

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 3. С. 116–126
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 3, pp. 116–126

Научная статья
УДК 536.24:536.253

Экспериментальное исследование пассивного теплоотвода из камеры сухого хранилища отработавшего ядерного топлива при различных параметрах внешней среды

А.Н. Казюлин^{1,2✉}, А.А. Ящук²

¹Горно-химический комбинат, Железногорск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

✉kandr@mail.ru

Аннотация. В связи с переходом российских атомных электростанций на использование топлива с повышенным исходным обогащением возникает необходимость приемки на хранение отработавшего ядерного топлива с более высоким тепловыделением. Для оценки возможности приема «горячего», относительно уже имеющегося на хранении отработавшего ядерного топлива необходимо предварительное исследование пассивного теплоотвода из хранилища. Удобным методом оценки является теоретическое исследование с помощью расчетной модели. В статье описаны результаты экспериментального исследования параметров в контрольных точках камеры сухого хранилища отработавшего ядерного топлива ВВЭР-1000 в зависимости от параметров внешней среды в разное время года.

Ключевые слова: естественная конвекция, отработавшее ядерное топливо, сухое хранение отработавшего ядерного топлива, тепловыделение отработавшего ядерного топлива, отвод тепла

Для цитирования. 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. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=180173>

Original article

An experimental study of passive heat removal from the dry spent nuclear fuel storage chamber at the different parameters of environment

A.N. Kazyulin^{1,2✉}, A.A. Yashchuk²

¹Mining and Chemical Complex, Zheleznogorsk, Russia

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

✉kandr@mail.ru

Abstract. Due to the transition of Russian nuclear power plants to the use of fuel with increased initial enrichment, it becomes necessary to accept spent nuclear fuel with higher heat generation for storage. To assess the possibility of receiving “hotter” spent nuclear fuel, relative to the one already in

storage, a preliminary study of the passive heat removal from the storage is necessary. A convenient method of evaluation is a theoretical study using a computational model. The paper describes the results of an experimental study of the parameters at the control points of the VVER-1000 spent nuclear fuel dry storage chamber, depending on the environmental parameters at different seasons of the year.

Keywords: natural convection, spent nuclear fuel, dry storage of spent nuclear fuel, heat release of spent nuclear fuel, heat removal

For citation. Kazyulin A.N., Yashchuk A.A. 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, vol. 16, no. 3, pp. 116–126. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=180173>

Введение

В настоящее время на атомных электростанциях (АЭС) России в общей сложности эксплуатируется 37 энергоблоков разных типов и модификаций. Доля выработки электричества атомными станциями в России составляет около 20 % от всего производства электроэнергии [1]. По данным МАГАТЭ «PRIS», всего в мире вырабатывается 370 ГВт на 412 атомных энергоблоках.

За все время эксплуатации АЭС в мире из ядерных реакторов было выгружено более 400 тыс. тонн отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Примерно одна треть этого объема была направлена на переработку, оставшиеся две трети находятся в промежуточных хранилищах ОЯТ в ожидании дальнейшей переработки или окончательной геологической изоляции [2].

ОЯТ после извлечения из энергоблока продолжает выделять большое количество тепла, уменьшающееся с течением времени. На рис. 1 приведен график зависимости остаточного тепловыделения от времени выдержки после выгрузки из реактора для ОЯТ водно-водных энергетических реакторов ВВЭР-1000. Во избежание расплава конструктивных элементов отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) хранилища, используемые для размещения ОЯТ, должны охлаждаться.

Существует два метода промежуточного хранения ОЯТ в зависимости от способа охлаждения: мокрое и сухое. Мокрые хранилища, как правило, представляют собой конструкции бассейнового типа, заполненные водой, в которые помещаются ОТВС. При сухом хранении ОЯТ располагается в камерах или контейнерах, охла-

ждаемых атмосферным воздухом. Сухое хранение является более эффективным с точки зрения экономики и экологии, но ввиду ограниченных возможностей сухих хранилищ по теплосъему извлеченное из реакторов топливо сначала размещается в мокрых хранилищах.

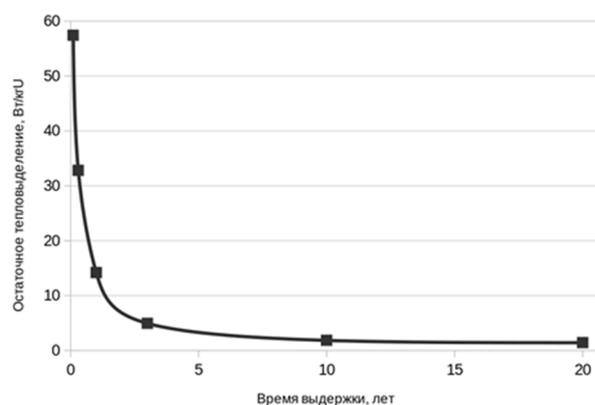


Рис. 1. Зависимость остаточного тепловыделения от времени выдержки для ОЯТ ВВЭР-1000 (начальное обогащение по U-235 4,3 %, глубина выгорания 50 ГВт×сут/тU)

На Федеральном государственном унитарном предприятии «Горно-химический комбинат» (ФГУП «ГХК») эксплуатируется централизованное мокрое хранилище отработавшего топлива (ХОТ-1), создано и функционирует сухое хранилище ОЯТ камерного типа (ХОТ-2). При проектировании обосновано безопасное хранение в ХОТ-2 ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 с глубиной выгорания не более 50 ГВт×сут/тU и предварительной выдержкой в мокром хранилище не менее 20 лет [3]. В настоящее время на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР завершён переход на использование топлива с повышенным исходным обогащением (до 4,95 % по изотопу U-235) и более высоким

выгоранием (до $70 \text{ ГВт} \times \text{сут}/\text{тU}$). Вводятся в эксплуатацию энергоблоки с реакторами типа ВВЭР-1200, отработавшее топливо которых имеет более высокое тепловыделение, чем ОЯТ реакторов типа ВВЭР-1000. Это приведет к необходимости организации приема в сухое хранилище ОЯТ ФГУП «ГХК» более «горячего» топлива. Поэтому в настоящее время актуально проведение исследований теплообменных процессов в ХОТ-2 в целях обоснования возможности использования сухого хранилища ФГУП «ГХК» для хранения ОЯТ с повышенными, относительно проектных, характеристиками. Для обоснования безопасного хранения ОЯТ с высоким тепловыделением требуется выполнить тепловые расчеты с использованием математической модели теплофизических процессов, происходящих в камере ХОТ-2, в условиях естественной конвекции воздуха. Корректность расчетов в математической модели должна подтверждаться экспериментальными данными.

В литературе достаточно широко рассмотрены вопросы исследования теплового состояния хранилищ ОЯТ контейнерного типа с использованием систем: MAGNASTOR [4, 5], VSC-17 [6], HI-STORM [7, 8], CASTOR [9], однако мало внимания уделено исследованию тепловых процессов, происходящих в сухих хранилищах ОЯТ камерного типа.

Целью данной работы является проведение экспериментального исследования процесса отвода тепла из камеры сухого хранилища ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 в зависимости от параметров окружающей среды в разные времена года. Ранее была построена математическая модель свободно-конвективного течения воздуха в камере хранения ХОТ-2, численно решающая систему уравнений газовой динамики методом С.К. Годунова [10]. С помощью модели было установлено, что наличие ветра благоприятно сказывается на температурном режиме функционирования камеры хранения.

Объект исследования

Хранилище отработавшего топлива реакторов ВВЭР-1000 предназначено для длительного (не менее 50 лет) технологического хранения ОЯТ. Охлаждение камер хранилища обеспечивается пассивной системой отвода тепла (СОТ),

функционирующей за счет естественной конвекции.

Здание сухого хранилища ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 представляет собой железобетонное сооружение высотой 36 метров, отделение хранения состоит из отдельных камер, в которые установлены гнезда хранения с размещенными в них пеналами с ОЯТ. В каждом гнезде располагается два пенала, один над другим. Каждая камера ХОТ-2 имеет отдельную систему отвода тепла от гнезд с ОЯТ в виде опускаемых и вытяжных воздушных шахт. В составе СОТ отсутствуют активные элементы, влияющие на характер циркуляции. При заданной конструктивной схеме камер, входящих в состав хранилища, величина расхода воздуха в камере определяется мощностью остаточного тепловыделения ОЯТ, размещенного в камере. Режим работы системы – постоянный в течение всего срока эксплуатации хранилища.

На рис. 2 приведено поперечное сечение камеры сухого хранилища.

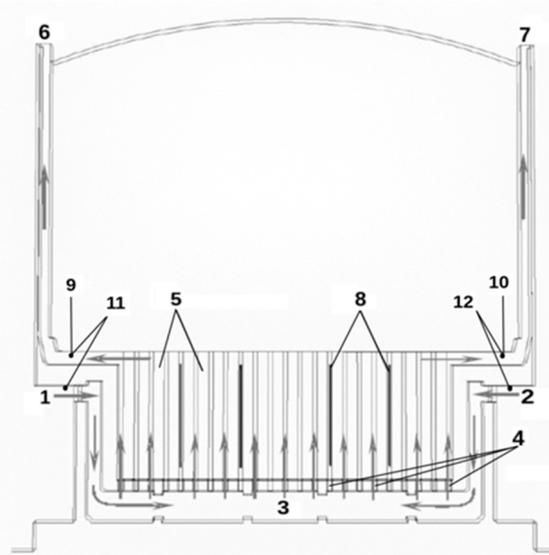


Рис. 2. Поперечное сечение камеры ХОТ-2: 1, 2 – входные каналы; 3 – подкамерное пространство; 4 – закладные трубы; 5 – гнезда хранения; 6, 7 – вытяжные шахты; 8 – перегородки; 9, 10 – точки измерения температуры; 11, 12 – точки измерения перепада давления; стрелками обозначены направления движения потока воздуха

Вход наружного «холодного» воздуха в каждую камеру хранилища происходит через жалюзийные решетки на входных каналах и опускаемые шахты, расположенные по обеим сторонам камер хранения в боковых стенах здания. Далее

воздух поступает в подкамерное пространство, имеющее продольные перфорированные перегородки и направляющие. Через систему вертикальных закладных труб, пронизывающих днище камеры, воздух входит в камеру хранения ОЯТ и, нагреваясь, движется вверх вдоль поверхностей гнезд. 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. Для организации вертикального движения воздуха в камере хранения установлены перегородки.

Для проведения исследования выбрана камера № 2 сухого хранилища ОЯТ ВВЭР-1000, поскольку она содержит ОЯТ с наибольшим суммарным остаточным тепловыделением. Проведены измерения следующих физических параметров в контрольных точках камеры:

- температура воздуха на выходе из камеры хранения (рис. 2 точки 9, 10);
- перепад давления между входом и выходом камеры хранения (рис. 2 точки 11, 12);
- температура дна пробки гнезд хранения (рис. 3).

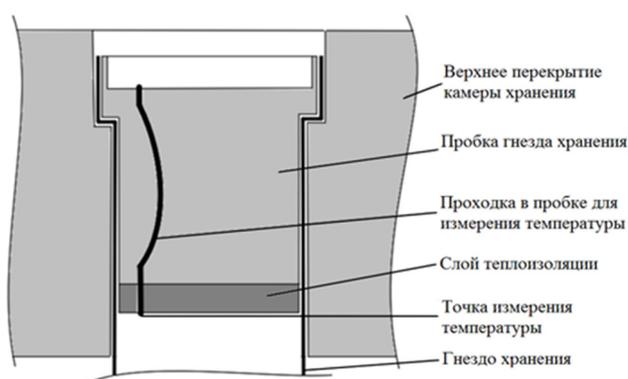


Рис. 3. Пробка гнезда хранения ОЯТ

Измерения температуры на выходе из камеры хранения ОЯТ ВВЭР-1000, а также перепада давления между входом и выходом камеры хранения осуществлялись штатной системой управления технологическим процессом ХОТ-2,

в которой для контроля температуры используются датчики ТПУ 0304, для контроля перепада давления – датчики Метран-150СD.

Для проведения измерений температуры дна пробки гнезд хранения в штатные проходки в пробках гнезд (рис. 3) устанавливались датчики температуры ТС713В в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4. В целях оценки влияния ветрового воздействия на конвективное течение воздуха в камере и, соответственно, на охлаждение гнезд с ОЯТ, для измерения температуры были выбраны гнезда по всей длине камеры между шахтами системы отвода тепла. Также на схеме (рис. 4) показаны направления входа воздуха в камеру хранения ОЯТ ВВЭР-1000 и ориентация камеры № 2 по отношению к северному направлению.



Рис. 4. Схема контролируемых гнезд хранения ОЯТ ВВЭР-1000 камеры № 2 (вид сверху)

Для проведения измерений параметров внешней среды на антенной мачте на высоте 44 метра от поверхности земли была установлена метеостанция «Сокол-М1», измерялись показания температуры окружающего воздуха, а также скорости и направления ветра.

Проведение и обработка результатов измерений

Измерения проводились в период с 6.07.2022 по 30.06.2023. Измеряемые параметры сохранялись в память персонального компьютера с интервалом не более 10 минут.

Для оценки суточного влияния метеорологических параметров на отвод тепла выбран период с 29.10.2022 по 01.11.2022 (рис. 5), так как за это время устойчивый юго-западный ветер сменился на устойчивый юго-восточный [11]. Преобладающая скорость ветра за указанный период составила ~ 5 м/с.

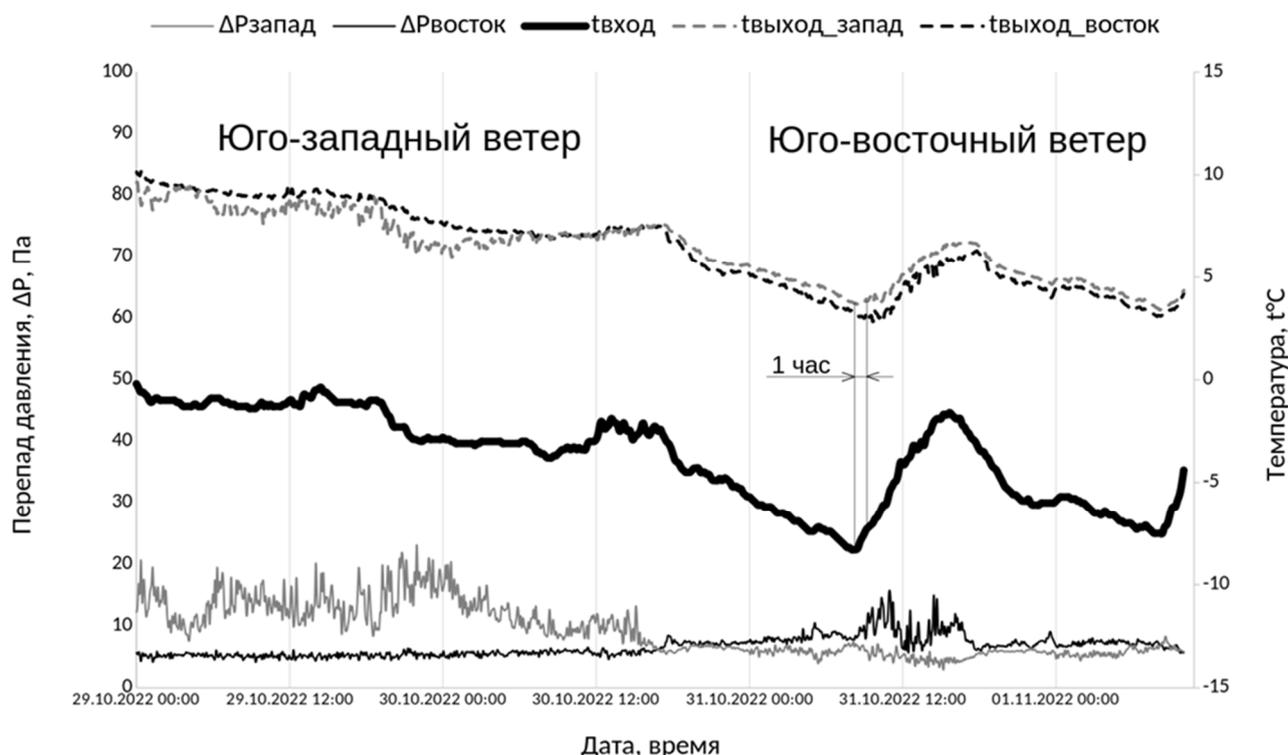


Рис. 5. Зависимость параметров СОТ камеры № 2 от внешних условий [11]

Как видно из графиков (рис. 5), после перемены ветра с юго-западного на юго-восточный соответственно меняется перепад давления: с восточной стороны ($\Delta P_{\text{восток}}$) заметно увеличивается, а с западной ($\Delta P_{\text{запад}}$) – падает. Это свидетельствует об уменьшении создаваемого ветром дополнительного давления на западную сторону хранилища и увеличении на восточную сторону. Соответствующим образом изменяется интенсивность отвода тепла от камеры хранения ОЯТ: с восточной стороны увеличивается, а с западной уменьшается, что подтверждается изменением температуры воздуха на выходе: с западной стороны ($t_{\text{выход_запад}}$) становится больше, чем с восточной ($t_{\text{выход_восток}}$), разница составляет до 1 °С.

Также из графиков (рис. 5) видно, что температура воздуха на выходе из камеры № 2 коррелирует с температурой окружающего воздуха на входе ($t_{\text{вход}}$), но имеет меньшую амплитуду колебаний и отставание по времени около 1 часа. Это объясняется тепловой инерцией хранилища.

Для оценки влияния внешних условий на отвод тепла из камеры хранения ОЯТ в разное время года выбраны периоды с преобладающим юго-западным ветром со скоростью ~5 м/с

при высокой (с 15-00 12.06.2022 по 15-00 13.06.2022), средней (с 15-00 29.10.2022 по 15-00 30.10.2022) и низкой (с 15-00 26.11.2022 по 15-00 27.11.2022) среднесуточной температуре окружающего воздуха (табл. 1). Как показал анализ измеренных данных, во всех трех случаях температура воздуха на выходе ($t_{\text{выход}}$) и перепад давления (ΔP) в вытяжных шахтах камер хранения зависит от направления ветра: с подветренной (восточной) стороны хранилища охлаждение менее интенсивное, ΔP меньше, а температура воздуха на выходе больше. Но данное влияние незначительно, и разница $t_{\text{выход}}$ между западной и восточной сторонами уменьшается с понижением температуры окружающего воздуха ($t_{\text{вход}}$). При этом ΔP растет с понижением температуры окружающего воздуха.

Дополнительно с целью оценки влияния скорости ветра на конвективный теплообмен сравнивались показания за периоды с минимальной (с 17-00 04.12.2022 по 17-00 05.12.2022) и максимальной (с 4-00 09.01.2023 по 4-00 10.01.2023) скоростью ветра (табл. 1). Направление ветра в эти дни также было юго-западное. При сильном ветре (9,1 м/с) давление на наветренную (западную) сторону здания значительно выше,

и разница $t_{\text{выход}}$ между восточной и западной сторонами составляет $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как при скорости ветра $5,6\text{ м/с}$ и практически идентичной температуре окружающего воздуха ($-2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) $t_{\text{выход}}$ между разными сторонами здания отличается на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. При минимальной скорости ветра ($1,7\text{ м/с}$) перепад давления и температура воздуха в вытяжных шахтах с разных сторон здания практически совпадают.

Для оценки влияния суточных колебаний температуры внешней среды на температуру гнезд хранения ОЯТ выбран летний период с максимальной температурой воздуха с 06.06.2023 по 07.06.2023 (рис. 6). Анализ выполнен для гнезд № 2, 26 – ближайших к внешним стенам

хранилища, и гнезда № 16, находящегося в центре камеры хранения (рис. 4).

Суточные колебания измеренных значений температуры дна пробки гнезд хранения соответствуют суточным колебаниям температуры окружающего воздуха (рис. 6). Значительно меньшая амплитуда колебаний температуры дна пробки гнезд и более плавное ее изменение по сравнению с температурой окружающего воздуха объясняются тепловой инерцией хранилища, также наблюдается отставание по времени: для гнезд № 2, 26 – $\sim 1\text{ час}$, для гнезда № 16 – $\sim 2\text{ часа}$, что свидетельствует о более интенсивном отводе тепла от гнезд, расположенных ближе к воздушным шахтам хранилища.

Таблица 1. Среднесуточные параметры внешней среды и СОТ камеры № 2 в разные времена года [11]

Период измерений	Внешняя среда		Западная сторона хранилища		Восточная сторона хранилища	
	$t_{\text{вход}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	Скорость ветра, м/с	$t_{\text{выход}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$t_{\text{выход}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta P, \text{ Па}$
С 15-00 12.06.2022 по 15-00 13.06.2022	23,4	5,1	30,4	5,2	31,1	1,7
С 15-00 29.10.2022 по 15-00 30.10.2022	-2,6	5,6	7,2	12,7	7,7	5,5
С 15-00 26.11.2022 по 15-00 27.11.2022	-29,4	4,7	-17,3	16,1	-17,2	9,6
С 17-00 04.12.2022 по 17-00 05.12.2022	-15,3	1,7	-8,3	6,2	-8,5	6,3
С 4-00 09.01.2023 по 4-00 10.01.2023	-2,5	9,1	3,6	22,2	6,3	3,9

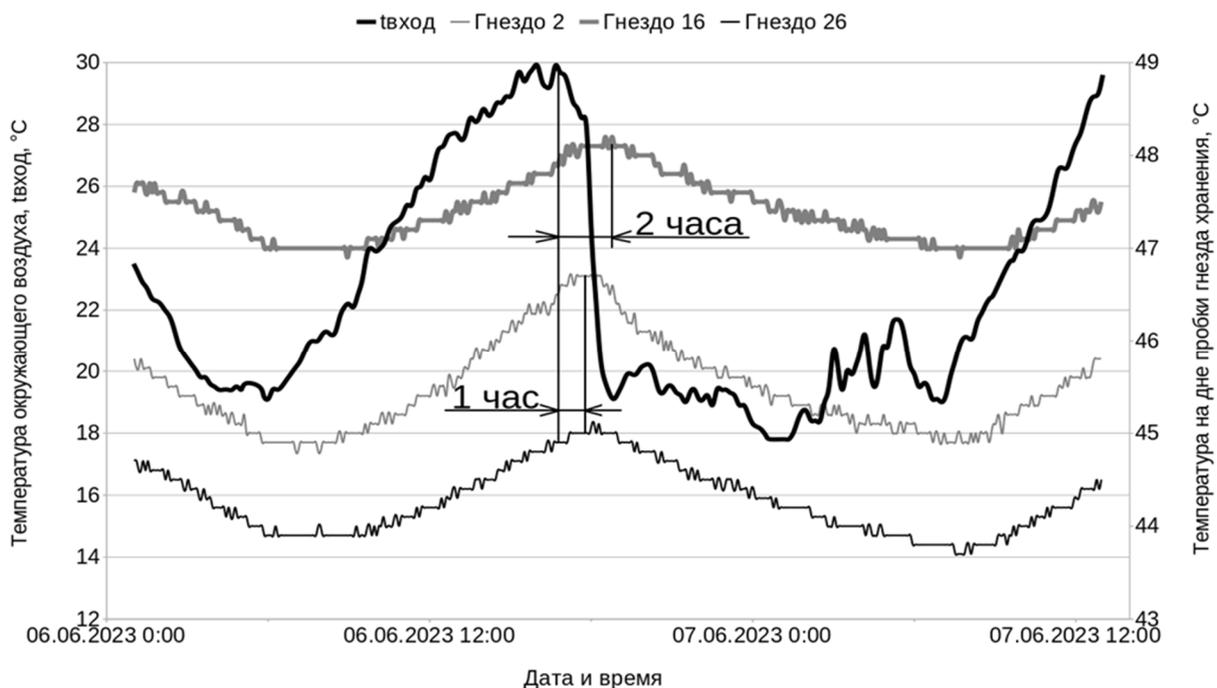


Рис. 6. Зависимость температуры дна пробки гнезд хранения от температуры окружающего воздуха

Оценка зависимости температуры дна пробки гнезда хранения при естественно-конвективном течении воздуха через камеру хранения ОЯТ от внешних условий в разные времена года представлена в табл. 2. Здесь показаны среднечасовые значения параметров внешней среды, а также температура дна пробки гнезд хранения, измеренные в летний, осенний и зимний периоды (учитывая тепловую инерцию хранилища температура дна пробки гнезд хранения приведена с отставанием на 1 час).

Из табл. 2 видно, что со снижением температуры окружающего воздуха уменьшается температура дна пробки всех гнезд хранения ОЯТ, которая становится минимальной в зимний период. Для каждого из периодов в табл. 2 представлено сравнение измеренных показаний температуры в камере при перемене ветра с юго-восточного (Ю-В) и северо-западного (С-З) на юго-западный (Ю-З) и одновременном его усилении. Для всех трех периодов при сильном Ю-З ветре наблюдается более интенсивное охлаждение гнезда № 2, расположенного с Ю-З стороны хранилища (рис. 4), по сравнению с остальными гнездами (разница в изменении температуры после усиления и перемены ветра составляет ~ 1 °С). Это факт подтверждает более интенсивный отвод тепла с наветренной стороны здания, выявленный при анализе параметров СОТ (рис. 5 и табл. 1).

Расчет тепловыделения ОЯТ и корреляционный анализ

С целью проведения корреляционного анализа зависимости температуры, измеренной на дне пробки гнезд хранения, от тепловыделения ОЯТ для контролируемых гнезд выполнен расчет остаточного тепловыделения ОТВС, находящегося в пенах гнезд. Тепловыделение рассчитано по формулам и аппроксимационным коэффициентам, приведенным в Руководстве по безопасности при использовании атомной энергии «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водородных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных» (РБ-093-20).

Концентрация нуклида y в ОЯТ с глубиной выгорания x (при $x \geq 2$ ГВт×сут/тU) на момент останова реактора определялась по следующей формуле:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6, \quad (1)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – аппроксимационные коэффициенты.

Концентрация нуклидов, за исключением $^{234}\text{U}, ^{235}\text{U}, ^{236}\text{U}, ^{237}\text{Np}, ^{238}\text{Pu}, ^{240}\text{Pu}, ^{241}\text{Pu}, ^{241}\text{Am}$ и ^{242}Cm , с учетом времени выдержки t после останова реактора определялась по формуле:

$$y_i(t) = y_i(0) \times \exp(-\lambda_i t), \quad (2)$$

где $y_i(0)$ – определенная по формуле (1) концентрация i -го нуклида на момент останова реактора; λ_i – постоянная распада i -го нуклида.

Таблица 2. Зависимость температуры на дне пробки гнезд хранения ОЯТ от внешних условий в разные времена года

Измеряемые параметры	Летний период			Осенний период			Зимний период		
	Дата измерения		Изменение	Дата измерения		Изменение	Дата измерения		Изменение
	18.07.22	20.07.22		17.10.22	18.10.22		16.02.23	17.02.23	
Температура окружающего воздуха, °С	17	14,5	-2,5	5,9	7	1,1	-12	-10	2,0
Скорость ветра, м/с	2,6	6,2	3,6	2,9	9,5	6,6	0,6	11,3	10,7
Направление ветра	Ю-В	Ю-З		Ю-В	Ю-З		С-З	Ю-З	
Температура в гнезде № 2, °С	43,9	41,5	-2,4	30,2	31,0	0,8	14,6	14,4	-0,2
Температура в гнезде № 3, °С	44,0	42,6	-1,4	30,6	32,3	1,7	15,0	16,1	1,1
Температура в гнезде № 6, °С	52,4	51,2	-1,2	39,5	41,4	1,9	25,1	26,3	1,1
Температура в гнезде № 10, °С	47,8	46,6	-1,2	34,4	36,1	1,7	19,4	20,4	1,0
Температура в гнезде № 16, °С	46,4	45,3	-1,1	32,7	34,7	2,0	17,6	19,0	1,4
Температура в гнезде № 17, °С	46,1	44,8	-1,3	32,6	34,0	1,4	17,1	17,8	0,7
Температура в гнезде № 23, °С	45,1	43,6	-1,5	31,4	32,8	1,5	15,8	16,5	0,8
Температура в гнезде № 25, °С	38,5	37,2	-1,3	24,8	26,5	1,7	9,0	9,9	0,9
Температура в гнезде № 26, °С	43,1	41,6	-1,5	30,0	31,7	1,7	14,7	15,8	1,1

Концентрация нуклидов ^{240}Pu , ^{241}Pu и ^{242}Cm с учетом времени выдержки t после останова реактора определялась по формуле:

$$y_2(t) = y_2(0) \times \exp(-\lambda_2 t) + y_1(0) \times b_{1,2} \times \frac{A_2}{A_1} \times \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)], \quad (3)$$

где:

$y_1(0)$, $y_2(0)$ – определенные по формуле (1) концентрации материнских (^{244}Cm , ^{245}Cm и $^{242\text{m}}\text{Am}$) и дочерних (^{240}Pu , ^{241}Pu и ^{242}Cm) нуклидов на момент останова реактора;

λ_1 , λ_2 – постоянные распада материнского и дочернего нуклида, соответственно;

A_1 , A_2 – атомные массы материнского и дочернего нуклида, соответственно;

$b_{1,2}$ – коэффициент ветвления, характеризующий вероятность распада материнского нуклида, приводящего к возникновению дочернего нуклида ($b_{1,2} = 0,827$ для распада $^{242\text{m}}\text{Am}$ в ^{242}Cm , $b_{1,2} = 1$ – для остальных нуклидов).

Концентрация нуклидов ^{235}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu и ^{241}Am с учетом времени выдержки t после останова реактора определялась по формуле:

$$y_3(t) = y_3(0) \times \exp(-\lambda_3 t) + y_2(0) \times \frac{A_2}{A_1} \times \frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} [\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_3 t)] + y_1(0) \times b_{1,2} \times \frac{A_3}{A_1} \times \lambda_1 \lambda_2 \left[\frac{\exp(-\lambda_1 t)}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{\exp(-\lambda_2 t)}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{\exp(-\lambda_3 t)}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right], \quad (4)$$

где:

$y_1(0)$ и $y_2(0)$ – концентрации материнских нуклидов (^{243}Am и ^{239}Pu – для ^{235}U ; ^{244}Cm и ^{240}Pu – для ^{236}U ; ^{241}Pu и ^{241}Am – для ^{237}Np ; $^{242\text{m}}\text{Am}$ и ^{242}Cm – для ^{238}Pu ; ^{245}Cm и ^{241}Pu – для ^{241}Am) на момент останова реактора, определенные по формуле (1);

$y_3(0)$ – концентрации дочерних нуклидов (^{235}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu и ^{241}Am) на момент останова реактора, определенные по формуле (1);

λ_1 , λ_2 , λ_3 – постоянные распада соответствующих материнских и дочерних нуклидов;

A_1 , A_2 , A_3 – атомные массы соответствующих материнских и дочерних нуклидов.

Концентрация нуклида ^{234}U с учетом распада материнских нуклидов ^{238}U и ^{238}Pu для времени

выдержки t после останова реактора определялась по формуле:

$$y_{U-234}(t) = y_{U-234(U-238)}(t) + y_{U-234(\text{Pu}-238)}(t) - y_{U-234}(0) \times \exp(-\lambda_{U-234} t), \quad (5)$$

где:

$y_{U-234(U-238)}(t)$ – определялась по формуле (3), в которой ^{238}U – материнский нуклид, а ^{234}U – дочерний;

$y_{U-234(\text{Pu}-238)}(t)$ – определялась по формуле (4), в которой ^{242}Cm и ^{238}Pu – материнские нуклиды, а ^{234}U – дочерний;

$y_{U-234}(0)$ – концентрация ^{234}U на момент останова реактора;

λ_{U-234} – постоянная распада ^{234}U .

Значение парциального тепловыделения W_i (в Вт/тU) за счет i -го нуклида, содержащегося в ОЯТ для данной глубины выгорания x и времени выдержки t , определялось по формуле:

$$W_i(x, t) = k_{i,W} \times y_i(x, t), \quad (6)$$

где $k_{i,W}$ – переводные коэффициенты, определяющие тепловыделение i -го нуклида (в Вт/т).

Общее тепловыделение ОЯТ определялось суммированием парциального тепловыделения W_i всех нуклидов. Было рассчитано тепловыделение для каждой ОТВС с учетом массы содержащегося в ней ОЯТ, а также суммарное тепловыделение всех ОТВС для каждого пена и гнезда хранения камеры № 2 сухого хранилища ОЯТ ВВЭР-1000.

На рис. 7 приведены графики рассеяния показаний измеренной среднесуточной температуры на дне пробки гнезд хранения в зависимости от остаточного тепловыделения ОЯТ, находящегося в гнезде. Рассмотрено три варианта зависимости: при низкой среднесуточной температуре окружающего воздуха ($-33,3$ °C, 22.01.2023), средней ($+1,1$ °C, 25.03.2023) и высокой ($+27,6$ °C, 08.06.2023). Для каждого варианта построены линии тренда, рассчитаны коэффициенты корреляции (r) и детерминации (R). При построении линий тренда было принято, что связь между расчетным тепловыделением ОЯТ и измеренной температурой имеет линейный характер.

Коэффициент корреляции рассчитывался по формуле Пирсона:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \times \bar{y}}{S_x \times S_y}, \quad (7)$$

где:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i \times y_i) -$$

выборочные средние;

$$S_x = \sqrt{x^2 - (\bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\bar{x})^2}, \quad S_y = \sqrt{y^2 - (\bar{y})^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\bar{y})^2} - \text{выборочные}$$

средние квадратические отклонения.

Коэффициент детерминации рассчитывался по формуле:

$$R = r^2. \tag{8}$$

Оценка тесноты связи температуры на дне пробки гнезд хранения и остаточного тепловыделения ОЯТ осуществлялась с помощью шкалы Чеддока (табл. 3).

Таблица 3. Соотношение коэффициента корреляции по шкале Чеддока [12]

Характер тесноты связи	Диапазон измерения r
слабая	0,1–0,3
умеренная	0,3–0,5
заметная	0,5–0,7
высокая	0,7–0,9
весьма высокая	0,9–0,99

В табл. 4 приведены полученные значения коэффициентов корреляции и детерминации, а также характер тесноты связи измеренной температуры на дне пробки гнезд хранения и рассчитанного остаточного тепловыделения ОЯТ.

Полученные значения r и определенная теснота связи (табл. 4) свидетельствуют о наличии корреляционной связи измеренной температуры на дне пробки гнезд и рассчитанного тепловыделения ОЯТ в гнездах. При низкой и высокой температуре окружающей среды связь заметная, при средней – высокая.

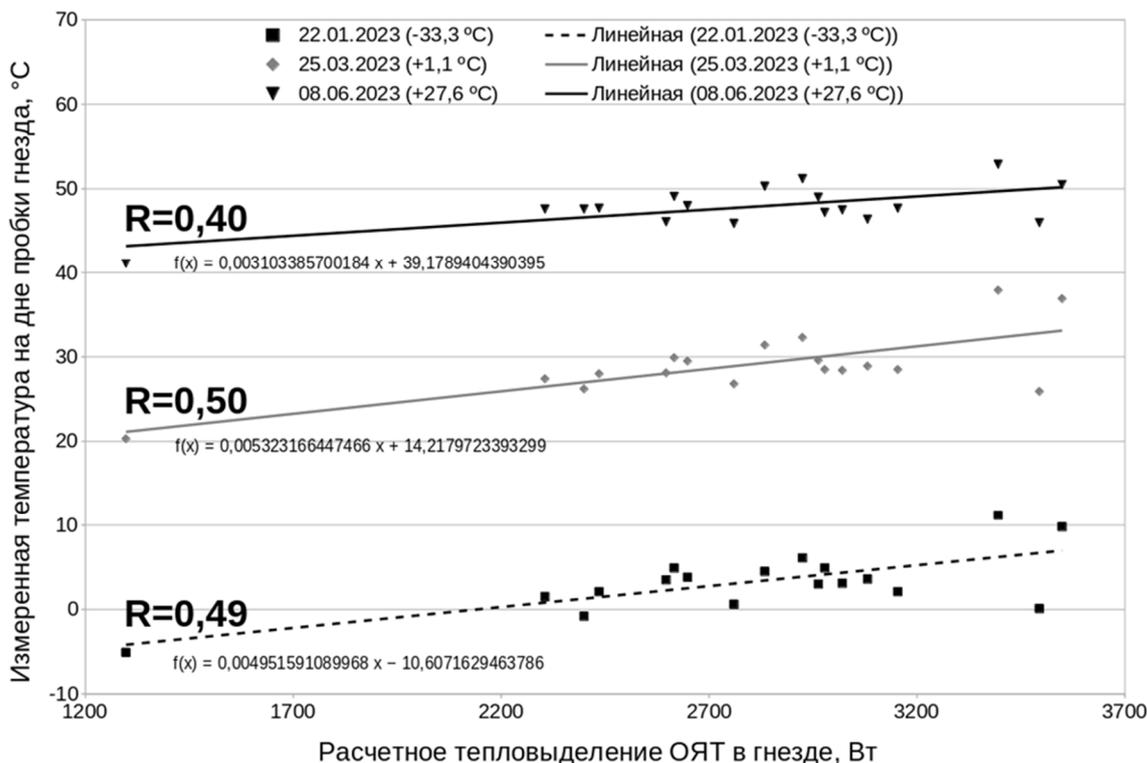


Рис. 7. График рассеяния показаний измеренной температуры на дне пробки гнезд хранения ОЯТ

Таблица 4. Оценка корреляционной связи температуры на дне пробки гнезд хранения и остаточного тепловыделения ОЯТ

Дата	Среднесуточная температура внешней среды, °C	Коэффициент корреляции r	Теснота связи	Коэффициент детерминации R
22.01.2023	-33,3	0,70	заметная	0,49
25.03.2023	1,1	0,71	высокая	0,50
08.06.2023	27,6	0,63	заметная	0,40

Величина коэффициента детерминации (табл. 4) свидетельствует о том, что в данных случаях только 40–50 % вариации температуры на дне пробки гнезда хранения определяются тепловыделением ОЯТ в гнезде. Оставшиеся 50–60 % могут определяться следующими факторами:

- наличие либо отсутствие ОЯТ в соседних гнездах (рис. 4), величина его остаточного тепловыделения;

- расположение гнезда в камере хранения – в центре или на периферии, в зависимости от того, насколько удалено от внешних стен хранилища;

- наличие и скорость ветра, под влиянием которого происходит более интенсивное охлаждение хранилища с наветренной стороны;

- отличие величины остаточного тепловыделения ОЯТ в верхнем и нижнем пеналах в гнезде.

Заключение

Впервые было проведено экспериментальное исследование пассивного теплоотвода при естественно-конвективном течении воздуха внутри камеры сухого хранилища ОЯТ в разные времена года. Для выполнения исследования измерялись параметры в контрольных точках сухого хранилища ОЯТ ВВЭР-1000 и окружающей среды в течение одного календарного года.

В работе отмечается положительное влияние ветрового воздействия на конвективный теплообмен в камере хранения ОЯТ. При воздействии ветра со скоростью 5–10 м/с температура воздуха на выходе из камеры хранения ОЯТ и температура на дне пробки гнезд хранения с наветренной стороны хранилища уменьшается на величину ~1 °С, что качественно подтверждает выполненные ранее расчеты [10].

Можно отметить достаточно небольшую разницу температур воздуха между входом и выходом СОТ камеры хранения ОЯТ. Так, в теплый период воздух в камере хранения подогревается на 7–8 °С (табл. 1), что в соответствии с [3] может свидетельствовать об имеющемся запасе по отводу дополнительного количества тепла.

Выполненный корреляционный анализ зависимости температуры, измеренной на дне пробки гнезд хранения, от остаточного тепловыделения ОЯТ, находящегося в гнездах, свидетельствует о наличии связи между указанными параметрами.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что существующая система охлаждения ОЯТ и конструкция ХОТ-2 обеспечивают безопасное хранение отработавшего топлива.

Экспериментальные данные, полученные в ходе представленных исследований, могут быть использованы при валидации математической модели процессов тепломассообмена в условиях естественной конвекции воздуха в камере ХОТ-2.

Список источников

1. **Шубнов К.И.** Действующие и строящиеся атомные станции в России, их принцип работы // Современные проблемы энергетики и экологии: материалы докладов и сообщений заочной студенческой научно-практической конференции (26 мая 2022 года, Севастополь) / под общей редакцией Ю.А. Омельчук. Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2022. С. 26–33.
2. **Квятковский С.А., Мансуров О.А., Птицын П.Б.** Методы обращения с ОЯТ энергетических реакторов. Москва: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. 192 с. DOI: 10.36535/0202-6120-2021-02-39-2021
3. **Калинкин 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.
4. **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. No. 320. P. 282–297. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2017.06.005
5. **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. No. 11(1). P. 149. DOI: 10.3390/en11010149
6. **Tseng Y.-S., JWang J.-R., Tsai F.P., Cheng Y.-H., Shih C.** Thermal design investigation of a new tube-type dry-storage system through CFD simulations // Annals of Nuclear Energy. 2011. No. 38. P. 1088–1097. DOI: 10.1016/j.anucene.2011.01.001
7. **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. No. 76. P. 54–62. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.09.032
8. **Li J., Liu Y.Y.** Thermal modeling of a vertical dry storage cask for used nuclear fuel // Nuclear Engineering and Design. 2016. No. 301. P. 74–88. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.01.008
9. **Poškás R., Šimonis V., Poškás P., Sirvydas A.** Thermal analysis of CASTOR RBMK-1500 casks during

long-term storage of spent nuclear fuel // *Annals of Nuclear Energy*. 2017. No. 99. P. 40–46. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.09.031

10. **Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л., Сеелев И.Н., Шрагер Э.Р.** 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
 11. **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.
 12. **Котеров А.Н., Ушенкова Л.Н., Зубенкова Э.С., Калинин М.В., Бирюков А.П., Ласточкина Е.М., Молодцова Д.В., Вайнсон А.А.** Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2019. Т. 64. № 6. С. 12–24. DOI: 10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24
- References**
1. **Shubnov K.I.** Deistvuyushchie i stroyashchiesya atomnye stantsii v Rossii, ikh printsip raboty [Operating and under construction nuclear power plants in Russia, their principle of operation]. *Sovremennyye problemy energetiki i ekologii: materialy dokladov i soobshchenii zaochnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 26 maya 2022 goda* [Modern problems of power engineering and ecology: materials of reports and messages of extramural student scientific-practical conference (26 May 2022, Sevastopol)]. Ed by Yu.A. Omel'chuk. Sevastopol: Sevastopol'skii gosudarstvennyi universitet, 2022, pp. 26–33. (In Russ.).
 2. **Kviatkovskii S.A., Mansurov O.A., Ptitsyn P.B.** Technologies of power reactors SNF management. Moscow: Centre of Analytical R&D (CARD), Private Enterprise «Science and Innovations», State Atomic Energy Corporation Rosatom, 2021, 192 p. (In Russ.). DOI: 10.36535/0202-6120-2021-02-39-2021
 3. **Kalinkin V.I.** Obosnovanie metoda suhogo hranenija otrabotavshogo jadernogo topliva atomnykh jelektrostantsij s reaktorami RBMK-1000 i VVER-1000 [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.).
 4. **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, no. 320, pp. 282–297. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2017.06.005
 5. **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, no. 11(1), p. 149. DOI: 10.3390/en11010149
 6. **Tseng Y.-S., JWang J.-R., Tsai F.P., Cheng Y.-H., Shih C.** Thermal design investigation of a new tube-type dry-storage system through CFD simulations. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, no. 38, pp. 1088–1097. DOI: 10.1016/j.anucene.2011.01.001
 7. **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, no. 76, pp. 54–62. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.09.032
 8. **Li J., Liu Y.Y.** Thermal modeling of a vertical dry storage cask for used nuclear fuel. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, no. 301, pp. 74–88. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.01.008
 9. **Pořkas R., Šimonis V., Pořkas P., Sirvydas A.** Thermal analysis of CASTOR RBMK-1500 casks during long-term storage of spent nuclear fuel. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, no. 99, pp. 40–46. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.09.031
 10. **Krainov A.Yu., Min'kov L.L., Seelev I.N., Shragher E.R.** 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, no. 47, pp. 75–86. (In Russ.). DOI: 10.17223/19988621/47/8
 11. **Kazyulin A.N., Yashchuk A.A.** Vlijanie meteorologicheskikh parametrov na otvod tepla iz kamer suhogo hranilishha otrabotavshogo jadernogo topliva [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): tezisyy 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.).
 12. **Kotеров А.Н., Ушенкова Л.Н., Зубенкова Э.С., Калинин М.В., Бирюков А.П., Ласточкина Е.М., Молодцова Д.В., Вайнсон А.А.** Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции [The power of communication. Message 2. Gradations of the magnitude of correlation]. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*, 2019, vol. 64, no. 6, pp. 12–24. (In Russ.). DOI: 10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24

Статья поступила в редакцию 16.01.2024; одобрена после рецензирования 14.03.2024; принята к публикации 28.03.2024.

The article was submitted on 16.01.2024; approved after reviewing on 14.03.2024; accepted for publication on 28.03.2024.