

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 1. С. 31–40  
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 1, pp. 31–40

Научная статья  
УДК 536.24:536.253  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=184527>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/CABOON>

## Численное моделирование теплового состояния камеры сухого хранения отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР

А.Н. Казюлин<sup>1</sup>✉, В.А. Солоненко<sup>2</sup>, А.А. Ящук<sup>3</sup>, В.Г. Бутов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат», Железногорск, Российская Федерация

<sup>1,2,3,4</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация

<sup>1</sup>[kandr@mail.ru](mailto:kandr@mail.ru)✉

**Аннотация.** С использованием численного моделирования исследован процесс сопряженного теплообмена в камере сухого хранения отработавшего ядерного топлива в условиях естественного движения охлаждающего воздуха. Задача рассмотрена в трехмерной постановке с учетом процессов свободной конвекции, теплопроводности и излучения. Математическая модель создана в программном комплексе ANSYS CFX. Параметры теплового состояния камеры сухого хранения, полученные расчетным путем с помощью численной модели камеры, хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований в разные времена года. Разработанная модель может быть использована для оценки и прогнозирования теплового состояния сухого хранилища при хранении отработавшего ядерного топлива, в том числе с повышенным тепловыделением.

**Ключевые слова:** численное моделирование, теплообмен, естественная конвекция, отработавшее ядерное топливо, сухое хранение ОЯТ

**Для цитирования.** Казюлин А.Н., Солоненко В.А., Ящук А.А., Бутов В.Г. Численное моделирование теплового состояния камеры сухого хранения отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 1. С. 31–40. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=184527>

Original article

## Numerical simulation of the thermal state of the dry storage chamber for spent nuclear fuel from VVER reactors

A.N. Kazyulin<sup>1</sup>✉, V.A. Solonenko<sup>2</sup>, A.A. Yashchuk<sup>3</sup>, V.G. Butov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Complex”, Zheleznogorsk, Russian Federation

<sup>1,2,3,4</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

<sup>1</sup>[kandr@mail.ru](mailto:kandr@mail.ru)✉

**Abstract.** The process of conjugate heat exchange in the dry storage chamber for spent nuclear fuel (SNF) under conditions of natural cooling air movement has been investigated using numerical mode-

ling. The problem was considered in a three-dimensional formulation taking into account the processes of natural convection, heat conduction and radiation. The mathematical model was created using the ANSYS CFX software.

As a result of calculating the heat exchange inside the socket and the storage canisters, specific heat flux over the height of the socket distribution graphs on the outer surface of the storage canisters and the inner surface of the storage socket were obtained. It was determined that the main influence on the distribution of heat flux in height is exerted by convection and radiation. The resulting specific heat flux distribution was used to determine the heat load on the wall of the socket in the model of the SNF dry storage chamber.

The designed mathematical model of the SNF dry storage chamber thermal state has been validated according to experimental data from a real object – the operating chamber of the Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Complex” SNF dry storage (hereinafter – HOT-2). The parameters of the dry storage chamber thermal state, obtained through calculations using the numerical model of the chamber, show good agreement with measured experimental data at different seasons.

A numerical study of the HOT-2 dry storage chamber thermal condition was carried out at full SNF load with a decay heat output of 350 and 500 watts for each spent fuel assembly. According to the research results, it was determined that the existing heat removal system and the design of the HOT-2 ensure the safe storage of spent fuel under the specified conditions. It was also determined that the most heat-stressed area of the concrete enclosure of the storage chamber is located in the middle of the wall separating the chambers from each other, in its upper part.

The developed model can be used to assess and predict the thermal state of the dry storage facility when storing spent fuel from VVER-type reactors, including those with increased heat release.

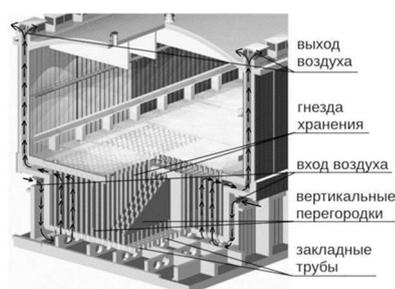
**Keywords:** numerical simulation, heat transfer, natural convection, spent nuclear fuel, dry storage of SNF

**For citation.** Kazyulin A.N., Solonenko V.A., Yashchuk A.A., Butov V.G. Numerical simulation of the thermal state of the dry storage chamber for spent nuclear fuel from VVER reactors. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 31–40. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=184527>

## 1. Введение

Постоянное повышение технико-экономических показателей Российских атомных электростанций (АЭС) с реакторными установками водно-водяных энергетических реакторов ВВЭР-1000/1200, направленное на снижение себестоимости электроэнергии, осуществляется, в том числе, путем повышения обогащения топлива по урану-235 и выгорания. Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), соответственно, обладает все более высокими тепловыми и радиационными характеристиками. Инфраструктура обращения с ОЯТ площадки Федерального государственного унитарного предприятия «Горно-химический комбинат» (ФГУП «ГХК») в ближайшем будущем должна обеспечить реализацию безопасных завершающих этапов ядерного топливного цикла ВВЭР, в том числе долговременного сухого хранения ОЯТ с повышенным тепловыделением.

Для обоснования возможности безопасного хранения облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС), содержащих ОЯТ с повышенными, относительно проектных, характеристиками в сухом хранилище ФГУП «ГХК» (ХОТ-2) необходимо выполнение расчетов с использованием численной модели теплофизических процессов, происходящих в камере ХОТ-2 в условиях свободно-конвективного движения воздуха (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема естественной циркуляции охлаждающего воздуха в камере ХОТ-2

Численные методы исследования процессов теплопереноса в системах хранения ОЯТ широко применяются в России и за рубежом. Математические модели создаются авторами как путем самостоятельного решения систем уравнений [1], так и с использованием программных пакетов: ANSYS CFX [2], ANSYS FLUENT [3, 4, 5, 6, 7], PHOENICS [8, 9], ALGOR [10], COBRA [11].

Целью данной работы является разработка и валидация численной модели процесса отвода тепла из камеры сухого хранилища ОЯТ реакторов ВВЭР-1000/1200.

## 1. Материалы и методы

### 1.1. Математическая модель камеры хранения

ХОТ-2 представляет собой комплекс зданий, предназначенных для длительного технологического хранения ОЯТ. Отвод тепла от гнезд хранения с ОЯТ обеспечивает система отвода тепла, функционирующая за счет естественной конвекции (рис. 1). Вход наружного воздуха в каждую камеру ХОТ-2 происходит через опускающиеся шахты, расположенные по обеим сторонам камер хранения в боковых стенах здания. Далее воздух поступает в подкамерное пространство и через систему вертикальных закладных труб, пронизывающих днище камеры, входит в камеру хранения ОЯТ. Нагреваясь, воздух движется вверх вдоль поверхностей гнезд и вертикальных перегородок, разделяющих камеру. Под перекрытием, отделяющим пространство камеры от помещения зала хранилища, поток нагретого воздуха делится на две части и, обтекая гнезда в поперечном направлении, движется двумя расходящимися горизонтальными потоками к выходам из камеры, организованным в боковых стенах хранилища. Далее потоки воздуха направляются в окружающую среду через вертикальные вытяжные шахты, расположенные в боковых стенах хранилища [12].

Моделирование процессов течения и сопряженного теплообмена за счет теплопроводности, конвекции и излучения выполнялось с использованием пакета для вычислительной гидродинамики ANSYS CFX, основанного на методе контрольного объема. Все расчеты произведены на суперкомпьютере СКИФ Cyberia Национального исследовательского Томского государственного университета.

В модели камеры хранения реализованы решения уравнений для моделирования течения газа, которое характеризуется вектором скорости  $\mathbf{U}$  с компонентами  $u_k$ ,  $k = 1, 2, 3$ , а также термодинамическими параметрами: давлением  $p$ , плотностью  $\rho$ , температурой  $T$ .

Уравнение неразрывности струи воздушного потока для осредненных по времени величин имеет вид (здесь и далее подразумевается, что по повторяющимся индексам проводится суммирование):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса для воздушного потока имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k) = \\ = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} + g (\rho - \rho_{ref}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{ref}$  – плотность наружного воздуха.

Тензор вязких напряжений без учета влияния градиентов давления:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Уравнение сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho h_0 - p)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k h_0) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_k} (u_i \tau_{ik}) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_k} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $h_0 = h + 0,5 U^2$  – полная энтальпия смеси,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа,  $h$  – статическая энтальпия.

Для описания турбулентных характеристик течения использована хорошо известная SST-модель Ментера [13]. Теплообмен излучением учитывался в приближении прозрачной среды, между поверхностями твердых тел. Использовалось приближение идеального газа.

Общий вид модели камеры показан на рис. 2. Конечно-объемная модель включает три расчетных области: полость камеры, в которой модели-

руется движение воздуха; стальные гнезда и бетонные стены камеры, в которых моделируется теплообмен за счет теплопроводности.

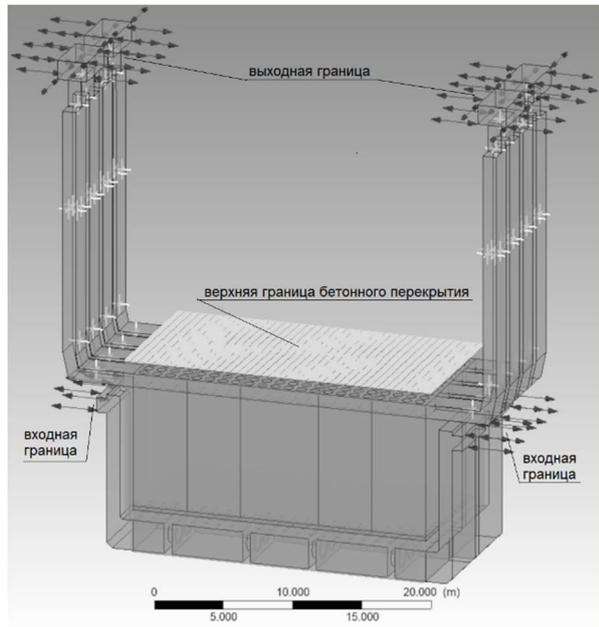


Рис. 2. Общий вид модели камеры

На границах раздела областей задается условие идеального теплового контакта. На верхней границе бетонного перекрытия (рис. 2) задается конвективный и теплообмен излучением с залом над камерой: коэффициент конвекции  $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$ , степень черноты 0,9. На внутренних поверхностях гнезд хранения (рис. 3), прикладываются тепловые нагрузки в виде заданного распределения теплового потока (для каждого гнезда может быть задано индивидуальное значение, соответствующее тепловыделению гнезда). Используемое в расчетах распределение удельного теплового потока по высоте гнезда хранения определено в подразделе 1.2 данной статьи.

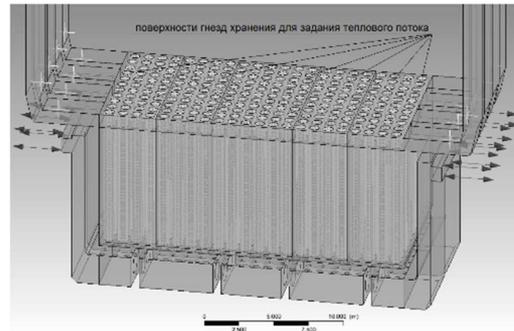


Рис. 3. Гнезда хранения в камере

На входной и выходной границах (рис. 2) задается температура наружного воздуха и давление, которое в случае истечения наружу интерпретируется как статическое, а в случае втекания в расчетную область как полное. При необходимости может быть задано дополнительное (избыточное) давление для учета ветрового воздействия. Такой подход позволяет учитывать различные ветровые нагрузки, включая полное запираание выходного потока из шахты, и некоторые аномальные режимы, например, истечение воздуха из входного отверстия шахты, либо втекание воздуха через выходную трубу. На всех остальных поверхностях задавались адиабатические условия, на поверхностях воздушной полости также условия прилипания.

Свойства газа учитывают зависимость от температуры, принятые зависимости для теплопроводности и теплоемкости приведены в табл. 1, вязкость описывается соотношением Сазерленда:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + T_s}{T + T_s}, \quad (5)$$

где  $\mu_0 = 1,831 \times 10^{-5} \text{ Па} \times \text{с}$  – вязкость при температуре  $T_0 = 294 \text{ К}$ ,  $T_s = 110 \text{ К}$  – постоянная Сазерленда.

Теплопроводность стали гнезд принималась равной  $40 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$ , бетона  $1,7 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$ .

Таблица 1. Зависимость теплопроводности и теплоемкости воздуха от температуры

| Температура, К | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×град) | Удельная теплоемкость, Дж/(кг×град) | Температура, К | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×град) | Удельная теплоемкость, Дж/(кг×град) |
|----------------|---|-------------------------------------|----------------|---|-------------------------------------|
| 223            | 0,0204                                    | 1005,99                             | 398            | 0,0333                                    | 1013,92                             |
| 248            | 0,0224                                    | 1005,60                             | 423            | 0,0350                                    | 1017,12                             |
| 273            | 0,0243                                    | 1005,72                             | 448            | 0,0366                                    | 1020,81                             |
| 298            | 0,0262                                    | 1006,33                             | 473            | 0,0382                                    | 1024,95                             |
| 323            | 0,0281                                    | 1007,45                             | 498            | 0,0398                                    | 1029,50                             |
| 348            | 0,0299                                    | 1009,08                             | 523            | 0,0414                                    | 1034,40                             |
| 373            | 0,0316                                    | 1011,24                             | 548            | 0,0429                                    | 1039,62                             |

Устойчивость решения достигается использованием неявных алгоритмов численного решения и заданием шага интегрирования по времени с учетом значения числа Куранта–Фридрикса–Леви  $< 1$ .

При оценке сходимости решения учитывались два критерия:

- изменение интегральных параметров, характеризующих теплообмен в камере, таких как максимальная температура на поверхности бетона, гнезд и массовый расход воздуха через вентиляционные шахты;

- изменение контрольных величин при различных размерах конечных объемов (сеточная сходимость).

Для первого критерия выход на установившийся режим достигается проведением достаточного количества итераций, при котором значения рассматриваемых температур и расхода не меняются с продолжением расчета. Итерационная сходимость решения для расхода воздуха, температур гнезд и бетонных ограждающих конструкций показана на рис. 4. После достижения сходимости колебания в расчетных значениях температур поверхности гнезд и бетонных ограждающих конструкций составляют менее  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , расхода воздуха менее  $0,3\text{ кг/с}$ .

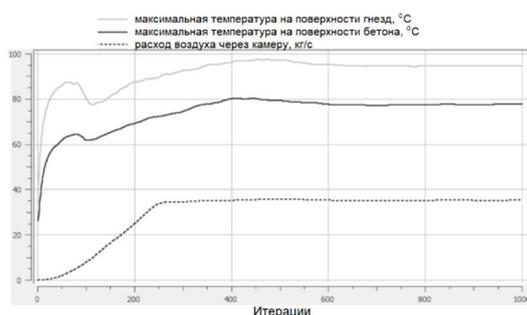


Рис. 4. Итерационная сходимость решения

Для второго критерия сходимости были рассмотрены три сетки с количеством конечных объемов  $\approx 5,6$  и  $7,5$  и  $13,0$  млн. При этом основные отличия в количестве узлов были сосредоточены на сетке расчетной области для моделирования движения воздуха, вблизи твердых стенок. Сеточная сходимость расчета также демонстрирует отсутствие изменения в значениях температуры (менее  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и расхода воздуха (менее  $0,5\text{ кг/с}$ ), что подтверждает достаточность используемой сетки с  $5,6$  млн. конечных объемов.

## 1.2. Математическая модель гнезда хранения

Для определения профиля распределения по высоте гнезда удельного теплового потока на внутренней поверхности гнезда и внешней поверхности пеналов хранения используется модель гнезда хранения. Схема гнезда хранения ОЯТ приведена на рис. 5 а. В каждом гнезде размещено по 2 пенала с ОЯТ, установленных один над другим. В каждом пенале расположено по 4 ОТВС реакторов ВВЭР.

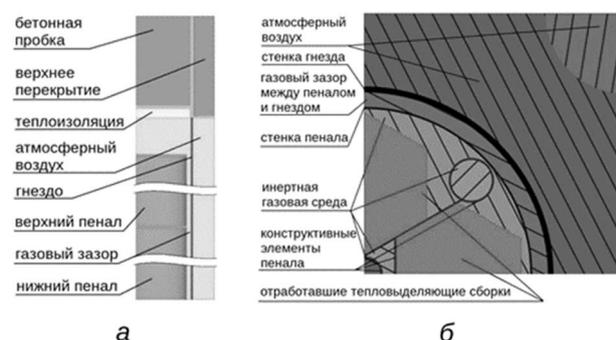


Рис. 5. а – схема гнезда хранения ОЯТ; б – область моделирования

Структурированное расположение в камере гнезд хранения и закладных труб позволяет рассматривать движение воздуха вокруг гнезда отдельно, с соответствующими граничными условиями. Исходя из этого в модели рассматривается четверть гнезда с окружающим гнездо пространством камеры. Расчетная область включает в себя ОТВС (в виде шестигранных тел, сужающихся в нижней и верхней частях по форме ОТВС), инертную газовую среду внутри пеналов с ОТВС, корпуса пеналов и корпус гнезда, газовый зазор между пеналами и гнездом, воздушную область снаружи гнезда, верхнее бетонное перекрытие и защитную бетонную пробку, теплоизоляцию на дне пробки, вертикальную перегородку, область входа воздушного потока из закладной трубы. Схема расчетной области представлена на рис. 5 б.

Математическая модель теплообмена в гнезде аналогична модели теплообмена в камере (подраздел 1.1 данной статьи). В качестве граничных условий задаются:

- температура охлаждающего воздуха, поступающего через закладную трубу (принимается равной  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- расход воздуха через закладную трубу (принимается по данным расчета теплообмена в камере);

– тепловыделение в объеме ОТВС (суммарно 610 Вт – максимальное по проекту). Распределение тепловыделения по высоте ОТВС задавалось неравномерно со снижением к ее краям. Используемый в расчетах профиль осевого распределения тепловыделения ОТВС приведен на рис. 6;

– на границах области задаются условия симметрии (кроме участка на одной из сторон над перегородкой, где задаются условия свободного выхода воздуха);

– на верхней границе верхнего перекрытия задаются условия теплообмена с воздухом надкамерного зала (температура +25 °С) аналогично модели камеры хранения.

В модели использовалась эффективная теплопроводность ОТВС в диапазоне температур от 0 до 400 °С. Теплопроводность стенок пеналов принималась равной 16 Вт/(м×К), гнезда – 40 Вт/(м×К), бетонного перекрытия – 1,7 Вт/(м×К), теплоизоляции пробки гнезда – 0,07 Вт/(м×К).

Модель учитывает конвективный теплообмен, кондуктивную теплопроводность по среде хранения и теплообмен излучением между твердыми телами. Степень черноты бетона принималась равной 1,0, степень черноты стальных элементов пеналов и гнезда 0,8.

Основное влияние на тепловой поток оказывают конвекция и излучение внутри пенала хранения, в пространстве между корпусами пеналов и гнезда, а также снаружи гнезда.

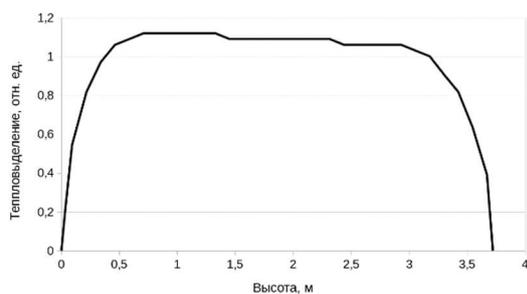


Рис. 6. Распределение остаточного тепловыделения по высоте активной зоны ОТВС

Полученные профили распределений по высоте теплового потока на внутренней поверхности стенки гнезда и на внешней поверхности стенок пеналов показаны на рис. 7. Вследствие конвективной передачи тепла от ОТВС в верхнюю часть пеналов наблюдаются всплески величины теплового потока на уровне верхних

крышек пеналов – 4,8 и 9,8 метров по высоте гнезда хранения. Также хорошо заметно сглаживание теплового потока при передаче тепла с поверхности пеналов на поверхность гнезда. Перераспределение части теплового потока из области расположения верхнего пенала в область газового зазора над пеналами (10,0–10,4 м по высоте гнезда от пола камеры хранения) приводит к снижению температуры стенки гнезда в наиболее теплонапряженной области напротив верхнего пенала, а также к увеличению температуры стенки гнезда в верхней части и, соответственно, величины теплового потока от гнезда на бетонное перекрытие.



Рис. 7. Распределение теплового потока по высоте гнезда хранения ОЯТ

### 1.3. Валидация математической модели

Для валидации расчетной модели использовались результаты экспериментального исследования пассивного теплоотвода из камеры сухого хранилища отработавшего ядерного топлива [14]. В связи с тем, что в натуральных экспериментах измерялась температура дна пробки гнезд хранения и с целью сравнения данных измерений с расчетными значениями, в математическую модель камеры хранения добавлены упрощенные модели гнезд хранения, без внутреннего содержания пеналов (рис. 8).

При выполнении расчетов задавалось остаточное тепловыделение ОТВС реакторов ВВЭР-1000, полученное расчетным путем с использованием таблиц аппроксимационных коэффициентов и аналитических зависимостей, приведенных в Руководстве по безопасности при использовании атомной энергии «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных» (РБ-093-20). В модели использовался профиль

распределения по высоте теплового потока (рис. 7) следующим образом:

- для гнезд, на которых проводились измерения, задавался профиль на внешней поверхности стенок пеналов;
- для остальных гнезд задавался профиль на внутренней поверхности стенки гнезда.

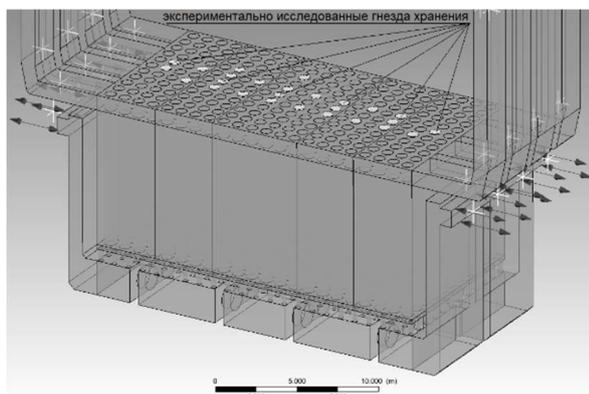


Рис. 8. Модель камеры хранения ОЯТ, включающая модели исследуемых гнезд хранения

При валидации рассмотрены три периода времени, характеризующихся низкими скоростями ветра (менее 1 м/с), с различной температурой внешнего воздуха. В табл. 2 приведены граничные значения температуры, задаваемой в модели для разных периодов. В расчетах, выполненных с целью валидации модели, влияние ветра не учитывается. Такой подход был принят исходя из соображений необходимости рассмотрения более консервативных оценок тепловых характеристик камеры ХОТ-2, основываясь на том факте, что ветровое воздействие вызывает более интенсивное охлаждение гнезд хранения ОЯТ [15].

Таблица 2. Используемые для валидации граничные значения температуры

| Период  | Дата       | Температура на улице, °С | Температура в зале хранения над камерой, °С |
|---------|------------|--------------------------|---|
| летний  | 07.06.2023 | +20                      | +21   |
| осенний | 05.11.2022 | 0                        | +15   |
| зимний  | 15.12.2022 | -19                      | +10   |

Валидация численной модели камеры хранения ОЯТ реакторов ВВЭР осуществлялась путем сопоставления расчетных и измеренных значений температуры воздуха на выходе из камеры, а также температуры в контролируемых при проведении экспериментального исследования [14] гнездах хранения (рис. 9).



Рис. 9. Схема контролируемых гнезд хранения ОЯТ ВВЭР-1000 в натурном эксперименте [14]

Результаты сравнения температуры в гнездах в летний, осенний и зимний периоды сведены в табл. 3. Как видно из таблицы, для летнего периода измеренная температура дна пробки гнезда хранения находится на уровне минимальной расчетной температуры воздуха под пробкой гнезда, в то время как для зимнего периода значение измеренной температуры примерно попадает в середину расчетных значений, а для осеннего периода – в основном находятся ближе к минимальным расчетным значениям. Данное наблюдение объясняется тем, что термометр для измерения температуры опускался из зала хранения сверху на дно пробки гнезда хранения по каналу в пробке (рис.10), закрытому снизу от внутренней полости гнезда, и на показания измеренных значений оказывала влияние температура в зале хранения над камерой (табл. 2).

Поскольку в зимний период температура в зале хранения (+10 °С) наиболее близка к температуре в гнезде – измеренные значения оказались ближе к середине интервала расчетных значений, а в летний период происходило охлаждение термодатчиков поступающим из зала воздухом.

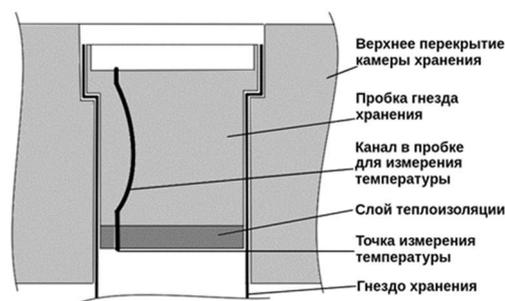


Рис. 10. Пробка гнезда хранения ОЯТ [14]

Сравнение расчетной и измеренной температуры в вытяжных шахтах на выходе из камеры хранения в летний, осенний и зимний периоды представлено в табл. 4.

Таблица 3. Расчетная и измеренная температура в гнездах в разные времена года

| Номер гнезда по схеме (рис. 9) | летний период (+20 °С)                               |       |  | осенний период (0 °С)                                |       |  | зимний период (-19 °С)                               |       |  |
|--------------------------------|--|-------|--|--|-------|--|--|-------|--|
|                                | Расчетная температура воздуха под пробкой гнезда, °С |       | Измеренная температура дна пробки гнезда, °С | Расчетная температура воздуха под пробкой гнезда, °С |       | Измеренная температура дна пробки гнезда, °С | Расчетная температура воздуха под пробкой гнезда, °С |       | Измеренная температура дна пробки гнезда, °С |
|                                | Мин.   | Макс. |  | Мин.   | Макс. |  | Мин.   | Макс. |  |
| 3                              | 41,4   | 51,5  | 43,6   | 22,9   | 33,8  | 28,7   | 5,3  | 19,0  | 12,8   |
| 6                              | 50,3   | 63,1  | 49,6   | 32,8   | 47,7  | 38,5   | 15,9   | 30,8  | 23,0   |
| 8                              | 47,5   | 57,9  | 49,1   | 30,4   | 46,0  | 35,0   | 13,2   | 27,5  | 18,9   |
| 10                             | 46,8   | 61,7  | 48,3   | 29,0   | 40,9  | 32,8   | 12,1   | 27,5  | 17,2   |
| 12                             | 51,7   | 62,3  | 51,7   | 33,7   | 46,9  | 39,4   | 16,8   | 30,9  | 23,6   |
| 14                             | 47,6   | 56,7  | 46,0   | 29,3   | 39,6  | 29,8   | 12,5   | 25,2  | 14,2   |
| 16                             | 46,7   | 57,0  | 47,0   | 28,5   | 39,2  | 31,1   | 11,4   | 25,5  | 15,5   |
| 17                             | 45,7   | 56,7  | 44,3   | 27,8   | 38,9  | 30,7   | 10,8   | 21,9  | 14,9   |
| 18                             | 45,6   | 56,1  | 46,0   | 28,1   | 37,4  | 31,5   | 10,4   | 20,2  | 16,3   |
| 19                             | 46,9   | 54,9  | 47,1   | 29,1   | 39,5  | 32,0   | 11,7   | 23,4  | 16,7   |
| 21                             | 46,2   | 54,9  | 45,6   | 28,3   | 39,2  | 30,9   | 11,5   | 23,2  | 16,0   |
| 22                             | 46,0   | 55,8  | 44,9   | 27,7   | 39,0  | 31,1   | 10,3   | 24,4  | 15,8   |
| 24                             | 45,6   | 56,6  | 45,6   | 27,7   | 38,5  | 30,5   | 9,8  | 24,1  | 15,5   |
| 25                             | 38,5   | 44,3  | 38,9   | 19,6   | 25,6  | 22,8   | 1,8  | 8,6   | 6,7  |
| 26                             | 45,0   | 58,1  | 43,7   | 26,8   | 41,0  | 28,0   | 9,1  | 27,5  | 12,4   |

Таблица 4. Расчетная и измеренная температура на выходе из камеры хранения

| Температура на выходе из камеры хранения | летний период (+20 °С) |                | осенний период (0 °С) |                | зимний период (-19 °С) |                |       |
|--|------------------------|----------------|-----------------------|----------------|------------------------|----------------|-------|
|  | Расчетная, °С          | Измеренная, °С | Расчетная, °С         | Измеренная, °С | Расчетная, °С          | Измеренная, °С |       |
| Минимальная                              |                        | 28,6           | 28,2                  | 8,2            | 8,5                    | -11,4          | -11,7 |
| Максимальная                             |                        | 33,3           | 30,4                  | 13,4           | 10,2                   | -6,1           | -9,7  |
| Средняя                                  |                        | 29,9           | 29,0                  | 9,8            | 9,0                    | -9,7           | -11,1 |

В результате валидации получено хорошее соответствие средних расчетных температур воздуха в вытяжных шахтах, отклонения составляют ~ 1 °С, причем для всех рассматриваемых периодов расчетные значения больше измеренных, что подтверждает консервативность расчета. Возможной причиной уменьшения экспериментально измеренных значений могло стать влияние незначительного ветрового воздействия (со скоростью менее 1 м/с), при котором производились измерения. Также отклонения могли быть вызваны погрешностью измерений или упрощениями, использованными в математической модели.

Таким образом, опираясь на данные валидации, можно сделать вывод о приемлемости разработанной численной модели для определения теплового состояния камеры сухого хранения отработавшего ядерного топлива.

## 2. Результаты

В целях оценки теплового состояния камеры сухого хранилища ОЯТ в случае ее полной загрузки ОТВС были выполнены расчеты при температуре атмосферного воздуха +25 °С, так как это максимальная среднесуточная летняя температура в районе расположения ХОТ-2, такой же принималась температура в зале над камерой. Расчеты произведены для двух вариан-

тов значения величины остаточного тепловыделения всех ОТВС:

- 350 Вт на каждую ОТВС (среднее значение тепловыделения ОТВС, хранящихся в ХОТ-2);
- 500 Вт на каждую ОТВС (среднее тепловыделение ОТВС, в случае загрузки в пустые гнезда ОЯТ с максимальным тепловыделением по проекту).

Температурное поле на внутренней поверхности бетонных конструкций камеры для расчета при тепловыделении 500 Вт/ОТВС, приведено на рис. 11.

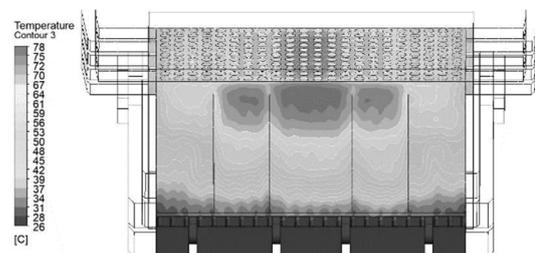


Рис. 11. Распределение температуры по внутренней поверхности ограждающих бетонных конструкций камеры хранения

Наиболее теплонапряженная область бетонного ограждения камеры хранения расположена по середине стенки, отделяющей камеры друг от друга, в верхней ее части.

На рис. 12 показаны графики изменения температуры по высоте бетонной стены между со-

седними камерами в ее центральной части для вариантов расчета теплового состояния камеры хранения при остаточном тепловыделении ОТВС 350 и 500 Вт.

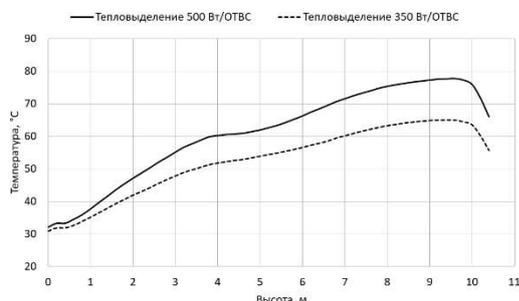


Рис. 12. Распределение температуры по высоте бетонной стены между соседними камерами в центральной части

Как видно из рис. 12 максимальная температура бетонных конструкций при тепловыделении каждой ОТВС, равном 350 Вт, составляет 65 °С, а при тепловыделении 500 Вт – 78 °С. С учетом того, что максимально допустимая температура строительных конструкций ХОТ-2 составляет 90 °С при долговременном воздействии, можно сделать вывод, что при полной загрузке камеры хранения отработавшим топливом с указанными значениями остаточного тепловыделения будут обеспечиваться условия безопасного температурного режима хранения ОЯТ.

### 3. Обсуждение

Впервые была разработана математическая модель теплового состояния камеры сухого хранилища отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000/1200, прошедшая валидацию по данным экспериментального исследования реального объекта – действующей камеры сухого хранилища ОЯТ. Средняя температура воздуха на выходе из камеры хранения, полученная расчетным путем, практически совпадает с экспериментально измеренной температурой. Отклонения значений температуры, полученные в результате валидации, составляют ~ 1 °С. При этом для разных времен года и, соответственно, разной температуры наружного воздуха, расчетное значение температуры выходящего воздуха выше экспериментально измеренного значения, что подтверждает консервативность разработанной численной модели.

Полученная математическая модель может быть использована для оценки и прогнозирования теплового состояния сухого хранилища при

хранении ОЯТ реакторов ВВЭР, в том числе с повышенным тепловыделением.

### Заключение

Выполнена разработка и валидация математической модели процесса отвода тепла из камеры сухого хранилища ОЯТ реакторов ВВЭР.

Путем расчета сопряженного теплообмена внутри гнезда и пеналов хранения ОЯТ за счет теплопроводности, конвекции и излучения получены графики распределения по высоте гнезда удельного теплового потока на внешней поверхности пеналов и внутренней поверхности гнезда хранения. Определено, что основное влияние на распределение теплового потока по высоте оказывают конвекция и излучение. Учет в тепловых расчетах профиля распределения теплового потока важен для правильного определения максимальных температур стенок пеналов и гнезд, а также при определении температурного поля конструктивных элементов ХОТ-2.

Проведено численное исследование теплового состояния камеры ХОТ-2 при полной загрузке ОЯТ с остаточным тепловыделением каждой ОТВС 350 и 500 Вт. Определено, что существующая система отвода тепла и конструкция ХОТ-2 обеспечивают безопасное хранение отработавшего топлива.

### Список источников

1. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л., Сеелев И.Н. и др. Численное исследование течения и теплообмена воздуха в камере хранения сухого хранилища ОЯТ // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 47. С. 75–86. DOI: 10.17223/19988621/47/8
2. Lee S.Y., Sindelar R.L., Losey D.C. Thermal modeling and performance analysis of interim dry storage and geologic disposal facilities for spent nuclear fuel. // Nuclear Technology. 2000. № 131:1. pp. 124-151. DOI: 10.13182/NT00-A3108
3. Herranz L.E., Penalva J., Feria F. CFD analysis of a cask for spent fuel dry storage: model fundamentals and sensitivity studies // Annals of Nuclear Energy. 2015. № 76. pp. 54–62. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.09.032
4. Tseng Y.S., JWang J.R., Tsai F.P. et al. Thermal design investigation of a new tube-type dry-storage system through CFD simulations // Annals of Nuclear Energy. 2011. № 38. pp. 1088–1097. DOI: 10.1016/j.anucene.2011.01.001
5. Kim T., Kim K., Lee D. et al. Conceptual design, development, and preliminary safety evaluation of a PWR dry storage module for spent nuclear fuel // Applied Sciences. 2022. № 12. DOI: 10.3390/app12094587
6. Li J., Liu Y.Y. Thermal modeling of a vertical dry storage cask for used nuclear fuel // Nuclear Engineering and

- Design. 2016. № 301. pp. 74–88. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.01.008
7. Безюков О.К., Афанасьев П.М. Численное моделирование теплового состояния пенала с отработавшим ядерным топливом при хранении в сухом хранилище камерного типа // Современная наука и инновации. 2019. № 1. С. 44–55. DOI: 10.33236/2307-910X-2019-25-1-44-55
  8. Chang H.Y., Chen R.H., Lai C.M. Numerical simulation of the thermal performance of a dry storage cask for spent nuclear fuel // *Energies*. 2018. № 11(1). pp. 149. DOI: 10.3390/en11010149
  9. Алехина С.В., Голощапов В.Н., Костиков А.О. и др. Тепловое состояние вентилируемого контейнера хранения отработавшего ядерного топлива в условиях натекания внешнего воздушного потока // Ядерная физика и энергетика. 2009. Т. 10. № 2. С. 171–177.
  10. Poskas R., Simonis V., Poskas P. et al. Thermal analysis of CASTOR RBMK-1500 casks during long-term storage of spent nuclear fuel // *Annals of Nuclear Energy*. 2017. № 99. pp. 40–46. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.09.031
  11. DeVoe R.R., Robb K.R., Skutnik S.E. Sensitivity analysis for best-estimate thermal models of vertical dry cask storage systems // *Nuclear Engineering and Design*. 2017. №. 320. pp. 282–297. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2017.06.005
  12. Калинин В.И. Обоснование метода сухого хранения отработавшего ядерного топлива АЭС с реакторами РБМК-1000 и ВВЭР-1000: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2007. 172 с.
  13. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32. № 8. pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149
  14. Казюлин А.Н., Ящук А.А. Экспериментальное исследование пассивного теплоотвода из камеры сухого хранилища отработавшего ядерного топлива при различных параметрах внешней среды // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 3. С. 116–126.
  15. Казюлин А.Н., Ящук А.А. Влияние метеорологических параметров на отвод тепла из камер сухого хранилища отработавшего ядерного топлива // I Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская теплофизика – 2023»: тезисы докладов (28–31 марта 2023 г., Красноярск) / ответственный за выпуск Д.В. Платонов. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. С. 273–275.
- ### References
1. Krainov AYu, Min'kov LL, Seelev IN et al. Numerical investigation of the air heat-mass transfer in the chamber of dry storage for spent nuclear fuel. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika*, 2017;(47):75–86. (In Russ.). DOI: 10.17223/19988621/47/8
  2. Lee SY, Sindelar RL, Losey DC. Thermal modeling and performance analysis of interim dry storage and geologic disposal facilities for spent nuclear fuel. *Nuclear Technology*, 2000;(131:1):124–151. DOI: 10.13182/NT00-A3108
  3. Herranz LE, Penalva J, Feria F. CFD analysis of a cask for spent fuel dry storage: model fundamentals and sensitivity studies. *Annals of Nuclear Energy*, 2015;(76): 54–62. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.09.032
  4. Tseng YS, JWang JR, Tsai FP et al. Thermal design investigation of a new tube-type dry-storage system through CFD simulations. *Annals of Nuclear Energy*, 2011;(38): 1088–1097. DOI: 10.1016/j.anucene.2011.01.001
  5. Kim T, Kim K, Lee D et al. Conceptual design, development, and preliminary safety evaluation of a PWR dry storage module for spent nuclear fuel. *Applied Sciences*, 2022;(12). DOI: 10.3390/app12094587
  6. Li J, Liu YY. Thermal modeling of a vertical dry storage cask for used nuclear fuel. *Nuclear Engineering and Design*, 2016;(301):74–88. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.01.008
  7. Bezyukov OK, Afanasyev PM. Numerical simulations of spent nuclear fuel storage case thermal state for a dry chamber-type storage. *Modern Science and Innovations*, 2019;(1):44–55. DOI: 10.33236/2307-910X-2019-25-1-44-55
  8. Chang HY, Chen RH, Lai CM. Numerical simulation of the thermal performance of a dry storage cask for spent nuclear fuel. *Energies*, 2018;(11(1)). DOI: 10.3390/en11010149
  9. Alyokhina SV, Goloshchapov VN, Kostikov AO. Thermal state of ventilated concrete cask with spent nuclear fuel in the conditions of exterior airflow leaking. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 2009;10(2):171–177.
  10. Poskas R, Simonis V, Poskas P. Thermal analysis of CASTOR RBMK-1500 casks during long-term storage of spent nuclear fuel. *Annals of Nuclear Energy*, 2017;(99):40–46. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.09.031
  11. DeVoe R.R., Robb K.R., Skutnik S.E. Sensitivity analysis for best-estimate thermal models of vertical dry cask storage systems. *Nuclear Engineering and Design*, 2017;(320):282–297. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2017.06.005
  12. Kalinkin VI. Justification of the method of dry storage of spent nuclear fuel of NPPs with RBMK-1000 and VVER-1000 reactors. Ph.D. thesis. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet, 2007, 172 p. (In Russ.).
  13. Menter FR. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994;32(8):1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149
  14. Kazyulin AN, Yashchuk AA. An experimental study of passive heat removal from the dry spent nuclear fuel storage chamber at the different parameters of environment. *Thermal processes in engineering*, 2024;16(3):116–126. (In Russ.).
  15. Kazyulin AN, Yashchuk AA. Influence of meteorological parameters on heat removal from dry storage chambers for spent nuclear fuel. I Vserossijskaya nauchnaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem “Enisejskaja teplofizika – 2023” (28–31 marta 2023 goda, Krasnojarsk): tezisy dokladov [I All-Russian Scientific Conference with International Participation “Yenisei Thermophysics – 2023”]. Ed by D.V. Platonov. Krasnojarsk: Sibirskij federal'nyj universitet, 2023, pp. 273–275. (In Russ.).