

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.120>

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИСЧЕРПАНИЯ НЕФТЯНЫХ ПОЛЕЙ

Научная статья

Киндинова В.В.<sup>1,\*</sup>, Кузнецова Е.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-5304-1293;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-0235-5799;

<sup>1,2</sup> Московский авиационный институт (национально-исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (hamstervill[at]mail.ru)

### Аннотация

В работе рассматриваются вопросы обучения методу системной динамики имитационного моделирования при подготовке специалистов нефтегазовой отрасли. Показаны достижения российских специалистов в решении задач управления нефтегазовым предприятием методом системной динамики с учетом особенностей российской экономики. Показано, что существует потребность в моделях обучения, соответствующих профилю обучающихся. Основной целью данной работы является изложение математических основ метода системной динамики, а также предоставление обучающего примера использования системной динамики для моделирования работы нефтяной компании в условиях истощения нефтяных месторождений. Приведены задачи, решаемые на модели. В работе выполнено сравнение разработанной модели с моделями нефтегазовой отрасли других авторов, а также с результатами гидродинамического моделирования нефтяных месторождений с использованием данных промысловых исследований и реальных скважинных замеров.

**Ключевые слова:** динамика истощения нефтяных полей, системная динамика, имитационная модель, причинно-следственная диаграмма, математическая модель процесса.

## SIMULATION MODEL OF THE OIL FIELD DEPLETION PROCESS

Research article

Kindinova V.V.<sup>1,\*</sup>, Kuznetsova E.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-5304-1293;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-0235-5799;

<sup>1,2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (hamstervill[at]mail.ru)

### Abstract

The work examines the issues of teaching the system dynamics method of simulation modelling in the training of oil and gas industry specialists. The article shows the achievements of Russian specialists in solving the problems of oil and gas enterprise management using the system dynamics method, taking into account the specifics of the Russian economy. It is demonstrated that there is a need for training models corresponding to the profile of students. The main objective of this paper is to outline the mathematical foundations of the system dynamics method and to provide a tutorial example of the use of system dynamics to model the work of an oil company in the conditions of depletion of oil fields. The problems solved by the model are presented. The work compares the developed model with oil and gas industry models of other authors, as well as with the results of hydrodynamic modelling of oil fields using field survey data and real well measurements.

**Keywords:** oil field depletion dynamics, system dynamics, simulation model, cause-effect diagram, mathematical model of the process.

### Введение

Нефтегазовая отрасль вносит основной вклад в ВВП России. В последние годы отрасль бурно развивается. Ее развитие сопровождается активной компьютеризацией и внедрением IT-технологий. Активно применяется математическое и компьютерное моделирование процессов нефтегазового сектора. В том числе применяются методы имитационного моделирования, предполагающие разработку программных моделей реальных систем или процессов, выполнение этих программ на компьютере и анализ результатов компьютерных экспериментов по исследованию поведения моделей. Важнейшим качеством имитационной модели является нахождение ее на границе возможностей математического моделирования, когда имитация – единственный способ получить представление о поведении сложной системы.

Системно-динамический подход имитационного моделирования предполагает моделирование сложных систем на самом верхнем уровне абстракции, когда исследователь абстрагируется от индивидуальных объектов системы и рассматривает только агрегированные количественные характеристики потоков таких объектов и взаимозависимости этих потоков. Системная динамика – один из наиболее популярных инструментов, используемых в настоящее время для анализа и проектирования сложных систем. Она используется для моделирования макроэкономических и социальных процессов, а также при исследовании климата и предсказании погоды, для управления ресурсами и исследования распространения болезней и т.п. [1], [2]. Системная динамика пользуется популярностью у большого количества коммерческих, государственных и даже надгосударственных структур, как например, «Римский клуб» [3].

На моделях системной динамики базируется концепция устойчивого развития человечества [4], которая в настоящее время во многом определяет мировые процессы хозяйствования и международных взаимоотношений.

Системная динамика применяется и для моделирования процессов в нефтегазовой отрасли. Метод системной динамики позволил российским ученым исследовать управленческие решения высокой сложности и стоимости. Каждое решение характеризуется определенным набором различных факторов. К таким факторам можно отнести, например, макроэкономические показатели, технико-экономические показатели месторождений и скважин, затраты на консервацию, риски, спрос на нефтепродукты, производственные мощности, возможности транспортной системы и др. Причем количество факторов может достигать огромных размеров. Метод позволяет учесть в моделях сложные внутренние связи, порождающие нелинейный характер взаимодействия между этими факторами. Метод позволяет учесть задержки, петли обратной связи. Использование системно-динамического имитационного моделирования позволило российским ученым разработать имитационные модели на уровне отдельных бизнес-сегментов и предприятий нефтяной отрасли, а также интегрированные модели управления инвестиционной деятельностью «вертикально интегрированных» нефтяных компаний с учетом таких дополнительных факторов, как общее количество месторождений, количество скважин, количество АЗС, количество нефтебаз и др. Известна российская модель расчета акционерной стоимости нефтегазодобывающего предприятия, позволившая решить задачу оптимизации акционерной стоимости компании. Эта модель также позволила решить задачи управления нефтегазодобывающим предприятием, в том числе проблеме «отключения» месторождений от эксплуатации, а также задачу расчета «равновесных» цен внутреннего ценообразования [5], [6], [7], [8].

При подготовке специалистов нефтегазовой отрасли обучение имитационному моделированию и, в частности, системной динамике является актуальным. Имеется богатый набор учебной литературы по системной динамике зарубежных и отечественных авторов [1], [2], [9], [10], [11], [12], где-либо описывают инструментальный программный пакетов, реализующих системно-динамический подход, либо пытаются объяснить на примерах идеологию построения системно-динамических моделей. Однако, как показывает опыт, обучение методу системной динамики наиболее эффективно, когда, во-первых, студентам разъяснены математические основы метода, во-вторых, студенты имеют дело с процессами из области своей будущей деятельности. Таким образом, основная цель данной работы – показать математические основы метода системной динамики, а также представить обучающий пример использования системной динамики для моделирования деятельности нефтяной компании в условиях истощения нефтяных месторождений.

#### **Имитационное моделирование динамики истощения запасов нефтяных полей**

Процессы истощения протекают под воздействием ряда позитивных и негативных факторов, которые могут существенно повлиять на результаты стратегического планирования и управления нефтяной отрасли. Так, истощение запасов наблюдается по мере ввода в строй всё большего количества скважин, но истощение приводит также к закрытию и консервации скважин уже действующих. Истощение запасов негативно воздействует и на производительность самих скважин. Согласно использованию простейшей и мало затратной технологии нефтедобычи, нефтяной насос работает лишь благодаря разнице давлений между дном скважины и секцией подпочвы. Разница давлений со временем уменьшается. При истощении нефтяного поля до 75% объема разница давлений стремится к окончательному выравниванию и деградации, нефтедобыча с использованием мало затратной технологии становится невозможной, и дальнейшая эксплуатация нефтяного поля связывается с внедрением уже весьма дорогостоящих технологических решений.

Для исследования процесса истощения нефтяных полей под воздействием указанных выше факторов разработана имитационная модель с использованием системно-динамического подхода. При моделировании использовались следующие допущения:

- 1) разработка месторождения осуществляется по малозатратной технологии, описанной выше;
- 2) разработка прекращается при истощении нефтяного поля до 75% объема;
- 3) введены следующие функциональные зависимости, основанные на экспертных оценках:
  - функция влияния на продуктивность скважины;
  - функция влияния на ввод в эксплуатацию скважин;
  - функция влияния на консервацию скважин.

Качественное описание процесса дает причинно-следственная диаграмма (рис. 1). Определяющие понятия и правила построения причинно-следственной диаграммы описаны в учебном пособии Каталевского Д. Ю. [10].

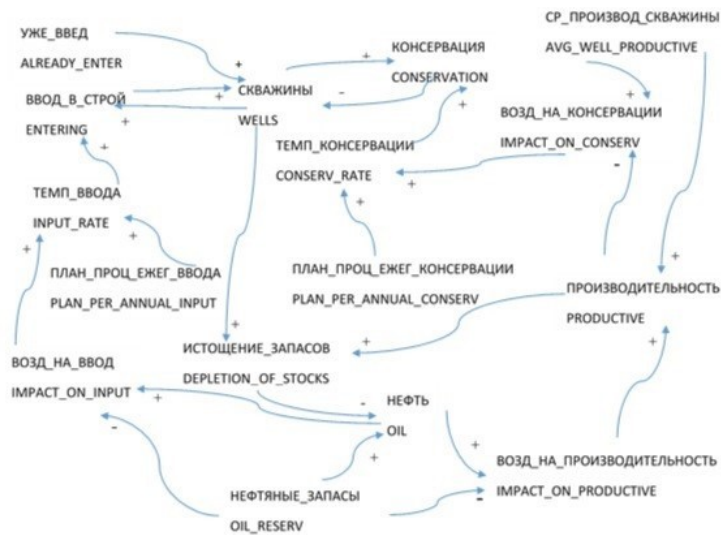


Рисунок 1 - Причинно-следственная диаграмма  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.120.1>

На основе причинно-следственной диаграммы построена потоковая диаграмма модели (рис. 2), с использованием системно-динамических инструментов системы AnyLogic [13].

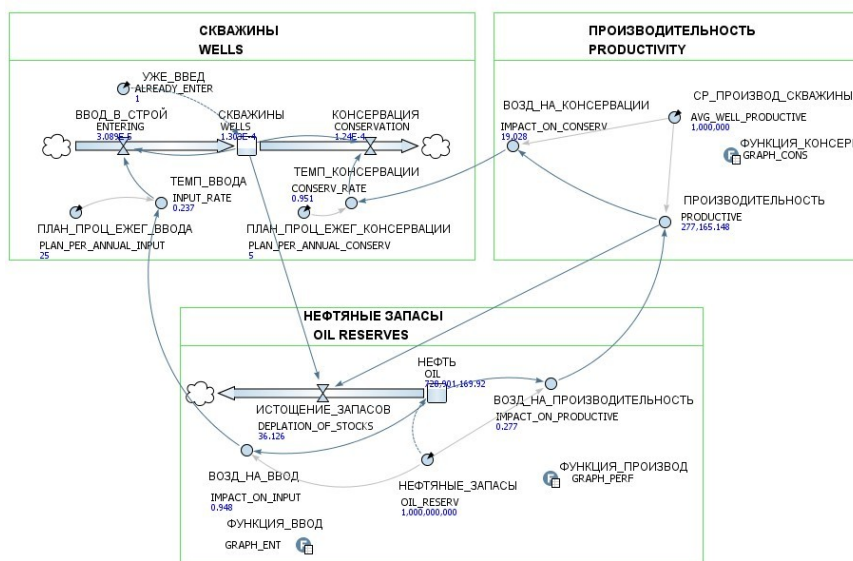


Рисунок 2 - Потоковая диаграмма процесса истощения нефтяных полей  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.120.2>

Введем сокращенные обозначения для накопителей, потоков, переменных и функций, представленных на потоковой диаграмме на рисунке 2. Сокращенные обозначения приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1 - Накопители, темпы, функции и параметры потоковой диаграммы.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.120.3>

Обозначение на потоковой диаграмме Designation on the flows diagram	Сокращенное обозначение Abbreviated designation	Пояснение Explanation
НЕФТЬ OIL	Y1	Накопитель или уровень Stock or level
СКВАЖИНЫ	Y2	Накопитель или уровень

WELLS		Stock or level
ИСТОЩЕНИЕ ЗАПАСОВ DEPLETION_OF_STOCKS	$X1$	Темп Rate
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ PRODUCTIV	$X2$	Функция, зависящая от уровня Level-dependent function
НЕФТЯНЫЕ ЗАПАСЫ OIL_RESERV	$a1$	Управляемый параметр Controlled parameter
УЖЕ ВВЕД ALREADY_ENTER	$a2$	Управляемый параметр Controlled parameter
ТЕМП КОНСЕРВАЦИИ CONSERV_RATE	$X3$	Функция, зависящая от уровня Level-dependent function
КОНСЕРВАЦИЯ CONSERVATION	$X4$	Темп Rate
ТЕМП ВВОДА INPUT_RATE	$X5$	Функция, зависящая от уровня Level-dependent function
ВВОД В СТРОЙ ENTERING	$X6$	Темп Rate
ПЛАН ПРОЦ ЕЖЕГ КОНСЕРВАЦИИ PLAN_PER_ANNUAL_CONSERV	$a3$	Управляемый параметр Controlled parameter
ПЛАН ПРОЦ ЕЖЕГ ВВОДА PLAN_PER_ANNUAL_INPUT	$a4$	Управляемый параметр Controlled parameter
СР ПРОИЗВОД СКВАЖИНЫ AVG_WELL_PRODUCTIV	$a5$	Управляемый параметр Controlled parameter
ФУНКЦИЯ ПРОИЗВОД GRAPH_PERF	$F1$	Табличная функция Table function
ФУНКЦИЯ КОНСЕРВ GRAPH_CONS	$F2$	Табличная функция Table function
ФУНКЦИЯ ВВОД GRAPH_ENT	$F3$	Табличная функция Table function
ВОЗД НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ИМПАКТ_ON_PRODUCTIV	$F1(Y1, a1)$	GRAPH_PERF(OIL/ OIL_RESERV)
ВОЗД НА КОНСЕРВАЦИИ ИМПАКТ_ON_CONSERV	$F2(X2, a5)$	GRAPH_CONS(PRODUCTIV/ AVG_WELL_PRODUCTIV)
ВОЗД НА ВВОД ИМПАКТ_ON_INPUT	$F3(Y1, a1)$	GRAPH_ENT(OIL/ OIL_RESERV)

Потоковая диаграмма соответствует математической модели процесса [3], [14], представленной системой разностных уравнений и алгебраических соотношений, приведенных ниже.

$$Y1(t) = Y1(t - dt) - X1(t) * dt, \quad (1)$$

где  $Y1(t)$  – количество нефти в момент времени;  
 $Y1(t-dt)$  – количество нефти в момент времени  $t-dt$ ;  
 $t$  – время;  
 $dt$  – шаг приращения времени;  
 $X1$  – функция истощения запасов нефти.

$$Y2(t) = Y2(t - dt) + (X6 - X4) * dt, \quad (2)$$

где  $Y2(t)$  – количество скважин в момент времени  $t$ ;  
 $Y2(t-dt)$  – количество скважин в момент времени  $t-dt$ ;  
 $t$  – время;  
 $dt$  – шаг приращения времени;  
 $X6$  – функция ввода скважин;  
 $X4$  – функция консервации скважин.

$$Y2(t0) = a2, \quad (3)$$

где  $Y2(t0)$  – количество скважин в начальный момент времени;

$a_2$  – количество скважин, константа.

$$Y_1(t_0) = a_1, \quad (4)$$

где  $Y_1(t_0)$  – количество нефти в начальный момент времени;  
 $a_1$  – запас нефти, константа.

$$X_1 = Y_2(t) * X_2, \quad (5)$$

где  $X_1$  – функция истощения запасов нефти;  
 $Y_2(t)$  – количество скважин в момент времени  $t$ ;  
 $t$  – время;  
 $X_2$  – функция производительности скважин.

$$X_2 = F_1(Y_1(t), a_1) * a_5, \quad (6)$$

где  $X_2$  – функция производительности скважин;  
 $F_1(Y_1(t), a_1)$  – функция воздействия на производительность;  
 $Y_1(t)$  – количество нефти в момент времени  $t$ ;  
 $a_1$  – запас нефти, константа;  
 $a_5$  – средняя производительность скважины, константа.

$$X_3 = F_2(X_2, a_5) * a_3/100, \quad (7)$$

где  $X_3$  – функция скорости консервации;  
 $F_2(X_2, a_5)$  – функция воздействия на консервацию;  
 $X_2$  – функция производительности скважин;  
 $a_5$  – средняя производительность скважины, константа;  
 $a_3$  – план на ежегодную консервацию скважин, constant.

$$X_4 = Y_2(t) * X_3, \quad (8)$$

где  $X_4$  – функция консервации скважин;  
 $Y_2(t)$  – количество скважин в момент времени  $t$ ;  
 $X_3$  – функция скорости консервации.

$$X_5 = F_3(Y_1(t), a_1) * a_4/100, \quad (9)$$

где  $X_5$  – функция скорости введения скважин;  
 $F_3(Y_1(t), a_1)$  – функция воздействия на введение скважин;  
 $Y_1(t)$  – количество нефти в момент времени  $t$ ;  
 $a_1$  – запасы, nstant;  
 $a_4$  – plan per annual input wells, constant.

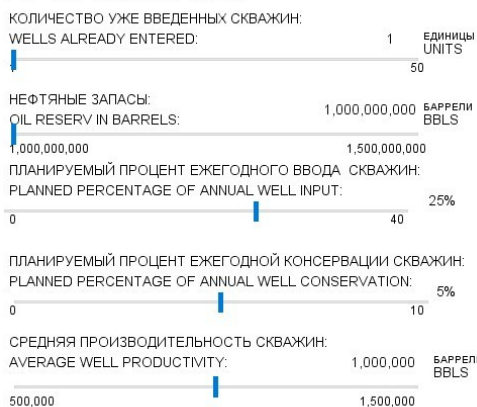
$$X_6 = Y_2(t) * X_5, \quad (10)$$

где  $X_6$  – функция введения скважин;  
 $Y_2(t)$  – количество скважин в момент времени  $t$ ;  
 $X_5$  – функция скорости введения скважин.

Для модели разработан пользовательский интерфейс, позволяющий задавать значения параметров для проведения компьютерных экспериментов (рис. 3).

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИСТОЩЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАПАСОВ SIMULATION MODEL OF OIL RESERVES DEPLETION

### ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТА: EXPERIMENT PARAMETERS:



ЗАПУСК МОДЕЛИ И ДЕМОНСТРАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

RUN MODEL AND OPEN PRESENTATION OF THE EXPERIMENT

Рисунок 3 - Интерфейс для задания параметров эксперимента  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.120.4>

Имитационные эксперименты на модели позволяют оценить срок службы месторождения в зависимости от планируемого процента ежегодного ввода скважин в эксплуатацию (PLAN\_PER\_ANNUAL\_INPUT). Результаты приведены на рисунке 4, рисунке 5.

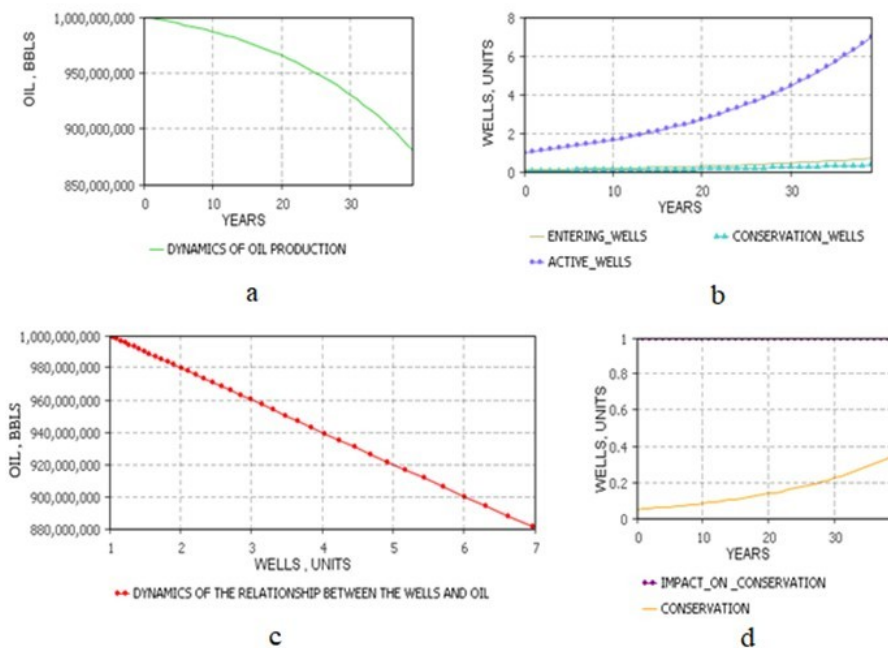


Рисунок 4 - Динамика процессов при PLAN\_PER\_ANNUAL\_INPUT = 10%  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.120.5>

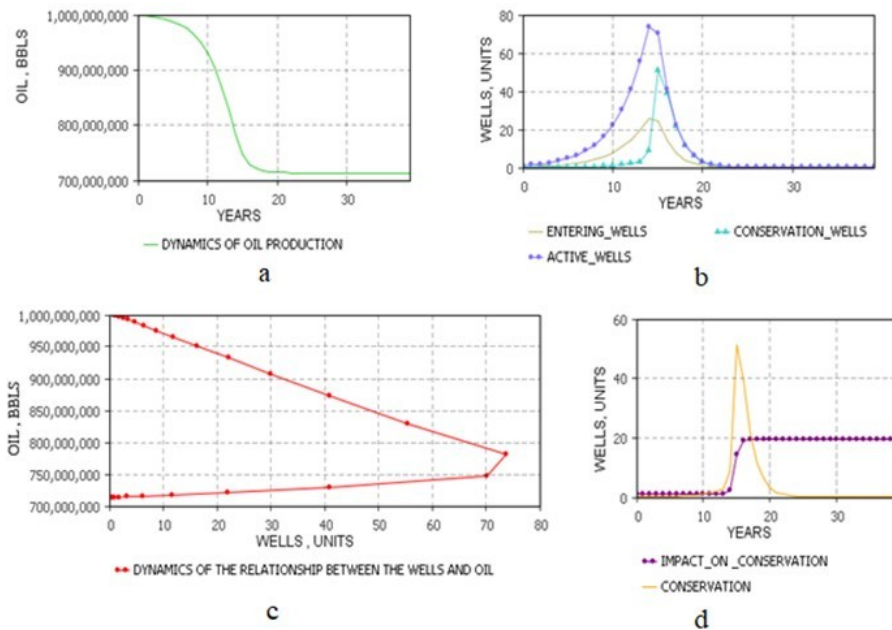


Рисунок 5 - Динамика процессов при  $PLAN\_PER\_ANNUAL\_INPUT = 36\%$   
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.120.6>

На рисунке 4а и 5а показана динамика добычи нефти. На рисунке 4б и 5б показана динамика изменений количества активных скважин, количества введенных скважин и количества законсервированных скважин. На рисунке 4с и 5с показана взаимозависимость между количеством скважин и количеством нефти. На рисунке 4д и 5д показана динамика консервации скважины и функция воздействия на консервацию.

Проанализируем результаты имитационных экспериментов. Запасы нефти не возобновляются со временем и их можно израсходовать только раз. При  $PLAN\_PER\_ANNUAL\_INPUT = 36\%$  за период моделирования 40 лет наблюдается типовой вид поведения динамической системы. Такой вид поведения системы называют «рост и спад». Наблюдается «рост и спад» количества действующих скважин на фоне падения запасов невозобновляемого ресурса нефти. Можно заметить, чем больше скважин вводится, тем меньше срок истощения месторождения нефти. В представленной модели не учитывается переменная «капитал» добывающей отрасли. Переменную «капитал» можно использовать для регулирования скорости добычи нефти.

### Обсуждение

Построенная системно-динамическая модель имитации деятельности нефтяной компании в условиях истощения запасов нефтяных полей позволяет изучать различные сценарии управления. В частности, исследовать процессы введения в эксплуатацию и консервации нефтяных скважин с учетом их производительности и размера месторождения. Сценарии управления могут учитывать различные технико-экономические показатели, свойственные месторождению (например, объем месторождения, объем добычи), корпоративные ограничения (например, минимальный объем добычи) и предпочтения, которые могут действовать на заданном интервале (например, отношение объема добычи к объему месторождения).

Системно-динамические модели, разработанные российскими специалистами для нефтегазовой отрасли [5], [6], [7], [8], имеют высокую научную ценность. Указанные модели применяются при подготовке топ-менеджмента нефтегазовой отрасли. Однако они имитируют очень сложные процессы, в них используется большое количество сложных понятий и терминов из области макроэкономики. Поэтому такие модели авторы считают слишком сложными для применения при обучении студентов-«нефтянников».

Предложенная авторами обучающая имитационная модель динамики истощения запасов нефтяных полей является дополнением к обучающей модели Донеллы Медоуз «экономики нефтяной отрасли» [11]. Популярная модель Донеллы Медоуз имитирует деятельность нефтяной компании, разрабатывающей нефтяное месторождение. Эта модель исследует взаимозависимость и взаимовлияние капитала и невозобновимого ресурса-нефти нефтяного месторождения.

Центральным вопросом двух моделей является исследование противоречий между ростом объемов нефтедобычи и ограничениями, обусловленными производственной политикой нефтедобывающего предприятия. Но в отличие от модели Донеллы Медоуз, предложенная в работе модель акцентирует внимание на технологии нефтедобычи. Модель рассматривает процесс истощения нефтяных запасов в зависимости от производительности скважин или от количества скважин нефтедобычи. Результаты предложенной модели согласуются с результатами гидродинамического моделирования нефтяных месторождений с использованием данных промысловых исследований и фактических замеров скважин [15]. Предложенная модель может быть использована для проверки чувствительности системы к начальным предположениям, а также для определения путей улучшения реальной системы. Проведенные исследования могут быть полезными для менеджмента нефтедобывающих компаний, для экспресс-анализа процессов нефтедобычи.

Обе модели имитируют процесс исчерпания нефтяного месторождения на высоком уровне абстракции. Имитационные эксперименты с моделью позволяют проследить течение процесса во времени шаг за шагом. Это способствует более глубокому пониманию процесса. Обе модели являются обучающими и могут быть рекомендованы для изучения метода системной динамики при подготовке специалистов нефтегазового профиля.

### Заключение

В работе показано, что метод системной динамики имитационного моделирования является популярным методом анализа и проектирования макроэкономических и социальных систем, применяется также для анализа процессов нефтегазовой отрасли.

В работе представлена разработанная авторами имитационная модель динамики истощения запасов нефтяных полей с использованием системно-динамического подхода в среде программного пакета AnyLogic. Представлены результаты имитационного исследования зависимости истощения запаса нефтяных полей от производительности скважин, от их количества и от объема месторождения. Модель может продуктивно применяться для обучения специалистов нефтегазовой отрасли взаимодействию со сложными природными и техническими объектами.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Карпов. — СПб. : БХВ-Петербург, 2006. — 400 с.
2. Sterman J. D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World / J. D. Sterman. — Boston : Irwin McGraw-Hill, 2000. — 982 p.
3. Forrester J. W. World Dynamics / J. W. Forrester. — Cambridge : Mass, Wright-Allen Press, 1973. — 147 p.
4. Meadows D. H. The Limits to Growth / D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers [et al.] — New York : Universe Books, 1972. — 205 p.
5. Акопов А. С. Поддержка принятия управленческих решений для нефтегазодобывающих предприятий с помощью динамических имитационных моделей / А. С. Акопов // Системы управления и информационные технологии. — 2004. — Т. 4. — № 16. — С. 51–56.
6. Акопов А. С. Использование средств динамического имитационного моделирования для подготовки управленческих решений в ТЭК / А. С. Акопов // Системы управления и информационные технологии. — 2004. — Т. 2. — № 14. — С. 72–79.
7. Akopov A. S. Designing of Integrated System-Dynamics Models for an Oil Company / A. S. Akopov // International Journal of Computer Applications in Technology. — 2012. — Vol. 45. — № 4. — P. 220–230. DOI: 10.1504/IJCAT.2012.051122
8. Акопов А. С. Система прогнозирования динамики добычи нефти с использованием имитационного моделирования / А. С. Акопов, А. Л. Бекларян, Н. К. Хачатрян [и др.] // Информационные технологии. — 2017. — Т. 23. — № 6. — С. 431–436.
9. Казаков С. А. Практикум по основам моделирования бизнес-процессов : учебное пособие / С. А. Казаков, Ю. А. Шебеко. — Москва : Изд-во МАИ, 2002. — 108 с.
10. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении : учебное пособие / Д. Ю. Каталевский. — Москва : Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. — 513 с.
11. Meadows D. H. Thinking in Systems / D. H. Meadows. — Vermont : Chelsea Green Publishing Company, 2009. — 218 p.
12. Лычкина Н. Н. Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития / Н. Н. Лычкина // Имитационное моделирование. Теория и практика. Сборник докладов четвертой всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2009. — СПб. : ОАО «ЦТСС», 2009. — Том 1. — С. 48–56.
13. The AnyLogic Company // The AnyLogic Company register. — URL: <https://www.anylogic.com/> (accessed: 21.10.2023).
14. Forrester J. W. Industrial Dynamics / J. W. Forrester. — Portland Oregon : Productivity Press, 1961. — 464 p.
15. Гладков Е. А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа: учебное пособие / Е. А. Гладков. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. — 99 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Karpov Yu. Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5 [Simulation Modeling of Systems. Introduction to modeling with AnyLogic 5] / Yu. Karpov. — Saint-Petersburg : BKhV-Peterburg Publ., 2006. — 400 p. [in Russian]
2. Sterman J. D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World / J. D. Sterman. — Boston : Irwin McGraw-Hill, 2000. — 982 p.



3. Forrester J. W. *World Dynamics* / J. W. Forrester. — Cambridge : Mass, Wright-Allen Press, 1973. — 147 p.
4. Meadows D. H. *The Limits to Growth* / D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers [et al.] — New York : Universe Books, 1972. — 205 p.
5. Akopov A. S. Podderzhka prinjatija upravlencheskih reshenij dlja neftegazodobyvajushhih predpriyatij s pomoshh'ju dinamicheskikh imitacionnyh modelej [Support for Decision-making for Upstream Enterprises with Dynamic Simulation Models Help] / A. S. Akopov // *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii* [Control Systems and Information Technology]. — 2004. — Vol. 4. — № 16. — P. 51–56. [in Russian]
6. Akopov A. S. Ispol'zovanie sredstv dinamicheskogo imitacionnogo modelirovanija dlja podgotovki upravlencheskih reshenij v TJeK [Using of Dynamic Simulation Models for Decision-Making Support in Oil and Gas Industry] / A. S. Akopov // *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii* [Control Systems and Information Technology]. — 2004. — Vol. 2. — № 14. — P. 72–79. [in Russian]
7. Akopov A. S. Designing of Integrated System-Dynamics Models for an Oil Company / A. S. Akopov // *International Journal of Computer Applications in Technology*. — 2012. — Vol. 45. — № 4. — P. 220–230. DOI: 10.1504/IJCAT.2012.051122
8. Akopov A. S. Sistema prognozirovaniya dinamiki dobychi nefti s ispol'zovaniem imitacionnogo modelirovanija [The Forecasting System Dynamics of Oil Production using Simulation Modeling] / A. S. Akopov, A. L. Beklaryan, A. V. Fomin [et al.] // *Informatsionnye tehnologii* [Information Technology]. — 2017. — Vol. 23. — № 6. — P. 431–436. [in Russian]
9. Kazakov S. A. *Praktikum po osnovam modelirovaniya biznes-protsessov* [Workshop on the Basics of Business Process Modeling] : educ. tutorial / S. A. Kazakov, Yu. A. Shebeko. — Moscow : MAI Publ, 2002. — 108 p. [in Russian]
10. Katalevsky D. Yu. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii* [Fundamentals of Simulation Modeling and System Analysis in Management] : educ. tutorial / D. Yu. Katalevsky. — Moscow : "Delo" RANEPa Publ., 2015. — 513 p. [in Russian]
11. Meadows D. H. *Thinking in Systems* / D. H. Meadows. — Vermont : Chelsea Green Publishing Company, 2009. — 218 p.
12. Lychkina N. N. Retrospektiva i perspektiva sistemnoi dinamiki. Analiz dinamiki razvitiya [Retrospective and Perspective of System Dynamics. Analysis of the Dynamics of Development] / N. N. Lychkina // *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika. Sbornik dokladov chetvertoi vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii IMMOD-2009* [Simulation Modeling. Theory and Practice. Collection of reports of the Fourth All-Russian Scientific and Practical conference IMMOD-2009]. — Saint Petersburg : OJSC "TsTSS" Publ, 2009. — P. 48–56. [in Russian]
13. The AnyLogic Company // The AnyLogic Company register. — URL: <https://www.anylogic.com/> (accessed: 21.10.2023).
14. Forrester J. W. *Industrial Dynamics* / J. W. Forrester. — Portland Oregon : Productivity Press, 1961. — 464 p.
15. Gladkov E. A. *Geologicheskoe i gidrodinamicheskoe modelirovanie mestorozhdenii nefti i gaza* [Geological and Hydrodynamic Modeling of Oil and Gas Fields] : educ. tutorial / E. A. Gladkov. — Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2012. — 99 p. [in Russian]