффективность решения задачи моделирования конкретного типа системы, а возможность гибкой настройки системы моделирования вплоть до выбора нужных библиотек моделей, реализованных сторонними специалистами.

Решение такой задачи требует применения в ходе реализации интеллектуальных имитационных программных средств для моделирования сложных организационно-технических систем единых стандартов, паттернов или программных интерфейсов, которые, во-первых, будут достаточно универсальными и обеспечат программную реализацию различных видов интеллектуальных моделей, имеющих различающиеся способы применения. Во-вторых, обеспечат различные виды гибридизации интеллектуальных моделей.

За последний год был разработан ряд моделей, реализующих возможности по моделированию сложных систем с совершенно новых точек зрения.

Модель нечетких растущих сетей Петри [6] позволяет моделировать систему, каждый элемент которой, во-первых, обладает индивидуальным поведением, описанным некоторым процессом (например, роботизированный конвейер), а во-вторых взаимодействует с другими элементами системы. При этом, сама модель имеет заложенные механизмы адаптации как структуры, так и процессов к изменяющимся внешним условиям функционирования, системным факторам и факторам, носящим непредсказуемый характер (например, отказам).

Модель нечетких бизнес-процессов [7] открывает совершенно новые возможности по моделированию нечетких бизнес-процессов, характеризующихся комплексным воздействием рискообразующих факторов, неопределенностью системных и внешних параметров. Переход к моделированию нечетких бизнес-процессов позволяет оценивать, как состояние отдельных элементов системы, так и системы в целом с учетом обозначенных выше факторов.

Перечисленные модели являются взаимодополняющими и не могут в полной мере заменять одна другую. На примере представленных моделей, могут быть сформированы требования к архитектуре интеллектуальных имитационных программных средств для моделирования сложных организационно-технических систем (ИИПС). Архитектура ИИПС должна удовлетворять следующим требованиям:

обеспечивать возможность применения произвольных моделей в качестве имитационных моделей (при условии реализации моделей на базе строго определенного интерфейса взаимодействия моделей с средством моделирования);

обладать возможностью настройки имитационной модели с использованием некоторых стандартизированных данных;

иметь открытый для внешних систем интерфейс взаимодействия (как по данным, так и по структуре моделей);

не должна выполнять функции интерпретации результатов моделирования, эта функция должна лежать на той системе, которая обеспечивает решение прикладных задач, например, на системе управления эффективностью или системе управления рисками.

ИИПС, таким образом, должна включать интерфейс взаимодействия, интерпретатор, графический редактор, непосредственно средства моделирования.

Графическое представление архитектуры системы приведено на рис. 1.

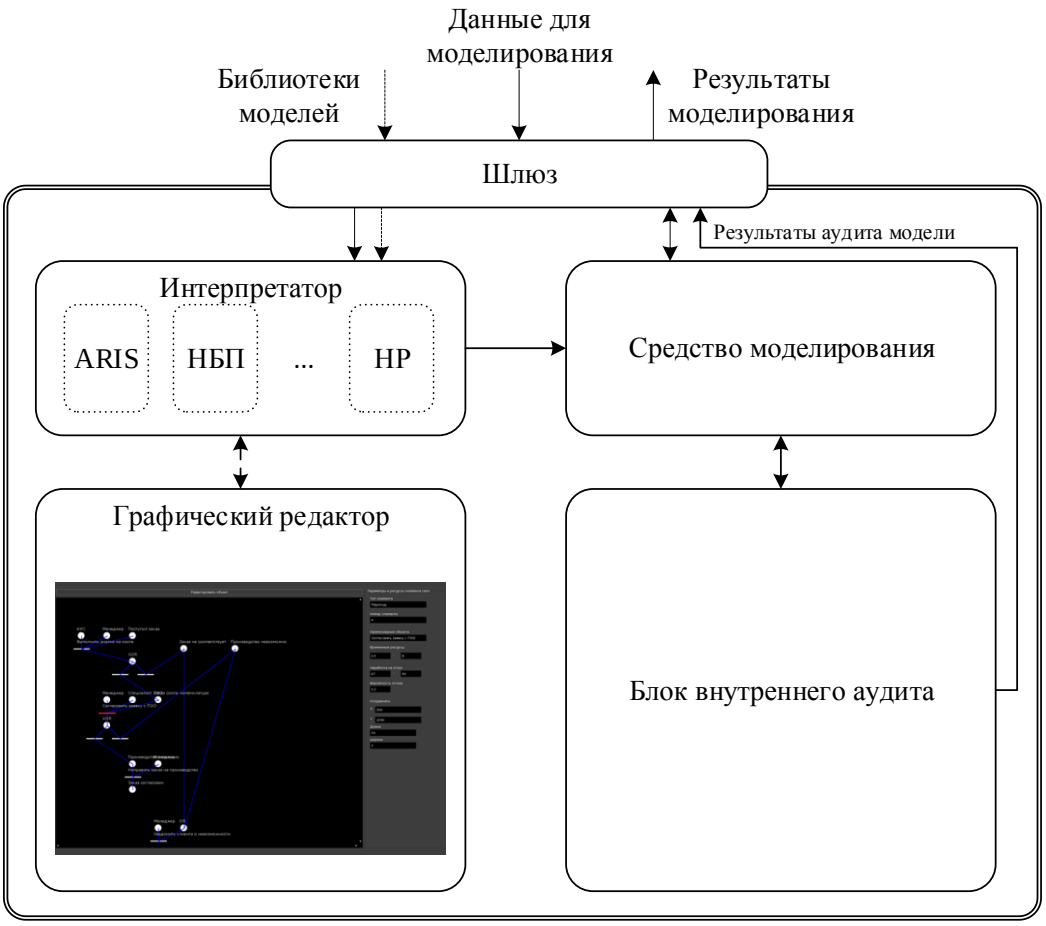


Рис. 1 – Графическое представление архитектуры системы

Рассмотрим функции, способы взаимодействия и особенности отдельных элементов архитектуры ИИПС.

Шлюз является средством взаимодействия ИИПС с внешними системами и предназначен для передачи:

- библиотеки, содержащей интеллектуальную имитационную модель;
- формализованных исходных данных для настройки модели;
- исходных данных для проведения моделирования.

Программный интерфейс библиотеки, содержащей интеллектуальную имитационную модель, как уже было отмечено выше, должен обеспечивать единые интерфейсы взаимодействия ИИПС с моделью.

Исходные же данные, как для настройки модели, так и для выполнения моделирования на её основе должны быть также стандартизированы, однако, такая стандартизация может ограничиваться стандартными средствами для решения конкретных прикладных задач, например, формализованным описанием графической нотации рисков [8, 9] или формализованным описанием нечетких бизнес-процессов [10].

Данные из шлюза попадают в интерпретатор, основной задачей которого является увязывание библиотеки модели, данных, полученных для её настройки или обучения и графического представления модели. Интерпретатор выдает структуру модели в графический редактор.

Графический редактор предназначен для визуального представления пользователю модели, а также, при необходимости, динамического отображения процесса функционирования модели (если это предусмотрено библиотекой модели). Кроме того, графический редактор позволяет изменить структуру модели путем добавления в неё (или удаления) отдельных элементов и/или связей между ними.

Полученная модель передается в средство моделирования, обладающее возможностями по запуску моделирования с использованием полученных данных и знаний.

Перед проведением моделирования, блок внутреннего аудита должен провести тестирование модели. Цель такого тестирования – убедиться в «функциональности» модели, а также оценить оперативность её функционирования.

Рассмотрим процесс функционирования такой системы.

Этап 1. Подготовка к моделированию

Шаг 1. На шлюз подается программная библиотека модели, которая передается во все блоки системы в требуемой им части.

Шаг 2. На шлюз подаются данные для настройки имитационной модели. Как уже было отмечено выше, эти данные должны быть переданы в едином стандартизированном формате, будь то нотация рисков или нотация нечетких бизнес-процессов. На основании данных, строится имитационная модель.

Пользователь может в ручном режиме отредактировать модель с использованием графического редактора.

Шаг 3. Внутреннее тестирование модели. Модель должна быть протестирована перед началом моделирования. Для этого специализированный блок внутреннего аудита выполняет тестирование модели: заполнение её данными, удовлетворяющими входным требованиям модели (сформированными, например, по xsd схеме, а также по

дополнительным параметрам, заложенным в модель), загрузку данных в модель и её тестирование путем моделирования системы. Этот шаг призван оценить, во-первых, степень работоспособности модели, а во-вторых, её интерактивность, в результате чего, пользователю могут быть выданы предложения по организации взаимодействия средства моделирования с внешней средой, например, в интерактивном режиме с выдачей результатов моделирования по мере их получения, либо же в отложенном режиме, когда результаты выдаются по окончании моделирования.

Шаг 4. Проверка корректности настройки модели пользователем. Пользователь может провести незначительное моделирование, для этого он вводит или загружает исходные данные для моделирования в рамках графического редактора, после чего данные передаются в средство моделирования. Если модель реализована таким образом, что обеспечивает графическое представление процесса моделирования, такое представление предъявляется пользователю. По окончании моделирования пользователю выдаются результаты моделирования.

Шаг 5. Адаптация модели. По результатам графического моделирования, пользователь может сделать вывод о необходимости дополнительной настройки модели. Такую настройку он может выполнить либо изменив файл исходных данных для настройки модели (вне рамок ИИПС), либо в рамках графического редактора настроить параметры модели или изменить её структуру.

Шаги 4 и 5 могут повторяться до получения пользователем удовлетворительных результатов предварительного моделирования.

Этап 2. Проведение моделирования.

Шаг 1. На шлюз подаются данные для проведения моделирования. Как и данные настройки, исходные данные должны быть переданы в рамках одного из предопределенных ранее форматов.

Шаг 2. Непосредственно моделирование. Данные поступают в блок моделирования, где выполняется моделирование. При этом само по себе моделирование может быть интерактивным, то есть выдавать результаты моделирования на шлюз по мере их получения, либо не интерактивным, то есть данные будут выданы по достижению моделью точки останова.

В ходе непосредственного моделирования, система должна оставаться к внешним сигналам прерывания моделирования.

Шаг 3. Выдача данных моделирования на шлюз.

Выдаваемые во внешнюю среду данные могут быть представлены в каком-либо особенном формате, удобном для разработчика библиотеки, однако, целесообразной является выдача результатов в том же стандартизированном формате, что и получение.

Таким образом, в работе рассмотрена архитектура интеллектуальных имитационных программных средств для моделирования сложных организационно-технических систем, рассмотрены функции отдельных элементов такой системы, а также процесс её функционирования. Архитектура обеспечивает независимость средств моделирования от применяемых моделей. Построенные подобным образом программные средства могут применяться как самостоятельно для моделирования сложных организационно-технических систем, так и в составе программных комплексов в условиях автоматического взаимодействия различных моделей между собой.

Список литературы / References

1. Советов, Б. Я. Моделирование систем. Практикум : учебное пособие для бакалавро/Б.Я. Советов, С. А. Яковлев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2014. – 295 с.
2. Кобелев Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных систем. – М.: Дело, 2003. – 336 с.
3. Горелова Г.В. Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных системИзвестия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 239-250.
4. Vemuri, V. Modeling of Complex Systems: An Introduction. Academic Press, 1978.
5. Sayama H. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. Geneseo: State University of New York at Geneseo, 2015. — 498 p.
6. Senkov A.V. Application of growing nested Petri nets for modeling robotic systems operating under risk / Senkov A.V., Sorokin E.V. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 082046 doi :10.1088/1755-1315/87/8/082046
7. Senkov A. Risk assessment in fuzzy business processes based on High Level Fuzzy Petri net / Senkov A., Borisov V. // International Journal of Applied Engineering Research Volume 11, Number 16 (2016) pp 9052-9057
8. Сеньков А.В. Формат базы знаний системы поддержки принятия решений для интеллектуального управления комплексными рисками в сложных организационно-технических системах // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2017. – Т.2 №3(5) с. 23-34
9. Сеньков А.В., Графическая нотация для представления процесса управления комплексными рисками // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 12-1 . – С. 72-81
10. Сорокин Е.В. Формальный язык описания нечетких бизнес-процессов / Сорокин Е.В., Сеньков А.В., Марголин М.С. // Научный альманах. – 2016. – № 10-3(24). С. 278-284

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sovetov B. Ya. Modelirovanie sistem. Praktikum:uchebnoe posobie dlja bakalavrov [Modeling of systems. Practical work: a tutorial for bachelors]/. B. Ja. Sovetov, S. A. Jakovlev. – 4-th edition , revised and enlarged . – M. : Izdatel'stvo Jurajt, 2014. – 295 p. [in Russian]
2. Kobelev N.B. Osnovy imitacionnogo modelirovanija slozhnyh system [Fundamentals of simulation of complex systems]. – M.: Delo, 2003. – 336 p. [in Russian]
3. Gorelova G.V. Kognitivnyj podhod k imitacionnomu modelirovaniju slozhnyh sistem [Cognitive approach to simulation of complex systems] // Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki [Bulletin of Southern Federal University]. 2013. № 3 (140). p. 239-250. [in Russian]
4. Vemuri, V. Modeling of Complex Systems: An Introduction. Academic Press, 1978.

5. Sayama H. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. Geneseo: State University of New York at Geneseo, 2015. - 498 p.

6. A.V.Senkov Application of growing nested Petri nets for modeling robotic systems operating under risk / A.V.Senkov, E.V.Sorokin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 082046 doi :10.1088/1755-1315/87/8/082046

7. Senkov A. Risk assessment in fuzzy business processes based on High Level Fuzzy Petri net / Senkov A., Borisov V. // International Journal of Applied Engineering Research Volume 11, Number 16 (2016) p 9052-9057

8. Senkov A.V. Format bazy znanij sistemy podderzhki prinjatija reshenij dlja intellektual'nogo upravlenija kompleksnymi riskami v slozhnyh organizacionno-tehnicheskih sistemah [Format of the knowledge base of the decision support system for the intellectual management of complex risks in complex organizational and technical systems]// Mezhdunarodnyj zhurnal informacionnyh tehnologij i jenergojeffektivnosti [International Journal of Information Technologies and Energy Efficiency]. – 2017. – V.2 №3(5) p. 23-34. [in Russian]

9. Senkov A.V., Graficheskaja notacija dlja predstavlenija processa upravlenija kompleksnymi riskami [Graphical notation for the presentation of the process of managing complex risks] // Sovremennye naukoemkie tehnologii [Modern high technology]. – 2016. – № 12-1 . – p. 72-81. [in Russian]

10. Sorokin E.V. Formal'nyj jazyk opisanija nechetkih biznes-processov [Formal language for describing fuzzy business processes] / Sorokin E.V., Senkov A.V., Margolin M.S. // Nauchnyj al'manah [Scientific almanac]. – 2016. – № 10-3(24). p. 278-284. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.122

Середа С.Н.

ORCID: 0000-0002-9982-5875, кандидат технических наук, Доцент,

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

К ВОПРОСУ АППРОКСИМАЦИИ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Аннотация

В статье представлены результаты математического моделирования эмпирических зависимостей на примере аппроксимации частотной характеристики акустической камеры. Предложена оригинальная модель функции аппроксимации амплитудно-модулированного затухающего сигнала. Приводятся количественные оценки параметров модели с использованием линеаризации нелинейных функций. Результаты исследования могут быть использованы для разработки шумозащитных экранов и решении прикладных задач математической статистики.

Ключевые слова: функция аппроксимации, линеаризация, математическая модель, частотная характеристика, шумозащита.

Sereda S.N.

ORCID: 0000-0002-9982-5875, PhD in Engineering, Associate Professor,

Murom Institute (Branch) of the Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov

TO THE QUESTION OF EMPIRICAL DEPENDENCIES APPROXIMATION

Abstract

The article presents the results of mathematical modeling of empirical dependencies on the example of the approximation of acoustic chamber frequency characteristic. An original model of the approximation function of an amplitude-modulated damped signal is proposed. Quantitative estimates of the model parameters using the linearization of nonlinear functions are given. The results of the research can be used to develop noise shielding screens and solve applied problems of mathematical statistics.

Keywords: approximation function, linearization, mathematical model, frequency response, noise protection.

Во многих областях науки и техники возникает задача обработки результатов эксперимента и идентификации зависимостей между параметрами процесса или системы, которая может сводиться к поиску некоторой аналитической функции аппроксимации табличных эмпирических данных, что позволяет в дальнейшем проводить расчеты путем интерполяции и экстраполяции функции и прогнозировать динамику процесса. Хотя разработаны различные методы решения задачи аппроксимации, как-то кусочно-линейная аппроксимация, аппроксимация тригонометрическими функциями, полиномами Чебышева и др., в некоторых случаях не удается с помощью таких подходов получить приемлемо хорошее приближение, либо аналитическая функция не позволяет получить общую математическую модель исследуемого процесса как, например, при использовании сплайнов. При этом выдвижение гипотезы о виде функции аппроксимации должно учитывать дополнительную информацию о характере процесса, что скорее является искусством. Кроме того, определение значений параметров функции аппроксимации, обеспечивающих наилучшее приближение в смысле минимизации критерия среднеквадратического отклонения, может проводиться как аналитически, так и алгоритмически [1, С. 292], [2, С. 145], [8], [10].

Рассмотрим задачу поиска функции аппроксимации частотной характеристики акустической камеры, используемой в качестве лабораторного макета для оценки эффективности звукопоглощающих экранов [5, С. 18].

Цель исследования заключалась в определении собственной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) акустического экрана на основе резонатора Гельмгольца, установленного в лабораторную акустическую камеру [6]. Измерения уровня шума в камере проводились с помощью шумомера ВШВ-003. В качестве источника звука использовался генератор звуковой частоты TR-0157/002, усилитель звуковой частоты и акустическая система из двух

колонок "ОДА". Измерения проводились в треть октавных полосах частот, в диапазоне от 25 Гц до 8000 Гц. В данном диапазоне частот преобладает энергия большинства производственных, бытовых и транспортных шумов [7, С. 19].

Методика измерений амплитудно-частотной характеристики исследуемой системы включала следующие этапы [4, С. 28]:

Сначала замерялась интенсивность отраженного от глухой стенки звука (без резонатора). Производили три замера уровня звукового давления на каждой частоте перед глухой стенкой, затем находили среднее значение $L_г$.

Далее в камеру помещался экран, направленный щелями к источнику звука, и проводились измерения звукового давления перед экраном при разных настройках геометрических параметров резонатора $L_р$. Для каждого состояния было произведено несколько замеров и определялось средний статистический уровень звукового давления, чтобы минимизировать ошибки измерений.

Эмпирическая АЧХ звукопоглощающего экрана определялась как разность результатов измерений двух предыдущих этапов

$$L_э = L_г - L_р \quad (1)$$

Частотная характеристика звукопоглощающего экрана $L_э(x)$ (рис.1) получена при следующих значениях геометрических параметров резонатора: глубина короба h=75 мм, ширина щели b=0,5 мм, расстояние между щелями l=90,75 мм, глубина щели i=15 мм.

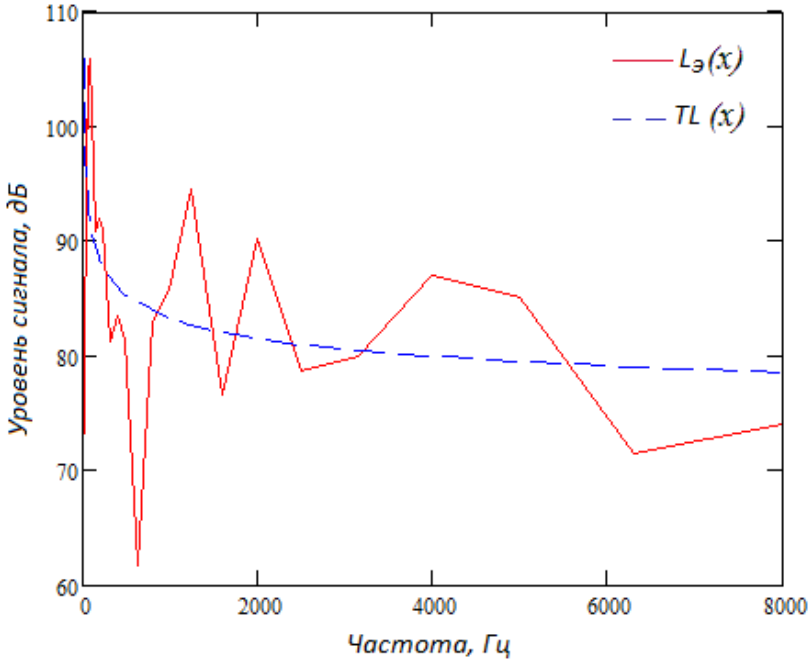


Рис. 1 – Эмпирическая частотная характеристика звукопоглощающего экрана

Для поиска аналитической функции, аппроксимирующей данные эксперимента, сделаем допущение о характере изменения анализируемой кривой. Во-первых, функция не является гладкой и содержит как максимумы, так и провалы на частотах, кратных резонансной частоте экрана. Во-вторых, как видно из рисунка, линия тренда $TL(x)$, вычисленная путем усреднения, представляет собой монотонно убывающую кривую с ростом частоты. Проведем предварительную обработку путем нормирования эмпирической характеристики на ее максимум, и в дальнейшем будем проводить аппроксимацию нормированной характеристики $L(x)$. Поскольку в эксперименте измерения проводились на наборе одно-тональных гармонических сигналов звукового диапазона частот, то можно принять гипотезу о частотном отклике звукопоглощающего экрана в форме амплитудно-модулированного затухающего сигнала соответствующей частоты [9]. Это позволяет определить математическую модель анализируемой характеристики в виде

$$S(x)=S_1(x)+S_2(x)*S_3(x) \quad (2)$$

где $S_1(x)$ – функция тренда; $S_2(x)$ – функция амплитуды; $S_3(x)$ – несущая функция; x – частотная координата.

Относительно вида функций, являющихся составными частями модели могут быть различные предположения. Предварительный анализ данных эксперимента, а также линии тренда позволяет поставить задачу оценки параметров функции аппроксимации вида

$$S(x)=\exp(a_1 \cdot x^{b1})+a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot x) \cdot \sin(\omega \cdot x+\varphi) \quad (3)$$

где a_1, a_2, b_1, b_2 – параметры функции; ω – частота резонатора; φ – фазовый сдвиг.

Для определения значений параметров искомой функции воспользуемся методом приведения зависимостей к линейному виду для её составляющих. Так можно получить формулы линеаризации для функции тренда $S_1(x)$ (4) и функции амплитуды (5) соответственно.

$$Y_1 = \ln(S_1(x)) = a_1 \cdot x^{b1};\ U_1 = A + b_1 \cdot Z_1;\ \ A = \lg(a_1);\ Z_1 = \lg(x);\ U_1 = \lg(-Y_1) \quad (4)$$

$$Y_2 = S_2(x) = a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot x);\ U_2 = \ln(a_2) + b_2 \cdot x;\ \ U_2 = \ln(Y_2) \quad (5)$$

В качестве критерия приближения принимаем минимум среднеквадратического отклонения

$$Q = \sum_{i=1}^{n} (L(x) - S(x))^2 \rightarrow min \quad (6)$$

Достижению минимума целевой функции (6) в случае линейной зависимости с двумя параметрами a_i, b_i соответствует равенство нулю первых частных производных [1, С. 345], [3, С. 153]

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = 0,\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 0 \tag{7}$$

Раскрытие выражения (7) в отношении функций $S_1(x)$ и $S_2(x)$ приводит к системам нормальных уравнений (7) и (8) соответственно

$$\begin{cases} \mathrm{n} \cdot \lg a_1 + b_1 \sum lgx = \sum \lg\left[-\ln(S_1)\right] \\ \lg a_1 \cdot \sum lgx + b_1 \sum (lgx)^2 = \sum\{lgx \cdot \lg[-\ln(S_1)]\} \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} \mathrm{n} \cdot \ln a_2 + b_2 \sum x = \sum \ln(S_2) \\ \lg a_2 \cdot \sum x + b_2 \sum x^2 = \sum[x \cdot \ln(S_2)] \end{cases} \tag{9}$$

Решение указанных систем уравнений в программе математического моделирования MathCad с помощью встроенной функции lsolve(a_i,b_i) дает значения параметров a_1= –0.015, b_1=0.505, a_2=0.288673, b_2= –0.004712. При этом, значение ошибки составляет Q_1=2.7*10^{-7} и Q_2=3.8*10^{-7}.

Оценка параметров функции $S_3(x)$ проводилась алгоритмически методом итераций, где критерием остановки итерационного процесса было совпадение глобального максимума и минимума на частоте провала функции аппроксимации $S(x)$ с данными эксперимента. В результате поиска были получены значения параметров ω=420, φ=6.41, что позволяет установить их прямую взаимосвязь с резонансной частотой акустического экрана f_p, определяемой по его геометрическим характеристикам [6]

$$\omega = 2{,}5\pi f_m / f_p\ ;\ \varphi = 1{,}75\pi f_p / f_m \tag{10}$$

где f_m – частота глобального максимума эмпирической функции $L(x)$;

f_p – резонансная частота акустического экрана, определяемая по [6]

$$= \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{b}{l \cdot h \cdot i}},$$

где b - ширина щели; h - глубина короба; i - глубина щели; l - расстояние между щелями; c=331 м/с – скорость звука в воздухе при температуре воздуха 20°С.

Результаты математического моделирования функции аппроксимации с установленными значениями параметров показаны на рис. 2. В качестве меры адекватности модели примем коэффициент корреляции, показывающий степень совпадения кривых, который составил 97,4%. Как видно из рисунка предложенная аналитическая функция достаточно точно локализует частоты, в которых наблюдаются глобальный максимум и основной провал при приемлемом приближении в остальном диапазоне частот. Полученная модель позволяет в дальнейшем рассчитать частотную характеристику шумозащитного экрана при изменении его конструктивных параметров и оценивать степень звукопоглощения.

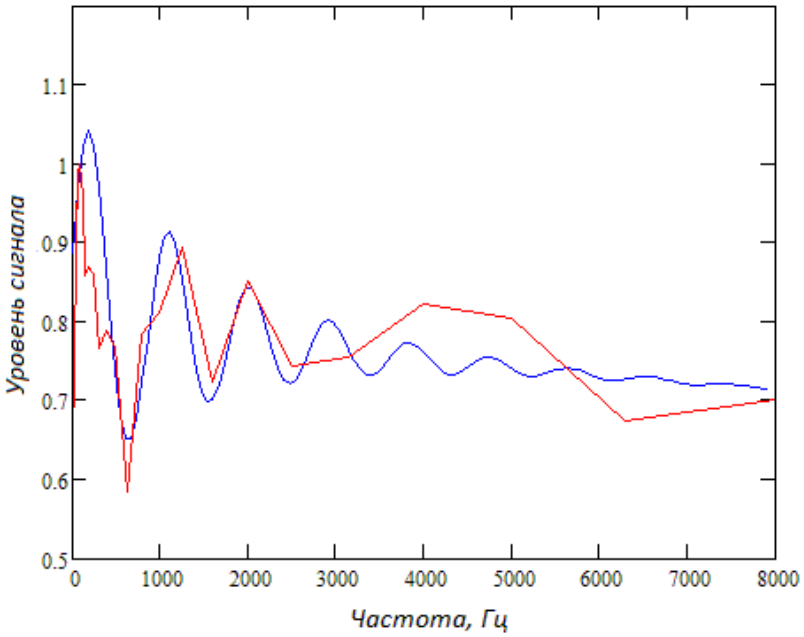


Рис. 2 – Аппроксимация нормированной частотной характеристики $L(x)$ функцией $S(x)$

Список литературы / References

1. Амосов А.А. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. пособие / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченова. – М. : Высш. шк., 1994. – 544 с.

2. Большаков А.А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов: Учеб. пособие для вузов / А.А. Большаков, Р.Н. Каримов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 522 с.

3. Гумеров А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов: Учеб. пособие / А.М. Гумеров. – 2-е изд. – СПб. : Издательство «Лань», 2014. – 176 с.

4. Гуськов П.М. Выбор уровня звукового давления в лабораторной акустической камере при исследовании характеристик шумозащитных экранов / П.М. Гуськов // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2017. – №1. – С. 28–31.

5. Калиниченко М.В. Некоторые аспекты применения резонансных поглотителей на урбанизированных территориях / М.В. Калиниченко // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 4. – С. 18–24.

6. Патент ПМ №139578 Российская Федерация, E01F8/00. Шумопоглотитель / Булкин В. В. Калиниченко М. В.; заявитель и патентообладатель Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – №2013121443; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.04.2014.

7. Bulkin V. V. Preliminary results of development and test of the lab anechoic chamber / V. V. Bulkin, M. V. Kalinichenko // Noise Theory and Practice, vol. 2. – 2016. - №2. – P. 19–26.

8. Powell M. J. D. Approximation Theory and Methods / M.J.D. Powell. – Cambridge University Press, 1981. – 339 p.

9. Sereda S.N. Mathematical Model of Acoustic Baffle based on Helmholtz Resonator / S.N. Sereda, V.V Bulkin, M.V. Kalinichenko, P.M. Guskov P.M. // IEEE Conference 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, 2017).

10. Steffens Karl-Georg. The History of Approximation Theory. From Euler to Bernstein / Karl-Georg Steffens. – Boston: Birkhauser, 2006. – 219 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Amosov A. A. Vychislitelnye metody dlya ingenerov: ucheb. posobie [Computational methods for engineers: Textbook] / A. A. Amosov, Yu. A. Dubinsky, N. V. Kopchenova. – M.: Vysshaya shkola, 1994. – 544 p. [in Russian]

2. Bolshakov A. A. Metody obrabotky mnogomernych dannych i vremennych ryadov: ucheb. posobie [Methods for processing multidimensional data and time series: Textbook] / A. A. Bolshakov, R. N. Karimov. – M.: Hot line – Telekom, 2007. – 522 p. [in Russian]

3. Gumerov A. M. Matematicheskoe modeliravanie chimiko-technologicheskich processov: ucheb. posobie. [Mathematical modeling of chemical-technological processes: Textbook] / A. M. Gumerov. – 2nd edition. – SPb.: Lan publishing, 2014. – 176 p. [in Russian]

4. Guskov P. M. Vybor urovnya zvukovogo davlenia v laboratornoy akusticheskoy kamere pri issledovanii charakteristik shumozaschitnych ekranov [Choice of the sound pressure level in a laboratory acoustic chamber in the study of the characteristics of the noise protecting screens] / P. M. Guskov // Metody i ustroistva peredachy i obrabotky informatcii [Methods and devices of the information processing and transmission]. – 2017. – №1. – P. 28–31. [in Russian]

5. Kalinichenko M. V. Nekotorye aspekty primenenia resonansnych poglotiteley na urbaniziravannych territoriach [Some aspects of the resonance absorbers employment in urban areas] / M. V. Kalinichenko // Mashinostroenie i bezopasnost zhiznedeyatelnosty [Engineering industry and life safety]. – 2013. – № 4. – P. 18–24. [in Russian]

6. Pat. PM №139578 Russian Federation, E01F8/00. Shumopoglotitel [Acoustic absorber] / Bulkin V. V., Kalinichenko M. V.; the applicant and the patentee Vladimir State University n.a. A.G. and N.G. Stoletovs. – №2013121443; appl. 05/07/13; publ. 04.20.14. [in Russian]

7. Bulkin V.V. Preliminary results of development and test of the lab anechoic chamber / V.V. Bulkin, M. V. Kalinichenko // Noise Theory and Practice, vol. 2. – 2016. – №2. – P. 19–26.

8. Powell M. J. D. Approximation Theory and Methods / M.J.D. Powell. – Cambridge University Press, 1981. – 339 p.

9. Sereda S.N. Mathematical Model of Acoustic Baffle based on Helmholtz Resonator / S.N. Sereda, V.V Bulkin, M.V. Kalinichenko, P.M. Guskov P.M. // IEEE Conference 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, 2017.

10. Steffens Karl-Georg. The History of Approximation Theory. From Euler to Bernstein / Karl-Georg Steffens. – Boston: Birkhauser, 2006. – 219 p.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.137

Сидоров К.С.[1], Ермилов Н.О.[2]
[1]ORCID: 0000-0003-0395-286X, студент, [2]Старший преподаватель кафедры математики и методики её преподавания,
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет».

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПРИ СОЗДАНИИ РАЗВИВАЮЩИХ ЯЗЫКОВЫХ ВИДЕОИГР

Аннотация

В данной статье представлено использование техник машинного обучения и анализа данных для создания адаптивных схем выбора уровней для языковых видеоигр. Описаны предпосылки к созданию подобной системы, а также проведён статистический анализ эффективности построенной схемы на основе данных, собранных с выборки студентов Астраханского государственного университета. Приведено сравнение с более простыми схемами, использованными ранее в процессе разработки, с помощью как классических частотных методов (критерий согласия Пирсона), так и с помощью байесовских методов.

Ключевые слова: машинное обучение, анализ данных, высшее образование, видеоигры, статистика.

Sidorov K.S.[1], Ermilov N.O.[2]
[1]ORCID: 0000-0003-0395-286X, student, [2] Senior professor of department of mathematics and its teaching methodology,
Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education “Astrakhan State University”

MACHINE LEARNING IN DEVELOPMENT OF VIDEO GAMES FOR LANGUAGE LEARNING

Abstract

This article presents the use of machine learning and data analysis techniques in development of adaptive level selection schemes for video games for language learning. The prerequisites for the development of such a system are described in the paper, as well as a statistical analysis of the effectiveness of the constructed scheme based on data collected from a sample of students of the Astrakhan State University. The comparison is made with the simpler schemes used earlier in the development process, using both classical frequency methods (Pearson consensus test) and Bayesian methods.

Keywords: machine learning, data analysis, higher education, video games, statistics.

Введение

Как и в любом университете, в Астраханском государственном университете учатся студенты из разных стран, и уровень знания русского языка, разумеется, у них разный. Поскольку для успешного усвоения материала требуется знание русского языка, одна из задач, стоящих перед университетом – подготовить иностранных студентов так, чтобы языковой барьер не мешал им учиться.

С этой целью в АГУ была разработана обучающая видеоигра, основанная на следующей известной идее: игроку выдаётся слово, его задача – за ограниченное время составить как можно больше слов из выданных ему букв. Подобных приложений на рынке, разумеется, представлено много, но они не заточены под обучение языку (в частности, в них отсутствуют продуманные системы уровней).

Как уже было отмечено, уровни сложности игры необходимо градуировать. В то же время простые схемы, неполно учитывающие специфику слова, работали некачественно (понятие качественной модели будет уточнено в разделе «Статистическое сравнение результатов»). Поэтому для построения более эффективной схемы градирования уровней по согласованным с разработчиком техническим заданиям были собраны данные о прохождении игры с разными словами и настройками времени, по которой средствами машинного обучения была построена схема градирования, успешно работающая на практике.

Постановка проблемы

Как уже упоминалось, разрабатываемый продукт основан на составлении как можно большего числа анаграмм заданного слова за ограниченное время. На момент написания статьи интерфейс программы выглядел так, как показано на рис. 1:

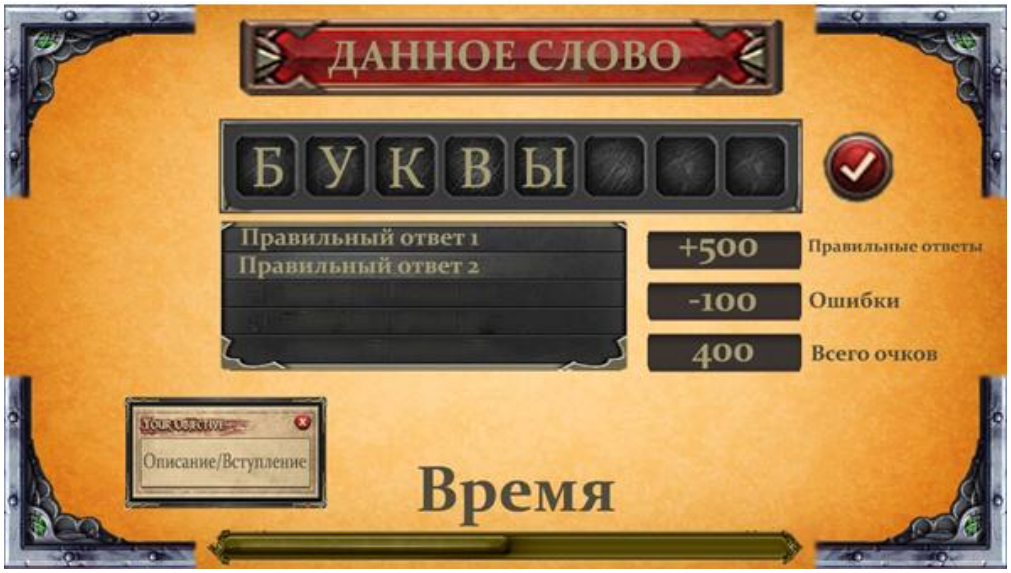


Рис. 1 – образец интерфейса приложения

Остаётся неясным, как построить уровни, если зафиксировано время прохождения игры и разыгрываемое слово. Другими словами, нас интересует проблема того, как по заданному слову выбрать пороговые количества слов l_1, l_2, l_3 так, чтобы они могли адекватно задавать степень сложности игры в том смысле, что количество дошедших до того или иного уровня было бы примерно одинаковым.

Насколько нам известно, осознанных попыток решить подобную задачу не предпринималось. В одной из статей на Хабрахабре была попытка учитывать специфику слова для построения системы наград, но она не была подкреплена анализом данных, и некоторые идеи из той статьи будут рассмотрены далее вместе с обоснованием их неэффективности. [1]

Описание выборки

Для дальнейшего анализа была собрана выборка данных о прохождении игры. Более подробно, она содержит 989 записей, каждая из которых содержит:

разыгрываемое слово;

максимальное возможное количество слов, которое можно в нём найти;

время прохождения;

количество найденных слов.

Пять первых записей выборки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Образец формата записей в выборке

Слово	**Максимальное количество**	**Время на игру, минуты**	**Результат**
математика	129	7	13
алгебра	97	7	6
геометрия	229	7	15
логика	76	5	16
графика	77	5	24

Как можно видеть уже по первым записям, выборка достаточно вариативна – например, разыгрывались слова разной длины и с разным потенциалом на поиск слов.

В то же время можно заметить, что большинство игроков не угадывают очень много возможных слов (см. рис. 2). С одной стороны, это объясняется ограниченностью времени, а с другой – наличием редких слов, неизвестных даже многим носителям языка

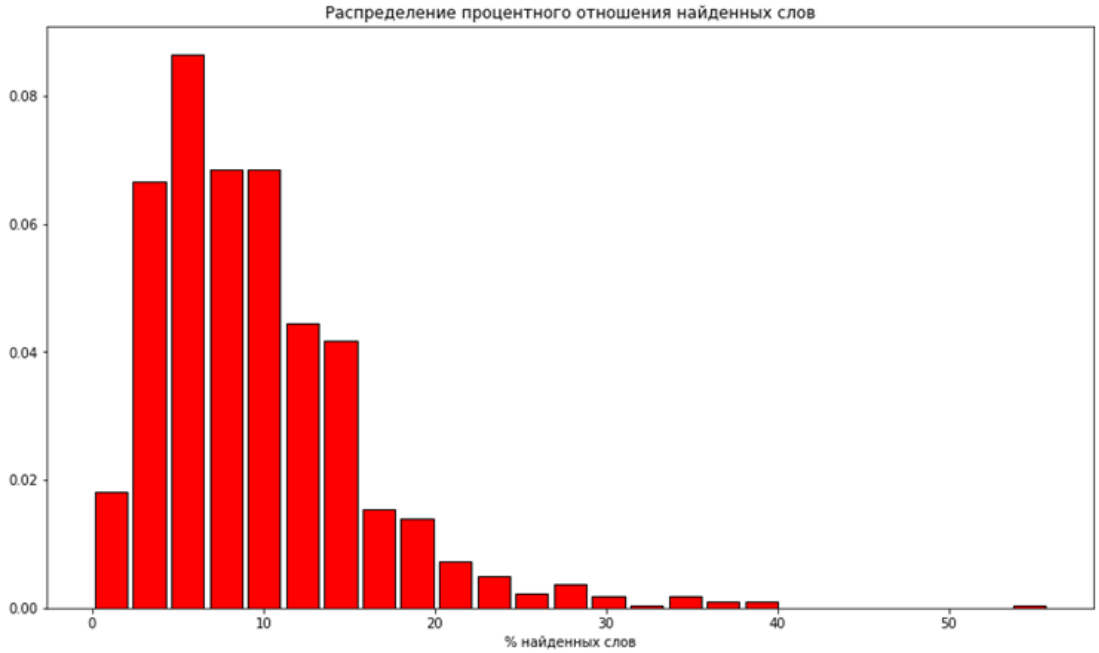


Рис. 2 – гистограмма распределения процентного отношения найденных слов

Как видим, основная масса не находит больше 15% слов, а больше 50% было найдено только в 1 игре (напомним, что в выборке их 989).

Математическая модель

Для дальнейшего анализа нам понадобится математическая модель зависимости количества найденных слов от времени. Для этого мы будем использовать модель, известную из ядерной физики как простейшую модель числа нераспавшихся частиц [2]. А именно, будем считать, что если всего в слове можно найти S_{max} слов, то в момент времени t игрок найдёт $S(t) = S_{max}\left(1 - e^{-\lambda t}\right)$ слов. На качественном уровне это можно понимать так: сначала игрок находит слова с постоянной скоростью λ, после чего приходит «насыщение», и он начинает находить слова всё медленнее и медленнее, но асимптотически при $t \to +\infty$ игрок находит все слова.

Параметр λ в данной модели отражает, как уже упоминалось, скорость «прорешивания» слова. Заметим, что для более опытных игроков этот параметр будет больше – это будет существенно для построения системы уровней на основе данной модели.

Эту модель пока что нельзя использовать напрямую, потому что есть скрытый параметр λ, поэтому дальнейшее изложение будет разворачиваться вокруг оценки этого параметра. Поскольку в нашей выборке хранятся только параметры S, S_{max}, t, то мы можем построить эмпирическую оценку на скрытый параметр следующим образом: $\lambda_{emp} = -\frac{1}{t}\ln(1 - \frac{S}{S_{max}})$.

Настройка параметров с помощью машинного обучения

Как уже отмечалось, мы ищем зависимость λ от параметров слова. Предлагается искать эту зависимость в классе параметрических зависимостей вида $\lambda = \frac{1}{\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{x}+b}$, где $\boldsymbol{x}$ – вектор параметров слова (содержащий, в частности, максимальное доступное количество слов), а $\boldsymbol{w}, b$ – пока что неизвестные параметры, задающие зависимость.

Именно такой вид зависимости обосновывается графиком, представленном на рис. 3.

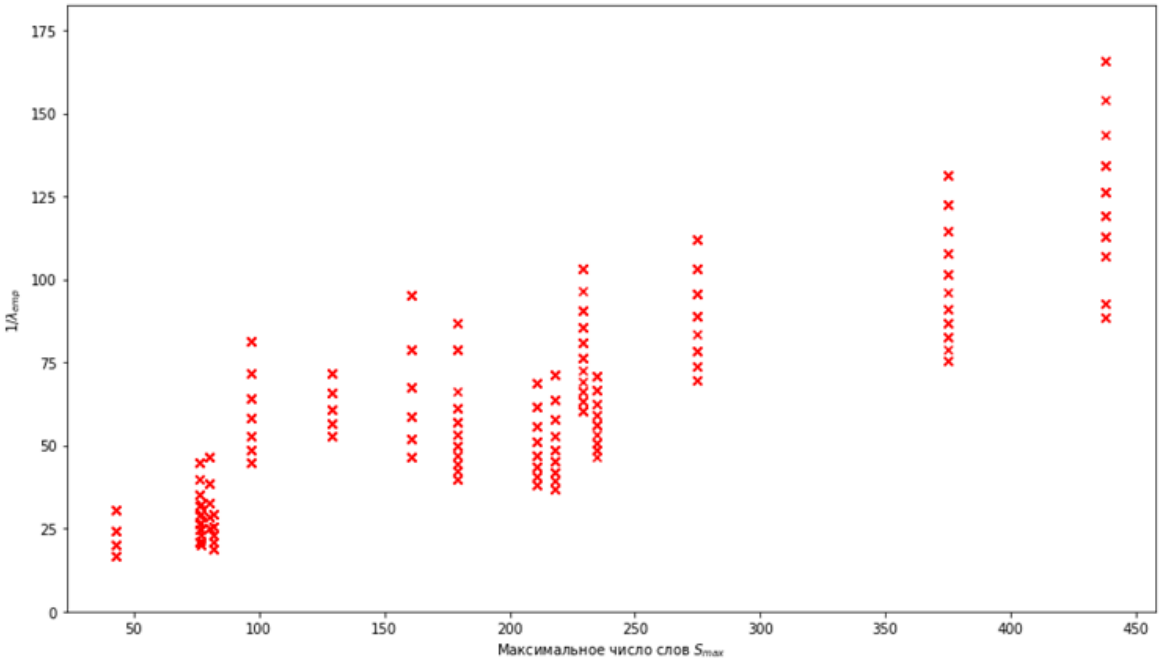


Рис. 3 – диаграмма рассеяния для зависимости $\frac{1}{\lambda} = \xi$ от максимального числа слов

Как можно видеть на приведённой диаграмме, зависимость ξ от S_{max} можно хотя бы с точностью до случайного шума считать линейной. Из этого возникает следующая задача машинного обучения: по выборке, состоящей из параметров слова и оценки $\frac{1}{\lambda_{emp}} = \xi$, построить линейную модель для предсказания ξ по остальным переменным. Для ясности, в таблице 2 приводим примерный вид выборки в том формате, в котором она используется при применении алгоритмов машинного обучения (использованы те же объекты в том же порядке, что и в таблице 1).

Таблица 2 – Образец формата записей в выборке, составленной для поиска модели для ξ (для простоты указана лишь одна свободная переменная)

Максимальное количество	ξ, эмпирическая оценка
129	0,015
97	0,009
229	0,009
76	0,047
77	0,075

В такой постановке получается стандартная задача линейной регрессии, для решения которой существует множество инструментов [3]. Перед применением алгоритма, впрочем, оказалось нужным для каждого слова удалить все объекты, не находящиеся между 25-ой и 75-ой процентилью по количеству найденных слов. Таким образом, из выборки были удалены нетипично слабые и нетипично сильные игроки – из-за очень большой разнородность уровня знаний игроков в области лексики русского языка данные получились очень зашумлёнными, без подобной процедуры очистки построить полезные выводы не представлялось возможным. В результате подобной очистки в выборке осталось лишь 563 объекта.

К оставшимся объектам была применена стандартная модель линейной регрессии с L_1-регуляризатором [4]. На кросс-валидации с 3 проходами модель показала среднее значение коэффициента детерминации 0,539. Это можно интерпретировать следующим образом: модель смогла «объяснить» 53,9% дисперсии в данных (для сравнения, константная модель по определению данного коэффициента объясняет 0% дисперсии) [5]. С учётом того, что данные остались достаточно зашумлёнными даже после удаления части данных (рис. 3 был построен именно на сокращённой

выборке), это можно расценивать как положительный результат, который можно использовать далее для других задач (например, для оценки порогов уровней).

В конечном итоге была найдена следующая зависимость: $\lambda_{emp} \approx \frac{1}{17.05+0.23S_{max}}$. В данной зависимости фигурирует только одна свободная переменная – S_{max}, чему есть строгое обоснование. Поскольку L_1-регуляризатор обладает свойством удаления признаков, не объясняющих вариативность данных [4], то во время исследования в модель добавлялись признаки, которые могут косвенным образом объяснять сложность слова – например, его длина, количество гласных, отношение количества гласных к длине слова. *Все* подобные признаки моделью отклонялись как несущественные (если точнее, модель выставляла им нулевые коэффициенты), что говорит о том, что такие признаки не имеют значения для игроков при условии, что известно максимально количество слов. В частности, это опровергает схемы из упомянутых статей на Хабрахабре и позволяет перейти к решению основной поставленной задачи.

Реализация уровней сложности

Как уже упоминалось, большие значения параметра скорости при прочих равных в нашей модели задают более высокий уровень мастерства игрока. Поэтому возможна следующая реализация уровней: пусть зафиксировано слово и время t. По параметрам слова (как было показано выше) оцениваем λ_{emp}. Сделав это, вычисляем величину $S(t)$, используя $\lambda = \lambda_{emp}$ – это будет средний уровень сложности. Лёгкий (трудный) уровень теперь получаются подстановкой меньшего (большего) значения λ в выражение для $S(t)$.

Отметим, что эмпирически величина $\ln\lambda$ распределена нормально, что отражено на Q-Q графике [6] на рис. 4, построенном с помощью оценок λ_{emp} для всех объектов выборки.

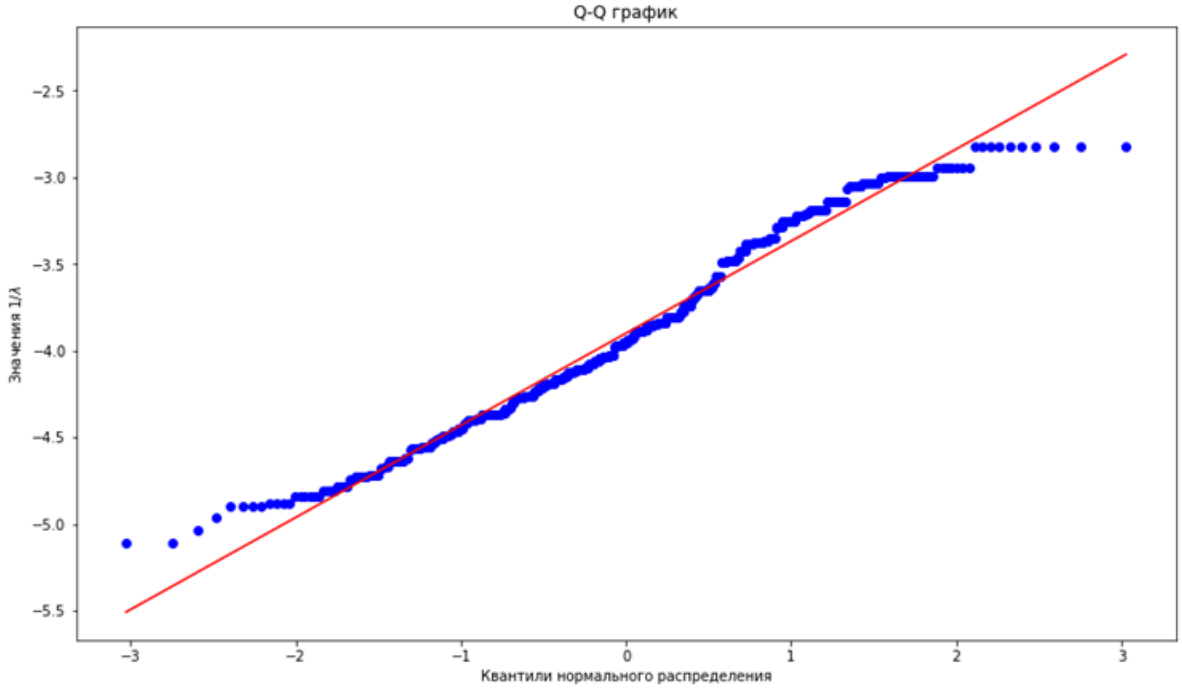


Рис. 4 – Q-Q график для квантилей нормального распределения и значений исследуемой величины

Из графика видно, что соответствующие квантили двух распределений – нормального и эмпирического – очень похожи (особенно в зоне типичных значений), что означает, что $\ln\lambda$ хотя бы приближённо можно считать нормально распределённой.

Соответственно, если считать, что $\ln\lambda \sim \mathcal{N}(\ln\lambda_{emp}, \sigma^2)$, то тогда при выборе подходящего α значения $\ln\lambda_{emp} - \alpha\sigma$, $\ln\lambda_{emp}$, $\ln\lambda_{emp} + \alpha\sigma$ окажутся (соответственно) первым, вторым и третьим квартилем распределения, то есть поделят игроков на четыре примерно равные группы в зависимости от степени опыта – как раз то, что и должна делать хорошая схема построения уровней.

Переходя от логарифмов к исходным величинам, получаем формулы для построения лёгкого, среднего и трудного уровней получаются выбором λ соответственно $K\lambda_{emp}$, λ_{emp} и $\frac{\lambda_{emp}}{K}$ для некоторого K (в наших экспериментах неплохие результаты давало $K = 0.7$).

Статистическое сравнение результатов

Ранее в приложении использовалась следующая схема уровней (далее будем называть её жёсткой – в противовес мягкой, адаптивной схеме, разработанной выше): для прохождения лёгкого уровня требовалось найти $0.04S_{max}$, среднего – $0.08S_{max}$, трудного – $0.12S_{max}$.

Поскольку нашим основным требованием к уровням сложности является равное разделение игроков по группам, то был проведён следующий тест: для каждого слова были выписаны уровни в соответствии с обеими схемами, после чего для каждого слова было рассчитано количество игроков, дошедших до того или иного уровня (всего для каждого слова получилось 4 числа).

Пример выборки, построенной для статистического анализа – в таблице 3.

Таблица 3 – Количество дошедших до того или иного уровня (по жёсткой схеме) для первых 5 слов выборки

Слово	**Не дошло до 1 уровня**	**Дошло до 1, но не до 2 уровня**	**Дошло до 2, но не до 3 уровня**	**Дошло до 3 уровня**
математика	1	4	31	27
алгебра	1	8	24	30
геометрия	2	20	27	14
логика	0	4	12	40
графика	0	3	6	47

Поскольку перед нами стоит требование равномерности, разумно применить ко всем словам критерий согласия Пирсона [7]. (Требуемый уровень значимости везде – 5%). В результате применения критерия к жёсткой схеме только для одного слова – «розетка» – нельзя отклонить нулевую гипотезу (которая в критерии согласия Пирсона формулируется как равномерность исследуемого распределения). В мягкой схеме нулевая гипотеза не отклоняется уже для шести слов – «геометрия», «розетка», «монетизация», «линолеум», «клавиатура», «праздничный». Учитывая, что выборка содержит очень большое количество шума, это уже позволяет сделать вывод о том, что мягкая схема представляет собой качественное улучшение по сравнению с жёсткой.

Также был проведён ещё один тест, в котором напрямую оценивалась энтропия полученных распределений игроков – из наших рассуждений следует, что чем выше энтропия разбиения, тем лучше работает схема построения уровней.

Для этого использовалась следующая вероятностная модель:

$$\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_k)$$
$$\boldsymbol{p} \mid \boldsymbol{\alpha} \sim \mathrm{Dir}(\boldsymbol{\alpha})$$
$$x \mid \boldsymbol{p} \sim \mathrm{Cat}(\boldsymbol{p})$$

Здесь:

$\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_k)$ – гиперпараметр, отвечающий за априорное знание о количестве объектов (мы использовали $\boldsymbol{\alpha} = (1, 1, 1, 1)$);

$\boldsymbol{p}$ – вероятностное распределение, задающую вероятность увидеть игрока, дошедшего до соответствующего уровня;

x – конкретное «наблюдение», то есть уровень, до которого дошёл игрок.

Пусть мы увидели $\boldsymbol{N} = (N_1, \dots, N_k)$ игроков, дошедших до того или иного уровня. (Это ровно те числа, которые приведены в таблице 3). Тогда, как известно, по правилу Байеса можно получить апостериорное распределение на $\boldsymbol{p}$, которое будет равно $\boldsymbol{p} \sim \mathrm{Dir}(\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{N})$ – вновь распределение Дирихле, но с другими параметрами [8].

Далее мы провели следующий эксперимент: для каждой из схем построили указанное байесовское апостериорное распределение, после чего построили случайную выборку для величины $H(\boldsymbol{p})$ – энтропии Шеннона [9] – и эмпирически оценили 95%-ный доверительный интервал для неё. (Поскольку апостериорное распределение мы получили в явном виде, то для эмпирической оценки мы могли использовать достаточно много значений $\boldsymbol{p}$ – в наших экспериментах результаты перестали меняться после того, как размер выборки превысил 10 миллионов).

В результате для шести слов - «логика», «графика», «монетизация», «линолеум», «клавиатура», «праздничный» - доверительный интервал для энтропии мягкой схемы лежал целиком правее, чем доверительный интервал для жёсткой схемы, что можно интерпретировать следующим образом: мягкая схема на этих словах устойчиво даёт статистически значимо более равномерное распределение. Обратной ситуации не возникало ни разу; более того, точечные оценки на энтропию мягкой схемы были больше для 14 слов из 16. Полные результаты запуска – в таблице 4.

Таблица 4 – Эмпирические доверительные интервалы для двух схем.

Слово	**Доверительный интервал жёсткой схемы**	**Доверительный интервал мягкой схемы**	**Статистически эффективная схема**
математика	[0.85, 1.15]	[0.94, 1.26]	-
алгебра	[0.94, 1.21]	[0.94, 1.19]	-
геометрия	[1.07, 1.29]	[1.24, 1.28]	-
логика	[0.65, 1.03]	[1.18, 1.37]	Мягкая схема
графика	[0.43, 0.88]	[1.04, 1.31]	Мягкая схема
розетка	[1.21, 1.37]	[1.24, 1.38]	-
монетизация	[0.77, 1.09]	[1.22, 1.38]	Мягкая схема
потолок	[0.75, 1.07]	[0.75, 1.07]	-
аудитория	[1.04, 1.27]	[1.10, 1.33]	-
краска	[0.61, 0.97]	[0.93, 1.23]	-
линолеум	[0.95, 1.25]	[1.28, 1.38]	Мягкая схема
куртка	[1.12, 1.31]	[1.16, 1.35]	-
компьютер	[0.96, 1.25]	[0.97, 1.27]	-
сковорода	[1.04, 1.31]	[1.00, 1.29]	-
клавиатура	[0.74, 1.08]	[1.25, 1.38]	Мягкая схема
праздничный	[0.82, 1.18]	[1.20, 1.37]	Мягкая схема

Отметим, что ещё одним достоинством представленной схемы (как видно по таблице 4) является её устойчивость – даже когда мягкая схема в чём-то проигрывала жёсткой, её всё равно удавалось производить достаточно сбалансированные разбиения.

Заключение

В данной статье была рассмотрена, построена и проанализирована система уровней, способная адаптироваться под параметры конкретного слова и (после модификации алгоритма с учётом возникающей специфики задачи online learning [10]) к специфике игроков.

Всё исследование было подкреплено конкретными данными и статистическими оценками, построенными на них, что подтверждает работоспособность данной модели в рассматриваемой задаче.

В качестве дальнейших улучшений рассматривается расширение данной схемы на выбор не только интересных уровней сложности, но и интересных временных интервалов (построение быстрых или длинных игр в зависимости от слова). Также рассматривается построение системы наград на основе данных, что может также быть очень полезно при геймификации приложения и, как следствие, вовлечении пользователей в процесс изучения лексики.

Список литературы / References

1. Создание игры «Слова из Слова» [Электронный ресурс] // Habrahabr. – 2016. – URL: https://habrahabr.ru/post/308256/ (дата обращения: 16.11.2017).

2. Rutherford E. A comparative study of the radioactivity of radium and thorium. / Ernest Rutherford, Frederick Soddy // Philosophical Magazine – 1903. – Vol. 5 – P. 445-457 – doi:10.1080/14786440309462943

3. Pedregosa F. Scikit-learn: Machine Learning in Python. / Fabian Pedregosa, Gaël Varoquaux, Alexandre Gramfort and others // Journal of Machine Learning Research – 2011. – Vol. 12 – P. 2825-2830.

4. Tibshirani R. Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. / Robert Tibshirani // Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological) – 1996. – Vol. 58 – P. 267-288.

5. Glantz S. Primer of Applied Regression and Analysis of Variance. / Stanton A. Glantz, Bryan K. Slinker. - McGraw-Hill, 1990 – 949 p.

6. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 1.3.3.24. Quantile-Quantile Plot [Электронный ресурс] // National Institute of Standards and Technology. – 2012. – URL: http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/qqplot.htm (дата обращения: 16.11.2017).

7. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. / Karl Pearson // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science – 1900. – Vol. 50 – P. 157-175 – doi:10.1080/14786440009463897

8. Agresti A. Bayesian inference for categorical data analysis. / Alan Agresti, David B. Hitchcock // Statistical Methods and Applications – 2005. – Vol. 14 – P. 297-330 – doi:10.1007/s10260-005-0121-y

9. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. / Claude E. Shannon // Bell System Technical Journal – 1948. – Vol. 27 – P. 379-423 – doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

10. Bottou L. Online Learning and Stochastic Approximations. / Léon Bottou – 1998.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sozdanie igry «Slova iz Slova» [Creation of the game “Words from Words”] [Electronic resource] // Habrahabr. – 2016. – URL: https://habrahabr.ru/post/308256/ (accessed: 16.11.2017). [in Russian]

2. Rutherford E. A comparative study of the radioactivity of radium and thorium. / Ernest Rutherford, Frederick Soddy // Philosophical Magazine – 1903. – Vol. 5 – P. 445-457 – doi:10.1080/14786440309462943

3. Pedregosa F. Scikit-learn: Machine Learning in Python. / Fabian Pedregosa, Gaël Varoquaux, Alexandre Gramfort and others // Journal of Machine Learning Research – 2011. – Vol. 12 – P. 2825-2830.

4. Tibshirani R. Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. / Robert Tibshirani // Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological) – 1996. – Vol. 58 – P. 267-288.

5. Glantz S. Primer of Applied Regression and Analysis of Variance. / Stanton A. Glantz, Bryan K. Slinker. - McGraw-Hill, 1990 – 949 p.

6. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 1.3.3.24. Quantile-Quantile Plot [Electronic resource] // National Institute of Standards and Technology. – 2012. – URL: http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/qqplot.htm (accessed: 16.11.2017).

7. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. / Karl Pearson // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science – 1900. – Vol. 50 – P. 157-175 – doi:10.1080/14786440009463897

8. Agresti A. Bayesian inference for categorical data analysis. / Alan Agresti, David B. Hitchcock // Statistical Methods and Applications – 2005. – Vol. 14 – P. 297-330 – doi:10.1007/s10260-005-0121-y

9. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. / Claude E. Shannon // Bell System Technical Journal – 1948. – Vol. 27 – P. 379-423 – doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

10. Bottou L. Online Learning and Stochastic Approximations. / Léon Bottou – 1998.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.151

Сидоров А.И.[1], Таваров С.Ш.[2], Маджидов Г.Х.[3]
[1]ORCID: 0000-0001-5024-6728, доктор технических наук, профессор
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск,
[2]ORCID: 0000-0002-2875-2752, кандидат технических наук,
[3]ORCID: 0000-0002-9470-3158, соискатель,
[2,3]Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

УРОВЕНЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ Г. ДУШАНБЕ

Аннотация

Для оценки состояния элементов городских распределительных сетей 6-10 кВ необходимо произвести расчет показателей надежности элементов схем электроснабжения, которое позволяет определить степень надежности рассматриваемых элементов. В статье рассматриваются уровни показателей надежности элементов городских распределительных сетей напряжением 6-10 кВ города Душанбе выраженной виде количественной оценки, полученные из годовых отчетов за периоды 2012-2016 гг. Приводятся данные по протяженностям воздушных, кабельных линий электропередач и количеств городских силовых трансформаторов напряжением 6-10/0,4 кВ. Рассчитываются следующие показатели надежности: интенсивность и частота отказов, среднее время восстановления, а также недоотпуск электроэнергии за счет перерыва электроснабжения связанная с отказами элементов.Для количественной оценки полученные результаты сравниваются с литературными источниками.

Ключевые слова: воздушные линий, кабельные линий, отказ, надежность.

Sidorov A.I.[1], Tavarov S.S.[2], Madzhidov G.Kh.[3]
[1]ORCID: 0000-0001-5024-6728, PhD in Engineering, Professor
South Ural State University,Chelyabinsk, Russia
[2]ORCID: 0000-0002-2875-2752, PhD in Engineering, [3]ORCID: 0000-0002-9470-3158, External Doctorate Student,
Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

LEVEL OF RELIABILITY INDICATORS OF ELEMENTS OF DISTRIBUTION NETWORK IN DUSHANBE

Abstract

To assess the state of the elements of 6-10 kV city distribution networks, it is necessary to calculate the reliability indicators of the elements of power supply schemes, which enables the determination of the degree of reliability of the elements in question.The article deals with the levels of indicators of reliability of elements of city distribution networks with voltage of 6-10 kV in Dushanbe expressed in a quantitative form and are obtained from annual reports for the periods of 2012-2016. The data on the lengths of air, cable power lines and the number of urban power transformers of 6-10/0.4 kV voltage are given. The following reliability indicators are calculated: Intensity and frequency of failures, average recovery time, as well as the under-supply of electricity due to an interruption in power supply associated with failures of the elements.The results obtained are compared with published sources for quantitative evaluation.

Keywords: air lines, cable lines, failure, reliability.

На состояния уровня показателей надежности элементов систем электроснабжения могут влиять множество факторов большая часть, из которых имеет, случайны характер. Согласно [10, С. 8] качественные показатели надежности не пригодны для инженерных целей.

Таким образом, для практических расчетов в системах электроснабжения используют количественные характеристики надежности, основанные на методах теории вероятности и математической статистики [10, С. 11-15]. Преимущество и недостатки ряда этих методов приведены [10, С. 20 – 30].

В статье для оценки показателей надежности элементов распределительной сети напряжением 6-10 кВ будем использовать количественный характер надежности [2, С. 6, 3, С. 5], [7, С. 8], [8, С. 4], [9, С. 10]. Преимущество количественной оценки является в том что, она позволять характеризовать надежность [1]: наглядно, учесть все факторы, влияющие на надежность, способность отслеживать изменение надежности во времени. Согласно [10, С. 11, 15] основными показателями надежности элементов схемы электроснабжения являются: интенсивность и частота отказов, а также средняя время восстановления. По результатам, которых также можно оценить числовые значения недоотпуска электроэнергии.

Для количественно оценки показателей надежности за исходные данные были приняты годовые отчеты ОАО «Гор. Электросеть г. Душанбе» за рассматриваемые периоды, а именно 2012-2016 гг [4].

Необходимо отметить, что для количественной оценки показателей надежность по данным годовых отчетов ОАО «Гор. Электросеть г. Душанбе» за рассматриваемые периоды были приняты устойчивые отказы.

Проведенный обзор состояния электрооборудования рассматриваемого объекта [5, С. 3, 6] и причины их нарушений [6, С. 4-7] показывает что, большая часть электрооборудования городских распределительных сетей находятся за пределами допустимых нормами значения.

Для определения показателей надежности распределительных сетей были собраны и обработаны информации по повреждаемости элементов систем электроснабжения и отключения электрооборудования распределительных сетей г. Душанбе напряжением 6, 10 кВ.

В табл. 1-3 приведено протяженность кабельный (КЛ) и воздушных (ВЛ) линий а также количество трансформаторных подстанций (ТП) по учетным годам.

Таблица 1 – Протяженность ВЛ 6,10 кВ

Год	РЭС Сомони (км)	РЭС Шохмансур (км)	РЭС Фирдавси (км)	РЭС Сино (км)	Общий по«Гор.сеть г. Душанбе» (км)
2012	62,88	48,19	73,76	57,10	241,93
2013	62,98	48,19	57,10	73,76	242,03
2014	65,98	58,35	70,78	79,03	274,14
2015	65,98	58,35	73,48	79,03	274,84
2016	41,19	43,28	89,67	107,22	281,37

Таблица 2 – Протяженность КЛ 6,10 кВ

Год	РЭС Сомони (км)	РЭС Шохмансур (км)	РЭС Фирдавси (км)	РЭС Сино (км)	Общий по «Гор.сеть г. Душанбе» (км)
2012	127,52	129,20	243,70	264,21	764,63
2013	145,39	136,72	252,75	281,62	816,49
2014	159,34	143,38	258,77	319,03	880,53
2015	162,84	147,58	263,27	324,49	898,19
2016	192,27	166,11	235,16	341,53	935,09

Таблица 3 – Количество трансформаторов ТП 6, 10 кВ

Год	РЭС Сомони (шт.)	РЭС Шохмансур (шт.)	РЭС Фирдавси (шт.)	РЭС Сино (шт.)	Общий по «Гор.сеть г. Душанбе» (шт.)
2012	384	262	247	564	1457
2013	274	256	235	518	1283
2014	329	300	292	660	1581
2015	337	305	300	686	1628
2016	317	328	282	580	1507

Частота отказов элементов электрической сети, ВЛ и КЛ, а также ТП (РП), рассчитывались из соотношения, что для ЛЭП обычно данный показатель рассчитывается на 100 км в год [10, С. 11-15]:

$$a_i = n_i/N_i \cdot 100\ (год^{-1}/100\ \text{км}), \quad (1)$$

где a_i - частота отказа КЛ или ВЛ (на 100 км линии),
n_i - число отказов для линий (шт./год),
N_i - протяженность линий (км).

В табл. 4 приведено количество аварийных отключений ВЛ напряжением 6, 10 кВ.

Таблица 4 – Аварийное отключение ВЛ за 2012-2016 года

РЭС-ы	2012	2013	2014	2015	2016
Сино	100	126	186	146	145
Фирдавси	47	55	103	92	72
Сомони	56	66	50	100	68
Шохмансур	60	68	46	89	58
Итого	263	315	385	427	343

Произведем расчет интенсивности отказа ВЛ, на примере РЭС-а Сино за 2016 год. По формуле

$$\omega_i = n_i/l \quad , (2)$$

где ω_i- интенсивность отказов за год на 1 км длины ЛЭП, 1/год;
ω_i - количество отключений, шт;
l - длина линии, км.

$$\omega_i = 145/107{,}22 = 1{,}352$$

Для остальных периодов расчеты производится аналогично и результаты расчета сводятся в табл. 5.

Таблица 5 – Резултаты расчета интенсивности отказов по ВЛ 6, 10 кВ

Год	РЭС Сомони (шт.)	РЭС Шохмансур (шт.)	РЭС Фирдавси (шт.)	РЭС Сино (шт.)	Общий по «Гор.сеть г. Душанбе» (шт.)
	ω_i	ω_i	ω_i	ω_i	ω_i
2012	0,891	1,307	0,502	1,874	1,087
2013	1,080	1,369	0,911	1,708	1,289
2014	0,758	0,754	1,455	2,480	1,434
2015	1,516	1,525	1,252	1,847	1,55
2016	1,651	1,340	0,803	1,352	1,219

В табл. 6 приведено количество аварийных отключений кабельных линий (КЛ) напряжением 6, 10 кВ.

Таблица 6 – Аварийное отключение КЛ за 2012-2016 года

РЭС/ год	2012	2013	2014	2015	2016
Сомони	165	179	242	245	185
Шохмансур	105	107	194	223	199
Фирдавси	140	178	241	190	253
Сино	235	251	448	464	509
Итого	645	312	1125	1122	1162

Произведем расчет интенсивности отказа КЛ, на примере РЭС-а Сино за 2016 год.

$$\omega_i = 509/341{,}53 = 1{,}49$$

Для остальных периодов расчеты производится аналогично и результаты расчета сводятся в табл. 7.

Таблица 7 – Резултаты расчета интенсивности отказа КЛ 6, 10 кВ

Год	РЭС Сомони (шт.)	РЭС Шохмансур (шт.)	РЭС Фирдавси (шт.)	РЭС Сино (шт.)	Общий по «Гор.сеть г. Душанбе» (шт.)
	ω_i	ω_i	ω_i	ω_i	ω_i
2012	1,294	0,812	0,574	0,889	0,844
2013	1,231	0,783	0,704	0,891	0,382
2014	1,519	1,353	0,931	1,404	1,278
2015	1,505	1,511	0,722	1,430	1,249
2016	0,962	1,198	1,076	1,490	1,243

Определяем частоту отказов оборудования ТП (РП):

$$a_{об} = n_{об}/N_{об} \cdot 100(год^{-1}/100) \text{ , (3)}$$

где $a_{об}$ - частота отказа оборудования ТП, РП (на 100 шт.);
$n_{об}$ - число отказов оборудования ТП, РП (шт.);
$N_{об}$- общее количество ТП, РП (шт).

В табл. 8 приведено количество аварийных отключений ТП напряжением 6, 10 кВ.

Таблица 8 – Аварийные отключения по ТП – 6, 10 кВ

РЭС/месяцы	2012	2013	2014	2015	2016
Сино	255	258	353	258	217
Фирдавси	117	100	124	100	103
Сомони	91	68	68	72	56
Шохмансур	57	55	55	87	86
Итого	520	481	602	517	462

В качества примера приведем расчет для РЭС-а Сино за 2016 год.

$$a_{об} = 217/580 \cdot 100 \text{ =37,41 шт.}$$

Для остальных периодов расчеты производится аналогично и результаты расчета сводятся в табл. 9.

Таблица 9 – Резултаты расчета частота отказов оборудования ТП 6, 10 кВ

Года	РЭС Сомони		РЭС Шохмансур		РЭС Фирдавси		РЭС Сино		Общий по «Гор.сеть г. Душанбе»	
	$n_{об}$	$a_{об}$	$n_{об}$	$a_{об}$	$n_{об}$	$a_{об}$	$n_{об}$	$a_{об}$	$n_{об}$	$a_{об}$
2012	91	23,7	57	21,76	117	47,3	255	45,2	520	35,7
2013	84	30,6	60	23,4	127	54,0	294	56,7	565	44,0
2014	68	20,6	55	18,3	124	42,4	353	53,4	602	38,0
2015	72	21,3	87	28,5	100	33,3	258	37,6	517	31,7
2016	56	17,6	86	26,2	103	36,5	217	37,4	462	30,6

Среднее время восстановления оборудования рассчитывалось из следующего соотношения:

$$T_B = \sum_{i=1}^{N_0} t_в \Big/ N_o \,, (4)$$

где $t_в$ - общая длительность восстановления i-го элемента сети (ч);
N_o - количество изделий, поставленных на восстановление.

Таблица 10 – Резултаты расчета среднее время восстановления оборудования 6,10 кВ

Года	РЭС Сомони		РЭС Шохмансур		РЭС Фирдавси		РЭС Сино		Общий по «Гор.сеть г. Душанбе»	
	$t_в$	T_B	$t_в$	T_B	$t_в$	T_B	$t_в$	T_B	$t_в$	T_B
2012	778,5	2,0	680,4	2,6	859,8	3,4	1840,5	3,2	4159,4	2,8
2013	802,1	2,9	702,7	2,7	1036,7	4,4	2148,2	4,1	4689,4	3,6
2014	758,3	2,3	672,7	2,2	1022,3	3,5	2099,3	3,1	4552,7	2,8
2015	901,3	2,6	855,5	2,8	802,0	2,6	1740,8	2,5	4299,7	2,6
2016	441,4	1,3	500,6	1,5	596,1	2,1	1509,2	2,6	3047,5	2,0

Ниже в табл. 11 приводиться значения недоотпуска электроэнергии за рассматриваемые периоды.

Таблица 11 – Недоотпуски электроэнергии по учетным годам

Года	млн. Вт·ч
2012	4,2
2013	3,1
2014	5,7
2015	6,1
2016	4,5
Итого	23,7

Результаты расчетов уровней показателей надежностей характеризованные в виде количественной оценки сравнивались [9, С.126, 128]. Данные показатели показывают что, большая часть показателей надежности для рассматриваемых элементов распределительной сети 6, 10 кВ имеют превышения.

Список литературы / References

1. Правила устройства электроустановок Раздел 4: Распределительные устройства и подстанции – Введ. 01.10.2003. –7-е изд. –М.: НЦ ЭНАС. –2003. –100 с.

2. Папков Б. В. Вероятностные и статистические методы оценки надежности элементов и систем электроэнергетики: теория, примеры, задачи: учеб. пособие. / Б.В. Папков, В.Л. Осокин – НГИЭУ. Княгинино, 2015. 356 с.

3. Сидоров А.И. Исследование причин нарушений в работе сельских электрических сетей 6–35 кВ/ А.И. Сидоров, С.Н. Трофимова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. –2009. – № 4. –С. 29–31.

4. Технический годовой отчет ОАО «Горэлектросеть г. Душанбе» с 2012 по 2016 гг.

5. Таваров С. Ш. Состояние электрического оборудования в городских электрических сетях г. Душанбе ОАХХ «Барки Точик» [Текст] / С. Ш. Таваров, Г. Х. Маджидов, Э. А. Фирдавс // Электробезопасность. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – №2 – С. 4–12.

6. Таваров С.Ш. Анализ причин нарушений в городских электрических сетях г. Душанбе / С.Ш. Таваров, Г.Х. Маджидов// Электробезопасность. – 2016. – №1. С. 25–30.

7. Трофимова С.Н. Анализ повреждаемости электрооборудования в городских электрических сетях 6–35 кВ / С. Н. Трофимова // Электробезопасность. – 2007. – № 4. – С. 33–41.

8. Трофимова С.Н. Повышение надежности электроснабжения в условиях современного города / С. Н.

Трофимова, С. П. Максимов // – Электро. Серия «Надежность электроустановок». – 2014, №4. С. 40–42.

9. Чернов Д.В. Исследование влияния надежности системы электроснабжения на качество электроэнергии на шинах сельских потребителей: автореферат дис. ... канд. тех. наук / Д.В.Чернов. –Иркутск: Изд-во Институт систем энергетики СО РАН, 2009. –25 с.

10. Шеметов А. Н. Надежность электроснабжения: учебное пособие для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» / А. Н. Шеметов. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2006. 149 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Pravila ustrojstva jelektroustanovok Razdel 4: Raspredelitel'nye ustrojstva i podstancii [Regulations for electrical installation Section 4: Distributing devices and substations]. – Vved. 01.10.2003. –7-e izd. –M.: NC JeNAS. –2003. –100 p. [in Russian]

2. Papkov B. V., Osokin V. L. Verojatnostnye i statisticheskie metody ocenki nadezhnosti jelementov i sistem jelektrojenergetiki: teorija, primery, zadachi: ucheb. Posobie [Probabilistic and statistical methods of assessment of reliability of elements and systems of power industry: theory, examples, tasks: studies. grant.] / B.V. Papkov, V.L. Osokin – NGIJeU. Knjaginino, 2015. 356 p. [in Russian]

3. Sidorov A.I., Trofimova S.N. Issledovanie prichin narushenij v rabote sel'skih jelektricheskih setej 6–35 kV [Research of the reasons of violations in work of rural electrical networks of 6-35 kV] // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva [Mechanization and electrification of agriculture]. 2009. – № 4. P 29–31. [in Russian]

4. Tehnicheskij godovoj otchet OAO «Gorjelektroset' g. Dushanbe» s 2012 po 2016 gg [The technical annual report of JSC City Electric Supply Company of Dushanbe from 2005 to 2015].

5. Tavarov S. Sh., Madzhidov G. H., Firdavs Je. A. Sostojanie jelektricheskogo oborudovanija v gorodskih jelektricheskih setjah g. Dushanbe OAHH «Barki tochik» [The condition of the electrical equipment in city electric networks of Dushanbe OHHH «Barki Tojik»] // Jelektrobezopasnost' [Electrical safety]. 2016. №2. P. 4-12. [in Russian]

6. Tavarov S.Sh., Madzhidov G.H Analiz prichin narushenij v gorodskih jelektricheskih setjah g. Dushanbe [Analysis of disturbances in urban electric networks Dushanbe] // Jelektrobezopasnost' [Electrical safety]. 2016. №1. P. 25-30. [in Russian]

7. Trofimova S. N. Analiz povrezhdaemosti jelektrooborudovanija v gorodskih jelektricheskih setjah 6–35 kV. [The analysis of damageability of electric equipment in city electrical networks of 6-35 kV] // Jelektrobezopasnost' [Electrical safety]. 2007. №4. P. 33-41. [in Russian]

8. Trofimova S. N., Maximov S. P. Povyshenie nadezhnosti jelektrosnabzhenija v uslovijah sovremennogo goroda [Increase in reliability of power supply in the conditions of the modern city]. Jelektro. Serija «Nadezhnost' jelektroustanovok» [Electro. Reliability of Electroinstallations series]. 2014. № 4. P. 40-42. [in Russian]

9. Chernov D. V. Issledovanie vlijanija nadezhnosti sistemy jelektrosnabzhenija na kachestvo jelektrojenergii na shinah sel'skih potrebitelej [Research of influence of reliability of system of power supply on quality of the electric power on tires of rural consumers]: abstractdis. …. . of PhD in Engineering: D.V.Chernov. –Irkutsk: Izd-vo Institut sistem jenergetiki SO RAN, 2009. –25 p. [in Russian]

10. Shemetov A. N. Nadezhnost' jelektrosnabzhenija: uchebnoe posobie dlja studentov special'nosti 140211 «Jelektrosnabzhenie» [Reliability of power supply: manual for students of specialty 140211 «Power supply»] / A.N. Shemetov. Magnitogorsk : GOU VPO «MGTU im. G. I. Nosova». 2000. – 149 p. [in Russian]

ВКонтакте

Получить актуальную информацию, задать вопросы и узнать свежие новости о Международном научно-исследовательском журнале Вы сможете на официальной странице ВКонтакте

http://vk.com/public43173774

Опубликовать статью ВАК / Научный журнал

О компании:

Почта: editors@research-journal.org

МНИЖ предоставляет возможность опубликовать свои научные достижения аспирантам, преподавателям вузов, студентам, лицам, имеющим ученую степень, общественным деятелям, деятелям культуры и образования, политикам, экономистам России, стран СНГ и дальнего зарубежья.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.141

Соколов П.Э.[1], Дрик В.Ю.[2]
[1]ORCID: 0000-0002-3960-5010, кандидат технических наук, [2]магистрант
Волгоградский государственный технический университет,
Институт архитектуры и строительства

ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Приведены результаты исследований удельной активности и эффективной удельной активности естественных радионуклидов в глинистых горных породах, которые применяются для производства различных керамических строительных материалов. Обработка полученных результатов дала возможность получить основные статистические характеристики исследованных горных пород. Анализ статистических характеристик позволил дать рекомендации, направленные на снижение уровня облучения населения от строительных материалов сырьем для которых служат исследованные глинистые горные породы.

Ключевые слова: удельная активность, естественные радионуклиды, глинистые горные породы, строительные материалы.

Sokolov P.E.[1], Drik V. Y.[2]
[1]ORCID: 0000-0002-3960-5010, PhD in Engineering, [2]Graduate student
Volgograd state technical university, Institute of architecture and construction (VSTU)

NATURAL RADIOACTIVITY OF CLAY ROCKS USED FOR MANUFACTURE OF CONSTRUCTION MATERIALS

Abstract

The results of study in specific activity and effective specific activity of natural radionuclides in clay rocks are presented. They are used for the production of various ceramic building materials. The processing of the obtained results made it possible to obtain the basic statistical characteristics of the investigated rocks. The analysis of statistical characteristics allowed to provide recommendations aimed at reducing the level of exposure of the population from construction materials to raw materials for which the investigated clay rocks are used.

Keywords: specific activity, natural radionuclides, argillaceous rocks, building materials.

Из всех известных источников ионизирующих излучений, воздействию которых подвергается человек, на долю строительных материалов приходится до 60 % [1], [2]. Естественная радиоактивность строительных материалов обусловлена повсеместным распространением природных радионуклидов: ^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th. Для производства строительных материалов используются различные горные породы, а также отходы различных отраслей промышленности [3].

До недавнего времени облучение от естественных источников ионизирующего излучения рассматривалось как несущественное и неизменное явление радиационного фона. В настоящее время признано, что поглощенная доза населения в жилых и общественных зданиях может быть весьма высокой и ее можно уменьшить, а также избежать значительных доз при строительстве новых зданий [4].

Активность радионуклидов в строительных материалах зависит от концентрации естественных радионуклидов в горных породах, из которых они изготовлены, какой обработке эти горные породы подвергались при производстве строительных материалов [5] и как много времени прошло с момента использования данного материала для строительства здания или сооружения [6].

Материалами для исследований были приняты глинистые горные породы, добываемые и используемые для производства строительных материалов. Они применяются для производства портландцемента, керамического кирпича и блоков, керамзита и т.д. Достаточно широкое распространение таких материалов в современных условиях требует соблюдения всех норм и требований безопасности, в том числе радиационной [7, 8].

Основной нормируемой величиной характеризующей степень радиационной опасности является эффективная удельная активность естественных радионуклидов [9]. Она определяется по формуле:

$$0{,}09A_K + A_{Ra} + 1{,}3A_{Th} = A_{\text{эфф}}, \quad (1)$$

где A_K – удельная активность ^{40}K, Бк/кг; A_{Ra} – удельная активность ^{226}Ra, Бк/кг; A_{Th} – удельная активность ^{232}Th, Бк/кг.

Для оценки радиоактивности глинистых горных пород был произведен отбор проб из 24 месторождений Волгоградской области. Отобранные пробы были подготовлены в соответствии с общепринятой методикой [10]. Для этого пробы помещались в сосуд Маринелли (см. рис. 1). Проведение измерений осуществлялось на спектрометрическом комплексе «ГАММА ПЛЮС Р». Полученные спектры обрабатывались с помощью программного обеспечения «PROGRESS 3.0» на персональном компьютере.

Рис. 1 – Сосуд Маринелли

В результате проведенных исследований были получены данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Удельные активности и эффективная удельная активность естественных радионуклидов в глинистых горных породах

№ п/п	Образец (шифр)	Число проб	Удельная активность, Бк/кг			$A_{эфф}$, Бк/кг
			^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Д-1	3	972,4	35,2	36,9	170,7
2.	Е-1	4	605,4	31,9	32,2	128,2
3.	Е-2	3	504,9	17,1	26,7	97,2
4.	Ж-1	3	385,4	21,1	27,9	92,0
5.	Ж-2	4	443,9	20,9	29,6	99,3
6.	М-1	5	499,9	28,5	42,6	128,9
7.	М-2	5	546,2	25,0	37,4	122,8
8.	К-1	3	942,6	32,5	61,1	196,8
9.	К-2	3	858,0	13,7	52,2	158,8
10.	К-3	3	824,3	20,9	50,5	160,7
11.	Ф-1	7	638,0	16,7	40,8	127,2
12.	Б-1	5	473,3	20,4	30,4	102,5
13.	Г-1	7	573,5	28,2	37,5	128,6
14.	С-1	5	629,1	27,9	38,7	134,8
15.	С-2	7	805,0	18,4	49,7	155,5
16.	С-3	5	799,8	16,8	50,9	154,9
17.	Л-1	5	651,3	20,2	37,8	127,9
18.	О-1	5	320,3	21,9	16,4	72,0
19.	Я-1	4	601,9	15,2	32,6	111,7
20.	Я-2	3	785,7	16,0	48,9	150,3
21.	Я-3	3	745,8	17,0	47,1	145,4
22.	Я-4	6	619,2	34,5	30,1	129,4
23.	Я-5	3	576,2	32,6	30,5	124,1
24.	Т-1	3	741,7	20,0	49,6	151,2

Обработку полученных экспериментальных данных можно произвести, используя различные подходы [11]. Обработаем полученные данные статистически.

Таблица 2 – Описательная статистика результатов исследований

Наименование	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	$A_{эфф}$
1	2	3	4	5
Среднее	647,66	23,03	39,09	132,13
Медиана	624,15	20,90	37,65	128,72
Дисперсия выборки	29106,2	44,85	110,43	790,21
Интервал	652,10	21,50	44,70	124,72
Колебания интервала	3,04	2,57	3,73	2,73
Минимум	320,30	13,70	16,40	72,05
Максимум	972,40	35,20	61,10	196,76

Представим данные, приведенные в табл. 2 в графической форме в виде диаграммы размахов, используя для обработки язык статистических вычислений и графики R [12] (см. рис. 2).

Диаграммы размахов позволяют проиллюстрировать распределение значений непрерывной переменной, отображая, пять параметров: минимум, нижний квартиль (25-й процентиль), медиану (50-й процентиль), верхний квартиль (75-й процентиль) и максимум.

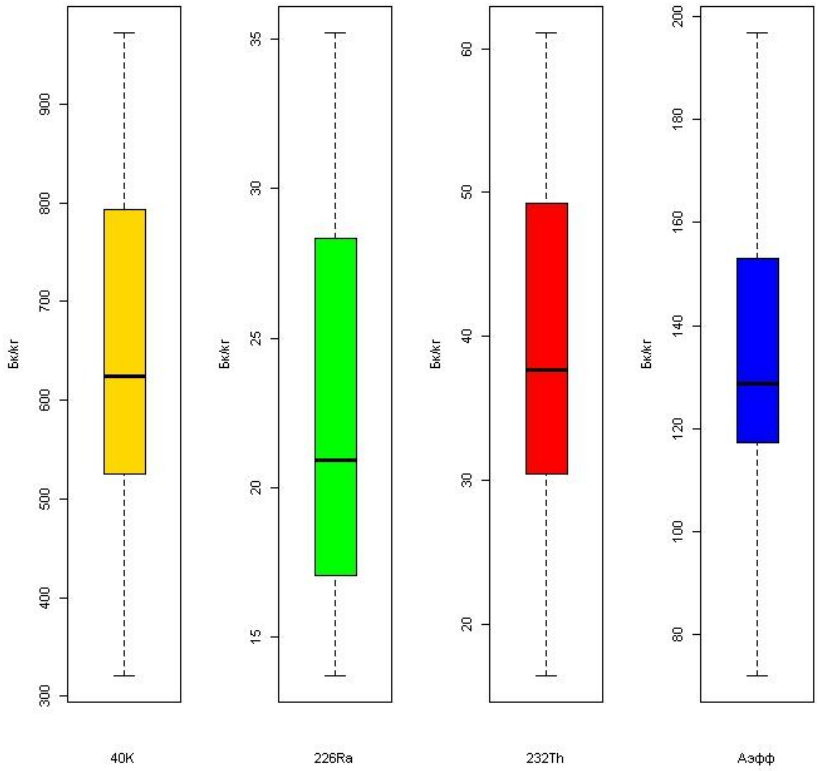


Рис. 2 – Диаграммы размахов для удельных активностей и эффективной удельной активности естественных радионуклидов

Анализируя данные, приведены в табл. 1-2 и на рис. 2 можно отметить следующее.

Максимальное значение удельной активности ^{40}K наблюдается у образца с шифром Д-1 и составляет – 972,4 Бк/кг. Минимальное значение имеет образец с шифром О-1, оно составляет – 320,4 Бк/кг. Среднее значение удельной активности составляет – 647,66 Бк/кг, при этом 10 образцов имеют удельную активность ^{40}K выше, а 14 ниже средней.

Среди исследованных горных пород максимальное значение удельных активностей ^{226}Ra отмечено у образца с шифром Д-1, оно составляет – 35,2 Бк/кг. У этого же образца отмечено и максимальное значение удельной активности ^{40}K. Минимальное значение – 13,7 Бк/кг отмечено у образца с шифром К-2. Среднее значение удельной активности ^{226}Ra составляет 23,03 Бк/кг. Количество образцов имеющих удельные активности ^{226}Ra больше средней – 9, а меньше – 15.

Образцом, имеющим максимальную удельную активность ^{232}Th – 61,1 Бк/кг является образец с шифром К-1, а минимальную – 16,4 Бк/кг образец с шифром О-1. Среднее значение удельных активностей ^{232}Th – 39,09 Бк/кг. Количество образцов имеющих удельные активности ^{232}Th больше средней – 9, а меньше – 15.

По эффективной удельной активности естественных радионуклидов максимальное значение наблюдается у образца с шифром К-1, оно составляет – 196,8 Бк/кг. У этого же образца отмечена и максимальная удельная активность ^{232}Th. Минимальное значение эффективной удельной активности имеет образец с шифром О-1 – 72,05 Бк/кг. У этого же образца отмечена и минимальная удельная активность ^{232}Th. Среднее значение эффективной удельной активности составляет – 132,13 Бк/кг. Образцов со значениями эффективной удельной активности выше среднего – 10, а меньше – 14.

Необходимо отметить, что все исследованные образцы глинистого сырья имеют эффективную удельную активность менее 370 Бк/кг, что соответствует первому классу по радиационной опасности [9]. Следовательно, все они могут использоваться для производства строительных материалов без ограничений. При этом необходимо иметь в виду, что глинистые горные породы в основном подвергаются различным видам переработки для получения из них керамических строительных материалов [3, 5]. Воздействие этих видов переработки необходимо обязательно учитывать.

Однако НКДАР ООН рекомендует снижать дозы облучения населения от природных источников излучения настолько, насколько это возможно и экономически целесообразно [13].

Поэтому полученные при статистическом анализе удельных активностей и эффективной удельной активности результаты позволяют рекомендовать применять для производства строительных материалов глинистые горные породы со значениями $A_{эфф}$ ниже среднего – 132,13 Бк/кг. Таким образом радиоактивность глинистых горных пород в 1,49 раза меньше допустимых норм для строительных материалов.

Список литературы / References

1. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.

2. Соколов П.Э. Необходимость контроля радиоактивности строительных материалов / П.Э. Соколов, О.П. Сидельникова, Ю.Д. Козлов // Строительные материалы. – 1995. - № 9. – С. 18-19.

3. Соколов П.Э. Радиационные аспекты производства строительных материалов / П.Э. Соколов // Форум. – 2016. - №2(8). – С. 115-120.

4. Соколов П.Э. Проблемы радиационной безопасности в производстве и использовании строительных материалов / П.Э. Соколов. – Волгоград. ВолгГАСА, 2003. – 85 с.

5. Соколов П.Э. Влияние обжига на радиоактивность керамических материалов / П.Э. Соколов, П.Д. Чернышев // Научное обозрение. – 2017. - №8. – С. 34-40.

6. Соколов П.Э. Оценка временного фактора в формировании радиационного фона зданий / П.Э. Соколов, В.В. Григорьевский // Форум. – 2016. - №2(8). – С. 111-114.

7. СанПиН 2.6.1.2523 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) : [утв. гл. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 07.07.2009 : введ. 01.09.2009].– М.: Минздрав России, 2009. – 93 с.

8. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.

9. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. – Введ. 1995-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 11 с.

10. Измерение активности гамма-излучающих радионуклидов на сцинтилляционном спектрометре с использованием пакетов программ SM и EXPRESS: Методические рекомендации / ВНИИФТРИ. М., 1993. – 31 с.

11. Соколов П.Э. Использование карт Кохонена для оценки радиоактивности строительного сырья / П.Э. Соколов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2017. - №1(3). – С. 70-78.

12. Кабаков Р.И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R / Р.И. Кабаков // пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 588 с.

13. Effects of Radiation on the Environment: Report to the General Assembly with Scientific Annex / United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2000). – New York: UN, 2000 – 842 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Krisjuk Je.M. Radiacionnyj fon pomeshhenij [Background radiation areas]. / Je.M. Krisjuk. – M.: Energoatomizdat, 1989. – 120 p. [in Russian]

2. Sokolov P.E. Neobhodimost' kontrolja radioaktivnosti stroitel'nyh materialov [The need for control of radioactivity of building materials] / P.E. Sokolov, O.P. S Sidel'nikova, Y.D. Kozlov // Stroitel'nye materially [Building materials]. – 1995. - №9. – P. 18-19. [in Russian]

3. Sokolov P.E. Radiacionnye aspekty proizvodstva stroitel'nyh materialov [Radiological aspects of production of construction materials] / P.E. Sokolov // Forum [Forum]. – 2016. - №2(8). – P. 115-120. [in Russian]

4. Sokolov P.E. Problemy radiacionnoj bezopasnosti v proizvodstve i ispol'zovanii stroitel'nyh materialov [Problems of radiation safety in the production and use of building materials] / P.E. Sokolov. – Volgograd. VolgGASA, 2003. – 85 p. [in Russian]

5. Sokolov P.E. Vlijanie obzhiga na radioaktivnost' keramicheskih materialov [The effect of roasting on the radioactivity of ceramic materials] / P.E Sokolov, P.D. Tchernyshev // Nauchnoe obozrenie [Scientific review]. – 2017. - №8. – P. 34-40. [in Russian]

6. Sokolov P.E. Ocenka vremennogo faktora v formirovanii radiacionnogo fona zdanij [Evaluation of time factor in the formation of the background radiation of buildings] / P.E. Sokolov, V.V. Grigor'evskij // Forum [Forum]. – 2016. - №2(8). – P. 111-114. [in Russian]

7. SanPiN 2.6.1.2523 Normy radiacionnoj bezopasnosti (NRB-99/2009) [Norms of radiating safety] : [Approved by the main state doctor of the Russian Federation 07.07.2009]. – Vved. 01.09.2009. – M.:Minzdrav Rossii, 2009. 93 p. [in Russian]

8. Osnovnye sanitarnye pravila obespechenija radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB) [Basic sanitary rules of ensuring radiation safety]: [Sanitary rules and regulations SR 2.6.1.2612-10]. – M.: Federal'nyj centr gigieny i jepidemiologii Rospotrebnadzora, 2010. – 83 p. [in Russian]

9. GOST 30108-94. Materialy i izdeliya stroitelnye. Opredelenie udelnoj ehffektivnoj aktivnosti estestvennyh radionuklidov [Materials and products building. Definition of specific effective activity natural radioniclides]. – Vved. 1995-01-01. M.: – Standartinform, 2007. – 11 p. [in Russian]

10. Izmerenie aktivnosti gamma-izluchajushhih radionuklidov na scintil-ljacionnom spektrometre s ispol'zovaniem paketov programm SM i EXPRESS: Metodicheskie rekomendacii [Measurement of activity of gamma-emitting radionuclides in scintil-translational spectrometer using software packages such as SM and EXPRESS: guidelines] / VNIIFTRI. M., 1993. – 31 p. [in Russian]

11. Sokolov P.E. Ispol'zovanie kart Kohonena dlja ocenki radioaktivnosti stroitel'nogo syr'ja [The use of Kohonen maps for assessing the radioactivity of building raw materials] / P.E. Sokolov // Vestnik nauki i obrazovanija Severo-Zapada Rossii [Journal of science and education of North-West Russia]. – 2017. - №1(3). – P. 70-78. [in Russian]

12. Kabacoff R.I. R v dejstvii. Analiz i vizualizacija dannyh v programme R [R in action. Data analysis and graphics with R] / R.I. Kabacoff // per. s angl. – M.: DMK Press, 2014. – 588 p. [in Russian]

13. Effects of Radiation on the Environment: Report to the General Assembly with Scientific Annex / United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2000). – New York: UN, 2000 – 842 p.

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.115

Соколов А.А.[1], Соколова О.А.[2], Нареклишвили А.М.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-1127-9612, кандидат технических наук,
[2]ORCID: 0000-0003-2314-6451 старший преподаватель, [3]ORCID: 0000-0003-3488-8354 магистр,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ.

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация

В работе рассматривается проблема отсутствия достаточности информации по техногенному влиянию технологических процессов, позволяющей учитывать необходимость обеспечения режима реального времени мониторинга и прогнозирования возможных последствий, а также отсутствия информационной системы, обеспечивающей полноту контрольной информации о техногенных проявлениях горно-металлургического предприятия для последующего анализа и прогнозирования экологических последствий. В ходе исследований предложена архитектура подсистемы передачи, хранения и обработки информации о техногенных параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия, обеспечивающая режим реального времени мониторинга техногенного цикла. Апробация системы подтвердила обеспечение режима реального времени при мониторинге техногенного цикла, повышение информативности его информационного обеспечения за счет возможностей прогнозировать объем поступающей информации и расчета требуемой емкости хранилища. Для проверки экономической эффективности работы информационной системы в режиме наполнения необходимым объемом информации в зависимости от среднего числа заявок от объекта, проходящих по действующему каналу, была сформулирована оптимизационная модель подтвердившая целесообразность внедрения предложенной системы на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: информационная система, анализ информации, обработка информации, промышленный объект, канал информации. поток заявок.

Sokolov A.A.[1], Sokolova O.A.[2], Nareklishvili A.M.[3]
[1]ORCID: 0000-0002-1127-9612, PhD in Engineering, [2]ORCID: 0000-0003-2314-6451 Senior Lecturer,
[3]ORCID: 0000-0003-3488-8354 Master's Degree Student,
North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz.

DEVELOPMENT OF ARCHITECTURE OF ANALYSIS AND INFORMATION PROCESSING SYSTEM

Abstract

The paper considers the lack of information on the technogenic impact of technological processes that allows for the need to provide real-time monitoring and forecasting of possible consequences, as well as the lack of an information system that provides the completeness of control information on man-made mining and metallurgical enterprises for subsequent analysis and prediction of environmental consequences. During the research, the architecture of the subsystem of transmission, storage and processing of information on technogenic parameters of the technogenic cycle of the mining and metallurgical enterprise was proposed, providing real-time monitoring of the technogenic cycle. Approbation of the system confirmed the provision of a real-time mode in monitoring the technogenic cycle, increasing the information content due to the ability to predict the amount of incoming information and calculate the required capacity of the storage. To verify the economic efficiency of the information system in the mode of filling with the necessary amount of information depending on the average number of requests from the object passing through an active channel, an optimization model was formulated that confirmed the feasibility of implementing the proposed system in industrial enterprises.

Keywords: information system, information analysis, information processing, industrial facility, information channel, flow of applications.

Введение. Горно-металлургический комплекс (далее ГМК) - как сложная промышленная система, а также процессы его взаимодействия с компонентами окружающей экосистемы характеризуется достаточной сложностью и высокой динамичностью. Для устойчивого управления этой системой необходимо постоянно осуществлять мониторинг и анализ большого объема различной информации в режиме онлайн, в системе "предприятие горно-металлургического комплекса - внешняя среда" под которой понимается совокупность действующих природных и техногенных объектов, расположенных как на территории самого ГМК, так и на территориях, прилегающих к нему. В настоящее время реализация подобных требований неотъемлемо связана с мониторингом экологической обстановки, для последующего анализа и принятия решений по управлению и прогнозу негативного воздействия на окружающую среду предприятия ГМК. При этом одной из главных составляющих мониторинга является информативность, под которой в настоящей статье понимается характеристика полноты и своевременности поступления информации о техногенных воздействиях предприятий на внешнюю среду и ее адекватной обработки для дальнейшего прогнозирования возможных экологических последствий.

Постановка задачи. Несмотря на наличие достаточного количества публикаций [1, С. 97], [2, С. 114], [3] [4, С. 180] по программно-алгоритмическому обеспечению мониторинга техногенных циклов на окружающую среду имеют место следующие недостатки:

- отсутствие достаточности информации по техногенным циклам технологических процессов, с учетом онлайн режима мониторинга для прогнозирования возможных негативных последствий;
- отсутствие информационной системы, которая способна гарантировать требуемый объем входящей информации о техногенных проявлениях ГМК для последующего анализа и обработки.

Учитывая вышеизложенное решение проблемы, по разработке архитектуры системы анализа и обработки информации для мониторинга техногенного цикла горно-металлургического предприятия, является актуальным.

В ходе авторских исследований были сформулированы и решены следующие задачи:

- выполнено исследование текущего состояния информационного обеспечения мониторинга техногенного цикла ГМК;

- предложена структура цифровой системы передачи, хранения и обработки измерительной информации (далее СПХОИ), позволяющая обеспечить онлайн режим при мониторинге техногенного цикла.

Представленная на рисунке 1 структура СПХОИ имеет следующие функциональные особенности организации:

а) режим мультимедиа;

б) возможность оперативного реагирования на изменение техногенных циклов предприятия ГМК, наиболее приближенное к онлайн режиму;

в) возможность комплексного анализа предприятия ГМК;

г) создание и применение баз данных различного характера в процессе мониторинга техногенных циклов;

д) высокий уровень оперативного реагирования;

и способна решать такие задачи как:

1) мониторинг и анализа данных по техногенным циклам предприятия ГМК;

2) генерацию управленческих решений для лица принимающего решения;

3) создание и контроль над развитием технологических процессов предприятия ГМК [5, P. 482].

Разработка математической модели для получения, передачи и хранения информации о техногенных параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия, обеспечивающей режим реального времени мониторинга техногенного цикла, позволяющей обеспечить полноту контрольной информации, происходила по определенной методологии. Первоначально опираясь на результаты анализа проведенного мониторинга информационного обеспечения ряда предприятий ГМК [6, P. 70], [7, P. 84], [8, P. 91], были построены гистограммы, по которым были определены средние значения исследуемых параметров и произведена оценка дисперсии, установлен нормальный закон распределения средних значений, и далее был разработан метод оптимального наполнения информационной системы необходимым объемом информации. Затем, для эффективной реализации экономии средств, с точки зрения возрастающих объемов хранения контрольной информации с учетом мощности серверов системы [9, P. 114], [10, P. 32], была задана целевая функция с соответствующими граничными условиям описанная в [11, P. 1362], [12, P. 26].

Процесс наполнения системы потоками информации от исследуемых объектов происходил по принципу схематично показанному на рисунке 1.

Далее была произведена оценка экономической эффективности предложенной структуры с помощью оптимизационной модели которая тестирует систему в режиме наполнения необходимым объемом информации в зависимости от среднего числа заявок поступающих от объекта, сквозь действующий канал, по формуле:

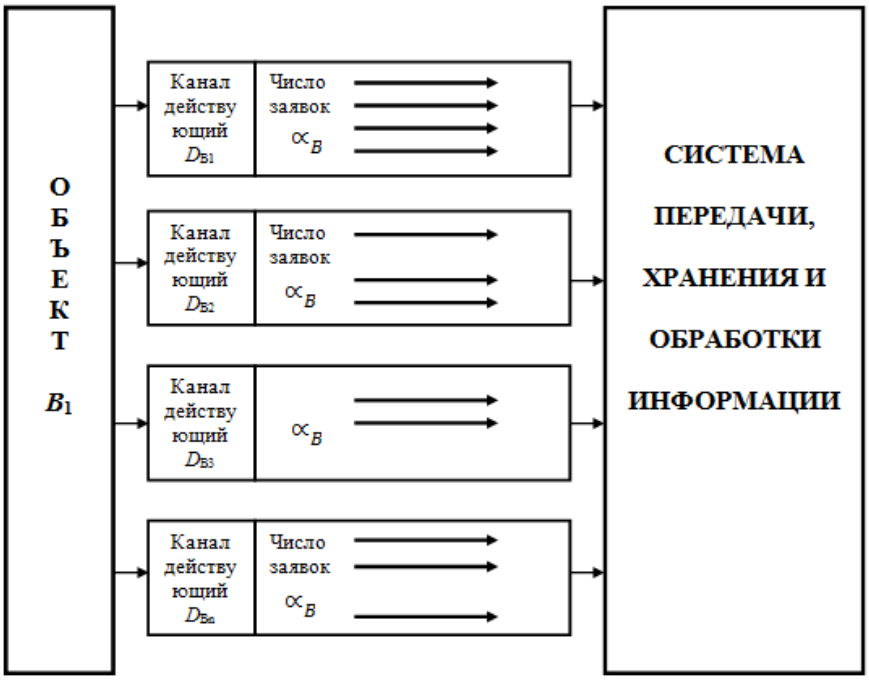


Рис. 1 – Принцип наполнения системы потоками заявок

$$\sum_{B=1}^{B} z_{\text{СР}} \cdot \propto_{B\ \text{ОБЩ}} \leq Z_{\text{ОБЩ}}, \qquad (1)$$

$$1 \leq Z_{\text{ср}} \leq 5; \;\; Z_{\text{ОБЩ}} \leq 1000,$$

где B – исследуемый объект;

$\propto_B$ – среднее число заявок из B-го объекта, проходящих по задействованному каналу за определенное время;

$\propto_{B\ \text{ОБЩ}}$ – общее количество заявок из B-го объекта, $\propto_{B\ \text{ОБЩ}} = D_B \cdot \propto_B$;

$z_{\text{СР}}$ – средние затраты на обработку каждой заявки от R-го объекта;

$Z_{\text{ОБЩ}}$ – затраченные средства для созданной системы, (руб).

Работа системы согласно оптимизационной модели является экономически эффективной, если средние затраты на извлечение данных по каждой заявке $z_{СР}$, перемноженные на потоки входящей информации по всей системе, будут меньше затраченных средств $Z_{ОБЩ}$, на создание системы на R-ых объектах.

На рисунке 2 показано распределение затрат на извлечение среднего количества заявок в системе. Изложенное выше подтверждает целесообразность дальнейшего внедрения на предприятиях предложенной архитектуры системы передачи и хранения информации, методология извлечения контрольной информации для обеспечения режима реального времени мониторинга описан более подробно в источнике [7].

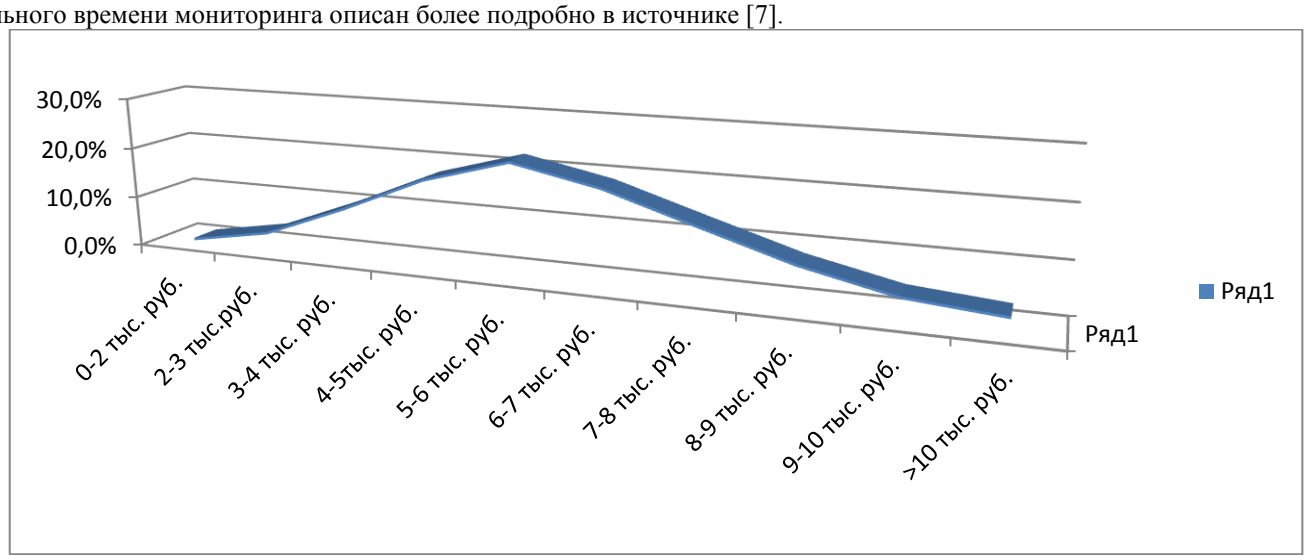


Рис. 2 – Вероятность распределения затрат на извлечение среднего количества заявок СПХОИ на промышленном объекте

В ходе дальнейших исследований была проанализирована эффективность работы системы, для этого была осуществлена экспертная оценка работы системы по таким критериям как: надежность, адаптивность, гибкость, оперативность, уровень централизации, производительность, снижение себестоимости и сроки внедрения, которая подтвердила преимущество предложенной авторами структуры информационной системы перед существующими аналогами.

Заключение. Апробация предложенной подсистемы передачи, хранения и обработки информации о техногенных параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия, обеспечивающая режим реального времени мониторинга техногенного цикла подтвердила обеспечение режима реального времени при мониторинге техногенного цикла, повышение информативности его информационного обеспечения за счет возможностей прогнозировать объем поступающей информации и расчета требуемой емкости хранилища. Разработанная структура системы позволяет эффективно использовать ее не только на предприятиях горно-металлургического комплекса, но и на иных промышленных предприятиях при внесении специфических изменений в базы данных и в программно-алгоритмическое обеспечение, характерных для исследуемой отрасли промышленности. В дальнейшем планируется разработка алгоритмов управления устойчивостью системы при внешних возмущающих воздействиях с учетом вероятности возникновения аварийных режимов работы оборудования на предприятиях горно-металлургического комплекса.

Список литературы / References

1. Иващук О. А. Автоматизация как основа реализации принципов современной системы управления экологической безопасностью / О. А. Иващук // Информационные системы и технологии. – 2009. – № 4(54). – С. 95-104

2. Константинов И. С. Особенности построения и интеллектуализации системы экомониторинга в составе автоматизированной системы управления экологической безопасностью / И. С. Константинов, О. Д. Иващук // Информационные системы и технологии. – 2010. – № 6(62). – С. 113-118.

3. Лисецкий Ю. М., Бобров А.Н. Пример построения корпоративной интегрированной информационной системы// УСиМ. – 2007. – № 6. – С. 9-16.

4. Гизатуллин А. Р., Соколова А. В. Трехмерное моделирование инженерных коммуникаций в ГИС / А. Р. Гизатуллин, А. В. Соколова // Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем: межвузовский научный сборник Уфа: УГАТУ. – 2013. – С. 176-185.

5. Петров Ю.С. Разработка новых математических моделей и методов для системного анализа информации / Ю.С. Петров Ю.С., А.А. Соколов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3 (часть 3) – С. 480-483.

6. Соколов А.А. К проблеме электрического моделирования фильтрации грунтовых вод / А.А. Соколов // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. - 2009. - Т. 84. - № 1. - С. 69-71.

7. Соколов А.А. Разработка метода решения задач системного анализа в природно-промышленной системе / А.А. Соколов, А.Ю. Аликов, И.И. Босиков, Ю.С. Петров // Перспективы науки. - 2010. - №4 (6). - С. 83-85.

8. Соколов А.А. Моделирование скорости распространения вредных веществ подземными водами в окружающей среде / А.А. Соколов // В сборнике: Региональные проблемы экологии: пути решения материалы IV международного экологического симпозиума. - 2007. - С. 90-93.

9. Кумаритов А.М. Разработка системы анализа и обработки информации по стратегическому управлению предприятий топливно-энергетического комплекса / А.М. Кумаритов, Е.А. Соколова //Наука и бизнес: пути развития. - 2014. - № 5 (35). - С. 113-116.

10. Соколова Е.А. Компрессия изображений вариабельными фрагментами / Е.А. Соколова // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2008. - № 10. - С. 31-34.

11. Соколова Е.А. Использование теоретико-множественного подхода для поиска необходимого контента по атрибутам и ключевым словам / Е.А. Соколова //Фундаментальные исследования. - 2013. - № 8-6. - С. 1360-1363.

12. Петров Ю.С. Обобщенная оценка влияния горного предприятия на окружающую природную среду / Ю.С. Петров Ю.С., О.З. Габараев, А.А. Соколов // Горный журнал. - 2015. - № 8. - С. 25-27.

Список литературы на английском языке / ReferencesinEnglish

1. Ivashhuk O. A. Avtomatizacija kak osnova realizacii principov sovremennojj sistemy upravlenija ehkologicheskojj bezopasnost'ju [Automation as a basis for implementing the principles of modern environmental safety management system] / O. A. Ivashhuk // Informacionnye sistemy i tekhnologii [Information systems and technologies]. – 2009. – № 4(54). – P. 95-104. [in Russian]

2. Konstantinov I. S. Osobennosti postroeniya i intellektualizacii sistemy e'komonitoringa v sostave avtomatizirovannoj sistemy upravleniya e'kologicheskoj bezopasnost'yu [Features of construction and intellectualization of environmental monitoring systems as part of an automated environmental control system] / I. S. Konstantinov, O. D. Ivashhuk // Informacionnye sistemy i texnologii [Information systems and technologies]. – 2010. – № 6(62). – P. 113-118. [in Russian]

3. Liseckij Ju. M., Bobrov N. Primer postroenija korporativnoj integrirovannoj informacionnoj sistemy [The example of the construction of the corporate integrated information system]// USiM. – 2007. – № 6. – C. 9-16.

4. Gizatullin A. R., Sokolova A. V. Trehmernoe modelirovanie inzhenernyh kommunikacij v GIS [Three-dimensional modeling of engineering communications in GIS] / A. R. Gizatullin, A. V. Sokolova // Geoinformacionnye tehnologii v proektirovanii i sozdanii korporativnyh informacionnyh system: mezhvuzovskij nauchnyj sbornik Ufa: UGATU [Interuniversity scientific collection: GIS technology in the design and development of enterprise information systems, USATU, Ufa, Russia]. – 2013. – P. 176-185. [in Russian]

5. Petrov Yu.S. Razrabotka novyh matematicheskih modelej i metodov dlya sistemnogo analiza informacii [Development of new mathematical models and methods for system analysis of information] / Yu.S. Petrov Yu.S., AA. Sokolov // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]. - 2014. - N. 3 (part 3) - P. 480-483. [in Russian]

6. Sokolov A. A. K probleme ehlektricheskogo modelirovaniya fil'tracii gruntovyh vod [To the problem of electrical simulation of groundwater seepage] / A.A. Sokolov // Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelej prirody. Otdel geologicheskij [Bulletin of Moscow society of naturalists] - 2009. - T. 84. - No. 1. - P. 69-71. [in Russian]

7. Sokolov A. A. Razrabotka metoda resheniya zadach sistemnogo analiza v prirodno-promyshlennoj sisteme [Development of a method to solve problems of system analysis in the natural and the industrial system] / A. A. Sokolov, A. Yu. Alikov, I. Boikov, Y. Petrov // Perspektivy nauki [Science Prospects]. - 2010. - №4 (6). - P. 83-85. [in Russian]

8. Sokolov A. A. Modelirovanie skorosti rasprostraneniya vrednyh veshchestv podzemnymi vodami v okruzhayushchej srede [Modeling the velocity of propagation of harmful substances in groundwater in the environment] / A. A. Sokolov // V sbornike: Regional'nye problemy ehkologii: puti resheniya materialy IV mezhdunarodnogo ehkologicheskogo simpoziuma [journal: Regional environmental problems: ways of solution: materials of IV international ecological Symposium]. - 2007. - P. 90-93. [in Russian]

8. Kumaritov A. M. Razrabotka sistemy analiza i obrabotki informacii po strategicheskomu upravleniyu predpriyatij toplivno-ehnergeticheskogo kompleksa [To develop a system of analysis and processing of information for strategic management of enterprises of fuel and energy complex] / A. M. Kumaritov, E. A. Sokolov // Nauka i biznes: puti razvitiya [Science and business: ways of development]. - 2014. - № 5 (35). - P. 113-116. [in Russian]

10. Sokolova E. A. Kompressiya izobrazhenij variabel'nymi fragmentami [Image Compression variable fragments] / E. A. Sokolov // Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij [Journal of computer and information technology]. - 2008. - No. 10. - P. 31-34. [in Russian]

11. Sokolova E. A. Ispol'zovanie teoretiko-mnozhestvennogo podhoda dlya poiska neobhodimogo kontenta po atributam i klyuchevym slovam [The Use of a set-theoretic approach to find the desired content attributes and keywords] / E. A. Sokolov // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]. - 2013. N. 8-6. - P. 1360-1363. [in Russian]

12. Petrov Yu. s. Obobshchennaya ocenka vliyaniya gornogo predpriyatiya na okruhayushchuyu prirodnuyu sredu [A Generalized assessment of the impact of mining enterprises on the environment] / Yu. s. Petrov Y. S., O. Z. Gabaraev, A. A. Sokolov // Gornyj zhurnal [The Mountain journal]. - 2015. - No. 8. - P. 25-27. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.135

Ташлыкова А.И.
ORCID: 0000-0001-7242-138X, старший преподаватель кафедры «Организация перевозок и безопасность на транспорте», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПРОСТОЯ ГРУЗА В ТРАНСПОРТНОМ УЗЛЕ

Аннотация

Транспортировка груза является большой сложной системой взаимодействие участников перевозочного процесса. Одним из главных обеспечений для перевозки является достаточная пропускная и перерабатывающая способность транспортных узлов. Статья направленна на оценку влияния различного рода факторов на перерабатывающую способность транспортных узлов. Ведущим подходом к исследованию данной проблемы является создание имитационной модели для программного обеспечения по оценки влияния изменения параметров инфраструктуры без построения наглядных контактных графиков работы транспортного узла. Материалы статьи могут быть полезными для всех участников перевозочного процесса любого вида транспорта.

Ключевые слова: транспортный узел, простой груза, имитационная модель, транспорт, функция.

Tashlykova A.I.
ORCID: 0000-0001-7242-138X, Senior lector of the department «Logistics and safety on transport», FSBEI of Higher Education "Far Eastern State Transport University", Khabarovsk

SIMULATION MODELING FOR EVALUATION OF INFLUENCE OF FACTORS ON DURATION OF CARGO DOWNTIME IN TRANSPORT HUB

Abstract

Cargo transportation is a large complex system of participants of the transportation process interaction. Sufficient throughput and processing capacity of transport hubs is the one of the main provisions for transportation. The paper is aimed at assessing the influence of various factors on the processing capacity of transport hubs. The leading approach to the study of this problem is to create the simulation model for the software to assess the impact of infrastructure parameters changes without constructing visual contact schedules of the transport hub. The article materials can be useful for all participants in the transportation process of any type of transport.

Keywords: transport hub, cargo downtime, simulation modeling, transport, function.

Вопрос по организации работы транспортных узлов с различной категорией грузов всегда актуален. Это связанно, прежде всего, с тем, что требования грузоотправителей и получателей с каждым годом становятся более жесткими при выборе транспортной услуги по доставки груза. Поэтому транспортная отрасль вынуждена соответствовать этим требованиям, а именно совершенствовать и повышать качество предоставляемых услуг [1, С. 7].

Анализ работы транспортных узлов (ТУ) Дальневосточного региона позволил выявить некоторые причины простоя груза. Для выявления факторов, которые воздействуют на простой груза, строится причинно-следственная диаграмма Исикавы (рис. 1), наглядно демонстрирующая иерархию и взаимозависимость всего комплекса факторов [3, С. 118]. На основе полученной дигаммы все факторы разбиты на 4 группы: 1) технологические; 2) технические; 3) зависимые от человеческого фактора; 4) зависимые от окружающей среды. [10, С. 58].

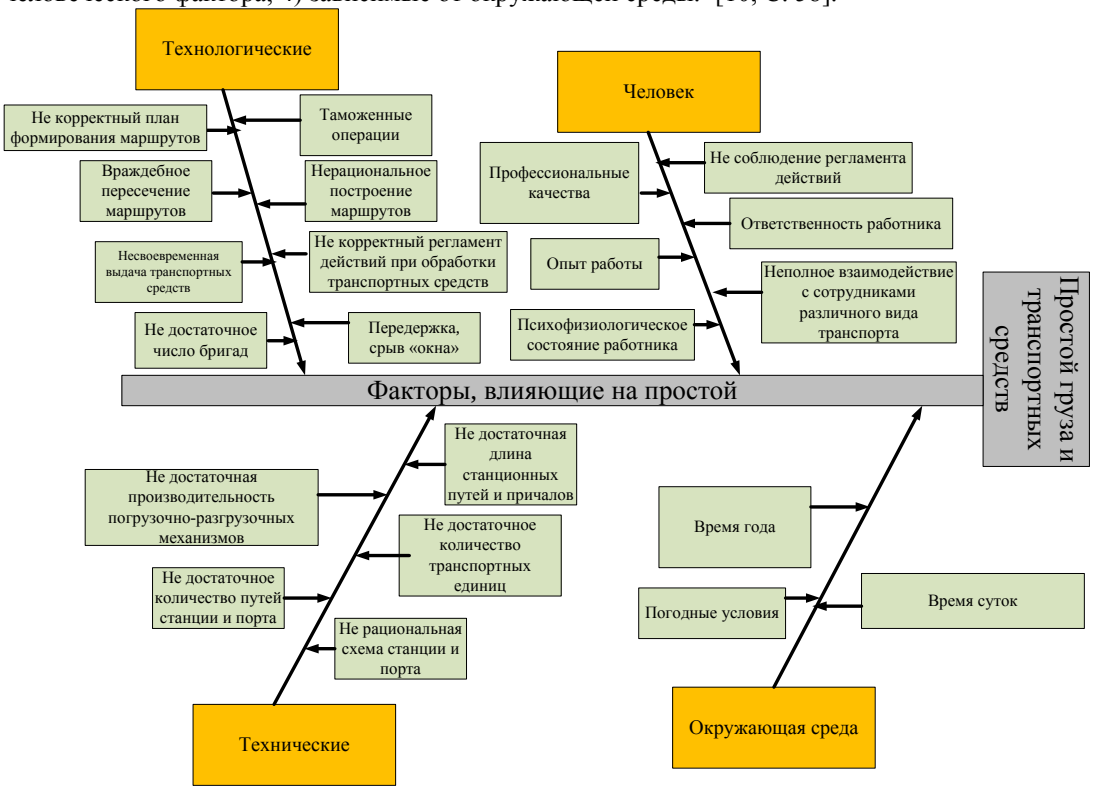


Рис. 1 – Причины простоя груза и транспортных средств в транспортном узле [10, С. 61]

Факторы группы «человек» являются причинами переменного характера и могут быть решены за счет повышения профессионального уровня работников, рационального и эргономического режима труда, наилучшего отбора кадров. Причины, связанные с влиянием окружающей среды независимы от человека и являются естественными факторами. Технические и технологические факторы, возможно, решить за счет реконструкции инфраструктуры, внедрения современных технических средств и рациональной технологии работы [4, С. 120], [10, С.61].

Изменение параметров групп факторов за счет применения различных методик, изложенных в научной и учебной литературе, не всегда может привести к снижению данного простоя в узле. Связанно это, как правило, с тем, что наиболее видимые факторы не являются первостепенными.

Примером данной гипотезы может послужить ситуации на железнодорожной станции. На станции «Н» фактический простой вагона в конце отчетного периода превысил плановый на 2,3 часа. Начальник станции потребовал отчет у работников станции по причинам завышения простоя. Первой причиной данного простоя, по мнению и расчетам работников послужила не рациональная схема станции. Следствием этого является длительная причина выполнения маневровой работы. Работники предложили выполнить реконструкцию некоторых элементов станции. Таким образом, при ликвидации данной причины за счет предложенных методов требуются капитальные вложения, а так же создаются условия для новых факторов, влияющих на не производительный простой вагонов. При детальном анализе работы станции «Н» возможно не потребуется внесение капитальных затрат за счет: разработки усовершенствованной технологии выполнения манёвровой работы, изменения плана формирования поездов, смена специализации путей, снижения человеческого фактора.

Для решения сложившейся проблемы на станции предлагается разработать имитационную модель по определению первостепенного фактора, изменение которого даст наибольший результат. Так же данная модель позволит определить пределы изменения технологических параметров при постоянстве технической инфраструктуры [9, С. 97].

При разработки модели в дальнейшем будут рассмотрены причины только двух групп: технологические и технические. Причины группы окружающей среды не зависимы от человека и изменение их параметров для достижения результата достаточно сложно. Группа человеческого фактора так же исключается, в связи с не возможностью контролировать изменение параметров.

В настоящее время для оценки влияния групп факторов на работу ТУ необходимы качественные и количественные показатели работы, которые можно определить при помощи расчета продолжительности основных операций и построения суточных и контактных графиков. Построение наглядного графика можно назвать процессом творческим, и он не позволяет провести оценку работы ТУ в заданные период времени, например за каждые сутки месяца. Таким образом, для оценки влияния групп на изменение простоя предлагается использовать начальную имитационную модель (НИМ), которая будет являться интеллектуальной транспортной системой [2, С. 25].

Термин «Интеллектуальные транспортные системы» в настоящее время характеризует комплекс интегрированных средств управления движением и перевозками, применяемых для решения всех видов транспортных задач на основе высоких технологий, методов моделирования транспортных процессов, программного обеспечения, организации информационных потоков в реальном режиме времени. Анализ функционирования таких систем показывает, что концепция их развития включает изучение функций существующих систем управления перевозками и движением, оценку степени влияния различных подсистем ИТС на развитие транспортной системы, создание архитектуры системы и согласование стандартов для развития ИТС, как интегрированных систем [8, С. 6].

Начальная имитационная модель является первой стадией создания программного обеспечения для оценки влияния изменения параметров инфраструктуры без построения наглядных контактных графиков работы транспортного узла [5, С.54; 6. С. 5].

Программное обеспечение НИМ разбито на элементы транспортного узла такие, как железнодорожная станция *(JS)*, морской порт *(MP)*, автомобильный пункт *(AP)*. Тогда целевая функция простоя *F(T)* будет иметь вид, представленный в формуле (1):

$$F(t) = \{JS; MP; AP\} \to \min , \tag{1}$$

Каждый элемент ТУ состоит из индивидуальных подсистем временного характера *(t)*, обслуживающих транспортное средство с грузом. Такими подсистемами для каждого вида транспорта являются:

- на железнодорожной станции: парк приема поездов, сортировочные механизмы, сортировочный парк, парк отправления;
- на морском транспорте: парк приема и отправления, парк грузовых операций, причалы;
- на автомобильном транспорте: пункты приема, пункты сдачи, пункты перегрузки [6, С.4].

Следовательно, подсистемы элементов представим как суммарное время нахождения груза и транспортного средства в узле (формула 2):

$$JS = \sum_{j=1}^{n} t_j ; \;\; MP = \sum_{m=1}^{n} t_m ; \;\; AP = \sum_{a=1}^{n} t_a , \tag{2}$$

Каждая подсистема элемента транспортного узла является совокупностью необходимых исходных значений и формул нормативных документации расчета перерабатывающей способности ТУ. Значения и формулы в свою очередь состоят из набора технологических и технических групп факторов представленных на рис. 1.

Для описания процесса определения первостепенного фактора введем условные обозначения технологической группы факторов как *Th и* технической группы – *T*. Таким образом, зависимость простоя (*T*) от двух групп факторов сводится к целевой функции, главной задачей которой будет являться нахождение оптимальных параметров групп факторов для приведения значения простоя к минимуму (формула 3):

$$F(T) = \{Th; T\} \to \min, \quad (3)$$

Параметры групп факторов представляют собой значения переменных X_i - технологической группы и Y_j – технической группы для одного или нескольких видов транспорта (формула 4):

$$Th = \sum_{i=1}^{n} X_i \text{ и } T = \sum_{j=1}^{n} Y_j, \quad (4)$$

Таким образом, функция принимает вид, представленный в формуле (5):

$$F(T) = \left\{ \sum_{i=1}^{n} X_i; \sum_{j=1}^{n} Y_j \right\} \to \min, \quad (5)$$

Условиями ограничения для данного вида целевой функции будет являться изменение, какого либо параметра из любой группы факторов до значения - меньше либо равно максимальному значению резерва мощности транспортного узла при заданных условиях. Таким образом, минимальное время простоя будет достигаться при следующих условиях ограничения, представленные в формулах (6)-(8):

$$\begin{cases} Th_{\min} \le Th \le Th_{\max} \\ T = const \end{cases} \text{ или,} \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_{\min} \le T \le T_{\max} \\ Th = const \end{cases} \text{ или,} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Th_{\min} \le Th \le Th_{\max} \\ T_{\min} \le T \le T_{\max} \end{cases}, \quad (8)$$

Рассмотрим расчет простоя груза в подсистеме парка приема t_j элемента транспортного узла железнодорожной станции *JS*. Переменной X_i технологической группы будет являться единственный параметр - количество бригад (*Б*). Переменные технической группы Y_j являются постоянными. При введении наличного количества бригад и расписания прибытия поездов, НИМ выполняет автоматический расчет потребного количества бригад, а так же отражает изменение величины простоя груза в парке.

Функция подсистемы парка приема будет иметь следующий вид;

при *Б=1* $F(t_j) = \{1;0\} \to 2{,}45 час$;

при *Б=2* $F(t_j) = \{2;0\} \to 1{,}90 час \to \min$.

$$\begin{cases} 1 \le Б_x \le 2 \\ Y = const \end{cases}$$

Единицей имитационного времени модели являются минуты. Так как нахождение вагона на определенном этапе обработки в течение суток разбивается с точностью до минуты, можно посмотреть работу станции в любой промежуток времени [7, С. 55]. Графическое представление изменение параметров подсистемы в НИМ представлены в таблицах 1 и 2. При минимальном значении исходных данных НИМ позволила оценить влияние изменения технологического параметра на простой груза в подсистеме. Аналогично представленного примера НИМ выполняет расчёты для остальных подсистем ТУ.

Таблица 1 – Начальная имитационная модель подсистемы парка прибытия при значении технологической переменной Б=1

Порядковый номер	номер поезда	Состав поезда	время прибытия		Интервал между поездами, час	Средний интервал прибытия, час	Время обработки поезда по прибытию, час	Время занятия бригад	Интервал освобождения бригад	Количество бригад		Простой под обработкой в парке прибытия	Вагоночасы простоя	Средний простой в парке прибытия
			час	мин						Наличное	Потребное			
1	2001	65	0	15	12,58	2,50	1,90	1,63	1,63	1	1	1,90	123,82	**2,45**
2	2002	65	2	20	2,58		1,90	1,63	1,63			1,90	123,82	
3	2003	65	3	30	1,83		1,90	1,63	3,25			3,53	229,47	
4	2004	65	4	15	1,75		1,90	1,63	3,25			3,53	229,47	
5	2005	65	6	45	3,00		1,90	1,63	1,63			1,90	123,82	
6	2006	65	12	20	7,08		1,90	1,63	1,63			1,90	123,82	
6	итого	390											954,22	

Таблица 2 – Начальная имитационная модель подсистемы парка прибытия при значении технологической переменной Б=2

Порядковый номер	номер поезда	Состав поезда	время прибытия		Интервал между поездами, час	Средний интервал прибытия, час	Время обработки поезда по прибытию, час	Время занятия бригад	Интервал освобождения бригад	Количество бригад		Простой под обработкой в парке прибытия	Вагоночасы простоя	Средний простой в парке прибытия
			час	мин						Наличное	Потребное			
1	2001	65	0	15	12,58	2,50	1,90	1,63	1,63	2	1	1,90	123,82	**1,90**
2	2002	65	2	20	2,58		1,90	1,63	1,63			1,90	123,82	
3	2003	65	3	30	1,83		1,90	1,63	1,63			1,90	123,82	
4	2004	65	4	15	1,75		1,90	1,63	1,63			1,90	123,82	
5	2005	65	6	45	3,00		1,90	1,63	1,63			1,90	123,82	
6	2006	65	12	20	7,08		1,90	1,63	1,63			1,90	123,82	
6	итого	390											742,92	

Начальная имитационная модель позволяет:

- оценить влияния изменения технологических и технических параметров на работу транспортного узла;
- сократить время оценивания изменяющихся параметров;
- провести оценку изменения параметров за любой период времени работы транспортного узла;
- позволит оценить экономическую эффективность от принятого технологического или технического решения по увеличению перерабатывающей способности транспортного узла.

Таким образом, начальная имитационная модель является базой для разработки программного обеспечения по расчету простоя груза в пути следования при различных условиях работы транспортных узлов. Данное программное обеспечение будет направленно на участников перевозочного процесса для создания оптимальных логистических условий следования грузопотоков.

Список литературы / References

1. Апатцев В.И. Проблемы оптимизации транспортного производства в железнодорожных узлах [Текст]: Монография РГОТУПС, 2000. - 244с.

2. Голубева Е.В. Статистическое моделирование работы припортовой станции [Текст] / Голубева Е.В., Зубков В.Н., Мамаев Э.А. // Совершенствование технологии железнодорожных перевозок: Международ, межв. сб. научных тр., Ростов-на-Дону, РГУПС, 2004. -С.20-29.

3. Еременко Е. А., Широков А. П. Технология работы припортовой станции с местными вагонами [Текст] // Актуальные вопросы технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Пермь, апрель 2015 г.). — Пермь: Зебра, 2015. — С. 118-122

4. Интеллектуальные технологии и техника в производстве и промышленности [Текст] : Сборник статей по итогам международной научно-практической конференции (Омск, 18 октября 2017). – Стерлитамак: АМИ, 2017. – 152 с.

5. Кельтон, В, Лоу, А. Имитационное моделирование [Текст]. Классика CS. 3-е изд. – СПб.: Питер: Киев: Издательская группа BHV, 2004 – 847 с.: ил.

6. Козлов П. А. Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов [Текст] / П. А. Козлов, В. Ю. Пермикин, В. С. Колокольников // Транспорт Урала. — 2013. — № 2 (37). — С. 3–6.

7. Король Р. Г. Имитационное моделирование работы припортовой железнодорожной станции с вероятностно-статистическим подходом к изменению параметров поступающего вагонопотока [Текст] / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Транспорт Урала. — 2014. — № 3 (42). — С. 53–58.

8. Кочерга В.Г. Формы интеграции интеллектуальных транспортных систем [Текст] // «Строительство 2001». Материалы международной НПК. - Ростовн/Д: РГСУ, 2001. С. 58-60.

9. Логистические транспортно-грузовые системы: Учебник для студ. высш. учеб, заведений [Текст]/ В.И.Апатцев, С.Б.Левин, В.М.Николашин и др.; Под ред. В.М.Николашина. - М.: Издательский центр «Академия», 2003. - 304 с.

10. Ташлыкова А.И. «О простое местного вагона на припортовой станции» [Текст] // Эффективные исследования современности: Сборник статей 32 международной научной конференции. – Москва: ЕНО, 2017. – 58 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Apatcev V.I. Problemy optimizacii transportnogo proizvodstva v zheleznodorozhnyh uzlah [Problems of optimization of transport production in railway junctions]: Monografija RGOTUPS [Monograph RGOTUPS], 2000. - 244s.

2. Golubeva E.V. Statisticheskoe modelirovanie raboty priportovoj stancii [Statistical modeling of the operation of a near-shore station] / Golubeva EV, Zubkov VN, Mamaev EA // Sovershenstvovanie tehnologii zheleznodorozhnyh perevozok: Mezhdunarod, mezhv. sb. nauchnyh tr., Rostov-na-Donu, RGUPS [Perfection of the technology of rail transportation: International, interv. Sat. Scientific Tr., Rostov-on-Don, RGUPS], 2004.-C.20-29.

3. Eremenko E. A., Shirokov A. P. Tehnologija raboty priportovoj stancii s mestnymi vagonami [The technology of operation of the port station with local cars] // Eremenko E. A., Shirokov A. P. Tehnologija raboty priportovoj stancii s

mestnymi vagonami [Actual questions of engineering science: materials III Intern. sci. Conf. (Perm, April 2015). - Perm: Zebra], 2015. - P. 118-122

4. Intellektual'nye tehnologii i tehnika v proizvodstve i promyshlennosti [Intellectual technologies and technology in production and industry]: Sbornik statej po itogam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (Omsk, 18 oktjabrja 2017). – Sterlitamak: AMI [Collected papers on the results of the international scientific and practical conference (Omsk, October 18, 2017). - Sterlitamak: AMI], 2017. - 152 p.

5. Kel'ton, V, Lou, A. Imitacionnoe modelirovanie/ Klassika CS. 3-e izd. – SPb.: Piter: Kiev: Izdatel'skaja gruppa BHV [Simulation modeling]. [Classics CS. 3rd ed. - St. Petersburg: Peter: Kiev: Publishing Group BHV], 2004 - 847 c .: ill.

6. Kozlov P. A. Avtomatizirovannoe postroenie imitacionnyh modelej krupnyh transportnyh obektov [Automated construction of simulation models of large transport objects] / PA Kozlov, V. Yu. Permikin, V. S. Kolokolnikov // Transport Urala [Transport of the Urals]. - 2013. - No. 2 (37). - P. 3-6.

7. Korol' R. G. Imitacionnoe modelirovanie raboty priportovoj zheleznodorozhnoj stancii s verojatnostno-statisticheskim podhodom k izmeneniju parametrov postupajushhego vagonopotoka [Simulation modeling of the operation of a railway station near a railway station with a probability-statistical approach to changing the parameters of the incoming car-stream.] / RG Korol, AS Balalaev // Transport Urala [Transport of the Urals]. - 2014. - No. 3 (42). - P. 53-58.

8. Kocherga V.G. Formy integracii intellektual'nyh transportnyh sistem [Forms of integration of intelligent transport systems] // «Stroitel'stvo 2001». Materialy mezhdunarodnoj NPK. - Rostovn/D: RGSU [«Construction 2001». Proceedings of the International NPC. - Rostov / D: RSUU], 2001. P. 58-60.

9. Logisticheskie transportno-gruzovye sistemy: Uchebnik dlja stud. vyssh. ucheb, zavedenij [Logistical transport-cargo systems: the Textbook for the stud. supreme. textbooks, institutions] / V.I. Apatsev, S.B. Levin, VMNikolashin and others; Ed. VMNikolashin. - Moscow: Izdatel'skij centr «Akademija» [Publishing Center «Academy»], 2003. - 304 p.

10. Tashlykova A.I. «O prostoe mestnogo vagona na priportovoj stancii» [On the Plainty of a Local Car at a Port Station] // Jeffektivnye issledovanija sovremennosti: Sbornik statej 32 mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. – Moskva: ENO [Effective Studies of the Present: A Collection of Articles of 32 International Scientific Conference. - Moscow: EO], 2017. - 58 p.

DOI: https://doi.org/

Тихомиров А. А.[1], Соболев Н.В.[2], Прахова Т.А.[3]
[1]ORCID: 0000-0003-2184-6577 доцент, [2]ORCID: 0000-0002-3803-7153, магистрант,
[3]ORCID: 0000-0001-7540-3371, бакалавр.
Петрозаводский Государственный Университет.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА НА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Аннотация

В статье изучается возможность построения релейной защиты на переходных процессах. В статье рассматривается расчет переходного процесса однофазного короткого замыкания линии Л-398 «Мончегорск» и возможность использования адаптивного терминала релейной защиты. Метод симметричных составляющих используется для расчета ассиметричного короткого замыкания линии Л-398 «Мончегорск». Адаптивный терминал релейной защиты предлагается использовать при реконструкции линии Л-398 «Мончегорск» на Кольской атомной электростанции.

Ключевые слова: адаптивная релейная защита, переходный процесс, короткое замыкание.

Tikhomirov A. A.[1], Sobolev N.V.[2], Prahova T.A.[3]
[1]ORCID: 0000-0003-2184-6577 associate professor, [2]ORCID: 0000-0002-3803-7153, Master's degree student,
[3]ORCID: 0000-0001-7540-3371, student.
Petrozavodsk State University.

RELAY PROTECTION IN TRANSIENT PROCESSES

Abstract

The paper studies the possibility of building relay protection in transient processes. The article considers the calculation of transient processes short-circuit currents for line Л-398 "Monchegorsk" and the possibility of using an adaptive relay protection terminal. A method of symmetrical components is used to calculate the assymetrical short circuit of line Л-398 "Monchegorsk". Adaptive relay protection terminal is proposed to be used in designing (engineering) reconstruction of Kolskaya Atomic Power Station Л-398 "Monchegorsk".

Key words: adoptive relay protection, transient processes, short circuit.

Introduction

In order to protect energy system objects from malfunctions, specifically from short circuit currents, relay protection is used. For reliable protection from short circuit current relay protection has to meet 4 requirements [1, P.10]:

- Selective ability (the ability to cut off only the damaged area)
- Fast response (time during which protection identifies short circuit and cuts off the damaged area)
- Reliability (the ability to response correctly to a malfunction)
- Sensitivity (the ability to respond correctly to all types of malfunctions)

The most important, as well as the most difficult to implement are the requirements of fast response and reliability. The protection is considered unreliable if it performed incorrectly in response to a short circuit or there was a fault in protection operation. This is possible in cases of short circuits that are hard to register, such as non-metallic short circuits and other

malfunctions, the current of which does not exceed the set point of relay protection. Apart from that, in case the overall error of a transformer does not exceed 10%, relay protection can respond incorrectly, thus causing great economic loss by damaging electrical equipment, cutting off consumers and causing business interruption.

The idea of building relay protection in transient processes is studied in many scientific articles and literature [2, P. 15]. One of the main ideas in building the protection is using the Fourier algorithm for dividing input signal into orthogonal components and their further analysis [3, P. 81]. Using this algorithm allows to "teach" relay protection to analyze and respond to transient processes of short circuits [4, P 21]. However, Fourier division in relay protection has a limited implementation due to the difficulty in building such protections.

Theoretical part

This article considers the possibility of applying adaptive terminal of relay protection using transient processes of malfunctions in electrical power system in order to enhance reliability and fast response of the protection in simplified representation.[5, P. 107] Considered adaptive terminal of relay protection uses the algorithm for searching the value of input signal and determining its first and second derivative for registration and analysis of a transient process. Dynamics of a transient process and type of electric power system malfunction is defined by the first and the second values of derivatives of peak values. Using this approach allows to avoid using Fourier transform and as a result simplify mathematical calculations. However, such simplification has an impact on protection fast response due to its linkage to peak values.

Terminal scheme is presented in picture 1.

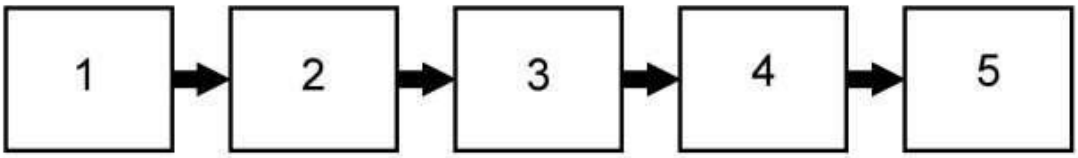


Fig. 1 – Scheme of adaptive terminal of relay protection

1) Current and potential transformer
2) Measuring element
3) Block of dynamic analysis and comparison
4) Executive element
5) High-voltage circuit-breaker

An input signal is sent from the current and potential transformer 1 to the driving point of the measuring element 2 of the terminal, which goes through analogue-digital processing and arrives at the block of dynamic analysis and comparison 3, where the peak values of voltage and current are:

$$U_A = (U_{\max} - U_{\min})/2 \tag{1}$$

Where $U_{\max}$ is the maximum voltage value in the specified time period, $U_{\min}$ – minimum voltage value in the specified time period.

$$I_A = (I_{\max} - I_{\min})/2; \tag{2}$$

Where $I_{\max}$ is the maximum voltage value in the specified time period, $I_{\min}$ – minimum voltage value in the specified time period.

After calculating peak values of voltage and current their derivatives are determined:

The first and second voltage derivatives relative to time with defined time interval:

$$U'(t) = \frac{\mathrm{dU(t)}}{\mathrm{dt}}; \tag{3}$$

$$U''(t) = \frac{d^2U(t)}{d^2t}; \tag{4}$$

The first and second current derivatives relative to time with the same defined time interval:

$$I'(t) = \frac{\mathrm{dI}}{\mathrm{dt}}; \tag{5}$$

$$I''(t) = \frac{d^2I}{d^2t}; \tag{6}$$

Values (1)-(6) are compared in pairs with the same data for malfunctions programmed into the block of dynamic analysis and comparison 3 beforehand, which are determined by modelling malfunctions and experimental data received by registration of the abovementioned signal parameters of faults that have already occurred.

When values (1) or (2) are the same with the values set in the terminal's memory, a signal is generated to the executive element 4, that form a tripping signal for high-voltage circuit-breaker 5. If values (1) or (5) are not reached, but there is an overlap in at least one of values (3)-(6) in time with the data in the memory of the terminal for malfunctions, this value is tracked over time. In case of further overlapping during a specified time period with the data for a malfunction within the determined measurement accuracy, a signal for tripping is produced for a high-voltage circuit-breaker with predetermined time delay, on the basis of a certain type of a malfunction [6, P. 3].

Practical part

We will calculate the transient process in case of a single-phase short-circuit for line Л-398 “Monchegorsk” [7, P.10]. In case of asymmetrical short circuit currents and voltage are different in different phases. Let us assume that a short circuit has appeared in phase A. A method of symmetrical components is used to calculate the assymetrical short circuit [8, P.57]. The main point of the method is that any asymmetrical mode in a circuit can be divided into symmetrical components: direct, inverse and zero sequences. Direct sequence of phase A is equal in absolute value to direct sequence of phase B and is equal in absolute value to direct sequence of phase C. The angle between vectors of direct sequence is 120^0. The same rule applies to the components of the inverse sequence. Vectors of the zero sequence are equal, but they are parallel to each other. To calculate the asymmetrical mode it is essential to draw out an equivalent circuit for each of the sequences, calculate their aperiodic component of short-circuit current. In case of a single-phase short-circuit of phase A, the current of phase B and C is equal to zero. The voltage of phase A is equal to zero, and voltage of phase B and C is calculated using a formula:

$$\mathrm{U}_{\text{к}B} = [(\mathrm{a}^2 - \mathrm{a}) * \mathrm{Z}_2 + (\mathrm{a}^2 - 1) * \mathrm{Z}_0] * \mathrm{I}_{\mathrm{KA1}}$$

$$\mathrm{U}_{\text{к}C} = [(\mathrm{a} - \mathrm{a}^2) * \mathrm{Z}_2 + (\mathrm{a} - 1) * \mathrm{Z}_0] * \mathrm{I}_{\mathrm{KA1}}$$

Where Z_2 and Z_0 – resistances to inverse and zero sequence, I_{KA1} – short-circuit current in phase A, $\mathrm{a} = \mathrm{e}^{j120^\circ} = -0{,}5 + \mathrm{j}0{,}5\sqrt{3}$, $\mathrm{a}^2 = \mathrm{e}^{j240^\circ} = -0{,}5 - \mathrm{j}0{,}5\sqrt{3}$

To calculate aperiodic short-circuit current of the direct sequence of phase A an equivalent circuit is drawn out (picture 2)

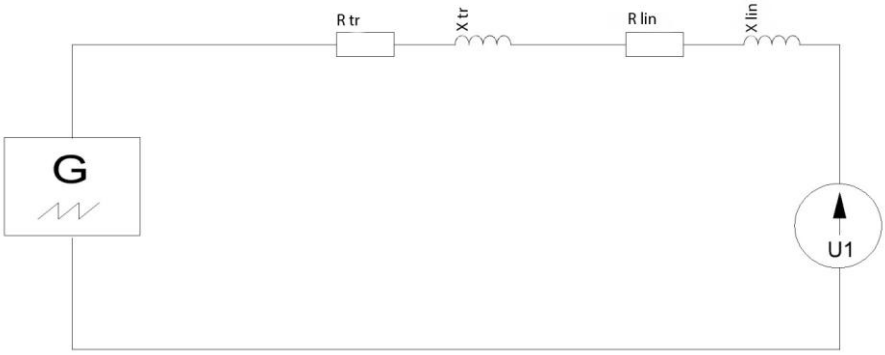


Fig. 2 – Equivalent circuit of direct sequence

By Ohm’s law: $U_1 = I(R_{\mathrm{tr}} + R_{\mathrm{lin}}) + (L_{\mathrm{tr}} + L_{\mathrm{lin}})\frac{dI}{dt}$ (7)

We solve the obtained differential equation (7) using Laplace transform,

We obtain:

$$0 = I(R_{\mathrm{tr}} + R_{\mathrm{lin}}) + (L_{\mathrm{tr}} + L_{\mathrm{lin}})\frac{dI}{dt} \quad (8)$$

We make a replacement $p = \frac{d}{dt}$

Inserting p into (2) we obtain:

$$0 = I(R_{\mathrm{tr}} + R_{\mathrm{lin}}) + (L_{\mathrm{tr}} + L_{\mathrm{lin}}) * p * I$$

$$p = \frac{-(R_{\mathrm{tr}} + R_{\mathrm{lin}})}{L_{\mathrm{tr}} + L_{\mathrm{lin}}}$$

Aperiodic component equals to:

$$\mathrm{I} = \mathrm{Ae}^{\frac{-(\mathrm{R_{tr}}+\mathrm{R_{lin}})}{\mathrm{L_{tr}}+\mathrm{L_{lin}}}*\mathrm{t}} \quad (9)$$

Where by Ohm’s law A equals to

$$\mathrm{A} = \frac{\mathrm{U1}*\sin\omega\mathrm{t}}{(\mathrm{R_{tr}}+\mathrm{R_{lin}})+\mathrm{j}\omega(\mathrm{L_{tr}}+\mathrm{L_{lin}})}, \quad T_{\mathrm{a}} = \frac{-(\mathrm{R_{tr}}+\mathrm{R_{lin}})}{\mathrm{L_{tr}}+\mathrm{L_{lin}}} = \frac{\mathrm{X_c}}{\omega R_c} = T_{\mathrm{a}}$$

By inserting A in equation (2) we obtain:

$$\mathrm{I} = \frac{(\mathrm{E}-\mathrm{U1})*\sin\omega\mathrm{t}}{(\mathrm{R_{tr}}+\mathrm{R_{lin}})+\mathrm{j}\omega(\mathrm{L_{tr}}+\mathrm{L_{lin}})} * \mathrm{e}^{\frac{-(\mathrm{R_{tr}}+\mathrm{R_{lin}})}{\mathrm{L_{tr}}+\mathrm{L_{lin}}}*t} \quad (10)$$

Then the full-load current of the direct sequence equals to:

$$\mathrm{I}_! = \frac{(\mathrm{E}-\mathrm{U1})*\sin\omega\mathrm{t}}{(\mathrm{R_{tr}}+\mathrm{R_{lin}})+\mathrm{j}\omega(\mathrm{L_{tr}}+\mathrm{L_{lin}})} * \mathrm{e}^{\frac{-(\mathrm{R_{tr}}+\mathrm{R_{lin}})}{\mathrm{L_{tr}}+\mathrm{L_{lin}}}*\mathrm{t}} + I_{K1} * \sin\omega\mathrm{t} \quad (11)$$

Where $I_{K1} = \frac{\mathrm{E}}{\sqrt{3}*\mathrm{Z_1}+\mathrm{Z_2}+\mathrm{Z_0}}$, $\mathrm{Z_1} + \mathrm{Z_2} + \mathrm{Z_0}$ – resistances of direct, inverse and zero sequence.

We find the resistance of direct, inverse and zero sequences. Source data for calculations are given in [10, P. 35]. Resistance of direct sequence consist of transformer’s, generator’s and line’s resistances. Then the overall resistance of the direct sequence:

$$\mathrm{Z_1} = \sqrt{(\mathrm{R_{tr1}} + \mathrm{R_{lin1}})^2 + (X_{\mathrm{tr1}} + X_{\mathrm{lin1}})^2} = \sqrt{(0{,}012)^2 + (0{,}18)^2} = 0{,}37\ \mathrm{Ohm}$$

Resistance of inverse sequence consists of transformer’s, line’s and generator’s resistances. Then the overall resistance of the inverse sequence:

$$\mathrm{Z_2} = \sqrt{(\mathrm{R_{lin2}})^2 + (X_{\mathrm{lin2}} + X_{\mathrm{gen2}})^2} = \sqrt{(0{,}012)^2 + (0{,}27)^2} = 0{,}27\ \mathrm{Ohm}$$

Where generator's resistance is taken from the generator's passport, and line's and transformer's resistance is equal to the resistance of direct sequence of line and transformer.

Resistance of zero sequence consists of transformer's, line's and generator's resistances. Then the overall resistance of inverse sequence:

$$Z_0 = \sqrt{(R_{tr0} + R_{lin0})^2 + (X_{tr0} + X_{lin0} + X_{gen0})^2} = 0{,}42 \text{ Ohm}$$

Where generator's resistance is taken from the generator's passport, and line's resistance is equal to $3.5*X_{lin1}$, transformer's resistance is equal to the resistance of direct sequence of the transformer.

We find I_{K1}:

$$I_{K1} = \frac{E}{\sqrt{3} * Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{15{,}75}{0{,}37 + 0{,}27 + 0{,}42} = 9 \text{ kA}$$

We bring the current to 330 kW side. Then current I_{K1} = 410 A

Voltage of direct sequence equals to:

$$U_1 = E - I_{K1} * Z_1 = 15{,}75 - 9 * 0{,}37 = 12{,}42 \text{ kW}$$

To calculate aperiodic short-circuit current of the inverse sequence of phase A an equivalent circuit is drawn out (Picture 3)

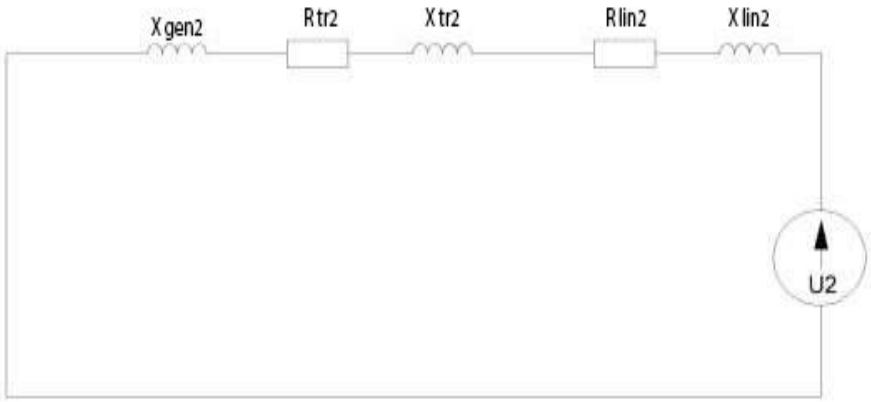


Fig. 3 – Equivalent circuit for inverse sequence

Voltage of inverse sequence equals to [9, P. 90]:

$U_2 = I_{K1} * Z_2 = 9 * 0{,}27 = 2{,}42$ kW

To calculate aperiodic short-circuit current of the zero sequence of phase A an equivalent circuit is drawn out (Picture 4)

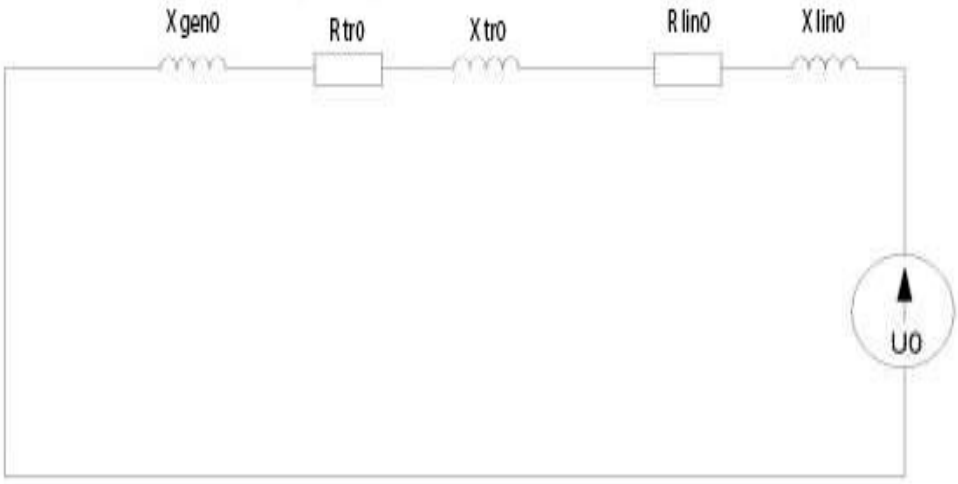


Fig. 4 – Equivalent circuit for zero sequence

Voltage of zero sequence equals to:

$U_2 = I_{K1} * Z_2 = 9 * 0{,}4 = 3{,}6$ kW

$I_{K(1)} = 3 * I_{K1} = 1230$ A

Graph of the transient process of the single-phase short-circuit is given in picture 5.

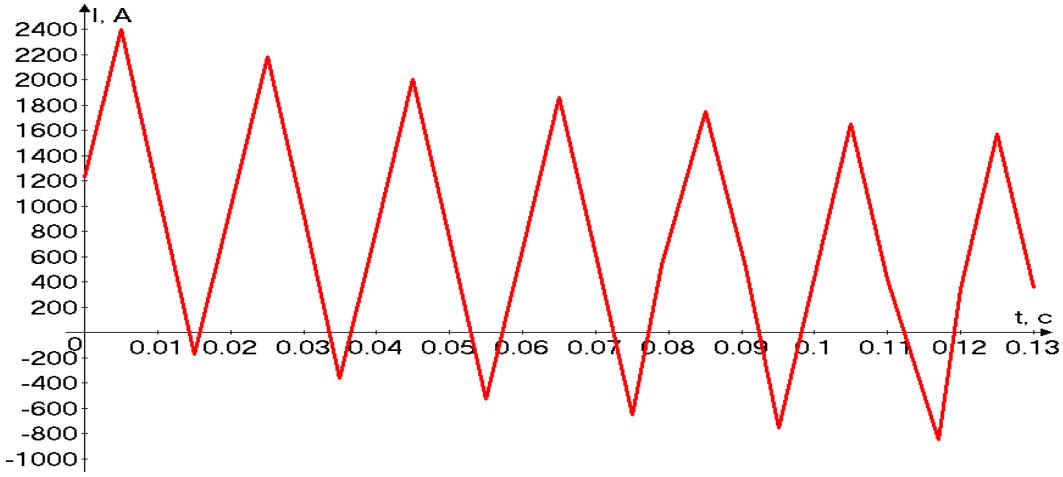


Fig. 5 – Transient process in case of single-phase short-circuit

According to the obtained graph an envelope of the process was plotted. The envelope is given in picture 6.

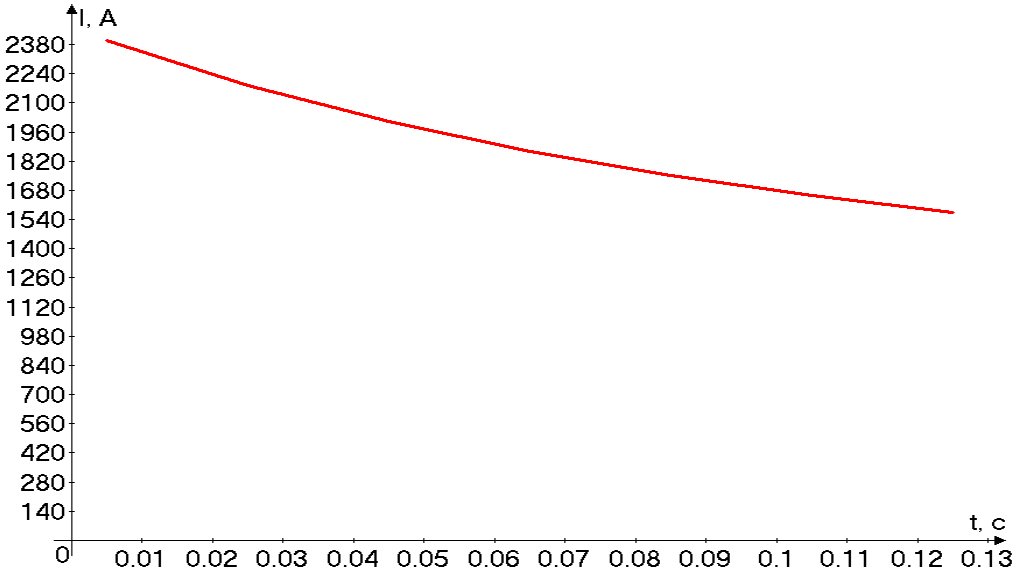


Fig. 6 – Graph of the envelope of the transient process in case of single-phase short-circuit

Conclusion

Using such algorithm allows to implement relay protection terminal for defining dynamic development of electric power system's malfunctions.

Using such approach allows to build a system of adaptive relay protection without using complicated algorithms. Adaptive relay protection terminal is proposed to be used in designing (engineering) reconstruction of Kolskaya Atomic Power Station Л-398 "Monchegorsk". The terminal is proposed to be set for responding by the envelope of the transient process of single-phase short-circuit. Using envelopes of transient processes in adaptive terminal of relay protection on the line of Kolskaya Atomic power Station Л-398 allows to indicate the type of short circuit and enhance the reliability of the response of relay protection and the dependence of the current's surpassing of the short-circuit's plant is reduced.

Список литературы / References

1. Булычев А.В. Релейная защита в электрических системах / Булычев А.В., Наволочный А.А., Поздеев Н.Д. – Вологда, ВоГТУ, 2007. – 154 с.
2. Лямец Ю.Я. Обучающиеся релейная защита / Лямец Ю.А., Антонов В.И., Нудельман Г.С. // Электричество – 2012 - № 2 – с. 15-19.
3. Лямец Ю.Я. Анализ частотной зависимости характеристик измерительных органов, использующие ортогональные составляющие электрических велечин / Лямец Ю.Я., Ильин В.А. // Электромеханика – 1987 - №10 – с. 81-85.
4. Лямец Ю.Я. Оценивание параметров как алгоритм релейной защиты / Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С. // Электричество – 199- - №2 – с. 21-24.
5. Тихомиров А.А. Использование переходного режима асинхронного двигателя для построения токовой защиты / Тихомиров А.А., Соболев Н.В., Изотов Ю.А. // Международный научно-исследовательский журнал – 2015 - №11 – с. 107-109.
6. Пат. 162321 Российская Федерация, МПК H02H 3/40 H 02 J 9/00 Система терминалов релейной защиты / Тихомиров А.А., Соболев Н.В.; заявитель и патентообладатель Петрозаводский Государственный Университет - № 2015146341/07; заявл. 27.10.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. №16. – 6 с.

7. Паспорт линии Л-398 “Мончегорск”, Кольская Атомная Электростанция, Росатом, 2001. – с.10.
8. Лямец Ю.Я. К анализу переходных процессов в трехфазных цепях методом симметричных составляющих / Лямец Ю.Я. // Электричество – 1988 - №12 – с.57-60.
9. Лямец Ю.Я. Обратная последовательность в трехфазной коммутирующей системе / Лямец Ю.Я. // Электричество – 1990 - №9 – с.88-91.
10. Бобров А.Е. Электромагнитные переходные процессы в энергосистеме / Бобров А.Е., Дяков А.М., Зорин В.Б. – Красноярск : СФУ, 2009. – 156 с.

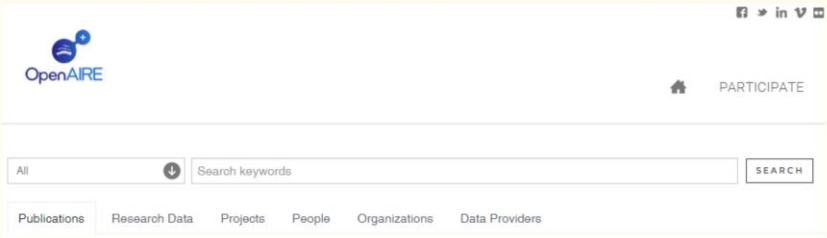
Список литературы на английском языке/ References

1. Bylichev A.V. Releynaia zachita elektricheskih sistem [relay protection of electrical systems] / Bylichev A.V. Navolochnii A.A. Pozdeev N.D. – Vologda, VSTU, 2007. - 154 p. [in Russian]
2. Liamets Iu. Ia. Obuchaychiesya releynaya zachita [Learning Relay Protection] / Liamets Iu. Ia. Antonov V.I., Nudelman G.S. // Elektrichestvo [Electricity. No. 2]. – 2012 - № 2 – P. 15-19 [in Russian]
3. Liamets Iu. Ia. Analiz chastotnoy zavisimosti kharakteristik izmeritel'nykh organov, ispol'zuyushchikh ortogonal'nyye sostavlyayushchiye elektricheskikh velichin [Analysis of frequency dependence of characteristics of measuring organs using orthogonal elements of electrical values] / Liamets Iu. Ia., Ilin V.A. // Elektromehanika [Electromechanics. № 10] – 1987 - №10 – P. 81-85 [in Russian]
4. Liamets Iu. Ia. Osenivanie parametrov kak algoritm releynoy zachiti [Parameter estimation as relay protection algorithm]. / Liamets Iu. Ia., Antonov V.I., Nudelman G.S. // Elektrichestvo [Electricity.№. 2]. – 1990 - № 2 – P. 21-24 [in Russian]
5. Tikhomirov A.A. Ispolsovanie perehodnogo rezjima asinhronogo dvigatelya dlya postroeniya tokovoi releinoi zachiti [The application of transition mode of asynchronous motor for current protective relay formation] / Tikhomorov A.A., Sobolev N.V., Izotov U.A. // Mejdunarodniy naucho-isledovatelskiy jurnal [International research journal. № 11]. – 2015 - №11 – P. 107-109. [in Russian]
6. Pat. 162321 Russian Federation, MPK H02H 3/40 H 02 J 9/00. Sistema terminalov releynoy zachity [relay protection terminal] / Tikhomorov A.A., Sobolev N.V.; the applicant and the patentee Petrozavodsk State University. - № 2015146341/07; appl. 27.10.2015; publ. 10.06.2016, Bul. Number 16. – 6 p.
7. Pasport linii L-398 “Monchegorsk” [Passport of the line Л-398 “Monchegorsk”] Kolskya Nuclear Power Station, Rosatom, 2001. – p.10.
8. Liamets Iu. Ia. K analizu perekhodnykh protsessov v trekhfaznykh tsepyakh metodom simmetrichnykh sostavlyayushchikh [To the analysis of transient processes in three-phase circuits by the method of symmetric components] / Liamets Iu. Ia. // Elektrichestvo [Electricity. No. 12]. – 1988 - № 12 – P. 57-60 [in Russian]
9. Liamets Iu. Ia. Obratnaya posledovatel'nost' v trekhfaznoy kommutiruyushchey sisteme [The reverse sequence in three-phase switching system] / Liamets Iu. Ia. // Elektrichestvo [Electricity. No. 9]. – 1990 - № 9 – P. 88-91 [in Russian]
10. Bobrov A.E. Elektromagnitnie perehodnie prosesi v energosisteme [Electromagnetic transient processes in electric power systems] / Bobrov A.E., Diakov A.M., Zorin V.B. – Krasnoyarsk : IPK SFU, 2009. – 156 p. [in Russian]

*«Международный научно-исследовательский журнал» включен в систему **OpenAIRE.***

***OpenAIRE** — европейская поисковая система по академическим материалам открытого доступа. Один из главнейших репозиториев научной информации в Европейском Союзе. Данная база позволяет увеличить цитируемость Ваших материалов в Европе.*

OpenAIRE
Open Access Infrastructure for Research in Europe



DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.117

Уразбахтин Р.Р.[1], Вавилов В.Е.[2]
[1]Студент, , [2]старший преподаватель кафедры ‘лектромеханики,
Уфимский государственный авиационный технический университет

МОДУЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ СО СФЕРИЧЕСКИМ ИНДУКЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Аннотация

В статье рассмотрены существующие варианты реализации технического зрения, применяющиеся для сложных медицинских операций с использованием эндоскопического оборудования, для управления производственными станками, машинами и летательными аппаратами. Выявлены недостатки существующих систем технического зрения. Далее в статье авторами предлагается новый вариант реализации технического зрения – модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем, в котором отсутствуют выявленные у существующих систем технического зрения недостатки. Описаны устройство модуля технического зрения со сферическим индукционным двигателем и принцип работы модуля технического зрения со сферическим индукционным двигателем.

Ключевые слова: техническое зрение, недостатки существующих систем технического зрения, сферический индукционный двигатель, модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем, применение модуля технического зрения со сферическим индукционным двигателем.

Urazbakhtin R.R.[1], Vavilov V.E.[2]
[1]Student, Ufa State Aviation Technical University, [2]Senior lecturer of the department of electromechanics,
Ufa State Aviation Technical University

MODULE OF THE TECHNICAL VISION WITH A SPHERICAL INDUCTION MOTOR

Abstract

The article deals with the existing implementations of technical vision, which are used for the medical operations with usage of endoscopic equipment, control industrial machines, cars and flying vehicles. The shortcomings of the existing systems of technical vision are revealed. In the article authors propose a new realization of the technical vision - module of the technical vision with a spherical induction motor in which there is no identified from existing technical vision systems deficiencies. The module of the technical vision with a spherical induction motor and the operating principle of module of the technical vision with a spherical induction motor are described.

Keywords: technical vision, shortcomings of existing systems of the technical vision, spherical induction motor, module of the technical vision with a spherical induction motor, usage of a module of the technical vision with a spherical induction motor.

На сегодняшний день актуальна проблема создания устройства для восприятия визуальной информации об окружающей среде, обработки и анализа изображений рабочих сцен с целью решения задачи распознавания образов. Обработка визуальной информации, как в живых, так и в технических системах заключается в получении некоторого представления сцены – ее изображения и формирования последующего описания. Существенной особенностью систем данного типа является необходимость формирования объемного изображения объекта. Вообще говоря, поверхность любого реального объекта является сложной и содержит как выпуклые, так и вогнутые участки. При анализе таких объектов необходимо бесконечное множество направлений съемки. Это возможно реализовать, если систему технического зрения оснастить сферическим индукционным двигателем, который будет перемещать видеокамеру или приемник излучения системы технического зрения под необходимыми углами. Такие устройства позволят, например, роботам, машинам и летательным аппаратам выполнять определенные действия и задачи без вмешательства человека. Система технического зрения может применяться на производстве (для управления станком или для контроля качества продукции) и в области медицины (для проведения сложных операций с применением эндоскопического оборудования). К сожалению, известные в настоящее время системы технического зрения обладают весомыми недостатками. Рассмотрим систему, которая применяется в медицине при проведении операций.

Эндоскопическое устройство для наблюдения полостей глубоких ран с помощью видеосистемы при проведении операций имеет жесткий корпус. Внутри корпуса размещен информационный канал, имеющий систему линз, окуляр и объектив. Перед объективом установлена поворотная призма, соединенная с механизмом изменения положения призмы. Устройство имеет также систему изменения масштаба изображения, соединенную с окуляром. Через наглазник устройство подсоединяется к видеосистеме [1].

Очевидно, что недостатками эндоскопического устройства для наблюдения полостей глубоких ран являются невысокая скорость выполнения заданных команд в связи с наличием сложной системы линз и сложным путем передачи информации до системы обработки этой информации, низкая надежность системы в связи с хрупкостью сложной оптической системы линз.

Известно, что для управления движением роботов применяется устройство для управления движением мобильных технологических машин и роботов.

Устройство для управления движением мобильных технологических машин и роботов содержит фотоэлектронный блок определения координат положения мобильной технологической машины или робота относительно заданного положения. Также устройство содержит блок управления исполнительными механизмами и лазерный передатчик. Устройство дополнительно снабжено нейросетевым блоком обработки информации, процессором обработки изображения и поворотным блоком. На поворотном блоке в свою очередь установлены видеокамера, осветитель и лазерный дальномер [2].

Недостатками устройства для управления движением мобильных технологических машин и роботов являются большой вес системы в целом в связи использованием поворотного блока для установки видеокамеры, а также

небольшая скорость выполнения заданных команд в связи с тем, что поворотный блок видеокамеры выполняет движения по прямолинейной траектории в горизонтальном или вертикальном направлении.

Также стоит отметить устройство, которое может применяться в системах наведения.

Оптико-электронная система зенитного ракетного комплекса содержит оптический пост. Оптический пост состоит из: несущей стойки, основания с поддоном, приводов с исполнительными механизмами наведения по вертикали и горизонтали и блоком управления. Блок управления содержит тепловизионный прибор с телеавтоматом и инфракрасный пеленгатор, состоящий из оптико-электронного датчика и блока выделения координат. Устройство также содержит: передатчик команд с антенной, подвижную и неподвижную ветви волноводной системы, гироскопический датчик углов и кабельные сборки с герметичными выходами к разъемам. Причем исполнительные механизмы приводов наведения оптического поста выполнены на бесконтактных моментных двигателях [3].

Очевидно, что основным недостатком описанной системы является низкая скорость выполнения заданных команд. Это обусловлено тем, что движения считывающего информацию устройства совершаются по горизонтали и вертикали по отдельности за счет двух различных приводов. По этой же причине у описанной системы большая масса.

Обобщая выше изложенное, следует отметить, что основными недостатками существующих устройств являются большая масса, низкая надежность и невысокая скорость выполнения команд. Поэтому актуально создание системы, не обладающей перечисленными недостатками.

Остановимся также на том, что для предлагаемого модуля технического зрения со сферическим индукционным двигателем наиболее подходящим устройством для получения информации является видеокамера. Видеокамера в настоящее время обладает невысокой стоимостью по сравнению, например, с лидарами (лидары также могут применяться в системах технического зрения). Преимуществом лидара является то, что можно получить информацию о местности в большом радиусе от самого лидара. С помощью лидара можно получить информацию о расстоянии до объекта, а также форме, размерах и расположении объекта в пространстве. Стоит отметить, что информация, получаемая с лидара, записывается в массив, элементы которого представляют собой координаты каждой точки анализируемого пространства. Этот факт осложняет дальнейшую обработку полученной информации. Более того, современные лидары довольно хрупкие и ненадежные. Преимуществами видеокамеры перед лидаром является то, что с ее помощью, во-первых, можно более точно и быстро отслеживать движущиеся объекты, а во-вторых, с помощью видеокамеры можно получить информацию о цвете объекта. Недостатком видеокамеры является то, что при использовании одной видеокамеры возникает погрешность при определении расстояния от видеокамеры до объекта. Также возможны ситуации, когда при использовании модуля технического зрения, например, на производстве оператору понадобится получить изображение происходящего процесса. С помощью лидара достичь этого не возможно.

Увеличение быстродействия системы, повышение ее надежности и снижение массы может достигаться за счет применения вместо приводов, выполняющих движения по горизонтали и вертикали сферического индукционного двигателя.

Преимущество применения сферического индукционного двигателя заключается в том, что его движения не ограничены только перемещениями по горизонтали и вертикали. Это позволит увеличить размеры пространства, которое может наблюдаться за счет системы технического зрения с применением такого двигателя. Двигатель, применение которого возможно, в том числе, в системах технического зрения, подробно описан в статье [4].

Авторами предлагается модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем. На рис. 1 представлен модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем.

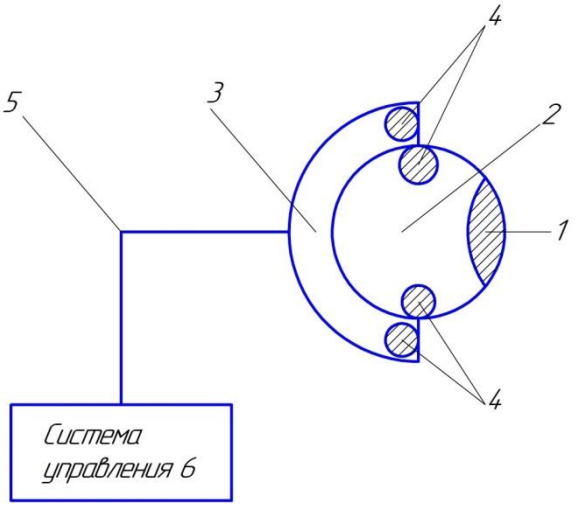


Рис. 1 – модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем
1 – видеокамера, 2 – ротор, 3 – статор, 4 – пары датчиков положения ротора, 5 – соединительный провод, 6 – система управления

Модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем обладает повышенными надежностью и быстродействием, меньшей массой, возможностью осуществления поворота видеокамеры на необходимый угол. Каждое из преимуществ предлагаемого устройства объясняется следующим. Повышенная надежность связана с применением одного сферического индукционного двигателя вместо двух приводов, в системах, описанных в работах [2] и [3]. По той же причине масса модуля технического зрения меньше, чем у систем, описанных в работах [2] и [3].

Характеристики предлагаемого модуля технического зрения сравним с популярной системой технического зрения Omron Xpectia FH. Начальная комплектация системы Omron Xpectia FH не подразумевает привода для видеокамеры. Поэтому примем массу привода для видеокамеры равной 600 грамм. Соответственно масса двух приводов составит около 1,2 кг. При оценке общей массы системы вес монитора не учитывается. Для системы технического зрения Omron Xpectia FH при сравнении с предлагаемым авторами устройством выберем минимально возможную массу. Минимально возможная масса системы технического зрения Omron Xpectia FH без монитора и без приводов составит 2,4 кг. Соответственно с приводами эта масса составит 3,6 кг. Расчётная масса модуля технического зрения с аналогичной комплектацией составляет 2,5 кг. При этом на данный момент вес сферического индукционного двигателя составляет приблизительно 700 грамм. Но возможно дальнейшее снижение его массы за счет использования в отдельных частях сферического индукционного двигателя современных композитных материалов. Получение изображения с видеокамеры и его анализ для модуля технического зрения со сферическим индукционным двигателем составляет 10-20 миллисекунд для одного кадра. Увеличение быстродействия составит порядка 25% по сравнению с устройствами, выполненными с двумя приводами, выполняющими движения по вертикали и горизонтали.

Предлагаемый модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем имеет следующее техническое устройство.

Видеокамера механически соединена с ротором, то есть, вмонтирована в него так, как показано на чертеже. При этом ротор имеет сферическую форму. Вмонтированная в ротор видеокамера не нарушает сферическую форму ротора, так как внешняя поверхность видеокамеры выполнена как продолжение поверхности сферы, образованной ротором. Ротор находится в статоре. Статор имеет полусферическую форму, повторяющую форму ротора. Ротор выполняет движения по внутренней полусфере статора, при этом видеокамера движется по полусфере, которая не пересекается с внутренней полусферой статора. Таким образом, в изображение видеокамеры не попадает изображение внутренних частей статора. Видеокамера обеспечивает углы обзора по горизонтали и вертикали сопоставимые с теми углами, на которые может смещаться человеческий глаз по горизонтали и вертикали соответственно. Возможность такого движения ротора обеспечивается получением и обработкой данных с пар датчиков положения ротора и соответствующими сигналами от системы управления. Пары датчиков положения ротора установлены на роторе и статоре и предотвращают направление видеокамеры во внутреннюю часть статора. Количество пар датчиков положения ротора может изменяться в зависимости от необходимой точности управления модулем технического зрения со сферическим индукционным двигателем и в зависимости от сферы применения заявляемого модуля. Данные, считываемые с пар датчиков положения ротора, обрабатываются системой управления. Соединительный провод выполнен с возможностью передачи данных от системы управления к парам датчиков положения ротора и передачи данных от пар датчиков положения ротора в систему управления. Статор находится в корпусе. Корпус статора может выполняться различным образом в зависимости от того, куда будет устанавливаться модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем. На корпусе статора могут быть выполнены необходимые крепежные элементы в зависимости от того, куда будет устанавливаться модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем. Статор посредством соединительного провода подключен к системе управления. По соединительному проводу от системы управления к статору и видеокамере подаются сигналы управления. Соединительный провод выполнен с возможностью передачи от видеокамеры информации в систему управления. Длина соединительного провода может варьироваться в зависимости от условий, в которых применяется модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем. Система управления выполнена с возможностью генерации необходимых для корректного управления сферическим индукционным двигателем сигналов. Система управления включает в себя систему обработки информации, получаемой с видеокамеры.

Принцип работы предлагаемого модуля технического зрения заключается в следующем.

С системы управления подается сигнал управления на статор и видеокамеру посредством соединительного провода. На статор и видеокамеру поступают различные сигналы управления. При этом видеокамера включается и начинает передавать получаемую информацию в систему управления посредством соединительного провода, ротор отклоняется к изначально заданному положению. При изменении сигнала от системы управления, подаваемого на статор, изменяется положение ротора в той области, в которой возможно движение ротора. Система управления при этом считывает и обрабатывает данные с пар датчиков положения ротора, что позволяет постоянно определять положение ротора и корректировать или изменять положение ротора и, соответственно, направление видеокамеры.

Предлагаемый авторами модуль технического зрения может применяться в качестве модуля технического зрения для беспилотных роботов, автомобилей или летательных аппаратов. Также устройство может применяться для контроля качества изделий на производстве, управления станками. Если модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем будет выполнен небольшого размера, то он может применяться в медицине для проведения сложных операций, требующих введения в организм видеокамеры в связи с невозможностью оперирующим врачом видеть оперируемую область.

Стоит отдельно остановиться на сферическом индукционном двигателе. За прототип взят сферический индукционный двигатель, разработанный американскими учеными (рис. 2) [4]. Описание и расчеты сферического индукционного двигателя для определенных параметров приведены в статье [4].

Рис. 2 – прототип сферического индукционного двигателя, предлагаемого к применению в модуле технического зрения со сферическим индукционным двигателем

Основным отличием предлагаемого авторами сферического индукционного двигателя является новое конструктивное исполнение ротора, в котором находится видеокамера. Менее значительным отличием является измененная система управления сферическим индукционным двигателем. Стоит отметить, что в предлагаемом модуле технического зрения видеокамера не должна направляться во внутреннюю область статора сферического индукционного двигателя, поэтому сферический индукционный двигатель для модуля технического зрения следует изготовить таким образом, чтобы этим двигателем обеспечивалась возможность перемещения видеокамеры только по полусфере, не пересекающейся с внутренней областью статора. То есть перемещение видеокамеры в необходимой области будет обуславливаться техническими особенностями сферического индукционного двигателя. Основное отличие системы управления обуславливается тем, что видеокамера не должна направляться во внутреннюю область статора сферического индукционного двигателя. То есть система управления должна быть построена таким образом, чтобы предотвратить направление видеокамеры во внутреннюю область статора, основываясь на данных, получаемых с пар датчиков положения ротора (при условии, что направление видеокамеры во внутреннюю область статора не ограничено техническими особенностями сферического индукционного двигателя).

Авторами разработана конструкция сферического индукционного двигателя. На жестком недеформируемом каркасе размещаются 6 статоров, как показано на рис. 2. Такая компоновка статоров позволит добиться необходимого перемещения видеокамеры в описанной области и беспрепятственно провести провод от системы управления к видеокамере, вмонтированной в ротор. Рамка для установки шести статоров выполняется из композитного материала для облегчения веса конструкции предлагаемого модуля технического зрения со сферическим индукционным двигателем и для исключения магнитного взаимодействия между рамкой и статорами. Углы между центрами роторов одинаковы и составляют 60 градусов. Также на рамке предусматривается крепление для установки системы управления. Ротор сферического индукционного двигателя выполняется полым, так как внутри его устанавливается видеокамера. Ротор состоит из двух отдельных стальных полусфер, покрытых медью. В одной полусфере во внутренней части предусматривается крепление для видеокамеры. Во второй полусфере предусматривается отверстие для провода, соединяющего систему управления с видеокамерой. После установки в полусферах видеокамеры и прокладки провода, они соединяются между собой путем сварки. Получившийся при этом шов шлифуется и покрывается медным слоем. На поверхности ротора крепятся датчики положения ротора.

В системе управления сферического индукционного двигателя реализуется векторный алгоритм управления, в связи с тем что при использовании дискретного алгоритма не достигается плавного перемещения видеокамеры (перемещение видеокамеры производится на некоторые элементарные участки). В предлагаемом варианте реализации сферического индукционного двигателя при реализации дискретного алгоритма управления такие элементарные участки будут большими, так как его конструкция подразумевает 6 статоров. Датчики положения ротора находятся и на роторе, и на рамке статора, так как ротор представляет собой цельный стальной шар с медным покрытием. Положение ротора отслеживается путем определения положения парных датчиков друг относительно друга. Ротор принимает начальное положение, когда парные датчики располагаются друг напротив друга, при этом расстояние между ними наименьшее.

Итак, основными недостатками существующих систем технического зрения являются низкое быстродействие, значительная масса и невысокая надежность. В некоторых системах медицинского назначения недостаточная

обзорность и невысокая надежность. Избежать этих недостатков можно, если в подобных системах использовать сферический индукционный двигатель. Авторами предлагается новый способ реализации системы технического зрения – модуль технического зрения со сферическим индукционным двигателем. Предлагаемый модуль технического зрения имеет широкую область применения, высокую универсальность. Основными преимуществами модуля технического зрения со сферическим индукционным двигателем являются большой угол обзора, повышенное быстродействие, в связи с тем, что с помощью сферического индукционного двигателя можно направить видеокамеру в необходимую точку, совершив при этом одно перемещение. Преимуществами являются повышенная надежность, обусловленная надежностью сферического индукционного двигателя, и меньшая в сравнении с аналогичными системами масса, достигаемая за счет применения одного сферического индукционного двигателя вместо двух приводов, выполняющих движения по вертикали и горизонтали, и за счет применения композитных материалов при изготовлении рамки для шести статоров. Использование видеокамеры в предлагаемом модуле технического зрения со сферическим индукционным двигателем объясняется ее большей универсальностью и менее высокой стоимостью, чем у других устройств для обработки визуальной информации. Применение видеокамеры позволяет снизить стоимость предлагаемой системы и повысить ее надежность.

Список литературы / References

1. Заявка на пат. 94033495 Российская федерация, A61B1/06. Эндоскопическое устройство для наблюдения полостей глубоких ран с помощь видиосистемы при проведении операций / Прудков М.И., Зайков С.А., Шелепов Л.Е., Максимов Г.Н., Клепалов В.И., Савин Н.С.; заявитель Медицинская компания «САН»; заявл. 13.09.1994; опубл. 10.08.1996

2. Пат. 154324 Российская федерация, B25J9/00. Устройство для управления движением мобильных технологических машин и роботов / Глебов Николай Алексеевич, Амин Нихад Мохаммед Амин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова"; заявл. 02.04.2015; опубл. 20.08.2015, Бюл. №23

3. Пат. 2165582 Российская федерация, F41G7/30.Оптико-электронная система зенитно-ракетного комплекса / Образумов В.И., Слугин В.Г., Кисляк В.А., Белянский Е.В., Кузьмич Я.Л.; заявитель и патентообладатель Государственное унитарное предприятие Конструкторское бюро приборостроения; заявл. 08.06.1999; опубл. 20.04.2011 Бюл. №11

4. Система технического зрения Xpectia FH [Электронный ресурс] // URL: http://www.baltacom.com/sites/default/files/catalogue/pdfs/xpectia_selectrion_rus.pdf (дата обращения: 08.11.2017)

5. Bhatia, Ankit "Six-Stator Spherical Induction Motor for Balancing Mobile Robots" / Ankit Bhatia, Masaaki Kumagai, Ralph Hollis // proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, 26-30 May 2015, Seattle, WA USA

6. Хорн Б.К.П. Зрение роботов: Пер. с англ. / Б.К.П. Хорн – М.: Мир, 1989. – 487 с.

7. Мошкин В.И. Техническое зрение роботов/ В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

8. Липин А.В. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Разработка и исследование трехкоординатного электропривода для манипуляторов [Электронный ресурс] / А.В. Липин // URL: http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Autoreferats/LipinAV.pdf (дата обращения: 10.10.2017)

9. Гридин В.Н. Адаптивные системы технического зрения / В.Н. Гридин, В.С. Титов, М.И. Труфанов – М.: Наука, 2009. – 442 с.

10. Ошлаков, В.Г. Оптическая инструментальная система ориентирования в условиях недостаточной видимости / Ошлаков В.Г., Цвык Р.Ш., Илюшин Я.А. // Техническое зрение в системах управления 2012: сборник трудов науч.-техн. конф. 14 -16 марта 2012 г., Москва / Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, ФГУП "Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем", Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН. – Москва, 2011. – с.16 - 26

11. Кузьмин, С.А. Способы повышения точности выделения объектов в видеопоследовательностях / Кузьмин С.А. // Техническое зрение в системах управления 2012: сборник трудов науч.-техн. конф. 14 -16 марта 2012 г., Москва / Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, ФГУП "Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем", Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН. – Москва, 2011. – с.124 - 132

12. Зейналов, Р.Ш. Система бесконтактных измерений параметров высокоскоростных объектов / Зейналов Р.Ш., Конушин А.С. // Техническое зрение в системах управления 2012: сборник трудов науч.-техн. конф. 14 -16 марта 2012 г., Москва / Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, ФГУП "Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем", Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН. – Москва, 2011. – с.193 - 199

13. Сканирующие лазерные дальномеры (LIDAR) [Электронный ресурс] / А. Антонов // URL: https://www.soel.ru/upload/iblock/792/20160110.pdf (дата обращения: 10.11.2017)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Pat. Appl. 94033495 Russian Federation, A61B1/06. Jendoskopicheskoe ustrojstvo dlja nabljudenija polostej glubokih ran s pomoshh' vidiosistemy pri provedenii operacij [Endoscopic device for the observation of cavities of deep wounds with the help of a video system during operations] / Prudkov M.I., Zajkov S.A., Shelepov L.E., Maksimov G.N., Klepalov V.I., Savin N.S.; the applicant Medicine company «SAN»; appl. 13.09.1994; publ. 10.08.1996

2. Pat. 154324 Russian Federation, B25J9/00. Ustrojstvo dlja upravlenija dvizheniem mobil'nyh tehnologicheskih mashin i robotov [Device for controlling the movement of mobile technological machines and robots] / Glebov Nikolaj Alekseevich, Amin Nihad Mohammed Amin; The applicant and the patentee Platov South-Russian State Polytechnic University; appl. 02.04.2015; publ. 20.08.2015, Bul. Number 23.

3. Pat. 2165582 Russian Federation, F41G7/30. Optiko-jelektronnaja sistema zenitno-raketnogo kompleksa [Optoelectronic system of anti-aircraft missile system] / Obrazumov V.I., Slugin V.G., Kisljak V.A., Beljanskij E.V., Kuz'mich Ja.L.; the applicant and the patentee Instrument Design Bureau; appl. 08.06.1999; publ. 20.04.2011 Bul. Number 11.

4. Sistema tehnicheskogo zrenija Xpectia FH [Xpectia FH vision system] [Electronic resource] // URL: http://www.baltacom.com/sites/default/files/catalogue/pdfs/xpectia_selectrion_rus.pdf (accessed: 08.11.2017) [in Russian]

5. Ankit Bhatia, Masaaki Kumagai and Ralph Hollis "Six-Stator Spherical Induction Motor for Balancing Mobile Robots" in proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, Seattle, WA USA, May 26-30 2015

6. Horn B.K.P. Zrenie robotov: Per. s angl. [Robots vision] / B.K.P. Horn – M.: Mir, 1989. – 487 p. [in Russian]

7. Moshkin V.I. Tehnicheskoe zrenie robotov [Robots technical vision] / V. I. Moshkin, A. A. Petrov, V. S. Titov and others – M.: Mashinostroenie, 1990. – 272 p. [in Russian]

8. Lipin A.V. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnicheskih nauk Razrabotka i issledovanie trehkoordinatnogo jelektroprivoda dlja manipuljatorov [The dissertation author's abstract on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science Development and research of the three-coordinate electric drive for manipulators] [Electronic resource] / A.V. Lipin // URL: http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Autoreferats/LipinAV.pdf (accessed: 10.10.2017) [in Russian]

9. Gridin V.N. Adaptivnye sistemy tehnicheskogo zrenija [Adaptive systems of technical vision] / V.N. Gridin, V.S. Titov, M.I. Trufanov – M.: Nauka, 2009. – 442 p. [in Russian]

10. Oshlakov, V.G. Opticheskaja instrumental'naja sistema orientirovanija v uslovijah nedostatochnoj vidimosti [Optical instrumental orientation system in conditions of low visibility] / Oshlakov V.G., Cvyk R.Sh., Iljushin Ja.A. // Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija 2012: sbornik trudov nauch.-tehn. konf. 14 -16 marta 2012 g. [Technical vision in management systems 2012: a collection of works of scientific and technical. conf. 14 -16 March 2012], Moskva / Uchrezhdenie Rossijskoj akademii nauk Institut kosmicheskih issledovanij RAN, FGUP "Gosudarstvennyj nauchno-issledovatel'skij institut aviacionnyh sistem", Uchrezhdenie Rossijskoj akademii nauk Institut prikladnoj matematiki im. M.V.Keldysha RAN [Establishment of the Russian Academy of Sciences Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Aviation Systems", Institute of Applied Mathematics pr. M.V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences]. – Moskva, 2011. – pp.16 - 26

11. Kuz'min, S.A. Sposoby povyshenija tochnosti vydelenija ob#ektov v videoposledovatel'nostjah [Methods to improve the accuracy of the selection of objects in video sequences] / Kuz'min S.A. // Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija 2012: sbornik trudov nauch.-tehn. konf. 14 -16 marta 2012 g. [Technical vision in management systems 2012: a collection of works of scientific and technical. conf. 14 -16 March 2012], Moskva / Uchrezhdenie Rossijskoj akademii nauk Institut kosmicheskih issledovanij RAN, FGUP "Gosudarstvennyj nauchno-issledovatel'skij institut aviacionnyh sistem", Uchrezhdenie Rossijskoj akademii nauk Institut prikladnoj matematiki im. M.V.Keldysha RAN [Establishment of the Russian Academy of Sciences Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Aviation Systems", Institute of Applied Mathematics pr. M.V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences]. – Moskva, 2011. – pp.124 - 132

12. Zejnalov, R.Sh. Sistema beskontaktnyh izmerenij parametrov vysokoskorostnyh ob#ektov [The system of contactless measurements of high-speed objects parameters] / Zejnalov R.Sh., Konushin A.S. // Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija 2012: sbornik trudov nauch.-tehn. konf. 14 -16 marta 2012 g. [Technical vision in management systems 2012: a collection of works of scientific and technical. conf. 14 -16 March 2012], Moskva / Uchrezhdenie Rossijskoj akademii nauk Institut kosmicheskih issledovanij RAN, FGUP "Gosudarstvennyj nauchno-issledovatel'skij institut aviacionnyh sistem", Uchrezhdenie Rossijskoj akademii nauk Institut prikladnoj matematiki im. M.V.Keldysha RAN [Establishment of the Russian Academy of Sciences Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Aviation Systems", Institute of Applied Mathematics pr. M.V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences]. – Moskva, 2011. – pp.193 – 199

13. Skanirujushhie lazernye dal'nomery (LIDAR) [Scanning Laser Rangefinders (LIDAR)] [Electronic resource] / A. Antonov // URL: https://www.soel.ru/upload/iblock/792/20160110.pdf (accessed: 10.11.2017). [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.118

УрмановМ.Д.[1], БиктимировР.А.[2], Насыбуллин Р.К.[3] Хусаинов Р.М.[4]
[1,2,3]магистрант,
[2]ORCID: 0000-0002-5351-4545, кандидат технических наук, доцент.
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета

ПРИМЕНЕНИЕ IMACHINING КАК МОДУЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация

В данной статье рассматривается применение модуля iMachining в качестве компонента информационной технологии для повышения производительности механической обработки. Описаны особенности генерации траектории. Проведен сравнительный анализ между стратегиями: высокоскоростной обработки, традиционной и высокоскоростной обработки с применением модуля iMachining. Выполнена тестовая обработка в системе NX CAM с применением данного модуля. Проведена оценка полученных результатов и сделан вывод о применимости данной стратегии на производстве.

Ключевые слова: iMachining, высокоскоростная обработка, NX CAM.

Urmanov M.D.[1], Biktimirov R.A.[2], Nasybullin R.K.[3], Khusainov R.M.[41]
[1,2,3]Master's Degree Student,
[2]ORCID: 0000-0002-5351-4545, PhD in Engineering, Associate professor.
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Kazan (Volga region) Federal University

APPLICATION OF IMACHINING AS HIGH-SPEED MACHINNING MODULE

Abstract

This article describes the use of the iMachining module as a component of information technology to improve machinning performance. The features of the trajectory generation are described as well. Comparative analysis was carried out between the strategies: traditional high-speed machinning, and high-speed machinning using the iMachining module. The test machinning in the NX CAM system was performed with the use of this module. The results obtained were evaluated and a conclusion was made about the applicability of this strategy to production.

Keywords: iMachining, high-speed machinning, NX CAM.

Введение.

Современное производство характеризуется постоянным увеличением темпов выпуска изделия. Это заставляет предприятия, все чаще при изготовлении различных типов деталей, применять нетрадиционные методы и стратегии обработки. Многие компании предлагают различные подходы для повышения производительности, одним из которых является высокоскоростная обработка [1].

Теория использования высоких режимов резания при механической обработке металлов возникла достаточно давно. Однако только сейчас, с появлением современных станков с ЧПУ, частота вращения шпинделя у которых достигает 60 000 об/мин, а скорость рабочей подачи превышает 5000 мм/мин, это стало возможным [2, С. 6-15].

Основными преимуществами высокоскоростной обработки:

- сокращение времени обработки — в 1,5−4 раза;
- продление срока службы инструмента — в 4−30 раз;
- увеличение усталостной долговечности изделия — снижение внутренних напряжений;
- снижение износа оборудования;
- возможность обработки твердых и закаленных металлов — стальные пресс-формы с 64 HRC [3, с. 52-58].

В 2006 году компания SolidCAM приступила к разработке первого продукта, действительно соответствующего ожиданиям и представлениям о высокоскоростной обработке и обеспечивающего оптимальное решение указанных выше проблем. В 2010 она представила модуль интеллектуальной высокоскоростной обработки iMachining.

Основными достоинствами данного модуля являются:

- траектории инструмента генерируются по тем же принципам, что и при высокоскоростной обработке (HSM);
- значительное, по сравнению с «обычным» фрезерованием, уменьшение механических и термических напряжений, которые возникают в заготовке в процессе обработки;
- уменьшение времени обработки за счет увеличения «средней» скорости снятия материала (CCM);
- сведение к минимуму холостых движений инструмента;
- увеличение стойкости инструмента за счет обеспечения постоянной механической и тепловой нагрузки.

Теоретическое обоснование.

Разберем особенности построения траектории iMachining.

Традиционная высокоскоростная обработка характеризуется снятием малого припуска в радиальном направлении при небольшой глубине резания (см. рис. 1, а). При использовании стратегии iMachining обработка выполняется также со снятием небольшого припуска, однако шаблон траектории построен таким образом, что в первую очередь идет врезание инструмента на его полную глубину резания, а затем снятие припуска с постоянной толщиной стружки (см. рис. 1, б).

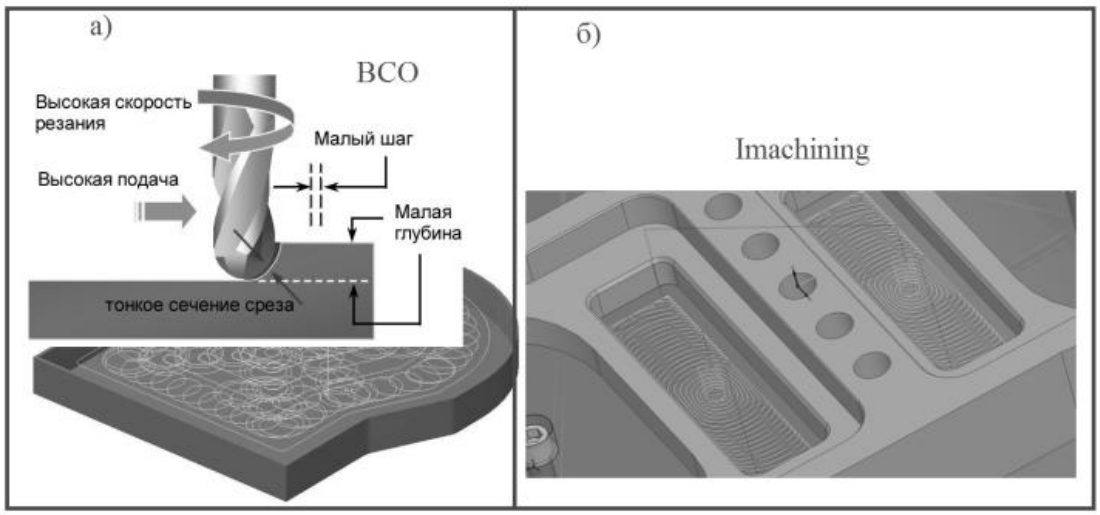


Рис. 1 – Особенности построения траекторий

За счет этого, а также за счет эффективного использования режущей длины инструмента и мощностных ресурсов станка, повышается производительность обработки [4]. А снятие стружки с постоянной толщиной обеспечивает уменьшение перепадов нагрузок, возникающих в процессе резания и действующих на режущий инструмент, что приводит к увеличению его срока службы. Однако из этого следует, что для данной стратегии, возможно применять только концевые фрезы [5].

Модуль iMachining имеет возможность анализировать конструкцию изделия для уменьшения холостых ходов, что способствует сокращению времени обработки [6].

Для расчета траектории в модуле iMachining необходимо указать параметры станка: максимальные обороты шпинделя, максимальную подачу, мощность и др. Также указываются параметры материала, параметры инструмента: количество стружечных канавок, угол спирали, под которым располагаются стружечные канавки и др. На основании этих данных подбираются оптимальные режимы резания. Это весьма удобно для работы технолога и позволяет сократить временные затраты на технологическую подготовку производства [7].

Стоит учесть, что для использования управляющей программы, разработанной в модуле iMachining, необходимо наличие специальной системы ЧПУ, в функции которой должен входить предварительный просмотр (функция Look-Ahead) кадров управляющей программы.

Модуль iMachining, способен создавать проходы с маленьким шагом, которые будут выполняться на очень больших рабочих подачах.

Описание основных результатов исследования.

Для выявления эффективности данного модуля как метода повышения производительности обработки были проведены соответствующие вычислительные эксперименты.

Виртуальная симуляция обработки проведена в среде NX CAM [8]. В ходе проверки возможностей модуля iMachining, стратегии высокоскоростной обработки (ВСО) и глубинного фрезерования были разработаны три управляющие программы для каждого модуля соответственно.

Время обработки по управляющим программам, полученным классическим модулем NX CAM в ходе симуляции, составило: для iMachining – 1 час 58 минут, для стратегии высокоскоростной обработки без модуля iMachining – 2 час 7 минут, для стратегии глубинного фрезерования – 2 часа 55 минут (таб. 1).

Таблица 1 – Характеристики операций

Модуль	iMachining	ВСО	Глубинное фрезерование
Величина подачи	от 50 до 750 мм/мин	1000 мм/мин	400 мм/мин
Частота вращения шпиндля	3000 об/мин	3000 об/мин	1950 об/мин
Глубина резания	от 2 до17 мм	1,6 мм	2 мм
Время обработки	1 час 58 минут	2 час минут	2 часа 55 минут

По полученным результатам видна разница между различными стратегиями обработки (см. рис. 2.). В ходе симуляции управляющей программы, полученной с помощью модуля iMachining, время обработки составило 1:58 ч., а при использовании стандартного шаблона глубинного фрезерования - 2:55 ч., то есть сокращение временных затрат при применении iMachining составляет 27,5%.

При ВСО получено время 2:07 ч., что составляет сокращение времени обработки на 19% относительно глубинного фрезерования, но увеличение времени обработки на 8,5% относительно модуля iMachining.

В настоящее время перед стратегией ВСО стоит немало нерешенных проблем. Многие компании занимаются разработкой, изучением и созданием программного модуля для данного направления. Наиболее удачное решение предложила компания SolidCAM. Четыре года интенсивного исследования и разработок позволило создать модуль iMachining, который дал решение для повышения эффективности использования стратегии ВСО. Оно включает в себя особенности:

- автоматический подбор режимов резания с учетом инструментов, оборудования и других параметров;
- траектории перемещения инструмента сглажены с переменной подачей, что позволяет уменьшить нагрузку в процессе резания;
- повышение производительности.

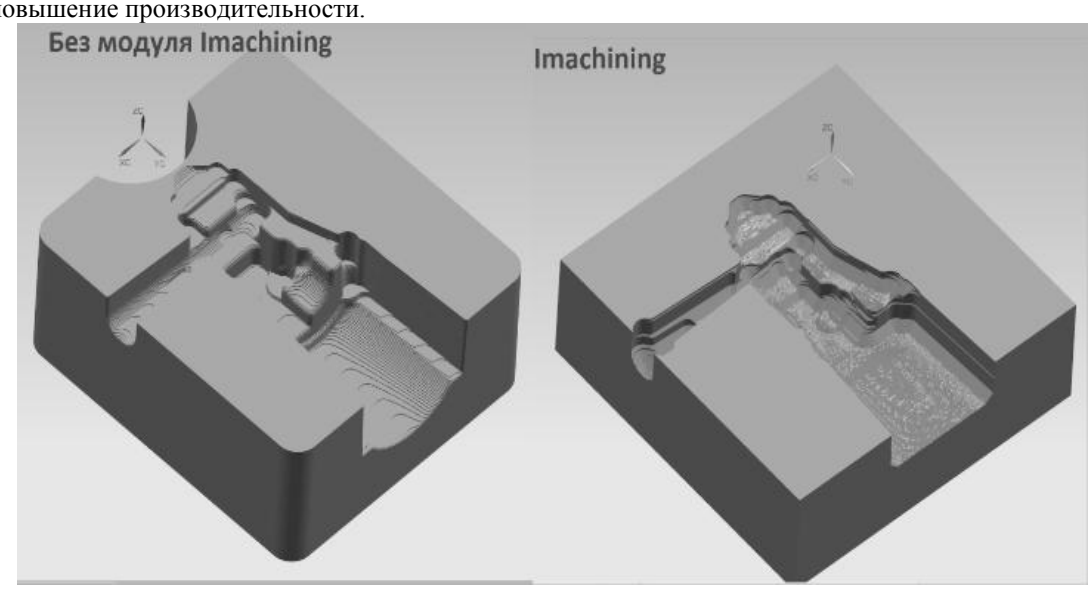


Рис. 2 – Полученный результат с различными стратегиями обработки в системе NX CAM

Однако, по полученным данным видно, что утверждение разработчиков данного продукта о сокращении машинного времени на 70% сильно преувеличено [9]. Несмотря на это, можно сказать, что по сравнению с традиционной обработкой применение модуля iMachining позволяет существенно повысить производительность.

Но стоит помнить, что для успешного перехода к данной стратегии обработки необходимо очень серьезно отнестись ко всем трем составляющим успеха: станку, инструменту и CAM-системе. Только их правильная комбинация обеспечит высокую производительность, точность и эффективность обработки, а ошибочная приведет к бесполезной трате времени и денег [10].

Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что данный модуль можно использовать как метод повышения производительности обработки, однако перед внедрением данной стратегии необходим соответствующий просчет вариантов, учитывающий затраты на внедрение и эксплуатацию соответствующего технологического оборудования и оснастки, поскольку применение данного модуля автоматически предполагает применение высокоскоростной обработки, в свою очередь, предъявляющей следующие требования:

а) к оборудованию:

- способность обеспечить скорости резания от 100 до 5000 м/мин, что означает наличие частот вращения шпинделя до 60000 об/мин;
- способность обеспечить скорости подачи до 10000 м/мин;
- высокая виброустойчивость, что можно оценить жесткостью конструкции;
- способность обеспечить автоматическую периодическую смазку зоны резания небольшим количеством масла;

б) к инструменту:

- способность выдерживать высокие температуры, что предполагает применение инструмента с покрытиями, например TIALN, или применение инструмента их кубического нитрида бора или поликристаллического алмаза;
- наличие стружкоразделительных канавок на зубьях для лучшего разделения и эвакуации стружки;
- высокая точность и жесткость вспомогательного инструмента.

Список литературы / References

1. Виттингтон К. Высокоскоростная механообработка [Электронный ресурс] / Виттингтон К., Власов В.В. // САПР и графика. – 2002 – N11 – С.10-15. – URL: http://sapr.ru/article/8151 (дата обращения: 15.08.2017).

2. Серебреницкий П.П. Некоторые особенности высокоскоростной механической обработки / Серебреницкий П.П. // Металлообработка. – 2007. – № 4 (40). – С. 6–15.

3. Самарцев А.А. Революция в механообработке. iMachining / Самарцев А.А. // CADmaster. –2012. - №2 (63). - С. 52-58.

4. Ловыгин А.А. SolidCAM: наша сила в iMachining [Электронный ресурс]/ Ловыгин А.А. // Планета CAM. – 2015. №4. - С. 15-18. - URL: http://planetacam.ru/articles/exclusive/solidcam_nasha_sila_v_imachining/ (дата обращения: 20.09.2017)

5. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов / Старков В.К. – М.: Машиностроение, 2009 – 640 с. ISBN 978-5-94275-460-0.

6. Somekh E. Design with SolidWorks. Manufacture with SolidCAM / Somekh E. – Bielefeld.: VDW-Nachwuchsstiftung GmbH. 2015 – 230 p. ISBN 978-3-942817-28-8.

7. Самарцев А.А. IMACHINING 3D. Логическое развитие технологии/ Самарцев А.А. // CADmaster. – 2013. - №2 (69). - С. 60-63.

8. Ведмидь П.А. Программирование обработки в NX CAM / Ведмидь П.А., Сулинов А.В. //М.: ДМК Пресс, 2014 – 304 с. ISBN 978-5-97060-143-3.

9. Burns G. iMachining for NX. Reference Guide / Burns G. // SolidCAM. 2016 – 26 p.

10. Власов В.В. Лить или резать. [Электронный ресурс] / Власов В.В., Рассохин Д.Д., Веретнов А.А. // САПР и графика. – 2008 – N10 – С.10-20. – URL: http://sapr.ru/article/19645 (дата обращения: 20.09.2017).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Wittington K. Vysokoskorostnaya mekhanoobrabotka [High-Speed Machining] [Electronic resource] / Wittington K., Vlasov V.V. // CAD and graphics. - 2002 — No.11 — P.10-15. - URL: http://sapr.ru/article/8151 (reference date: August 15, 2017). [In Russian]

2. Serebrenitsky P.P. Nekotoriye osobennosti vysokoskorostnoy mekhanicheskoy obrabotki [Some Features of High-Speed Machining] / Serebrenitsky P.P. // Metalworking. - 2007. - No. 4 (40). - P. 6-15. [In Russian]

3. Samartsev A.A. Revolutsiya v mekhanoobrabotke. iMachining [Revolution in Machining. iMachining] / Samartsev AA // CADmaster. - 2012. - No.2 (63). - P. 52-58. [In Russian]

4. Lovygin A.A. SolidCAM: nasha sila v iMachining [SolidCAM: Our Strength in iMachining] [Electronic resource] / Lovygin A.A. // CAM planet. - 2015. -. - No. 4. - P. 15-18. - URL: http://planetacam.ru/articles/exclusive/solidcam_nasha_sila_v_imachining/ (reference date: September 20, 2017) [In Russian]

5. Starkov V.K. Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov [Physics and Optimization of Material Cutting] / Starkov V.K. - Moscow: Mechanical Engineering, 2009 - 640 p. ISBN 978-5-94275-460-0. [In Russian]

6. Somekh E. Design with SolidWorks. Manufacture with SolidCAM / Somekh E. - Bielefeld .: VDW-Nachwuchsstiftung GmbH. 2015 - 230 p. ISBN 978-3-942817-28-8.

7. Samartsev A.A. IMACHINING 3D. Logicheskoye razvitiye tekhnologii [IMACHINING 3D. Logical Development of Technology] / Samartsev A.A. // CADmaster. - 2013. - No. 2 (69). - P. 60-63. [In Russian]

8. Vedmid P.A. Programmirovaniye obrabotki v NX CAM [Programming of machinning in NX CAM] / Vedmid P.A., Sulinov A.V. / M: DMK Press, 2014 - 304 p. ISBN 978-5-97060-143-3. [In Russian]

9. Burns G. iMachining for NX. Reference Guide / Burns G. // SolidCAM. 2016 - 26 p.

10. Vlasov V.V. Lit' ili rezat'. [Pour or cut.] [Electronic resource] / Vlasov V.V., Rassokhin D.D., Veretnov A.A. // CAD and graphics. - 2008 — No.10 — P.10-20. - URL: http://sapr.ru/article/19645 (Reference date: September 20, 2017). [In Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.139

Федотов В. А.

[1]ORCID: 0000-0002-3692-9722, кандидат технических наук,

Оренбургский государственный университет

СВЯЗЬ МОРФОЛОГО-АНАТОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы оценки технологических свойств зерна пшеницы на основе морфолого-анатомических характеристиках зерновки. Современные информационные технологии в сфере оптической микроскопии и компьютерного зрения позволяют упростить и автоматизировать получение информации о морфолого-анатомических характеристиках зерна. Анализ микрофотографий, обрабатываемых алгоритмами компьютерного зрения, позволяет получить данные о размерах различных составных частях зерновки, оказывающих определяющее влияние на мукомольные свойства зерна.

Ключевые слова: зерно, пшеница, экспресс-анализ, качество.

Fedotov V. A.

ORCID: 0000-0002-3692-9722, PhD in Engineering,

Orenburg State University

CONNECTION OF MORPHOLOGICAL AND ANATOMICAL CHARACTERISTICS OF WHEAT GRAIN WITH TECHNOLOGICAL PROPERTIES

Abstract

The paper describes the evaluation of technological properties of wheat grain based on its morphological and anatomical characteristics. Modern information technologies in the field of optical microscopy and computer vision make it possible to simplify and automatize obtaining of information on the morphological and anatomical characteristics of a grain. The analysis of microphotographs processed by computer vision algorithms allows obtaining data on the dimensions of various constituent parts of the grain, which have a determining effect on the grain milling properties.

Keywords: grain, wheat, quick analysis, quality.

Размеры зерновок пшеницы колеблются в следующем диапазоне: длина - от 4,2 мм до 8,6 мм, ширина - от 1,6 мм до 4,0 мм, толщина - от 1,5 мм до 3,8 мм. Ширина зерен мягкой пшеницы обычно больше толщины (в среднем 2,81 мм и 2,51 мм), для твердой пшеницы оба измерения практически одинаковы. Длина зерен мягкой пшеницы меньше, чем твердой: 6,23 мм и 6,65 мм соответственно. Толщина зерна в наибольшей степени характеризует его технологические свойства. Между толщиной зерна мягкой пшеницы и содержанием в нем эндосперма существует тесная корреляционная связь (r = 0,990) [1].

Количество крахмалистого ядра эндосперма в зерне, полученном сходом с сита 2,7 х 20 мм, на 10,73 % больше, чем в мелком зерне (сходе с сита 1,7 х 20 мм). Доля алейронового слоя в мелком зерне больше почти в два раза, чем в крупном. Таким образом, соотношение эндосперма и оболочек с уменьшением размера зерновок изменяется в пользу периферийных слоев [2].

Проведен анализ данных о качестве отдельных фракций мягкой пшеницы с зерном стекловидной и мучнистой консистенции в сравнении с нерассортированной. Все три линейных размера зерновок постепенно уменьшаются. Параллельно снижается объемная масса и масса 1000 зерен. Общая стекловидность фракций твердой пшеницы уменьшается с 79 % до 72 %, в то время как у фракций мягкой остается практически постоянной. Содержание эндосперма (по отношению к исходному) снижается соответственно на 3,5 % и 4,5 %, зольность эндосперма возрастает на 0,05 % и 0,10 %. Во фракциях твердой пшеницы, полученных сходом с сит 1,7 х 20 и 1,4 х 20 мм, существенно возрастает содержание белка по сравнению с исходным зерном - на 2,0 % при относительно небольшом увеличении количества сырой клейковины (на 0,9 %) [3, С. 75], [4, С. 27], [5, С. 26].

Современные информационные технологии в сфере оптической микроскопии и технического (или компьютерного) зрения позволяют упростить и автоматизировать получение информации о морфолого-анатомических характеристиках зерна. Анализ микрофотографий, обрабатываемых алгоритмами компьютерного зрения, позволяет получить данные о размерах различных составных частей зерновки.

Проводили анализ микрофотографий поперечных срезов зерновок мягкой пшеницы Саратовская 42 из восточной, центральной и западной зон районирования Оренбургской области (рис. 1). Петля у зерна восточной зоны узкая, вытянутая вдоль бороздки; петля у зерна западной зоны двуязыкая, растянутая, с широким размахом. У зерна центральной зоны области петля более компактная, сомкнутая, с небольшим размахом. В зависимости от формы петли бороздки меняется расположение пигментного слоя. В нижней части бороздки под центральным тяжем алейроновый слой отходит от гиалинового, и между ними образуются пустоты. Воздушные полости больше у пшениц центральной и западной зон области [6, С. 43], [7, С. 26].

Петли аналогичной формы наблюдаются и у мягкой пшеницы сортов Варяг, Прохоровка, Саратовская 42. Отношение толщины зерна к глубине петли колеблется от 55,2 % до 74,2 %, ширины зерна к ширине петли - от 9,7 % до 24,2 %. Размер бороздки зерна у твердой пшеницы в меньшей степени изменчив, чем у мягкой. Вариации глубины бороздки составляет: для твердых сортов пшеницы – около 170 мкм, для мягких сортов – около 350 мкм.

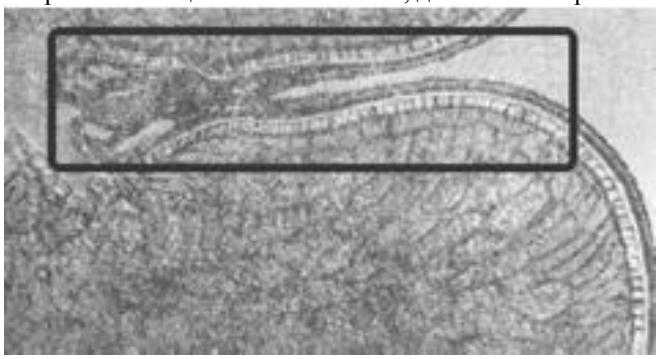


Рис. 1 – Форма петли бороздки зерновки мягкого сорта пшеницы

Среди сортов озимой пшеницы можно различить две группы: первую - с глубокой бороздкой (от 60 % до 75 % толщины зерна) и вторую - с мелкой бороздкой (от 45 % до 55 %). Четких различий по данному показателю зерна твердой и мягкой пшеницы не выявлено.

Глубина и конфигурация бороздки оказывают определяющее влияние на мукомольные свойства зерна. В литературных источниках отмечается наличие связи глубины бороздки с выходом муки в пределах сорта [8, С. 34].

Отношение глубины бороздки к толщине зерна для твердой и мягкой пшеницы колебалось соответственно в диапазоне от 60,5 % до 67,5 % и от 60,5 % до 71,5 %. Выявлена обратно пропорциональная зависимость этого показателя с мукомольными свойствами - выходом муки и ее качеством. Так, при уменьшении показателя отношения глубины бороздки к толщине зерна от 71,5 % до 60,5 % наблюдается увеличение выхода муки первого сорта с 69,2 % до 73,7 %. У муки 70 %-ного выхода наблюдается снижении зольности с 0,78 % до 0,61 %.

Г. А. Егоров, Т. П. Петренко и В. П. Изосимов выделяют следующие четыре основные разновидности конфигурации петли:

- щелевидная петля бороздки, внедряющаяся в центральную часть эндосперма в направлении спинки зерна, воздушная полость отсутствует;
- петля правильной округлой формы с незначительной воздушной полостью;
- сплюснутая двуязычная петля бороздки, внедряющаяся в щечечную часть эндосперма, воздушная полость небольшого размера;
- развитая петля бороздки с большим размахом и высотой петли, т. е. с большой воздушной полостью.

Наиболее выгодным с точки зрения мукомольных свойств отношением глубины петли бороздки к толщине зерна характеризуется пшеница II и IV типа (52,2 % и 53,1 % соответственно) и худшим - I типа (56,0 %) [9, С. 37].

В пределах сортов пшеницы I типа встречаются все разновидности формы петли бороздки. Зерна одного сорта пшеницы разных по стекловидности фракций могут иметь разную форму петли бороздки. Влияет также район произрастания и условия созревания зерна.

Результаты помола девяти образцов пшеницы I типа свидетельствуют о том, что больший выход муки получают из сортов, зерно которых характеризуется третьей группой петли бороздки (Саратовская 42, Прохоровка, Юго-Восточная 3).

Наряду с различиями в весовом соотношении и химическом составе анатомические части зерновки имеют характерные особенности микроскопического строения. Клетки зародыша - относительно небольшого размера, цилиндрические, тонкостенные, содержат цитоплазму, ядра и капельки жира. Во многих клетках присутствуют мелкие зерна алейрона.

Толщина алейронового слоя твердых и мягких сортов пшеницы изменяется в одинаковых пределах. Суммарная толщина оболочек и алейронового слоя полностью стекловидных зерен составила 70,3 мкм и 65,3 мкм, мучнистых зерен тех же сортов - 82,3 мкм и 75,0 мкм. Толщина плодовой и семенной оболочек твердой и мягкой пшеницы практически одинакова. Толщина алейронового слоя зерновок твердой пшеницы больше (39 мкм) по сравнению с мягкой (34 мкм).

Средняя суммарная толщина алейронового слоя и оболочек независимо от типа и сорта пшеницы составила 67 мкм, толщина алейронового слоя - 33 мкм. Отмечается, что типы и сорта пшеницы различаются по выравненности толщины алейроновых клеток. Так, зерно твердых сортов отличается более правильной формой клеток по сравнению с аналогичными клетками мягкой пшеницы. Профиль алейронового слоя влияет на мукомольные свойства пшеницы: у некоторых сортов его очертания имеют ступенчатую и даже зубчатую форму. Лучшая вымалываемость пшеницы тесно связана с выравненными по толщине клетками [10, С. 37].

Для лучшего использования потенциальных возможностей зерна пшеницы необходимо знание его морфологии, соотношения составных частей, прочности их связи и химического состава. Информационные технологии позволяют с минимальными трудозатратами определять и оперативным образом использовать данные о морфолого-анатомических характеристиках зерна пшеницы.

Список литературы / References

1 Медведев П. В. Управление качеством продуктов переработки зерна и зерномучных товаров / П. В. Медведев, В. А. Федотов, И. А. Бочкарева // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. - 2016. - № 1. - С. 61 – 69.

2 Калачев М. В. Малые предприятия для производства хлебобулочных и макаронных изделий / М. В. Калачев. - М. : ДеЛи принт, 2008. - 288 с.

3 Официальный Интернет-сайт Росстата. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.gks.ru. (дата обращения: 05.03.2017).

4 Беркутова Н. С. Микроструктура пшеницы / Н. С. Беркутова, И. А. Швецова. - М. : Колос, 1977. - 122 с.

5 Федотов В. А. Факторы формирования потребительских свойств зерномучных товаров / В. А. Федотов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 186-190.

6 Медведев П. В. Комплексная оценка потребительских свойств зерна и продуктов его переработки / П. В. Медведев, В. А. Федотов, И. А. Бочкарева // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - № 7-1 (38). - С. 77-80.

7 ГОСТ 27669-88 Мука пшеничная хлебопекарная. Метод пробной лабораторной выпечки хлеба (с Изменениями N 1, 2) – Введ. 1989-07-01. – М. : Стандартинформ, 2007.

8 Гончаренко А. А. Об адаптивности и экологической устойчивости сортов зерновых культур / А. А. Гончаренко // Вестник РАСХН. – 2005. – № 6. – С. 49-53.

9 Харченко М.А. Корреляционный анализ: Учебное пособие для вузов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. – 31 с.

10 Хангильдин В. В. Гомеостатичность и адаптивность сортов озимой пшеницы / В. В. Хангильдин, Н. А. Литвиненко // Науч.-техн. бюл. – 1981. – № 1. – С.8-14.

Список литературы на английском языке / References in English

1 Medvedev P. V. Upravlenie kachestvom produktov pererabotki zerna i zernomuchny`kh tovarov [Management of quality of grain processing products and seromycin products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov, I. A. Bochkareva // Nauchny`i` zhurnal NIU ITMO. Seriia: Protcessy` i apparaty` pishchevy`kh proizvodstv [The scientific journal ITMO. Series Processes and equipment for food production]. - 2016. - № 1. - P. 61 – 69. [in Russian]

2 Kalachev M. V. Maly`e predpriiatiia dlia proizvodstva khlebobulochny`kh i makaronny`kh izdelii` [Small enterprises for the production of bread and pasta] / M. V. Kalachev. - M. : DeLee print, 2008. - 288 p. [in Russian]

3 Oficial'nyj Internet-sajt Rosstata [Official website of Rosstat]. [Electronic resource]. – URL http://www.gks.ru.. (accessed: 05.03.2017) [in Russian]

4 Berkutova N. S. Mikrostruktura pshenitcy` [Wheat`s microstructure] / N. S. Berkutova, I. A. Shvetcova. - M. : Kolos, 1977. - 122 p. [in Russian]

5 Fedotov V. A. Faktory formirovanija potrebitel'skih svojstv zernomuchnyh tovarov [Factors of formation for consumer properties of goods seromycin] / V. A. Fedotov // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Journal of Orenburg state university]. – 2011. – № 4. – P. 186-190. [in Russian]

6 Medvedev P.V. Kompleksnaia ocenka potrebitel`skikh svoi`stv zerna i produktov ego pererabotki [Comprehensive assessment for consumer properties of grain and processing products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov, I. A. Bochkareva // Mezhdunarodny`i` nauchno-issledovatel`skii` zhurnal [International science-research journal]. - 2015. - № 7-1 (38). - P. 77-80. [in Russian]

7 GOST 27669-88 Muka pshenichnaya hlebopekarnaya. Metod probnoj laboratornoj vypechki hleba (s Izmeneniyami) [Wheat Flour. Method of test laboratory baking bread (with Amendments No. 1, 2). [in Russian]

8 Goncharenko A. A. About adaptive ability and ecological stability of grain crop varieties/ A. A. Goncharenko // Gazette of RAAS. – 2005. – № 6. – PP. 49-53. [in Russian]

9 Harchenko M.A. Korreljacionnyj analiz [Correlation analysis]: Uchebnoe posobie dlja vuzov [A manual for universities]. – Voronezh: Izd VGU, 2008. – 31 p. [in Russian]

10 Khangildin V. V. Homeostasis and adaptability of winter wheat cultivars / V. V. Khangildin, N. A. Litvinenko // Scintif.-Techn. Bull. VSGI. – 1981. – № 1. – PP. 8-14. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.130

Хасанов Р.Р.[1], Смирнова А.Р.[2]

[1]Доцент кафедры оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии,
кандидат технических наук,
[2]студент,
Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, г.Казань

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБЖАТЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ЗАМАЧИВАНИИ

Аннотация

Свойства грунтов, особенно пылевато-глинистых, существенным образом зависят от объемного содержания в них воды. Для точной прогнозной оценки характеристик грунта при возможном замачивании в процессе эксплуатации необходимо правильно оценивать возможность насыщаемости грунта водой в условиях сложившегося в них напряженного состояния при обжатии нагрузкой от здания или природным давлением. Приведены результаты экспериментальных лабораторных исследований оценки степени влияния давления, предварительно приложенного на грунт и имитирующего природное давление либо давление, возникающее под подошвой фундаментов зданий или сооружений, на возможность достижения полного водонасыщения грунта. Выполнен анализ результатов исследований, и установлена эмпирическая зависимость степени влажности от давления обжатия грунта.

Ключевые слова: грунт, замачивание, предварительное обжатие, коэффициент водонасыщения, показатель текучести.

Khasanov R.R.,[1] Smirnova A.R.[2]

[1]Associate professor of the Department of Foundations, Dynamics of Structures and Engineering Geology,
PhD in Engineering,
[2]Student,
Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia

EXPERIMENTAL RESEARCH OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF PRELIMINARY COMPRESSED CLAY SOIL AT MOISTENING

Abstract

The properties of soils, especially silty-clayey ones, essentially depend on the water content in them. For the accurate predictive assessment of soil characteristics with possible moistening during operation, it is necessary to correctly assess the possibility of soil saturation with water under the conditions of the stressed state with loading from the building or by natural pressure.

The results of experimental laboratory studies of the influence evaluation of pressure degree, previously applied to the ground and imitating the natural pressure or pressure arising under the foundation bases of buildings or structures, to the possibility of achieving full water saturation of the soil are presented in the paper. The analysis of the research results is performed, and the empirical dependence of the humidity degree on the ground compression pressure is established.

Keywords*:* soil, moistening, preliminary reduction, water saturation index, flow index.

Одним из отрицательных факторов, связанных с хозяйственной деятельностью человека и существенно влияющих на свойства грунтов, является их замачивание.

Причины, способствующие замачиванию грунтов на стадиях строительства и эксплуатации зданий и сооружений, могут быть:

- создание искусственных барьеров на пути движения грунтовых вод;
- вскрытие водоносных горизонтов;
- протечки из водонесущих коммуникаций;
- ошибки при водопонижении на строительных площадках;
- подтопление застроенных территорий.

Известно, что свойства всех разновидностей грунтов, особенно пылевато-глинистых, существенным образом зависят от состава и содержания в них воды. Изменение физического состояния грунтов при обводнении прежде всего выражается в повышении их объемной массы и показателя консистенции. Изменение механических свойств грунтов приводит к тому, что в процессе обводнения уменьшаются величины модуля общей деформации и параметров сопротивления сдвигу.

С учетом вышеизложенного, действующие строительные нормы предписывают при выполнении соответствующих расчетов несущей способности или деформаций осадок определять характеристики глинистых грунтов при их возможном полном водонасыщении, принимая коэффициент водонасыщения $S_r = 0{,}9 – 1{,}0$. Прогнозируемый теоретический показатель текучести глинистого грунта при этом определяется по формуле (9.1) [8]:

$$I_L^{sat} = \frac{\dfrac{k \cdot e \cdot \gamma_w}{\gamma_s} - W_p}{W_L - W_p}. \quad (1)$$

Однако факторы, влияющие на возможность или невозможность достижения полного водонасыщения, данная формула не учитывает. Как показывает практика, степень увлажнения грунта в условиях поднимающегося уровня грунтовых вод зависит от величины приложенной на грунт нагрузки. С увеличением нагрузки способность грунта к увлажнению снижается, следовательно, грунты, обжатые нагрузкой, будут содержать меньше воды. К тому же, практически всегда грунты в той или иной степени испытывают вертикальное давление, создаваемое либо собственным весом грунтов, либо нагрузкой, передаваемой фундаментами.

Для возможности составления прогноза изменения физико-механических свойств грунтов исследуемой территории застройки очень важно наличие большого количества экспериментов по рассматриваемой теме с разными видами грунтов. Поэтому в целях оценки степени влияния давления, приложенного на грунт, имитирующего природное давление либо давление, возникающее под подошвой фундаментов зданий или сооружений, на возможность достижения полного водонасыщения грунта в лаборатории грунтоведения кафедры оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии КГАСУ были проведены экспериментальные исследования глинистых грунтов с предварительным замачиванием под нагрузкой и с последующим определением их физико-механических характеристик.

В качестве испытуемого образца грунта была принята супесь твердая нарушенной структуры со следующими физическими характеристиками [1]: ρ = 1,8 г/см^3; ρ_s = 2,7 г/см^3; W_L = 21 %; W_P = 14 %; W = 8 %, I_p = 7 %; I_L = -0,86; e = 0,61, S_r = 0,35. Образцы грунтов изготавливались в соответствии с [2], испытания проводились в соответствии с [3].

Эксперименты проводились в приборе для компрессионных испытаний полевой лаборатории Литвинова с трубками для подачи и отвода воды, схема которого представлена на рис. 1. Испытуемый образец грунта заключался в металлическое кольцо диаметром 57 мм и высотой 20 мм. Кольцо с грунтом устанавливалось на перфорированное днище, сверху закрывалось перфорированным штампом для приложения давления. Перфорация давала возможность воде свободно проникать в поры грунта, а также просачиваться через него на поверхность.

В процессе экспериментальных исследований было проведено 6 серий испытаний. В каждой серии грунты, имеющие изначально идентичные физико-механические характеристики, подвергались предварительному обжатию определенным вертикальным давлением, после чего подвергались продолжительному интенсивному замачиванию. Давление обжатия на образец грунта создавалось посредством перфорированного штампа с помощью рычажной системы и гирь (рис. 1).

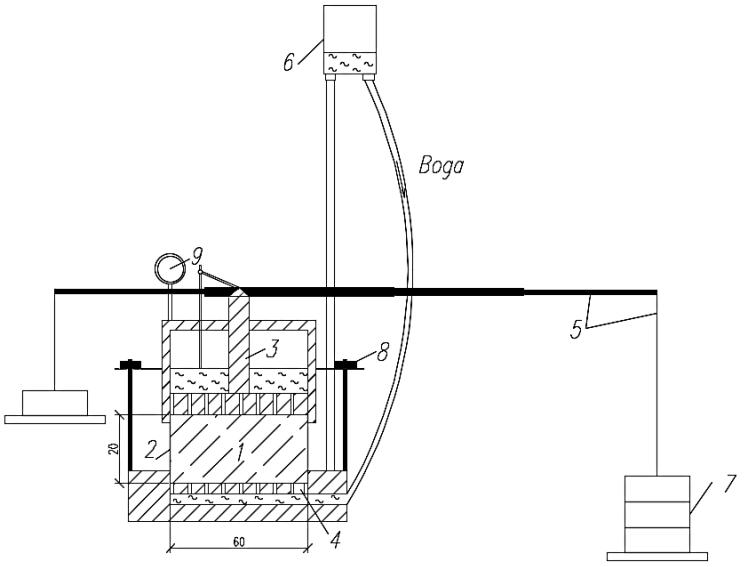


Рис. 1 – Схема прибора: *1* – образец грунта; *2* – режущее кольцо; *3* – перфорированный поршень; *4* – перфорированное дно; *5* – рычаг с грузами; *6* – емкость для воды; *7* – грузы; *8* – регулирующие винты; *9* – индикатор

Первая серия экспериментальных исследований содержала в себе испытания по определению характеристик замоченного грунта при отсутствии давления на образец, в последующие серии давление увеличивалось от 30 до 200 кПа. Давление под штампом со второй по шестую серии составляло соответственно: 30; 50; 100; 150; 200 кПа. По окончании процесса замачивания повторно определялись характеристики образца грунта.

Перед началом замачивания образец грунта выдерживался под давлением, соответствующим серии испытаний, до условной стабилизации осадок, которая контролировалась индикатором часового типа 9 (рис. 1). За условную стабилизацию осадок принято увеличение деформации образца грунта не более чем на 0,01 мм за 1 час наблюдений. Затем через трубку к нижней части образца подавалась вода, которая просачивалась через поры грунта и заполняла пространство над верхним перфорированным штампом. По мере падения уровня в емкость 6 (рис. 1) периодически добавлялась вода для поддержания постоянного гидравлического напора. В таком состоянии грунт выдерживался в течение 2 суток, после чего прибор разбирался, и определялись основные физические характеристики замоченного грунта, а именно, влажность W и плотность ρ, на основании которых вычислялись такие производные характеристики как коэффициент пористости e, коэффициент водонасыщения S_r и показатель текучести I_L.

На рис. 2. представлен график изменения влажности грунта при замачивании под разными значениями давления предварительного обжатия. Примечательно, что теоретическая полная возможная влажность W_{sat} = 22,6% при замачивании практически была достигнута (на 96%) только при отсутствии давления на образец.

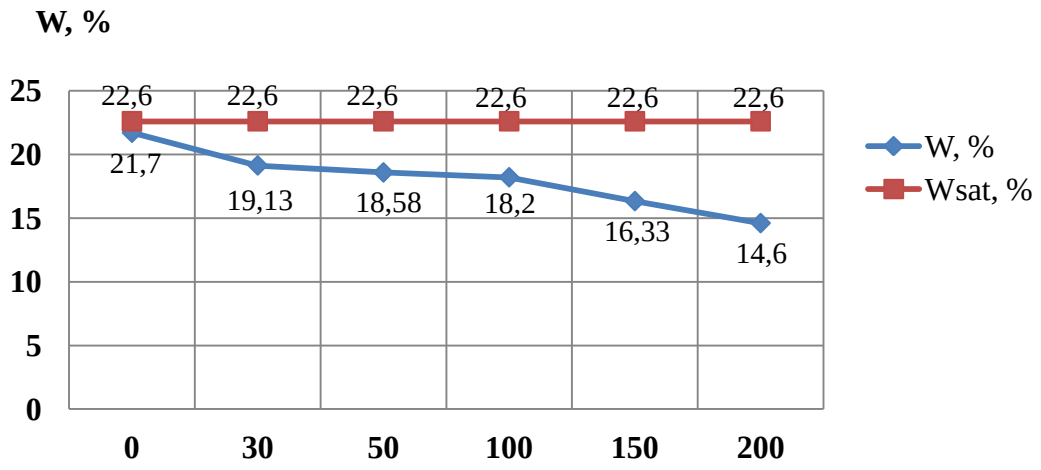


Рис. 2 – Полная возможная (W_{sat}) и фактическая (W) влажности грунта при замачивании в зависимости от давления, прикладываемого на образец

Известно, что между коэффициентом пористости и водопроницаемостью грунта существует прямая нелинейная зависимость, и чем меньше пористость, тем грунт менее водопроницаем, что, безусловно, влияет на способность грунта к водонасыщению.

На рис. 3 представлено изменение коэффициента пористости e грунта после замачивания в зависимости от давления, которое прикладывалось на поверхность образца. Установлено, что при отсутствии давления на поверхность грунта (1-я серия испытаний) после подачи воды пористость грунта увеличилась, т. е. происходило определенное разуплотнение грунта, которое возможно связано с взвешивающим действием воды или набуханием грунта. В последующих сериях приложение давления на образец грунта сопровождалось его некоторым уплотнением, т. е., соответственно, коэффициент пористости уменьшался по сравнению с первоначальным значением до 12%.

Рис. 3 – Изменение коэффициента пористости (e) грунта после замачивания в зависимости от давления, прикладываемого на поверхность образца

По результатам всех 6 серий испытаний грунтов построен обобщенный график зависимости коэффициента водонасыщения S_r испытуемого образца грунта от вертикального давления σ, предварительно приложенного на грунт, который представлен на рис. 4.

Проанализировав результаты проведенных эксперименов, можно установить, что замачиваемость глинистого грунта действительно зависит от величины предварительного обжатия вертикальным давлением. Как видно из графика на рис. 4, поры грунта, обжатого вертикальным давлением, после замачивания содержат меньшее количество воды по сравнению с грунтом, не испытывающим давления.

Аппроксимирующую кривую зависимости между коэффициентом водонасыщения S_r и давлением на грунт σ, полученную в результате обработки и анализа экспериментальных данных (рис. 4), для рассмотренного в рамках исследований грунта (супеси твердой) можно описать в виде следующего логарифмического уравнения:

$$S_r = 1 - 0{,}04\ln(\sigma), \qquad (2)$$

где σ – давление на грунт в кПа.

Величина достоверности аппроксимации при этом составляет R^2=0,95.

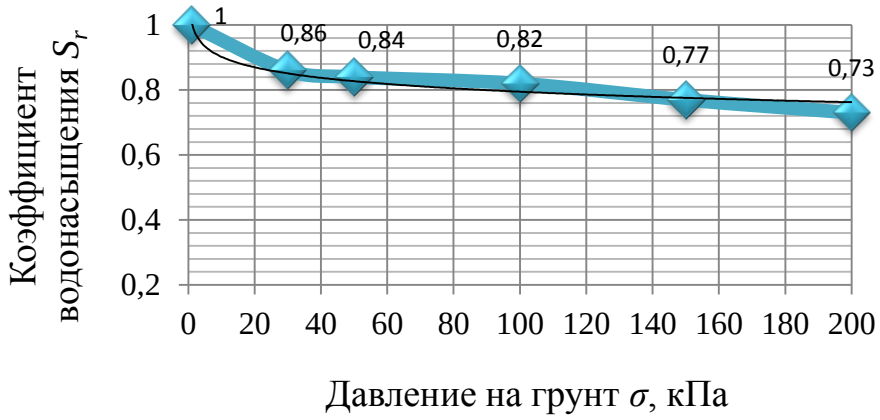


Рис. 4 – Обобщенный график зависимости коэффициента водонасыщения (S_r) от вертикального давления предварительного обжатия грунта (σ)

Кроме коэффициента водонасыщения контролировался и показатель текучести грунта I_L при замачивании под разными вертикальными давлениями (рис. 5). Как и следовало ожидать, график его изменения получился практически идентичным графику изменения коэффициента водонасыщения S_r (рис. 4), так как зависимость между ними прямая (1).

В 1-ой серии экспериментов, когда давление отсутствовало, грунт после замачивания становился водонасыщенным, он очень быстро размокал, и его консистенция практически сразу переходила из твердого состояния в текучее ($I_L > 1$). В остальных же сериях экспериментов с наличием давления на образец, перехода консистенции грунта после замачивания в текучее состояние не наблюдалось, во всех экспериментах она становилась только пластичной (рис. 5).

Следует отметить, что при определении показателя текучести грунта I_L на основе формулы (1), используя значение коэффициента водонасыщения S_r, найденное по выражению (2), можно получить весьма хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных (в пределах 8%).

Рис. 5 – Изменение показателя текучести грунта I_L после замачивания в зависимости от давления (σ), прикладываемого на поверхность образца

По результатам проведенной работы, которая включала в себя как проведение эксперимента, так и анализ процессов, возникающих в грунтах при их взаимодействии с водой, можно сделать следующие выводы:

1) Наличие давления, возникающего в грунте от собственного веса или от возводимого сооружения, учет которого на стадии проектирования сооружений не регламентирован нормами, является одним из немаловажных факторов, оказывающих влияние на возможность полного водонасыщения и изменяемость физико-механических свойств грунтов при замачивании.

2) После обжатия грунтов их возможность впитывать в себя воду снижается. Данный процесс, можно объяснить увеличением количества в глинистом грунте неустранимых замкнутых пузырьков воздуха при обжатии, которые не позволяют воде полностью заполнить весь объем пор.

3) По результатам проведенных лабораторных испытаний получена эмпирическая зависимость, позволяющая определить прогнозный коэффициент водонасыщения супесей в зависимости от давления предварительного обжатия грунта, учет которого позволяет получить наиболее приближенные к реальности значения показателя текучести, величина которого напрямую влияет в дальнейшем на все физико-механические характеристики грунта.

Список литературы

1. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ. 2013. – 42 с.
2. ГОСТ 30416-2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. – М.: Стандартинформ. 2013. – 15 с.
3. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартинформ. 2016. - 23 с.

4. Дорджиев А. А. Методы определения прочностных характеристик лессовых просадочных грунтов при замачивании / А. А. Дорджиев // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архитектура. - 2008. - Вып. 10 (29). – С. 58-63.

5. Дорджиев А. А. Прогноз деформаций оснований фундаментов существующей застройки в процессе их эксплуатации / А. А. Дорджиев, А. Г. Дорджиев // Водные ресурсы и водопользование в бассейнах рек западного Каспия: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. – Элиста: Изд-во КалмГУ, 2008. – С.109-111.

6. Сафин Д. Р. Исследование деформативности водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными армирующими элементами / Д. Р. Сафин // Известия КГАСУ. – Казань: 2008, № 2 (10). – С. 81-84.

7. Сафин Д. Р. Исследование несущей способности слабых водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными армирующими элементами / Д. Р. Сафин, В. А. Груздева // Сб. ст. Междунар. научно-практич. конф. «Методы проектирования и оптимизации технологических процессов». – Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2017. – С. 54-56.

8. СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. Минрегион России. – М.:НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 2011. – 90 с.

9. Тер-Мартиросян З. Г. Механика грунтов / З. Г. Тер-Мартиросян. М.: АСВ, 2005. – 488 с.

10. Хасанов Р. Р. Экспериментальные исследования деформативности водонасыщенных глинистых грунтов при циклических нагружениях / Р. Р. Хасанов, Р. Р. Гиниятуллин // Известия КГАСУ. – Казань: 2008, № 2 (10). – С. 85-89.

Список литературы на английском языке / References in English

1. GOST 25100-2011. Grunty. Klassifikacija [Soils. Classification]. – M.: Standartinform. 2013. – 42 p. . [in Russian]

2. GOST 30416-2012. Grunty. Laboratornye ispytanija. Obshhie polozhenija [Soils. Laboratory tests. General Provisions]. – M.: Standartinform. 2013. – 15 p. . [in Russian]

3. GOST 5180-2015. Grunty. Metody laboratornogo opredelenija fizicheskih harakteristik [Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics]. – M.: Standartinform. 2016. - 23 p. . [in Russian]

4. Dordzhiyev A. A. Metody opredelenija prochnostnyh harakteristik lessovyh prosadochnyh gruntov pri zamachivanii [Methods for determining strength characteristics of loess subsidence soils while wetting] / A. A. Dordzhiyev // Vestnik VolgGASU. Ser.: Str-vo i arhitektura. [Bulletin of Volgograd State Univercity of Arhitecture and Engeneering. Ser.: Construction and architecture]. - 2008. – №.10 (29). – P. 58-63. [in Russian]

5. Dordzhiyev A. A. Prognoz deformacij osnovanij fundamentov sushhestvujushhej zastrojki v processe ih jekspluatacii [Forecast of deformations of foundations of existing buildings during their operation] / A. A. Dordzhiyev, A. G. Dordzhiyev // Vodnye resursy i vodopol'zovanie v bassejnah rek zapadnogo Kaspija: sb. st. Vseros. nauch.-prakt. konf [Water resources and water use in the basins of the Western Caspian: dig. art. of All-Russian scientific-practical conference]. – Elista: Publishing house of KalmSU, 2008. – P.109-111. [in Russian]

6. Safin D. R. Issledovanie deformativnosti vodonasyshhennyh glinistyh gruntov, armirovannyh vertikal'nymi armirujushhimi jelementami [Vertically reinforced water-saturated argillir soil body deformability studies] / D. R. Safin // Izvestija KGASU [Izvestiya KGASU]. - Kazan: 2008, № 2 (10). – P. 81-84. [in Russian]

7. Safin D. R. Issledovanie nesushhej sposobnosti slabyh vodonasyshhennyh glinistyh gruntov, armirovannyh vertikal'nymi armirujushhimi jelementami [A study of the bearing capacity of weak water-saturated clayey soils reinforced by vertical reinforcing elements] / D. R. Safin, V. A. Gruzdeva // Sb. st. Mezhdunar. nauchno-praktich. konf. «Metody proektirovanija i optimizacii tehnologicheskih processov» [Dig. art. of International scientific-technical conference. «Methods for the design and optimization of technological processes»]. - Ufa: OMEGA SCIENCE, 2017. – P.54-56. [in Russian]

8. SP 24.13330.2011 «Svajnye fundamenty» Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.02.03-85 ["Pile foundations" Actualized edition of SNiP 2.02.03-85]. Minregion Rossii [Ministry of Regional Development of Russia]. – M.: NIIOSP im. N.M. Gersevanova, 2011. – 90 p.

9. Ter-Martirosyan Z. G. Mehanika gruntov [Soil mechanics] / Z. G. Ter-Martirosyan. M.: ASV, 2005. – 488 p.

10. Khasanov R. R. Jeksperimental'nye issledovanija deformativnosti vodonasyshhennyh glinistyh gruntov pri ciklicheskih nagruzhenijah [Experimental studies of deformation of water-saturated clayey soils under cyclic loads] / R. R. Khasanov, R. R. Ghiniatullin // Izvestija KGASU [Izvestiya KGASU]. - Kazan: 2008, № 2 (10). – P. 85-89. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.140

Ширяев А.С.[1], Калимуллин А.Т.[2], Мельников С.А.[3], Шакенов Е.Е.[4], Плотников Д.И.[5]
[1]ORCID: 0000-0002-1633-0771 аспирант, [2]ORCID: 0000-0002-6545-5407 аспирант,
[3]ORCID: 0000-0001-9226-297X студент, [4]ORCID:0000-0001-5086-071X студент,
[5]ORCID: 0000-0002-4566-4885 студент,
Омский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВЕКТОРА УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЗАДАЧЕ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация

В статье произведён расчёт технических мероприятий по снижению потерь электроэнергии на примере простой неразветвлённой сети. Определено оптимальное мероприятие по снижению потерь электроэнергии. При расчёте потерь электроэнергии на 10 кВ учитывался график электрических нагрузок. Сравнение полученных результатов в рамках данной статьи с имеющимися результатами свидетельствует о том, что выбор мероприятий должен осуществляться по специальным техническим расчётам, которые учитывают взаимное влияние мероприятий, оказываемое на потери электроэнергии в линиях электропередачи и трансформаторах.

Ключевые слова: потери электроэнергии, комбинация мероприятий, минимум целевой функции, трансформаторы, линии электропередачи.

Shiryaev A.S.[1] , Kalimullin A.T.[2] , Melnikov S.A.[3] , Shakenov E.E.[4], Plotnikov D.I.[5]
[1]ORCID: 0000-0002-1633-0771, postgraduate student, [2]ORCID: 0000-0002-6545-5407, postgraduate student,
[3]ORCID: 0000-0001-9226-297X student, [4] ORCID: 0000-0001-5086-071X student,
[5]ORCID: 0000-0002-4566-4885student,
Omsk State Technical University

DETERMINATION OF OPTIMUM VECTOR OF CONTROL ACTION IN PROBLEM OF ELECTRICITY LOSS REDUCTION

Abstract

The calculation of technical measures for reduction of electric power losses on the example of a simple unbranched network is carried out in the article. The optimal measure to reduce energy losses is determined. When calculating electricity losses by 10 kV, the schedule of electrical loads is taken into account. Comparison of the results obtained in this article with the available results shows that the choice of measures should be carried out according to special technical calculations that consider the mutual influence of the activities rendered on electric power losses in power transmission lines and transformers.

Keywords: power losses, combination of measures, minimum objective function, transformers, power lines.

Одним из важнейших показателей, характеризующих эффективность эксплуатации электрических сетей, является уровень потерь электроэнергии. В настоящее время существуют достаточно большое количество методов расчёта и снижения величины потерь электроэнергии [1], [2]. Также данный показатель внесён в целевую группу показателей государственных программ, направленных на развитие электросетевого комплекса и, как следствие, экономики Российской Федерации [3], [4].

Производство и передача электроэнергии является сложным технологическим процессом, каждый этап которого должен управляться в соответствии с оптимальным законом. Как уже было отмечено, потери электроэнергии являются важным показателем, характеризующим экономическую эффективность управления электроэнергетикой. Потери электроэнергии в настоящее время подразделяются на техническую и коммерческую составляющую. Сутью политики, направленной на снижение коммерческих потерь электроэнергии является борьба с хищениями, усовершенствование приборно-измерительной базы, осуществляющей учёт электроэнергии. В действительности, задача повышения эффективности управления электрическими сетями является комплексной и требует разработки алгоритмов уменьшения коммерческой и технической составляющих.

На практике присутствует доля потерь, напрямую зависящая от режимов эксплуатации электроэнергетических объектов и не поддающаяся коммерческому учёту. Задача минимизации данного типа потерь, как правило, требует значительных капитальных затрат и, соответственно, поиска оптимальных путей их снижения. В настоящей статье, в силу названных причин, именно данная задача представляет наибольший интерес.

Наибольшая доля технических потерь сконцентрирована на этапе распределения электроэнергии, в распределительных сетях, в таких элементах, как линии и трансформаторы.

В настоящее время, подход, который используется на практике, не учитывает возможного взаимного влияния мероприятий, оказываемого на потери в элементах сети. В рамках данной статьи предложен подход, позволяющий рассмотреть все возможные случаи вводимых мероприятий.

Суть предлагаемой методики заключается в определении общего числа возможных мероприятий на основании наиболее распространённых технических мероприятий в настоящее время (компенсация реактивной мощности на примере БСК, замены недогруженных трансформаторов и замены проводов меньшего сечения на провод большего сечения), сроков окупаемости, потерь электроэнергии и минимума приведённых затрат для каждого мероприятия. Наиболее подробное описание методики изложено в [5, С. 188-190], [6, С. 95-99].

Расчёт потерь электроэнергии в линиях, трансформаторах, сроков окупаемости и приведённых затрат находятся по следующим формулам соответственно:

$$\Delta P_{ЛЭП} = 3 \cdot I^2 rl \tag{1}$$

$$\Delta P_{ТРАНС} = \Delta P_{ТХХ} + \Delta P_{ТКЗ}\left(\frac{S}{S_{НОМ}}\right)^2; \quad (2)$$

$$T_{ок} = \frac{K}{И_{а.ИСХ} - И_{а.П.М} + C_{ЭЭ}\cdot(\Delta W_{ИСХ} - \Delta W_{П.М})}; \quad (3)$$

$$З = 0{,}14\cdot K + И_а + C_{ЭЭ}\cdot\Sigma\Delta W_{П.М}. \quad (4)$$

Где $\Delta P_{ЛЭП}$ - потери электроэнергии в линии [кВт], $\Delta P_{ТРАНС}$ - потери электроэнергии в трансформаторе [кВт], $T_{ок}$ - сроки окупаемости [руб.], $З$ - приведённые затраты [руб.], $И_а$ - амортизационные отчисления на ремонт оборудования до и после ввода мероприятия соответственно [руб.], $C_{ЭЭ}$ - стоимость электроэнергии равная 3,2 [руб/кВт·ч]. $\Delta W_{ИСХ}, \Delta W_{П.М}$ - потери электроэнергии в исходном режиме и после ввода мероприятий соответственно [кВт · ч].

Для поиска оптимального мероприятия или комбинации мероприятий рассмотрена простая неразветвлённая сеть, представленная на рисунке 1.

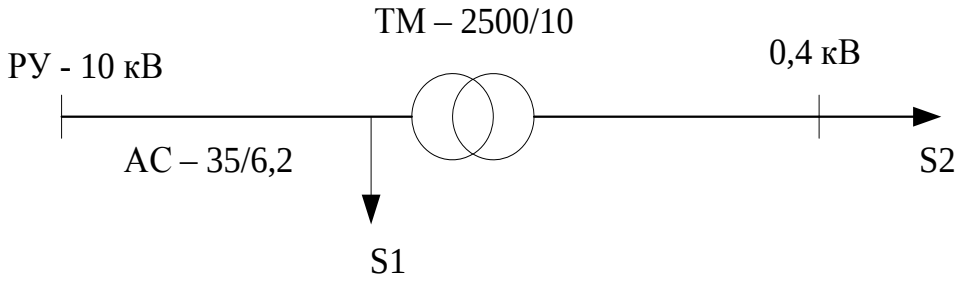


Рис. 1 – Расчётная схема

Таблица 1 – Исходные данные для потребителя S_2

I_2	cos□
90	0,85

Таблица 2 – Исходные данные для линии электропередачи

Марка провода	Длина линии, м.	$R_{л20^oC}$, Ом/м	*I*, А	Цена, руб·м	Цена
АС-35	1500	0,777	180	24,8	37200

Таблица 3 – Исходные данные для трансформатора

Марка трансформатора	$\Delta P_{КЗ}$, кВт	$\Delta P_{ХХ}$, кВт	Цена, руб.
ТМ-2500/10	23,50	3,85	1200000

Для потребителя S_1 10 кВ задан годовой график электрических нагрузок, представленный на рисунке 2. В таблицу 4 сведены результаты расчёта потерь электроэнергии, рассчитанные с учётом годового графика электрических нагрузок.

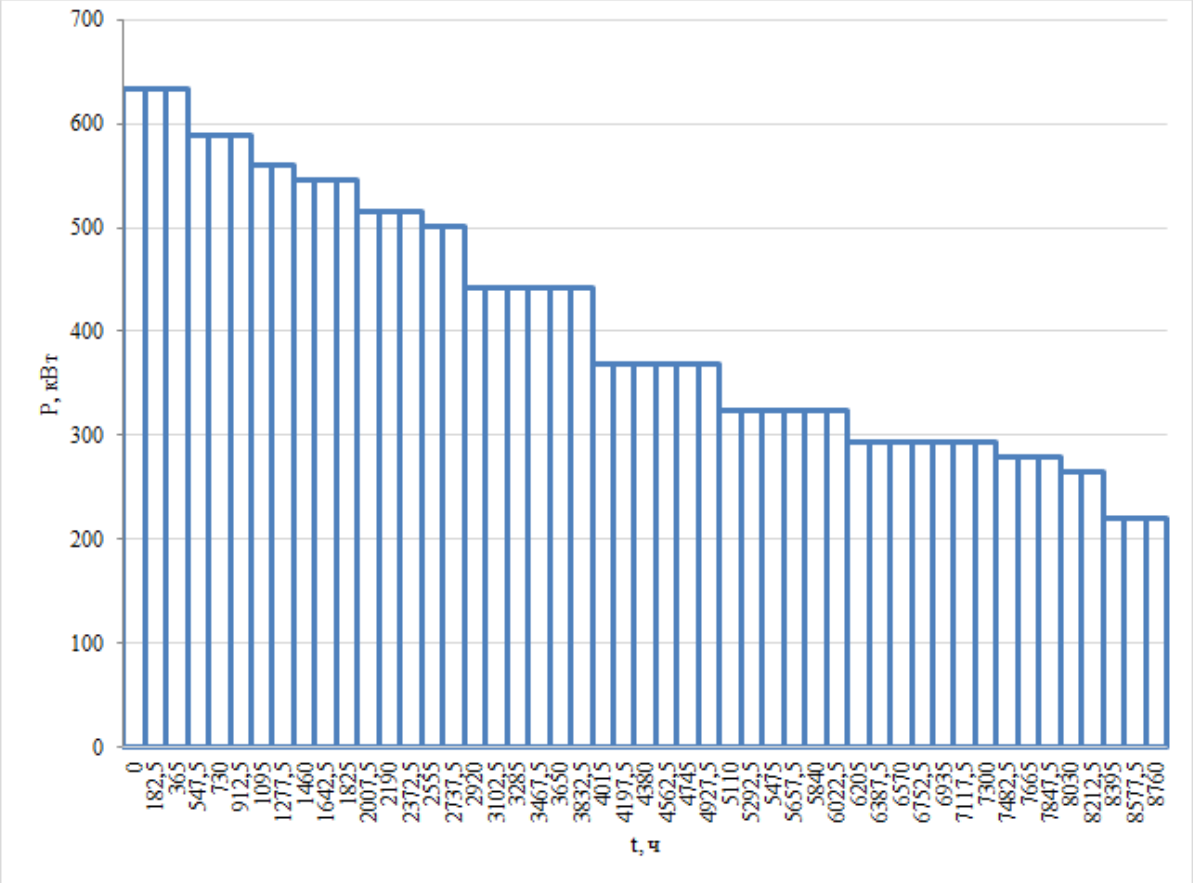


Рис. 2 – Годовой график электрических нагрузок для потребителя 10 кВ

Таблица 4 – Результаты расчёта потерь электроэнергии для потребителя S_1 10 кВ

Период	t, ч	$\Delta P_{ЛЭП}$, кВт	ΔW, кВт · ч	ΣΔW, кВт · ч
Зимний	5	1,39	6,99	135,45
	4	2,18	8,74	
	1	1,69	1,69	
	1	1,26	1,26	
	3	4,28	12,85	
	2	5,04	10,09	
	3	5,59	16,78	
	2	6,46	12,93	
	3	4,78	14,36	
Летний	3	0,78	2,36	
	2	1,39	2,79	
	2	1,13	2,26	
	2	1,26	2,52	
	5	1,69	8,46	
	6	3,14	18,88	
	2	4,04	8,08	
	2	2,18	4,37	

Произведём расчёт потерь электроэнергии на 0,4 кВ и определим необходимое оборудование для снижения потерь электроэнергии.

$$S_1 = \sqrt{3} I_1 U = 1{,}732 \cdot 90 \cdot 10 = 1558 \text{ МВА};$$

$$P_1 = \sqrt{3} I_1 U \cdot \cos\varphi = 1{,}732 \cdot 90 \cdot 10 \cdot 0{,}85 = 1325 \text{ кВт};$$

$$Q_1 = \sqrt{(S_1)^2 - (P_1)^2} = \sqrt{(1558)^2 - (1325)^2} = 821 \text{ квар}.$$

Для достижения максимального эффекта при компенсации реактивной мощности в задаче снижения потерь электроэнергии целесообразно выбрать следующее компенсирующее устройство БСК УКМ58-0,4-700-50У3. Тогда полная мощность будет равна:

$$S_1 = \sqrt{(P_1^2 + (Q_1 - Q_{КУ})^2} = \sqrt{(1325^2 + (821 - 700)^2} = 1328 \text{ МВА};$$

$$Q_1 = \sqrt{(S_1^2 - P_1^2)} = \sqrt{(1328^2 - 1325^2)} = 21{,}17 \text{ квар};$$

$$I_1 = \frac{S_1}{1{,}732 \cdot 10} = \frac{1328}{17{,}32} = 76 \text{ А}.$$

Поскольку трансформатор ТМ-2500/10 загружен на 50% от номинальной мощности, то целесообразно проанализировать возможность ввода мероприятия по замене недогруженных трансформаторов. Соответственно, выбираем трансформатор меньшей номинальной мощности ТМ-1600/10. А также произведём замену провода АС-35 на СИП-3 1х50.

Таблица 5 – Параметры провода СИП-3 1х50 [7]

Марка провода	**Длина линии, м.**	**$R_{л20^oC}$, Ом/м**	***I*, А**	**Цена, руб·м**	**Цена**
СИП-3 1х50	1500	0,720	130	41	61560

Таблица 6 – Данные для трансформатора ТМ-1600/10 [8]

Марка трансформатора	**□$P_{КЗ}$, кВт**	**□P_{XX}, кВт**	**Цена, руб.**
ТМ-1600/10	18	2,35	830000

Таблица 7 – Перечень возможных вводимых мероприятий

Обозначение	**Намечаемые мероприятия**	**Капиталовложения, руб.**
М1	Установка БСК УКМ58-0,4-700-50У3 на S_2	274400
М2	Замена провода АС-35 на СИП-3 1х50	61560
М3	Замена трансформатора ТМ-2500/10 на ТМ-1600/10	830000
М4	Замена провода АС-35 на СИП-3 1х50 и установка БСК УКМ58-0,4-700-50У3 на S_2	335960
М5	Замена трансформатора ТМ-2500/10 на ТМ-1600/10 и установка БСК УКМ58-0,4-700-50У3 на S_2	1104400
М6	Замена трансформатора ТМ-2500/10 на ТМ-1600/10, замена провода АС-35 на СИП-3 1х50, установка БСК УКМ58-0,4-700-50У3 на S_2	1165960

По формулам (1)-(4) для каждого мероприятия и их комбинаций мероприятий произведём расчёт потерь активной мощности, электроэнергии, сроков окупаемости и приведённых затрат. При расчёте потерь энергии продолжительность использования максимума нагрузки для бытовых потребителей равна $T_{MAX} = 3000$ [9, с. 714]. Результаты расчётов приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты расчета

№	**Кап.влож, руб.**	**$\Sigma\Delta P_Л$, кВт**	**$\Sigma\Delta P_{транс.}$, кВт**	**$\Sigma\Delta P$, кВт**	**Ток, год**	**$\Sigma\Delta W$, кВтч**	**З, руб**
0	-	59,09	12,98	72,07	-	216368	692378
М1	274400	47,46	10,45	57,91	2,29	173884	572620
М2	61560	26,24	12,98	39,23	0,2	117827	385889
М3	830000	59,09	19,43	78,52	20,71	235715	971260
М4	335960	43,98	10,45	54,43	2,21	163438	548034
М5	1104400	47,46	14,69	62,16	10,95	186618	830339
М6	1165960	43,98	15,19	59,17	9,12	177673	810553

Если соотноситься с результатами расчётов, полученных в [10, С. 220-221], [11, С. 50-54], то можно сделать вывод, что невозможно однозначно определить оптимальную комбинацию мероприятий. Поскольку для данной схемы оптимальным мероприятием является одиночное мероприятие М2 – «замена провода АС-35 на СИП 3 1х50». В данном случае, такое мероприятие, как замена недогруженного трансформатора ТМ-2500/10 на ТМ-1600/10 проводить нецелесообразно при загрузке трансформатора на 50%, поскольку сроки окупаемости не удовлетворяют нормативному значению 20,7> 8,3 года.

Из полученных результатов расчёта видно, что определение мероприятия, соответствующего минимуму приведённых затрат из общего числа возможных мероприятий является важной задачей и требует поиска оптимальных алгоритмов их определения с последующей разработкой рекомендаций к практическому применению.

Список литературы / References

1. Железко Ю. С. Потери электроэнергии, реактивная мощность, качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
2. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчётов / Ю.С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
3. Правительство российской федерации. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации. / Москва. 2013 г. № 511–р – 43 с.

4. Министерство энергетики Российской Федерации. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. / Москва – 2014. – 237 с.

5. Ширяев А.С., Гиршин С.С. Особенности комплексного подхода к внедрению мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / А.С. Ширяев, С.С. Гиршин // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!. – 2017. – № 1. – С. 188–192.

6. Ширяев А.С. Принципы отсеивания мероприятий по снижению потерь энергии в электрических сетях при поиске их оптимальной комбинации / А.С. Ширяев, С.С. Гиршин, Е.П. Жиленко // В сборнике: Учёные Омска – Региону. – 2017. – С. 95–99.

7. Изолированный провод СИП-3 1х50. [Электронный ресурс]. – URL: http://ingenerelectric.ru/cabel/sip/sip/sip3_20_1x50.html (дата обращения 16.11.2017).

8. Трансформатор ТМ-1600/10-0,4 – технические характеристики. [Электронный ресурс]. – URL: http://sil-transform.ru/tm_1600/10-04 (дата обращения 16.11.2017)

9. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.

10. Ширяев А.С. Анализ эффективности комплексного ввода мероприятий по снижению потерь энергии на критерии приведённых затрат без учёта температуры элементов сети / А.С. Ширяев, А.Т. Калимуллин, В.А. Ткаченко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 12-3 (54) . – С. 218–221.

11. Гиршин С.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в неразветвленной сети с учетом температуры токоведущих частей / С.С. Гиршин, А.С. Ширяев, А.А. Ляшков и др. // Омский научный вестник. – 2017. – № 2 (152) . – С. 50–54.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zhelezko Y. S. Poteri ehlektroehnergii, reaktivnaya moshchnost', kachestvo ehlektroehnergii: Rukovodstvo dlya prakticheskih raschetov. [Energy losses, reactive power, power quality: Guide for practical calculations] / Y.S. Zhelesko. – M.: EHNAS. 2009. – 456 p. [in Russian]

2. Zhelezko Y. S. Vybor meropriyatij po snizheniyu poter' ehlektroehnergii v ehlektricheskih setyah: Rukovodstvo dlya prakticheskih raschyotov [Choice of measures in reduce of energy losses tasks in the electrical grids] / Y.S. Zhelezko. – Energy atom. publishing house, 1989. – 176 p.

3. Pravitel'stvo rossijskoj federacii. Strategiya razvitiya ehlektrosetevogo kompleksa Rossijskoj Federacii [The government of the Russian Federation. Strategy of development of the power grid complex of the Russian Federation] : official text. – Moscow. 2013 g. № 511-r – 43 p. [in Russian]

4. Ministerstvo ehnergetiki Rossijskoj Federacii. EHnergeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda [Ministry of Energy of the Russian Federation. Energy Strategy of Russia for the period up to 2035] : official text. – Moscow – 2014. – 237 p. [in Russian]

5. Shiryaev A.S., Girshin S.S. Osobennosti kompleksnogo podhoda k vnedreniyu meropriyatij po snizheniyu poter' ehlektroehnergii v ehlektricheskih setyah [Features of an integrated approach to the introduction of measures to reduce energy losses in electrical networks] / A.S. Shiryaev, S.S. Girshin // Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'! [Russia is young: Advanced technologies in the industry!]. – 2017. – № 1. P. 188–192. [in Russian]

6. Shiryaev A.S. Principy otseivaniya meropriyatij po snizheniyu poter' ehnergii v ehlektricheskih setyah pri poiske ih optimal'noj kombinacii [Principles of screening out measures to reduce energy losses in electrical networks in the searching for optimal combination tasks] / A.S. Shiryaev, S.S. Girshin, E.P. Zhilenko // V sbornike: Uchyonye Omska – Regionu Materialy II Regional'noj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. Pod obshchej redakciej L. O. Shtriplinga [Scientists of Omsk region. Regional scientific and technical conference. Edited by Shtripliig.]. – 2017. pp. 95-99. [in Russian]

7. Izolirovanniy provod SIP-3 1x50 [Insulated wire SIP-3 1x50] [Electronic resource]. – URL: http://ingenerelectric.ru/cabel/sip/sip/sip3_20_1x50.html (accessed 16.11.2017). [in Russian]

8. Transformator TM-1600/10/0,4 – technicheskie charakteristiki [Transformer OT-1600/10/0.4] [Electronic resource]. – URL: http://sil-trans-form.ru/tm_1600/10-04 (accessed 16.11.2017). [in Russian]

9. Gerasimenko A.A. Peredacha i raspredelenie ehlektricheskoj ehnergii: Uchebnoe posobie [Transmission and distribution of electrical energy: A manual.] / A.A. Gerasimenko, V.T. Fedin. – Rostov-n/D.: Feniks; Krasnoyarsk. publishing projects. 2006. – 720 p. [in Russian]

10. Shiryaev A.S. Analiz ehffektivnosti kompleksnogo vvoda meropriyatij po snizheniyu poter' ehnergii na kriterii privedyonnyh zatrat bez uchyota temperatury ehlementov seti [The efficiency analysis of complex measures in the reduction of the power losses value tasks without temperature depends] / A.S. Shiryaev, A.T. Kalimullin, V.A. Tkachenko // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International scientific research journal]. – 2016. – № 12-3 (54). P. 218-221. [in Russian]

11. Girshin S.S. Vybor meropriyatij po snizheniyu poter' ehlektroehnergii v nerazvetvlennoj seti s uchetom temperatury tokovedushchih chastej [The choice of measures to reduce electricity losses in an unbranched network taking into account the temperature of current-carrying parts] / S.S. Girshin, A.S. Shiryaev, A.A. Lyashkov, A.T. Kalimullin // Omskij nauchnyj vestnik [Omsk scientific journal]. – 2017. – № 2 (152) . – P. 50–54. [in Russian]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.146

Щекочихин О.В.[1], Шведенко В.В.[2], Шведенко П.В.[3]
[1]ORCID: 0000-0001-6681-8436, кандидат технических наук
[2]ORCID: 0000-0002-9249-6116, кандидат экономических наук,
ООО «Регул+», Санкт-Петербург
[3]ORCID: 0000-0001-7003-8272
[1,3]Костромской государственный университет

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МНОГОКОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Аннотация

Рассмотрена модель производственной и информационной системы, которая ориентирована на достижение управленческого решения. Особенность информационной системы заключается в том, что она обладает свойством поведения, т.е. позволяет распознавать проблемную ситуацию, определять из моделей поведения наиболее подходящую и активизировать исполнение управленческих решений на соответствующих контурах производственной системы. Представлена алгебраическая системы, позволяющая по заданным условиям определять вид проблемной ситуации, модель поведения, бизнес-процесс и объект управления. На основе предложенной модели разработано программное обеспечение, позволяющее автоматически определить контур управления, который должен разрешить проблемную ситуацию, а так же определить центры ответственности, на которые подаются сигналы для автоматического или автоматизированного исполнения управленческого решения.

Ключевые слова: интеллектуальная обработка данных, информационная система с поведением, принятие управленческого решения, контуры управления.

Shchekochikhin O.V.[1], Shvedenko V.V.[2], Shvedenko P.V.[3]
[1]ORCID: 0000-0001-6681-8436, PhD in Engineering
[2]ORCID: 0000-0002-9249-6116, PhD in Economy,
«Regul+» JSC, St. Petersburg
[3]ORCID: 0000-0001-7003-8272
[1,3]Kostroma State University

FORMAL DESCRIPTION OF INFORMATIONAL SYSTEM FOR ENSURING MULTILOOP ENTERPRISE MANAGEMENT

Abstract

The productional and informational system model is considered, it is aimed at the achievement of a control decision. The peculiarity of the informational system lies in the fact that it has the property of behavior, i.e. allows to recognize a problem situation, to determine the most appropriate one from the behavior models and to activate the implementation of control decisions on the relevant contours of the production system. The algebraic system, allowing to determine the type of problem situation, the behavior model, the business process and the control object are presented. Based on the proposed model, a software has been developed automatically determining the control loop that should solve the problem situation, as well as define the centers of responsibility for which signals are sent for automatic or automated execution of the management decision.

Keywords: intellectual data processing, informational system with behavior, decision making in management, control loops.

Современное производство настолько сложно, что человек не в состоянии быстро и эффективно принимать управленческие решения. Поэтому наблюдается тенденция применения методов искусственного интеллекта для анализа целей управления и показателей текущего состояния производственной системы. Одним из методов интеллектуализации является создание информационных систем (ИС), наделенных свойством поведения [1], [2], [3]. ИС с поведением обеспечивают поддержку принятия управленческих решений в автоматическом и автоматизированном режимах. Автоматический режим предполагает интеллектуальный анализ данных, выбор наиболее подходящей модели поведения для достижения целей управления. Если опыт, накопленный в информационной системе недостаточен для принятия управленческого решения, то система обучается с помощью эксперта на новую модель поведения. Архитектура ИС, наделенной свойством поведения, ранее была рассмотрена в работах [4], [5], [6]. Интеллектуальная обработка данных и создание новой модели поведения рассматривалась в работах [7], [8], [9]. В настоящей работе предлагается формализованное описание многоконтурной ИС, которая позволяет в режиме близком к реальному времени, использовать и формировать модели поведения для подготовки и принятия управленческих решений.

В производственной системе можно выделить несколько контуров управления: оперативно-процессный, оперативно-функциональный, функционально-тактический, обще-тактический, стратегический и др. Передача управления и данных для поиска управленческих решений происходит между контурами управления.

Для информационного обеспечения логики принятия управленческих решений требуется его формальное математическое описание на основе теории множеств и предикатов первого порядка.

Фрагмент алгебраической системы представлен в работах [8,10].

Для формирования алгебраической системы управления предприятием введены структуры:

Множество контуров управления – M

Множество функциональных направлений – F

Множество лиц или устройств, принимающих решения (ЛПР /УПР) – P

Множество функций УПР/ЛПР – PF

Множество центров ответственности – *CR*

Цель управления бизнесом позволяет сформировать дерево целей, в соответствии со структурой управления. Структура управления состоит из ЛПР, наделенных функциями и системой показателей.

Множество УПР/ЛПР через показатели связаны с множеством функций, исполняемых УПР/ЛПР. Множество приложений связаны с УПР/ЛПР, через исполняемые функции.

Дерево целей может иметь несколько проекций – индикаторов текущего состояния производственной системы в различных аспектах, в которых наряду с нормативными значениями показателей содержатся их фактические значения, величина отклонения и степень значимости отклонения.

Проекция дерева целей на каждом контуре управления представляется следующим графом:

$$G_A = (A,T)\text{, где } A = \{A^0, A^1, ...A^{P-1}\},$$

где A^i – показатель, представляет собой кортеж:

(ID, Name, NV), где

ID – идентификатор показателя,

Name – наименование показателя,

NV – нормативное значение показателя.

T – множество связей между показателями. Каждая связь определяет методы агрегирования показателя.

Индикатор текущего состояния системы представляется следующим графом:

$G_B = (B,T)$, где *B* – состояние показателя, представляет собой кортеж информации:

(ID, FV, D, SD), где

ID – идентификатор показателя из графа $G_{A,}$

FV – фактическое значение показателя,

D – величина отклонения фактического значения от нормативного,

SD – степень значимости отклонения,

T – множество связей между показателями.

Представленные алгебраические структуры достаточны для описания системы управления предприятием.

Для описания информационной системы предприятия заданы следующие алгебраические структуры:

множество объектов системы – *O*,

множество элементарных свойств – *H*,

множества типов объектов – *K*,

типов свойств – *T*,

множество бизнес-процессов (БП) – *BP*,

множество типов связей – *L*,

множество приложений, входящих в ИС – *APP*,

множество потоков данных – *DS*.

Конечное множество определяющее абсолютное и относительное значение даты и времени, которые используются в приложениях – *DT*.

Элементы ранее описанных множеств задают основное множество (Θ) алгебраической системы *U* и множество констант (C) сигнатуры (Σ). Описание представленных множеств и констант происходит в соответствии с объявленными объектами и процессами предметной области.

Предикаты, задающие отношения представленных переменных описаны в работах [8,10].

Предикат, описывающий уникальный идентификатор информационного объекта, имеет следующий вид:

uiio(O,N,H,O,Y, DT)

$Y \subset N$, $y\mu$ – номер свойства, входящего в УИИО.

Предикат определен на множестве

$$M^u = O \times N \times H \times O \times Y \times DT = \{(o_i, n, h_j, o_\varphi, y_\mu, dt) \mid o_i \in \mathrm{O} : (\exists \mathrm{b_w} \in \mathrm{B}, \mathrm{obj_name}(o_i, \mathrm{b_i})),$$

$$\mathrm{n} \in \mathrm{N}, \mathrm{version}(o_i, \mathrm{n}), y_\mu \in N, h_j \in \mathrm{H} : [(\mathrm{s_prop}^*(o_i, n, h_j) \to \varphi = \mathrm{i}) \vee$$

$$\vee \exists \overline{o_r} \in S^i : \mathrm{s_prop}^*(o_r, n, h_j)]\}$$

Определив все объекты-сущности, объекты-справочники и объекты-показатели, следует говорить о процессе взаимодействия этих объектов посредством приложений в этапах БП.

Далее в модели выделены конструкты, описывающие структуры процессов:

struct_SBP(BP, N, $\overline{O}, \overline{O}, \overline{O}$ *,...)* – предикат, описывающий единичный БП версии *N*.

Предикат определен на множестве:

$$M^{sbp} = BP \times N \times \overline{O} \times \overline{O} \times \overline{O} \times ... \times \overline{O} \supset \{(bp_j, n, \overline{o_1}, \overline{o_2}, ...) \mid bp_j \in BP, n \in N, \overline{o_i} \in \overline{O} \wedge$$

$$\wedge\, o_i \in OM + F\}$$

БП представляет собой совокупность объектов управления и показателей, поэтому предикатом задается соответствие коду bp_j БП набора зафиксированных объектов $\overline{o_i}$, для которых $o_j \in OM+F$.

Так как процесс имеет этапную структуру, вводится предикат, задающий для n`-ого этапа процесса набор из единственного объекта управления, приложений, которые обрабатывает поступающую информацию и преобразует её в данные, и одного или более объектов-показателей:

step_SBP(BP,N, N, APP, $\overline{O}, \overline{O}, \overline{O}, \ldots$*)*

Множество истинности предиката имеет вид:

$$M^{ssbp} = BP \times N \times N \times APP \times \overline{O} \times \overline{O} \times \overline{O} \times \ldots \times \overline{O} \supset \{(bp_j, n, n', \overline{o_1}, \overline{o_2}, \ldots) \mid bp_j \in BP,$$

$$n \in N, n' \in N, \exists! o_i \in OM \wedge o_q \in F, i \neq q\}$$

Взаимодействие приложений, работающих на этапах БП обеспечивается потоками данных в многослойной шине.

Предикат уникального идентификатора потока данных в шине имеет следующий вид:

Data_stream(BP, N, O, APP, DT)

Множество истинности предиката имеет вид:

$$M^{ds} = BP \times N \times APP \times O \times DT \supset \{(bp_j, n, o_i, app_k, dt) \mid bp_j \in BP,$$

$$n \in N, \exists! o_i \in OM \wedge o_q \in F, i \neq q, app_k \in APP, dt \in DT\}$$

Регламентное время исполнения процессов является аналогом связей в реляционной БД – по формуле предиката можно понять, как данные в потоках связаны между собой.

Модель поведения определяется набором показателей и их отклонений, вышедших за границы, состоит из набора функций ЛПР и входящего потока данных.

Предикат Модели поведения:

Behavior_model (A, B, PF, DS)

Множество истинности предиката имеет следующий вид:

$$M^{ds} = A \times B \times PF \times DS \supset \{(a_j, b_i, pf_k, ds_m) \mid a_j \in A, b_i \in B,$$

$$\exists! pf_k \in PF, ds_m \in DS\}$$

Модель поведения дает подмножество управленческих решений. По критерию достижению цели выбирается наиболее эффективное управленческое решение.

Степень значимости отклонения показателя связана с контуром управления. В зависимости от степени значимости показателя управленческое решение исполняется автоматически с запуском соответствующих БП и контролем их исполнения или автоматизировано с участием ЛПР.

Показатели связаны с контуром управления степенью значимости показателя по связи один ко многим.

Для моделирования предложенной системы разработано программное обеспечение, которое позволяет формировать метамодели материальной системы, ИС и системы принятия управленческих решений, а так же системы сбора информации от приложений и баз данных в многомерные структуры. На рис. показана структура информационного объекта «Приложение», которое интегрируется в ИС, в интерфейсе разработанного программного обеспечения.

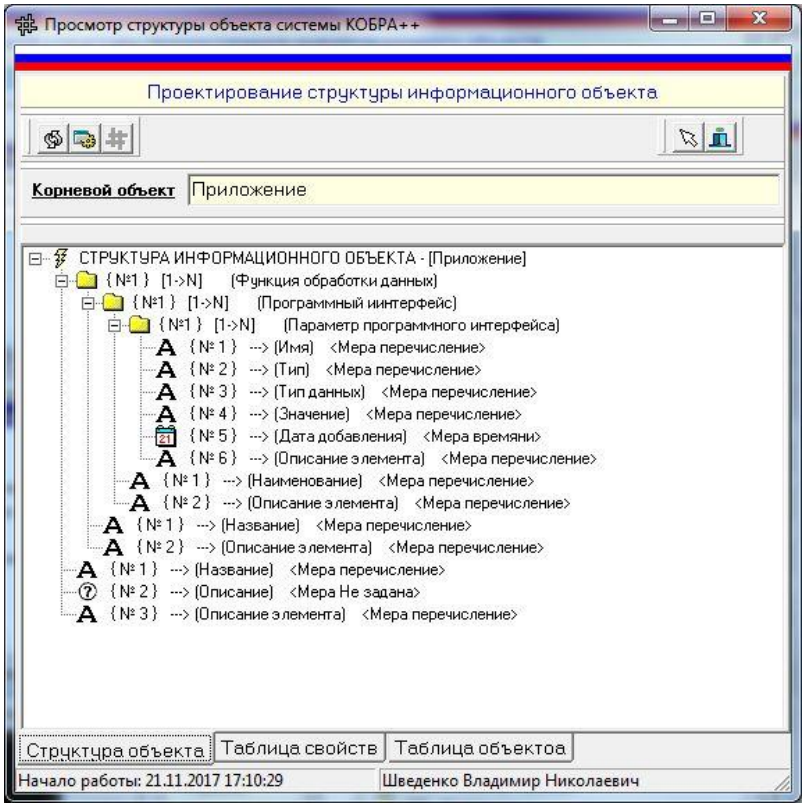


Рис. – Окно проектирования информационного объекта «Приложение»

Предложенная система позволяет гибко настраивать наборы показателей, моделей поведения и контуров управления в зависимости от степени детализации представления производственной системы в информационной, учитывать инновации, изменения нормативной базы и т.п.

Таким образом получена формализованная модель ИС с поведением. На основе предложенной модели разработано программное обеспечение, позволяющее автоматически определить контур управления, который должен разрешить проблемную ситуацию, а так же определить центры ответственности, на которые подаются сигналы для автоматического или автоматизированного исполнения управленческого решения. Предложенная система позволяет гибко настраивать наборы показателей, моделей поведения и контуров управления в зависимости от степени детализации представления производственной системы в информационной.

Список литературы / References

1. Madraky A. Hair-oriented data model for spatio-temporal data representation / A. Madraky, Z.A. Othman, A.R. Hamdan // Expert Systems with Applications, 59. 2016, pp. 119-144. DOI: 10.1016/j.eswa.2016.04.028

2. Vasin Y.G. Object-oriented topological management system of spatially-distributed databases / Y.G. Vasin, Y.V.Yasakov // Pattern Recognition and Image Analysis, 2016, 26 (4), pp. 734-741. DOI: 10.1134/S1054661816040180

3. Khakpour N. Synthesizing structural and behavioral control for reconfigurations in component-based systems / N. Khakpour, F. Arbab, E. Rutten // Formal Aspects of Computing, 2016, 28(1), pp.21-43. DOI: 10.1007/s00165-015-0346-y

4. Шведенко В. Н. Вариант архитектуры управляющей информационной системы для разрешения проблемных ситуаций на предприятии / В. Н. Шведенко, О. В. Щекочихин, П. В. Шведенко // Информационно управляющие системы № 5, 2016 С. 86-90. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.86

5. Schekochikhin O.V. Object-process data model in management information systems / O.V. Schekochikhin // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 318–323 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-318-323

6. Шведенко В.Н. Архитектура интегрированной информационной системы, обеспечивающая свойство поведения / В.Н. Шведенко, О.В. Щекочихин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1078–1083. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1078-1083

7. Щекочихин О.В. Методическое обеспечение подготовки и принятия управленческих решений в информационных системах, обладающих свойством поведения / В.Н. Шведенко, О.В. Щекочихин // Информатизация и связь. №3 2017г. – Москва: АНО «Редакция журнала Информатизация и связь», 2017 ISNN 2078-8320

8. Сахарова Н.С. Анализ информационной поддержки бизнес-процессов с применением группы запросов модели метаданных / Н.С. Сахарова // Научно-технический вестник Поволжья, 2015. – № 5. – С.272-274.

9. Виноградова Г.Л. Методы и модели снижения сложности управления в организационно-технической системе / Г.Л. Виноградова. – Кострома: Изд. Костромского гос. технолог. ун-та, 2015

10. Андреев С.Б. Моделирование интегральных показателей объектно-процессной системы управления предприятием / С.Б. Андреев, В.В. Шведенко // Научно-технический вестник Поволжья, 2017. – № 1. – С.71-74.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Madraky A. Hair-oriented data model for spatio-temporal data representation / A. Madraky, Z.A. Othman, A.R. Hamdan // Expert Systems with Applications, 59. 2016, pp. 119-144. DOI: 10.1016/j.eswa.2016.04.028 [in English]

2. Vasin Y.G. Object-oriented topological management system of spatially-distributed databases / Y.G. Vasin, Y.V.Yasakov // Pattern Recognition and Image Analysis, 2016, 26 (4), pp. 734-741. DOI: 10.1134/S1054661816040180 [in English]

3. Khakpour N. Synthesizing structural and behavioral control for reconfigurations in component-based systems / N. Khakpour, F. Arbab, E. Rutten // Formal Aspects of Computing, 2016, 28(1), pp.21-43. DOI: 10.1007/s00165-015-0346-y [in English]

4. Shvedenko V. N. Variant arhitektury upravljajushhej informacionnoj sistemy dlja razreshenija problemnyh situacij na predprijatii [Variant of the architecture of the management information system for resolving problem situations in the enterprise]/ V. N. Shvedenko, O. V. Shhekochihin, P. V. Shvedenko // Informacionno upravljajushhie sistemy [Information management systems] № 5, 2016 S. 86-90. doi:10.15217 / issn1684-8853.2016.5.86 [in Russian]

5. Schekochikhin O.V. Object-process data model in management information systems / O.V. Schekochikhin // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 318–323 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-318-323 [in Russian]

6. Shvedenko V.N. Arhitektura integrirovannoj informacionnoj sistemy, obespechivajushhaja svojstvo povedenija [The architecture of an integrated information system that provides a behavioral feature] / V.N. Shvedenko, O.V. Shhekochihin // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2016. T. 16. № 6. S. 1078–1083. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1078-1083 [in Russian]

7. Shhekochihin O.V. Metodicheskoe obespechenie podgotovki i prinjatija upravlencheskih reshenij v informacionnyh sistemah, obladajushhih svojstvom povedenija [Methodical support of preparation and acceptance of administrative decisions in the information systems possessing property of behavior] / V.N. Shvedenko, O.V. Shhekochihin // Informatizacija i svjaz' [Informatization and communication]. №3 2017g. – Moskva: ANO «Redakcija zhurnala Informatizacija i svjaz'», 2017 ISNN 2078-8320 [in Russian]

8. Saharova N.S. Analiz informacionnoj podderzhki biznes-processov s primeneniem gruppy zaprosov modeli metadannyh [Analysis of information support for business processes using the metadata model query group] / N.S. Saharova // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja [Scientific and Technical Herald of the Volga Region], 2015. – № 5. – S.272-274. [in Russian]

9. Vinogradova G.L. Metody i modeli snizhenija slozhnosti upravlenija v organizacionno-tehnicheskoj sisteme [Methods and models for reducing the complexity of management in the organizational and technical system] / G.L. Vinogradova. – Kostroma: Izd. Kostromskogo gos. tehnolog. un-ta, 2015 [in Russian]

10. Andreev S.B. Modelirovanie integral'nyh pokazatelej ob#ektno-processnoj sistemy upravlenija predprijatiem / S.B. Andreev, V.V. Shvedenko // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja, 2017. – № 1. – S.71-74. [in Russian]