

**ФИЗИКА АТОМНЫХ ЯДЕР И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ/PHYSICS OF ATOMIC NUCLEI AND ELEMENTARY PARTICLES, HIGH ENERGY PHYSICS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.26>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В НАТРИЕВОМ ОБОРУДОВАНИИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ**

Научная статья

**Ревякина П.А.<sup>1,\*</sup>, Бессонов И.А.<sup>2</sup>, Завадский Д.И.<sup>3</sup>, Кувшинова Е.В.<sup>4</sup>, Пыльцова Д.О.<sup>5</sup>, Ташлыков О.Л.<sup>6</sup>**

<sup>4</sup>ORCID : 0009-0006-5385-4132;

<sup>5</sup>ORCID : 0009-0004-0962-9961;

<sup>6</sup>ORCID : 0000-0001-6397-015X;

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (p.revyakina[at]internet.ru)

**Аннотация**

Оптимизация планово-предупредительного ремонта — основная часть задачи по повышению экономической составляющей объекта использования ядерной энергии. Компьютерное моделирование позволяет проводить виртуальные испытания, анализировать производительность и предсказывать поведение системы в различных условиях. В работе рассмотрено моделирование переходных процессов в трубопроводах системы индикации водорода в натриевом контуре циркуляции парогенератора ПГН-200М Белоярской атомной станции с использованием вычислительно пакета COMSOL.Multiphysics. Определено поведение моделируемого объекта от различных условий окружающей среды и влияние слоя теплоизоляционного материала на скорость протекания переходных процессов. С целью верификации результатов моделирования была проведена серия прямых измерений, результаты которой показали, что среднее отклонение температуры в модели от реальных значений составляет 10,87%.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование фазовых переходов, оптимизация планово-предупредительного ремонта, натрий, COMSOL.Multiphysics.

**STUDY OF PROCESSES OCCURRING IN SODIUM EQUIPMENT AT NUCLEAR POWER PLANTS**

Research article

**Revyakina P.A.<sup>1,\*</sup>, Bessonov I.A.<sup>2</sup>, Zavadskii D.I.<sup>3</sup>, Kuvshinova Y.V.<sup>4</sup>, Pylcova D.O.<sup>5</sup>, Tashlykov O.L.<sup>6</sup>**

<sup>4</sup>ORCID : 0009-0006-5385-4132;

<sup>5</sup>ORCID : 0009-0004-0962-9961;

<sup>6</sup>ORCID : 0000-0001-6397-015X;

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

\* Corresponding author (p.revyakina[at]internet.ru)

**Abstract**

Optimisation of scheduled preventive maintenance is a key part of the task of improving the economic component of nuclear energy facilities. Computer modelling allows virtual testing to be carried out, performance to be analysed and system behaviour to be predicted under various conditions. This work describes the modelling of transition processes in the pipelines of the hydrogen indication system in the sodium circulation circuit of the PGN-200M steam generator at the Beloyarsk Nuclear Power Plant using the COMSOL.Multiphysics software package. The behaviour of the simulated object under various environmental conditions and the influence of the thermal insulation layer on the rate of transient processes were determined. To verify the simulation results, a series of direct measurements were carried out, which showed that the average deviation of the temperature in the model from the real values is 10.87%.

**Keywords:** computer modelling of phase transitions, optimisation of preventive maintenance, sodium, COMSOL.Multiphysics.

**Введение**

Обеспечение безопасности эксплуатации атомных электрических станций (АЭС) — одна из важнейших задач в современной инженерии. Во время проведения планово-предупредительного ремонта и аварийных ситуаций процессы в элементарном оборудовании зависят от переменных, характеризующих влияние множества различных факторов на оборудование. Таким образом, очевидна необходимость эффективного инструмента, позволяющего предсказывать изменение основных теплогидравлических параметров натриевого оборудования во время переходных процессов [1].

В качестве основного средства для анализа процессов, протекающих в тепломеханическом оборудовании АЭС, зачастую применяется моделирование: компьютерное, с использованием вычислительных пакетов, и математическое. Приведенные методы моделирования дополняют друг друга, позволяя проводить верификацию результата с помощью данных, полученных путем прямого измерения характеристик системы [2], [3], [4].

С применением компьютерного инженерного моделирования в инженерных областях знаний появилась возможность проводить виртуальные испытания, позволяющие выполнять работы эффективнее и безопаснее, чем инновации путем создания одного физического прототипа за другим.

Компьютерное моделирование позволяет создавать детальные 3D-модели продуктов и систем. Это позволяет проводить виртуальные испытания, анализировать производительность и предсказывать поведение системы в различных условиях. Такой подход позволяет выявить потенциальные проблемы и улучшить методы, влияющие на работу с оборудованием.

Одна из сфер применения компьютерного моделирования — анализ процессов, протекающих в тепломеханическом оборудовании. Результат моделирования позволит выявить пути улучшения зависимых процессов, что, в свою очередь, повлияет на экономическую составляющую будущих проектов. Для проведения моделирования выбраны пакеты вычислительной гидродинамики COMSOL.Multiphysics [5], [6] и SolidWorks Flow Simulation [7], [8].

Существенный недостаток использования SolidWorks Flow Simulation заключается в том, что в нем отсутствует возможность проведения моделирования фазового перехода. COMSOL Multiphysics решает приведенную проблему и позволяет произвести анализ всех этапов переходных процессов в оборудовании.

Роль компьютерного моделирования в современных инженерных науках растет с каждым днем. С развитием компьютерных технологий у исследователей появляются новые возможности, позволяющие провести анализ процессов, протекающих в оборудовании без построения макетов, что во многом сокращает затраты на проведение подобных работ. По этой причине актуальность компьютерного моделирования как при разработке нового оборудования, так и для оптимизации производства в атомной энергетике или в промышленности в целом неуклонно возрастает [9], [10], [11].

В настоящей работе рассматривается влияние факторов окружающей среды на процессы, протекающие в натриевом оборудовании. В качестве инструмента моделирования и анализа фазового перехода был выбран вычислительный пакет COMSOL. Multiphysics.

Объектом моделирования фазового перехода стал участок натриевого дренажного трубопровода ПГН-200М энергоблока №3 Белоярской АС.

### Методы и принципы исследования

Для решения задачи теплопроводности использовался модуль «Теплопроводность в твердых и жидких телах», математический аппарат которого включает в себя следующие уравнения:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \nabla^2 T + \frac{q_v}{c \cdot \rho}, \text{ где}$$

$T$  — температура, К;

$\tau$  — время, с;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;

$c$  — удельная теплоемкость тела,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

$q_v$  — объемный тепловой поток источника,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$ ;

$\rho$  — плотность вещества,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Для описания процесса фазового перехода в вычислительном пакете используется следующий математический аппарат:

$$c_p = \theta_1 \cdot c_{p1} + \theta_2 \cdot c_{p2} + L_{1 \rightarrow 2} \cdot \frac{\partial \alpha_m}{\partial T}, \text{ где}$$

$c_p$  — удельная теплоемкость смеси фаз,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

$c_{p1}, c_{p2}$  — удельная теплоемкость твердой и жидкой фаз соответственно,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

$\theta_1, \theta_2$  — удельная доля твердой и жидкой фаз соответственно;

$L_{1 \rightarrow 2}$  — удельная теплота перехода из твердой фазы в жидкую,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2 + \theta_1}$$

$\lambda = \theta_1 \cdot \lambda_1 + \theta_2 \cdot \lambda_2$ , где

$\lambda_1, \lambda_2$  — коэффициент теплопроводности жидкой и твердой фазы соответственно,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

### Выполнение компьютерного моделирования

На начальном этапе работ были измерены геометрические характеристики оборудования, в частности пространственное расположение смежных дренажных трубопроводов относительно исследуемого участка дренажа, а также зависимость температуры стенки трубопровода от времени с начала момента расхолаживания, полученного при переводе оборудования в рабочее состояние в период осенней ремонтной кампании. Геометрические параметры исследуемого участка дренажного трубопровода ПГН-200М приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Геометрические параметры дренажного трубопровода

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.26.1>

Параметр	Значение
Трубопровод	
Диаметр, мм	40
Длина горизонтального участка, мм	1000
Длина вертикального участка, мм	400

Параметр	Значение
Радиус поворотного участка, мм	200
Теплоизоляция	
Толщина слоя изоляции, мм	55

На основании рассмотренных геометрических данных была построена твердотельная модель (рисунок 1).

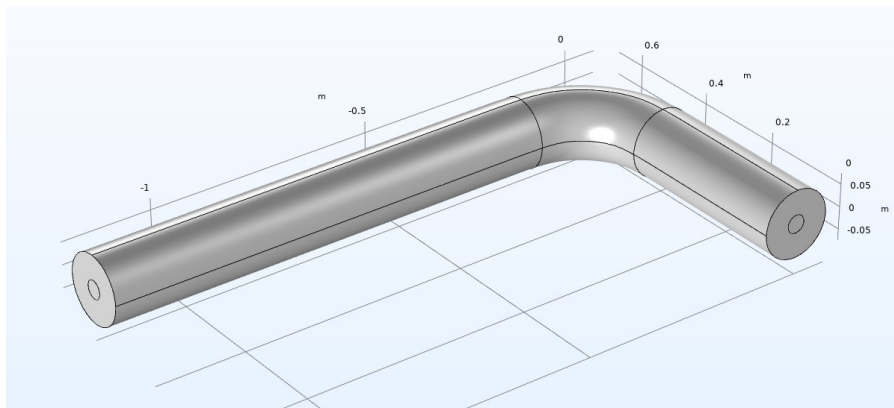


Рисунок 1 - Результат построения твердотельной модели  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.26.2>

С целью упрощения расчета была исключена запирающая арматура, соединяющая дренаж с общим сливным коллектором, и часть дренажного трубопровода, примыкающая к испарительному модулю парогенератора.

Дренажный трубопровод для обеспечения безопасной эксплуатации заключен в теплоизоляцию из прошитого базальтового мата (таблица 2).

Таблица 2 - Теплофизические параметры прошитого базальтового мата

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.26.3>

Коэффициент теплопроводности, Вт/м • К	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплоемкости, Дж/кг • С
0,05	50	840

Так как исследуемый дренажный трубопровод находится в реальных условиях окружающей среды, на него влияет множество факторов: температура стенки помещения, трубопроводы и дренажи, пролегающие рядом с рассматриваемым участком, температура, поддерживаемая в помещении. При моделировании участка трубопровода в качестве определяющего фактора была выбрана лишь температура окружающей среды, а дренажи от других секций исключены с целью упрощения расчета.

С целью упрощения модели были исключены процессы связанные с конвективными потоками жидкой фазы при охлаждении. В связи с этим было исключено влияние гравитации на процессы, протекающие внутри дренажного трубопровода.

### Результаты моделирования

В результате моделирования была получена модель, описывающая процессы, протекающие в дренажном трубопроводе, в зависимости от разных моментов времени.

На рисунке 2 приведены зависимости средней температуры и доли твердой фазы по всему объему натрия от времени с момента начала охлаждения с теплоизоляцией и без нее.

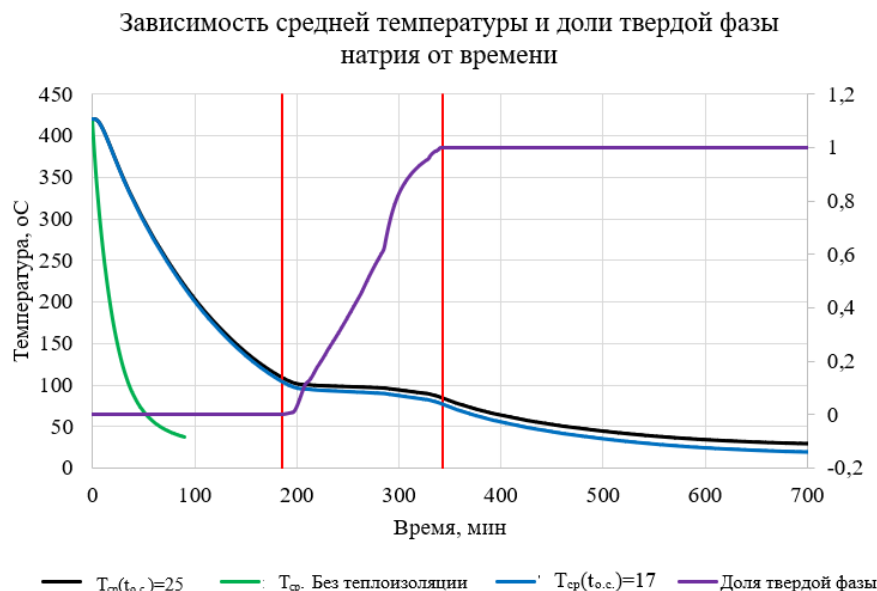


Рисунок 2 - Зависимость средней температуры и доли твердой фазы натрия от времени

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.26.4>

Условно процесс охлаждения можно разделить на 3 участка: первый участок характеризует охлаждение жидкой фазы натрия в трубопроводе; второй участок описывает процесс кристаллизации натрия; третий — процесс охлаждения твердой фазы натрия. На первом участке температура убывает по экспоненциальной зависимости до момента, когда начинается процесс кристаллизации. Стоит отметить, что граница второго участка начинается при средней температуре модели выше температура плавления натрия. С правой границы участка картина аналогична. Это можно объяснить тем, что при расчете данного параметра используется температура во всех точках модели. Так как слои, которые находятся на периферии профиля трубы, начинают охлаждаться первыми, то и процесс кристаллизации начинается в них быстрее чем в центральной точке профиля. По этой причине средняя температура модели будет выше температуры кристаллизации натрия. Спустя 31 минуты после начала процесса кристаллизации центральная точка охладится до 98 °C. С этого момента скорость изменения средней температуры по всей модели составляет  $\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = -0.041 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мин}}$ . Неравенство данного параметра нулю объясняется тем, что на периферийной части профиля процесс кристаллизации завершен, следовательно, на этом участке начался процесс охлаждения твердой фазы, что приводит к снижению средней температуры.

Отклонение температуры на правой границе второго участка можно объяснить таким же образом, но в данном случае периферийные зоны профиля полностью перешли в твердую фазу, при этом начался процесс охлаждения, что привело к снижению средней температуры и отклонению ее от температуры кристаллизации натрия.

Скорость переходных процессов важна при проведении операций, влияющих на экономическую составляющую проекта. Повлиять на процессы, протекающие в тепломеханическом оборудовании можно следующими способами: снять теплоизоляцию, что приведет к интенсификации процесса охлаждения; изменить параметры охлаждающего воздуха (снизить температуру приточного воздуха, увеличить скорость циркуляции).

На рисунке 3 представлена модель дренажного штуцера без теплоизоляции с геометрией, указанной в таблице 1. В результате моделирования было выявлено, что процесс кристаллизации начинается через 35 минут после начала процесса охлаждения. Длительность фазового перехода составляет 4 минуты (рисунок 2).

Отсутствие участка постоянной температуры при кристаллизации натрия в случае отсутствия теплоизоляции объясняется тем, что при анализе протекания фазового перехода используется среднее значение доли твердой фазы и температуры по всему объему модели, то есть если на краях модели натрий перешел в твердое состояние, то в центре трубопровода натрий все еще остается в жидкой фазе, следовательно, средняя температура не будет равной постоянной на всем протяжении моделирования.

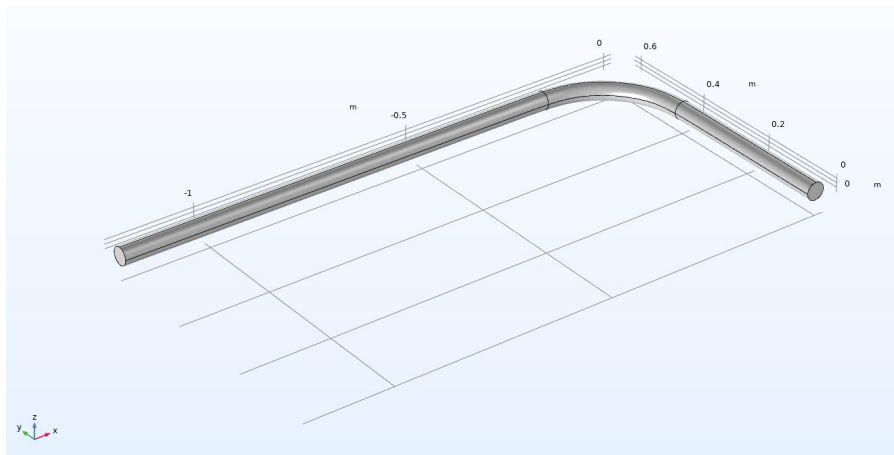


Рисунок 3 - Твёрдотельная модель дренажного трубопровода без теплоизоляции

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.26.5>

Снятие тепловой изоляции позволяет сократить время с момента начала процесса охлаждения до окончания кристаллизации натрия. Но использование данного метода нарушает требования правил технической безопасности, так как на оборудовании, находящемся в помещении постоянного пребывания персонала, эксплуатирующемся на объекте использования атомной энергии, при температуре рабочей поверхности свыше 45 °С, должна устанавливаться тепловая изоляция, при этом температура поверхности тепловой изоляции не должна превышать 45 °С.

С целью проведения верификации результатов компьютерного моделирования была проведена серия прямых измерений температуры поверхности исследуемых объектов с помощью пирометра. Было рассчитано, что среднее отклонение температуры составляет 10,87%.

Также стоит отметить, что с использованием стационарных систем контроля температуры зон электрообогрева была получена зависимость температуры натрия от времени. Результат моделирования сравнивался с данными этих систем. Отклонение времени достижения температуры натрия до 45 °С, полученное при выполнении моделирования, от данных системы составляет 26 минут, что составляет 3,7% от общего времени моделирования.

### Заключение

В результате моделирования была получена модель, описывающая процессы, протекающие в дренажном трубопроводе, в зависимости от разных условий окружающей среды. Полученные результаты будут применены для оптимизации применения будущих ремонтных работ на объектах использования атомной энергии.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### 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.

### 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. Бельтюков А.И. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяков. — Екатеринбург: УрФУ, 2013. — 548 с.
2. Ташлыков О.Л. Моделирование процесса замораживания натрия в трубопроводах с целью оптимизации ремонта реакторных установок на быстрых нейтронах. / О.Л. Ташлыков, А.А. Наумов, С.Е. Щеклеин // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. — 2013. — 2. — С. 21–26.
3. Архипов В.М. Техника работы с натрием на АЭС / В.М. Архипов. — Москва: Энергоатомиздат, 1986. — 133 с.
4. Таджибаева И. Обращение с натриевым теплоносителем реактора на быстрых нейтронах / И. Таджибаева, С.И. Пустобаев, Т.М. Жантикин. — Алматы: НТЦ БЯТ, 2010.
5. Программный пакет COMSOL Multiphysics – проектирование, прогнозирование // COMSOL Multiphysics. — URL: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics> (дата обращения: 26.03.24)
6. Бессонов И.А. Исследование влияния геометрических характеристик ледового конденсатора на его аккумулирующую способность. / И.А. Бессонов, А.А. Бреусова, Д.А. Кораблев. // Будущее атомной энергетики - AtomFuture 2022. Тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции; — Обнинск: Обнинский институт атомной энергетики, 2022. — С. 94–96.
7. Куртеев А.В. Моделирование процессов отвода остаточных тепловыделений шахты-хранилища отработавших тепловыделяющих сборок. / А.В. Куртеев, В.А. Климова, М.М. Севастьянов и др. // Физика. Технологии. Инновации : тезисы докладов VI Международной молодежной научной конференции, посвященной 70-летию основания Физико-технологического института УрФУ; — Екатеринбург: Учебно-методический центр УПИ, 2019. — С. 920-921.

8. Литвинов Д.Н. Теплогидравлическое моделирование канала с мишенями для наработки изотопа селен-75. / Д.Н. Литвинов, В.С. Костарев, О.Л. Ташлыков. // Физика. Технологии. Инновации : сборник статей VII Международной молодежной научной конференции; — Екатеринбург: УрФУ, 2020. — С. 163-172.
9. Ташлыков О.Л. Экологическое прогнозирование в ядерной энергетике XXI века. / О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2015. — 8-9. — С. 50–58.
10. Литовченко В.Ю. Моделирование радиационной защиты контейнеров для транспортировки высокоэнергетических бета-источников. / В.Ю. Литовченко, Н.А. Васютин, О.Л. Ташлыков // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. — 2019. — 5. — С. 4–12.
11. Костарев В.С. Моделирование комбинированной конструкции радиационной защиты и теплоизоляции трубопроводов с радиоактивными средами. / В.С. Костарев, Д.Н. Литвинов, В.Ю. Литовченко. // Физика. Технологии. Инновации : сборник статей VII Международной молодежной научной конференции; — Екатеринбург: УрФУ, 2020. — С. 141-151.

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

1. Bel'tyukov A.I. Atomny'e e'lektrostantsii s reaktorami na by'stry'x nejtronax s natrievy'm teplonositelem: uchebnoe posobie [Nuclear power plants with fast neutron reactors with sodium coolant: a textbook] / A.I. Bel'tyukov, A.I. Karpenko, S.A. Poluyaktov. — Ekaterinburg: UrFU, 2013. — 548 p. [in Russian]
2. Tashly'kov O.L. Modelirovanie processa zamorazhivaniya natriya v truboprovodax s cel'yu optimizacii remonta reaktorny'x ustanovok na by'stry'x nejtronax [Modeling of the process of sodium freezing in pipelines in order to optimize the repair of fast neutron reactor installations]. / O.L. Tashly'kov, A.A. Naumov, S.E. Shheklein // News of higher educational institutions. Nuclear energy. — 2013. — 2. — P. 21–26. [in Russian]
3. Arxipov V.M. Texnika raboty' s natriem na AE'S [The technique of working with sodium at nuclear power plants] / V.M. Arxipov. — Moscow: E'nergoatomizdat, 1986. — 133 p. [in Russian]
4. Tadzhibaeva I. Obrashchenie s natrievim teplonositelem reaktora na bistri'kh nejtronakh [Handling of the sodium coolant of a fast neutron reactor] / I. Tadzhibaeva, S.I. Pustobaev, T.M. Zhantikin. — Almaty: NTTs BYaT, 2010. [in Russian]
5. Programmnii paket COMSOL Multiphysics – proektirovanie, prognozirovanie [COMSOL Multiphysics software package – design, forecasting] // COMSOL Multiphysics. — URL: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics> (accessed: 26.03.24) [in Russian]
6. Bessonov I.A. Issledovanie vliyaniya geometricheskixarakteristik ledovogo kondensatora na ego akkumuliruyushchuyu sposobnost' [Investigation of the influence of geometric characteristics of an ice condenser on its storage capacity]. / I.A. Bessonov, A.A. Breusova, D.A. Koroblev. // The future of nuclear energy is AtomFuture 2022. Abstracts of the XVIII International Scientific and Practical Conference; — Obninsk: Obninskij institut atomnoj e'nergetiki, 2022. — P. 94–96. [in Russian]
7. Kurteev A.V. Modelirovanie processov otvoda ostatochny'x teplovy'delenij shaxty'-xranilishha otrabotavshix teplovy'delyayushchix sborok [Modeling of residual heat removal processes in the spent fuel assembly storage mine]. / A.V. Kurteev, V.A. Klimova, M.M. Sevast'yanov et al. // Physics. Technologies. Innovations: Abstracts of the VI International Youth Scientific Conference dedicated to the 70th anniversary of the Physics and Technology Institute of Ural Federal University; — Ekaterinburg: Uchebno-metodicheskij centr UPI, 2019. — P. 920-921. [in Russian]
8. Litvinov D.N. Teplogidravlichesкое modelirovanie kanala s mishenyami dlya narabotki izotopa selen-75 [Thermal and hydraulic modeling of a channel with targets for the production of the selenium-75 isotope]. / D.N. Litvinov, V.S. Kostarev, O.L. Tashly'kov. // Physics. Technologies. Innovations : Collection of Articles from the VII International Youth Scientific Conference; — Ekaterinburg: UrFU, 2020. — P. 163-172. [in Russian]
9. Tashly'kov O.L. E'kologicheskoe prognozirovanie v yadernoj e'nergetike XXI veka [Environmental forecasting in the nuclear power industry of the XXI century]. / O.L. Tashly'kov, S.E. Shheklein // International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology. — 2015. — 8-9. — P. 50–58. [in Russian]
10. Litovchenko V.Yu. Modelirovanie radiacionnoj zashhity' kontejnerov dlya transportirovki vy'sokoe'nergeticheskix beta-istochnikov [Simulation of radiation protection of containers for transportation of high-energy beta sources]. / V.Yu. Litovchenko, N.A. Vasyutin, O.L. Tashly'kov // Issues of atomic science and technology. Ser. Materials science and new materials. — 2019. — 5. — P. 4–12. [in Russian]
11. Kostarev V.S. Modelirovanie kombinirovannoj konstrukcii radiacionnoj zashhity' i teploizolyacii truboprovodov s radioaktivny'mi sredami [Modeling of a combined design of radiation protection and thermal insulation for pipelines with radioactive media]. / V.S. Kostarev, D.N. Litvinov, V.Yu. Litovchenko. // Physics. Technologies. Innovations : Collection of Articles from the VII International Youth Scientific Conference; — Ekaterinburg: UrFU, 2020. — P. 141-151. [in Russian]