

УДК 621.039

DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016

Оригинальная статья

Режим работы в бассейне выдержки Билибинской атомной электростанции при реализации различных неблагоприятных сценариев

Р.В. Ключев¹, В.Б. Заалишвили², И.Д. Музаев², А.А. Гаврилова¹

¹ Московский политехнический университет, Россия,
107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, 38,
e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

² Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а,
e-mail: vzaal@mail.ru

Статья поступила: 28.01.2025, доработана: 03.03.2025, принята к публикации: 07.03.2025

Резюме: **Актуальность работы.** На сегодняшний день только малая часть накопленного топлива (~5%) и часть ежегодно образующегося отработанного ядерного топлива на атомной электростанции отправляется на специализированный завод для регенерации. В связи с чем и возникла потребность в хранилищах с большой емкостью, которые смогут вмещать в себя все необходимые отходы при обеспечении высоких стандартов безопасности. Одним из основных способов увеличения места для захоронения является переход на схему более уплотненного хранения тепловыделяющих сборок (ТВС) в бассейнах выдержки. В то же время при увеличении тепловыделяющих сборок растет и количество выделяемого тепла. **Целью работы** является определение температурного режима в бассейне выдержки №4 Билибинской АЭС при реализации различных неблагоприятных сценариев для обеспечения долгосрочного безопасного хранения ядерных отходов. В связи с этим сформированы задачи исследования: рассчитать время до повреждения ТВС в бассейне выдержки Билибинской АЭС, рассчитать время до критического предаварийного состояния БВ-4. **Методы.** Аналитические исследования проведены на основе сочетания численных методов математического моделирования и построения регрессионных моделей. **Результаты.** Поставлена и решена начально-краевая задача математической физики, моделирующая температурно-тепловые процессы в тепловыделяющих сборках, погруженных в бассейн выдержки с принудительным охлаждением. Приведен расчет температурных режимов в бассейне выдержки №4 на Билибинской АЭС. Рассмотрены изменения температуры ТВС в бассейне выдержки №4 при условиях: 1) снижение уровня воды до головок тепловыделяющих сборок, 2) оголение тепловыделяющих сборок на 25%, 3) оголение тепловыделяющих сборок на 50%.

Ключевые слова: Билибинская атомная станция, бассейн выдержки, отработанное ядерное топливо, тепловыделяющие сборки, начально-краевая задача, трехкратные тригонометрические ряды Фурье.

Для цитирования: Ключев Р.В., Заалишвили В.Б., Музаев И.Д., Гаврилова А.А. Режим работы в бассейне выдержки Билибинской атомной электростанции при реализации различных неблагоприятных сценариев. // *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 194-207 DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016

DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016

Original paper

Operation mode in the spent fuel pool of the Bilibino nuclear power plant under the implementation of various unfavorable scenarios

R.V. Klyuev¹, V.B. Zaalishvili², I.D. Muzaev², A.A. Gavrilova¹

¹ Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya Str.,
Moscow 107023, Russian Federation,
e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

² Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: vzaal@mail.ru

Received: 28.01.2025, revised: 03.03.2025, accepted: 07.03.2025

Abstract: Relevance. Today, only a small part of the accumulated fuel (~5%) and a part of the annually generated spent nuclear fuel at a nuclear power plant is sent to a specialized plant for regeneration. In connection with this, the need arose for storage facilities with large capacities that can accommodate all the necessary waste while ensuring high safety standards. One of the main ways to increase disposal space is to switch to a more compact storage scheme for fuel assemblies (FA) in cooling pools. At the same time, as the fuel assemblies increase, the amount of heat generated also increases. **The aim** of the study is to determine the temperature regime in the spent fuel pool No. 4 of the Bilibino NPP under the implementation of various unfavorable scenarios, to ensure long-term safe storage of nuclear waste. In this regard, the research objectives were formed: to calculate the time until fuel assemblies are damaged in the spent fuel pool of the Bilibino NPP, to calculate the time until the critical pre-accident state of BV-4. **Methods.** Analytical studies were conducted based on a combination of numerical methods of mathematical modeling and construction of regression models. **Results.** The initial-boundary value problem of mathematical physics modeling temperature-thermal processes in fuel assemblies immersed in a spent fuel pool with forced cooling is formulated and solved. The temperature regimes in spent fuel pool No. 4 at the Bilibino NPP are calculated. Changes in the temperature of fuel assemblies in spent fuel pool No. 4 are considered for: 1) a decrease in the water level to the heads of fuel assemblies, 2) exposure of fuel assemblies by 25%, 3) exposure of fuel assemblies by 50%.

Keywords: Bilibino nuclear power plant, spent fuel pool, spent nuclear fuel, the inventive fuel assembly, initial boundary value problem, three-fold trigonometric Fourier series.

For citation: Klyuev R.V., Zaalishvili V.B., Muzaev I.D., Gavrilova A.A. Operation mode in the spent fuel pool of the Bilibino nuclear power plant under the implementation of various unfavorable scenarios. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 194-207. DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016

Введение

Основным принципом, положенным в основу проектирования систем обращения с ядерными отходами, является обеспечение ядерной и радиационной безопасности при нормальном функционировании системы, а также снижение радиационного воздействия при проектных и запроектных авариях [Chierici et al., 2025]. В связи с этим наиболее актуальными проблемами для ядерной энергетики являются: а) вопросы переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ); б) сложность в длительном хранении отработанного топлива.

Основными нерешенными вопросами являются: где хранить топливо, каким способом (в каком виде), насколько долгосрочным должно быть данное хранение.

На сегодняшний день только малая часть накопленного топлива (~5%) и часть ежегодно образующегося отработанного ядерного топлива на АЭС отправляется на специализированный завод для регенерации. В связи, с чем и возникла потребность в хранилищах с большой емкостью, которые смогут вмещать в себя все необходимые отходы при обеспечении высоких стандартов безопасности.

В рассматриваемом хранилище находятся 4 бассейна выдержки с проектной вместимостью 836 тепловыделяющих сборок (ТВС), но со временем данный параметр был повышен до 2030 ТВС (за счет более уплотненного размещения). ТВС хранятся в стальных пеналах 108×4 с минимальным шагом 115×177 мм в прямоугольной решетке. Герметичные пеналы с ТВС заполнены азотом, а само хранилище заполнено водой. После полного заполнения хранилища оно осушается.

Одним из основных способов увеличения места для захоронения является переход на схему более уплотненного хранения ТВС в бассейнах выдержки. В то же время при увеличении тепловыделяющих сборок растет и количество выделяемого тепла. Решению задач моделирования тепловых режимов ТВС при долгосрочном хранении отходов посвящено много работ [Колпаков, Селиваникова, 2009; Morrison, Parks, 2020; Сергеев, 2021]. В рамках существующих численных методов решения подобных задач, кроме зарубежных аналогов [Kile et al., 2024; Gauld, Murphy, 2010] существует и ряд прогрессивных отечественных ПО (Ядерный калькулятор ЭГП-6 2.0. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617782, 2019 г.) [Жердев, Суворов, 2020; Бедретдинов М.М., Степанов, 2021]. В отличие от программ на основе метода конечных элементов [ANSYS ..., 2013; Brigida et al., 2024], методов машинного обучения [Моргоева и др., 2022; Ключев и др., 2023; Klyuev et al., 2022] или трехмерных регрессионных моделей функции отклика [Бригида и др., 2019; Brigida et al., 2022] в большинстве случаев используются более простые методы [Karami et al., 2025]. И, тем не менее, методология прогноза температурных режимов ТВС при различных проявлениях неблагоприятных условий нуждается в совершенствовании.

В связи с этим целью работы, является определение температурного режима в бассейне выдержки №4 Билибинской АЭС при реализации различных неблагоприятных сценариев, для обеспечения долгосрочного безопасного хранения ядерных отходов. В связи с этим сформированы задачи исследования: рассчитать время до повреждения ТВС в бассейне выдержки Билибинской АЭС, рассчитать время до критического предаварийного состояния БВ-4.

Материалы и методы

Объектом исследования является хранилище Билибинской АЭС, а именно бассейн выдержки №4 (БВ-4) Билибинской АЭС. Аналитические исследования проведены на основе сочетания численных методов математического моделирования и наименьших квадратов (построение регрессионных моделей) по аналогии с работами [Golik et al., 2020; Maluykova et al., 2023]. При этом, несомненно, имеет значение возможность непосредственных инструментальных измерений соответствующих сложных явлений [Заалишвили, Голик, 2024; Заалишвили и др., 2013, 2014; Голик, Бурдзиева, 2023].

Для расчета параметров бассейна выдержки осуществляли расчет: 1) размера бассейна выдержки; 2) объема самого БВ-4; 3) объема воды в БВ-4. Для определения времени разогрева и закипания воды в БВ-4 рассчитывалось: 1) количество теплоты, которое выделяется кассетами после их погружения в БВ-4; 2) время разогрева воды в БВ-4; 3) время выпаривания воды в БВ-4; 4) время до закипания воды.

Основные формулы, используемые в работе.

Расчет количества теплоты, выделяемого при охлаждении:

$$Q = (C \cdot m_b)(t_2 - t_1), \quad (1)$$

Определение времени нагрева воды (t_p), ч:

$$t_p = \frac{m \cdot c \cdot \Delta \vartheta}{P \cdot \eta}, \quad (2)$$

где: m – количество воды (кг); P – мощность (Вт); η – КПД; $\Delta \vartheta$ – разность температур (К),

$$\Delta \vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2, \quad (3)$$

где: ϑ_2 – температура холодной воды (°C); ϑ_1 – температура горячей воды (°C).

Время испарения воды в БВ-4:

$$t_i = \frac{N}{L}; \quad (4)$$

Время закипания воды в БВ-4:

$$t_B = \frac{S \cdot \Delta H \cdot \rho}{G} \quad (5)$$

Постановка и решение начально-краевой задачи, моделирующей температурные процессы в тепловыделяющей сборке, погруженной в бассейн выдержки

В прямоугольной системе координат $oxyz$ часть пространства ограниченная условиями $0 \leq x \leq L_1, 0 \leq y \leq L_2, 0 \leq z \leq L_3$ занята индивидуальной тепловыделяющей сборкой погруженной в бассейн выдержки с принудительным охлаждением. Процесс выделения тепла в бассейне выдержки и охлаждения моделируется следующей начально-краевой задачей математической физики [Краснов и др., 2004; Музаев и др., 2016, 2024]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + \frac{W_0}{c\rho} e^{-\gamma t}, \quad (6)$$

$$U(x, y, z, t)|_{t=0} = U_0, \quad U = U^* \text{ при } x = 0, x = L_1, y = 0, y = L_2, z = 0, z = L_3, \quad (7)$$

где приняты следующие обозначения и предположения: $U(x, y, z, t)$ – нестационарное температурное поле в сборке, a – коэффициент температуропроводности материала сборки, c – коэффициент теплоемкости, ρ – плотность, W_0 – начальная тепловыделяющая мощность сборки, t – время, γ – декремент затухания тепловыделяющей мощности сборки, (x, y, z, t) – координаты точки в пространстве сборки, U_0 – температура сборки в момент погружения, U^* – температура принудительно

охлаждающей воды в бассейне выдержки. Конфигурация сборки геометрически скомпонована в виде параллелепипеда с размерами L_1 , L_2 , L_3 . Расчетная схема поставленной задачи (6)–(7) представлена на рисунке 1.

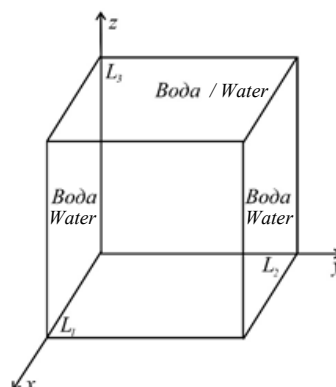


Рис. 1. Расчетная схема поставленной начально-краевой задачи /
Fig. 1. Calculation scheme of the initial boundary value problem

Поставленная пространственная начально-краевая задача решена методами трехкратных тригонометрических рядов Фурье [Краснов и др., 2004; Музаев и др., 2016, 2024] в следующей последовательности:

$$U(x, y, z, t) = U^* + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} U_{n,m,k}(t) \sin a_n x \sin a_m y \sin a_k z, \quad (8)$$

$$a_n = \frac{n\pi}{L_1}, a_m = \frac{m\pi}{L_2}, a_k = \frac{k\pi}{L_3}, \quad (9)$$

$$\frac{dU_{n,m,k}(t)}{dt} + a \lambda_{n,m,k}^2 U_{n,m,k} = \frac{W_0}{c\rho} e^{-\gamma t} \cdot \alpha_{n,m,k}, \quad (10)$$

$$U_{n,m,k}(t)|_{t=0} = (U_0 - U^*) \cdot \alpha_{n,m,k}, \quad (11)$$

$$\alpha_{n,m,k} = \frac{8}{L_1 L_2 L_3} \cdot \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k}, \quad (12)$$

$$U_{n,m,k}(t) = \left\{ \left[U_0 - U^* - \frac{W_0}{c\rho(a \cdot \lambda_{n,m,k}^2 - \gamma)} \right] \cdot e^{-a \cdot \lambda_{n,m,k}^2 t} + \frac{W_0}{c\rho(a \cdot \lambda_{n,m,k}^2 - \gamma)} e^{-\gamma t} \right\} \alpha_{n,m,k} \quad (13)$$

Температурное нестационарное поле вычисляется по совокупности расчетных формул (8)–(13).

Для средней температуры сборки получается следующая расчетная формула:

$$U_{cp}(t) = \frac{1}{L_1 L_2 L_3} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \int_0^{L_3} U(x, y, z, t) dx dy dz, \quad (14)$$

$$U_{cp}(t) = \frac{1}{L_1 L_2 L_3} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} U_{n,m,k}(t) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k},$$

Для мощности теплового потока, текущего от сборки к охлаждающей воде в бассейне выдержки получена следующая расчетная формула:

$$W(t) = -ac\rho \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} U_{n,m,k}(t) \left[a_n(1 + \cos n\pi) \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k} + \right. \\ \left. + a_m(1 + \cos m\pi) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k} + a_k(1 + \cos k\pi) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \right] \quad (15)$$

Для количества тепла, отданного сборкой охлажденной воде в промежутке времени ее нахождения в бассейне выдержки, получена следующая расчетная формула:

$$Q(t) = \int_0^b W(\tau) d\tau \\ = ac\rho \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} R_{n,m,k}(t) \left[a_n(1 + \cos n\pi) \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k} + \right. \\ \left. + a_m(1 + \cos m\pi) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos k\pi}{a_k} + a_k(1 + \cos k\pi) \frac{1 - \cos n\pi}{a_n} \cdot \frac{1 - \cos m\pi}{a_m} \right] \quad (16)$$

$$R_{n,m,k}(t) = \left[U_0 - U^* - \frac{W_0}{c\rho(a\lambda_{n,m,k}^2 - \gamma)} \right] \frac{1 - e^{a\lambda_{n,m,k}^2 t}}{a\lambda_{n,m,k}^2} - \frac{W_0}{c\rho(a\lambda_{n,m,k}^2 - \gamma)} \cdot \frac{1 - e^{-\gamma t}}{\gamma} \quad (17)$$

Результаты и обсуждение

Первичные результаты расчетов приведены на рисунке 2, где представлено изменение мощности ТВС в зависимости от времени хранения.

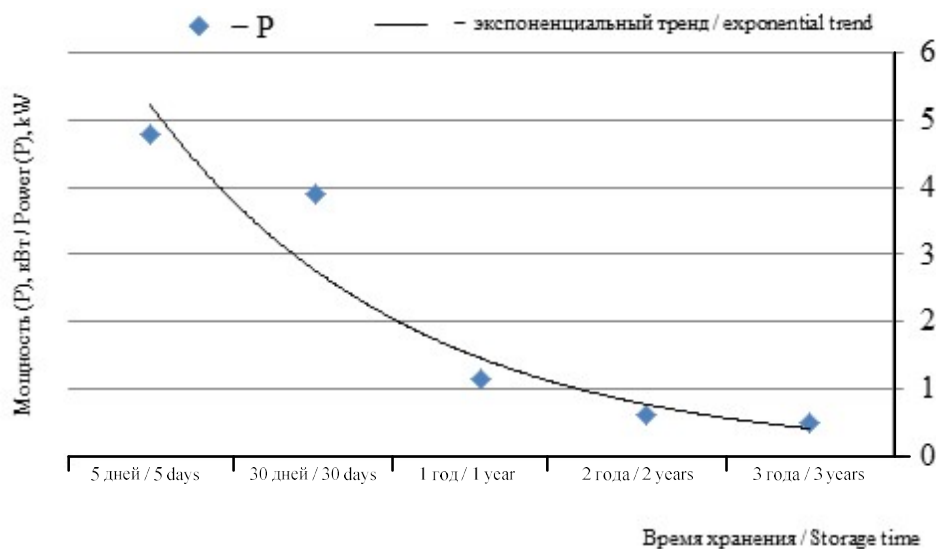


Рис. 2. Зависимость мощности тепловыделяющих сборок от времени их хранения /

Fig. 2. Dependence of the power of fuel assemblies on their storage time

В результате обработки данных установлена зависимость изменения мощности тепловыделяющих сборок от времени хранения, имеющая экспоненциальный вид ($R^2 = 0,93$):

$$W = 9,8915 \times e^{-0,64t} \quad (18)$$

Представленная зависимость тепловыделяющих сборок была получена путем статистической обработки данных (методом наименьших квадратов), подтверждающих состояние активной зоны при работе реактора в нормальном режиме.

Из анализа зависимости (6) следует, что падение мощности наиболее активно происходит на временном отрезке от 30 суток до года. Из этого следует, что первоочередная загрузка хранилища бассейна ОЯТ сборками с наименьшей активностью позволит более активному топливу в кассетах уменьшить выделение тепла в пределах БВ-4. За счет этого возможно управлять формированием дозовых нагрузок на рабочий персонал станции.

Уровень остаточного тепловыделения приведен на рисунке 3. Из анализа кривой, представленной на рисунке 2, следует, что уровень максимального остаточного тепловыделения возникает в случае ускоренной выгрузки. Это происходит во время останова блоков №2–4 с полной выгрузкой блока №1 и не превышает 30%. Принимая среднюю мощность ТВС равной 200 кВт, указанный пик уровня остаточных тепловыделений не превысит 60 кВт, что ниже допустимого значения в 100 кВт согласно «Техническому обоснованию безопасности атомных станций...». В реальных условиях, при заполнении БВ-4 процесс имеет большую длительность, соответственно уровень максимальных остаточных тепловыделений будет ниже представленного на графиках.

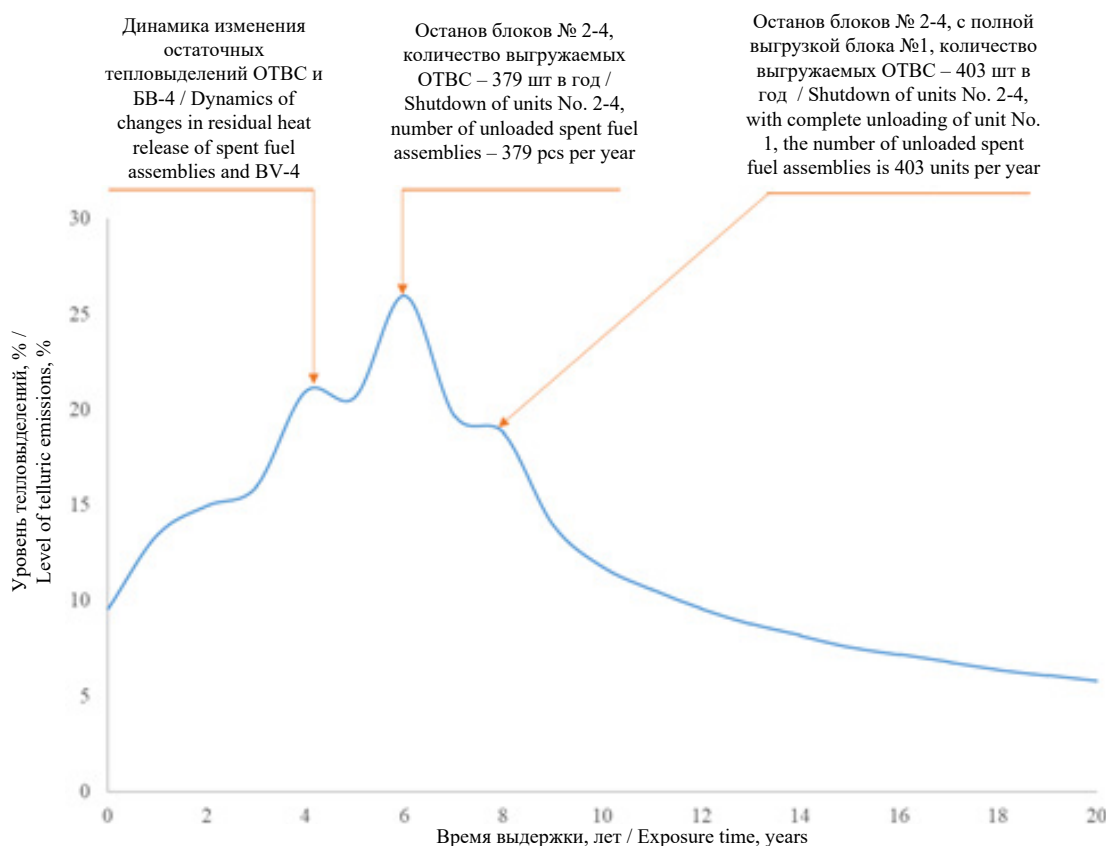


Рис. 3. Динамика остаточных тепловыделений отработанных ТВС и БВ-4 /

Fig. 3. Dynamics of residual heat releases from spent fuel assemblies and spent fuel assemblies

Первый предлагаемый вариант подразумевает, что в БВ-4 находится только ОЯТ, выгрузка не производится, а хранение происходит в нижнем ярусе БВ-4 (уровень

воды 6,5 м). Количество кассет в нижнем ярусе: 320 е.д., мощность одной такой кассеты 1,5 кВт. При расчете всех параметров был получен результат (рис. 4): время полного разогрева воды в БВ-4: 22 часа, время выпаривания всей воды из БВ-4: 96 часов.

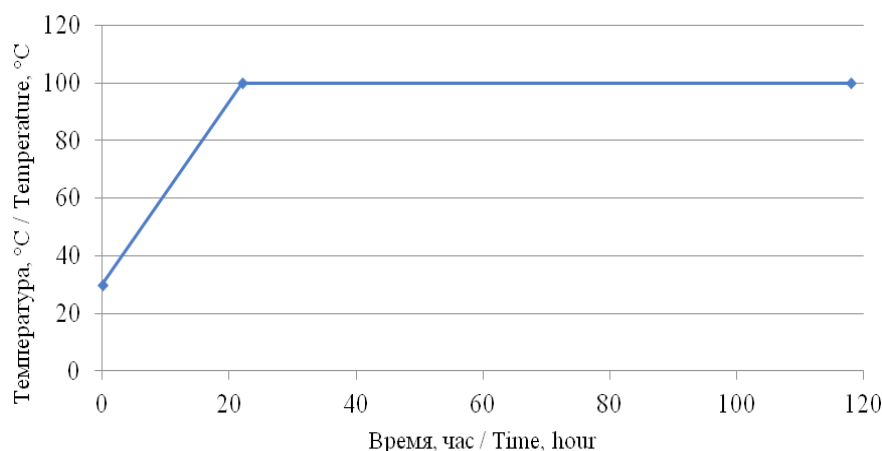


Рис. 4. Полученные результаты для первого яруса хранения /

Fig. 4. The results obtained for the first tier of storage

Второй предлагаемый вариант подразумевает, что все находящееся топливо Библибинской АЭС находится в БВ-4, в нижнем и верхнем ярусах БВ-4, при помощи уплотненного способа хранения ТВС. Изначально заполняется нижний ярус, а затем верхний (уровень воды в БВ-4 равен 9,5 м). Результаты расчетов приведены на рисунке 5. Общее количество кассет 650. Мощность кассеты 4,8 кВт, время разогрева 4,7 часов, время выпаривания всей воды из БВ-4 27 часов.

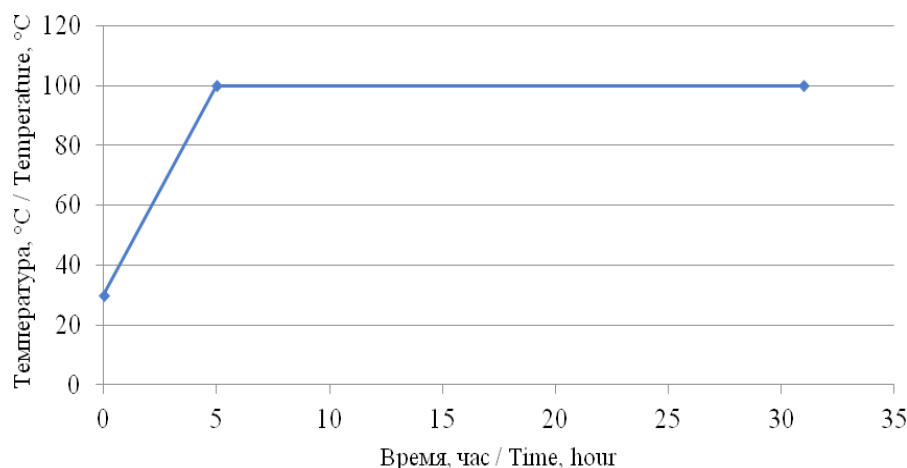


Рис. 5. Полученные результаты для верхнего и нижнего ярусов хранения /

Fig. 5. The results obtained for the upper and lower tiers of storage

Рассмотрим также сценарий, где рассчитывается тепловой режим БВ-4 при уплотненном хранении тепловыделяющих сборок при прекращении принудительного охлаждения. Данный расчет показывает, что при полностью заполненном водой БВ-4 вода все также нагревается до состояния кипения. Это происходит так как, несмотря на естественную циркуляцию, при достаточно плотном нахождении сборок, доля тепла переносится теплопроводностью.

При отсутствии принудительного охлаждения (рис. 6) разогрев воды в БВ-4 до температуры 90°C происходит за 90500 секунд, а до температуры кипения нагрев происходит за 126400 секунд.

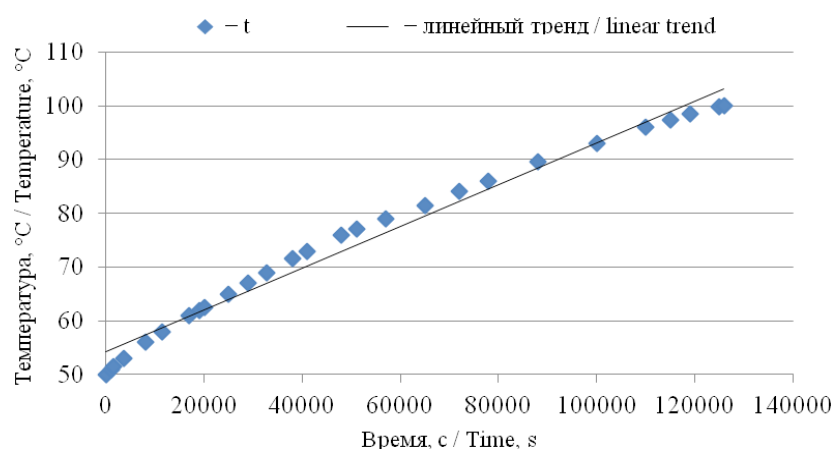


Рис. 6. Изменение температуры тепловыделяющих сборок в БВ-4 при отсутствии принудительного охлаждения и полной загрузке водой /

Fig. 6. Change in the temperature of fuel assemblies in BV-4 in absence of forced cooling and full loading with water

В результате обработки данных установлена зависимость изменения температуры тепловыделяющих сборок (при отсутствии принудительного охлаждения) от времени хранения, имеющая линейный вид ($R^2 = 0,98$):

$$T = 0,0004t + 54,239. \quad (19)$$

На последнем этапе производился расчет для условий, когда оголение тепловыделяющих сборок находилось на уровне 20, 25, а также 50 % (рис. 7). В результате обработки данных установлена зависимость изменения температуры ТВС в БВ-4 от времени хранения при трех неблагоприятных сценариях работы, имеющая линейный вид (табл. 1).

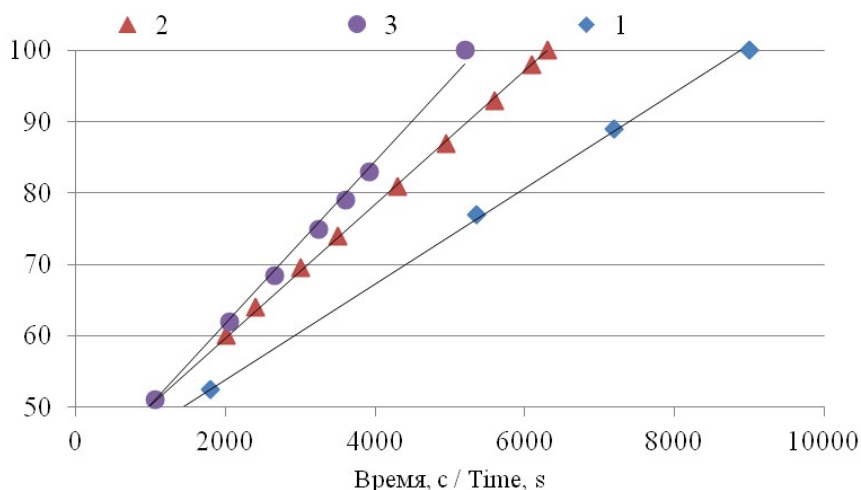


Рис. 7. Изменения температуры ТВС в БВ-4 при условиях:

1) снижение уровня воды до головок тепловыделяющих сборок; 2) оголение тепловыделяющих сборок на 25%; 3) оголение тепловыделяющих сборок на 50% /

Fig. 7. Changes in the fuel assembly temperature in BV-4 with:

1) a decrease in the water level to the heads of the fuel assemblies; 2) exposure of fuel assemblies by 25%; 3) exposure of fuel assemblies by 50%

Таблица 1 / Table 1

**Изменение температуры ТВС в БВ-4 в зависимости от времени хранения /
Changes in fuel assembly temperature in BV-4 with storage time**

Вариант / Variant	Формула / Equation	Коэффициент детерминации R^2 / Coefficient of determination R^2
1	$y = 0,0067x + 40,399$	0,9995
2	$y = 0,0094x + 40,864$	0,9994
3	$y = 0,0114x + 38,936$	0,9971

Изменение температуры ТВС в БВ-4 в зависимости от времени хранения установлено при трех неблагоприятных сценариях работы: 1) снижение уровня воды до головок тепловыделяющих сборок, 2) оголение тепловыделяющих сборок на 25%, 3) оголение тепловыделяющих сборок на 50%.

Расчеты были произведены с целью возможности определения «предельного» состояния в БВ-4 при отсутствии принудительного охлаждения, т.е. рассматривались или прогрев воды до точки кипения, или разогрев тепловыделяющих сборок до температуры 650 (°C).

При оголении сборок ТВС на 20% их температура не достигает критического значения в 650 (°C). Но при других параметрах, т.е. при 25, 50 % данный показатель растет и превышает необходимое критическое значение. Температура самой воды в данных расчетах равна температуре кипения (т.е. 100°C), прогрев происходит за 7,5 часов.

Выводы

1. Поставлена и решена начально-краевая задача математической физики, моделирующая температурно-тепловые процессы в тепловыделяющей сборке, погруженной в бассейн выдержки с принудительным охлаждением.

2. В результате решения поставленной начально-краевой задачи получены расчетные формулы:

- для распределения нестационарного температурного поля в сборке;
- для мощности (дж/с) теплового потока, текущего от сборки к охлаждающей воде в бассейне выдержки;
- для нестационарного теплового потока (дж) текущего от сборки к охлаждающей воде.

3. Аналогичным путем можно поставить и решить начально-краевую задачу, моделирующую температурно-тепловые процессы в тепловыделяющей сборке при частичном погружении сборки в бассейн выдержки с принудительным охлаждением.

4. В системе хранения и обращения с ОЯТ управление всеми механизмами производится вручную. В системе человек-машина возможны ошибки персонала независимо от уровня квалификации, подготовки и опыта. Под ошибочными действиями персонала при управлении комплексом оборудования по транспортированию ОЯТ следует считать ошибку при выборе переключателя управления. Вероятность такого события составляет около 3×10^{-3} .

5. В результате исследования установлено, что у персонала станции будет порядка 60 минут для восстановления полной работоспособности охлаждающих си-

стем БВ-4 при 50-процентном оголении ТВС и отсутствии принудительного охлаждения. Установлено, что в период полного разогрева воды в БВ-4 при отсутствии принудительного охлаждения и при уплотненном хранении сборок ТВС на двух ярусах БВ-4, оболочки нагреваются за 2,5 часа (при оголении сборок на 20%) и за 1 час 20 минут (при оголении сборок на 50%).

Литература

1. Бедретдинов М.М., Степанов О.Е. Валидация кодов КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1 для условий потери охлаждения бассейна выдержки отработанного ядерного топлива. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – Вып. 3. – С. 213–225. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-3-213-226.
2. Бригада В.С., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Голик В.И. Использование разгрузочного бурения для обеспечения безопасности обработки газоносных угольных пластов Донбасса. // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 3. – С. 7–11. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-7-11.
3. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.
4. Жердев Г.М., Суворов А.П. Программа «Ядерный Калькулятор ЭГП-6» для инженерных расчётов радиационных характеристик ОТВС Билибинской АЭС. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – Вып. 3. – С. 72–79. DOI: 10.55176/24141038-2020-3-72-79.
5. Заалишвили В.Б., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Информационный мониторинг распределённых физических полей в пределах урбанизированной территории. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – № 4. – С. 8–16.
6. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Кануков А.С., Габараев А.Ф., Шепелев В.Д. Сход каменно-ледовой лавины в районе ледника Девдорак 17 мая 2014 года по инструментальным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 4. – С. 122–128.
7. Заалишвили В.Б., Голик В.И. Геофизическое обеспечение горного производства. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 85–98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d.
8. Клюев Р.В., Моргоева А.Д., Гаврина О.А., Босиков И.И., Моргоев И.Д. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения. // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 392–402.
9. Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В. Конструкция твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов. Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
10. Краснов М.А., Киселев А.И., Макаренко Г.И., Шикин Е.В., Заляпин В.И. Вся высшая математика. Т. 4. М.: УРСС, 2004. – 192 с.
11. Моргоева А.Д., Моргоев И.Д., Клюев Р.В., Гаврина О.А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. № 7. – С. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527.
12. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Теоретические положения автоматизации проектирования селективных водозаборных устройств. // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21. № 4. – С. 99–110.
13. Музаев И.Д. Математическое моделирование селективных водозаборных процессов в двухслойном стратифицированном водоеме. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 29–40. DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x.
14. Сергеев В.В. Особенности расчетного моделирования тепловых режимов бассейнов выдержки БиАЭС. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – Вып. –1. – С. 91–107. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-1-97-107.

15. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 15.0. 2013, – 220 p.
16. Brigida V., Golik V.I., Voitovich E.V., Kukartsev V.V., Gozbenko V.E., Konyukhov V.Y., Oparina T.A. Technogenic reservoirs resources of mine methane when implementing the circular waste management concept. // *Resources*. – 2024. – Vol. 13. Issue 2. – Art. No. 33. DOI: 10.3390/resources13020033.
17. Brigida V.S., Golik V.I., Dzeranov B.V. Modeling of coalmine methane flows to estimate the spacing of primary roof breaks. // *Mining*. – 2022. – Vol. 2. – pp. 809–821. DOI: 10.3390/mining2040045.
18. Chierici A., Ciolini R., Siqueira Nascimento D., d’Errico F. An autonomous IoT monitoring unit for radiological and nuclear emergency management. // *European Physical Journal Plus*. – 2025. – Vol. 14 (1). – Art. No. 8. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05936-z.
19. Gauld I.C., Murphy B.D. Technical basis for a proposed expansion of regulatory guide 3.54-decay heat generation in an independent spent fuel storage installation. Oak Ridge: United States Nuclear Regulatory Commission. 2010, – 230 p.
20. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2020. – Vol. 5. – pp. 47–54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.
21. Karami Fath I., Niknejad A., Zare-Zardini H. Design optimization of pangolin inspired composites for enhanced energy absorption. // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15(1). – Art. No. 4443. DOI: 10.1038/s41598-025-88474-7.
22. Kile R.F., Epiney A.S., Brown N.R. RELAP5-3D validation studies based on the High Temperature Test facility. // *Nuclear Engineering and Design*. – 2024. – Vol. 426. – Art. No. 113401. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2024.113401.
23. Klyuev R.V., Morgoev I.D., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Martyushev N.V., Efremkov E.A., Mengxu Q. Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review. // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – Art. No. 8919. DOI: 10.3390/en15238919.
24. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
25. Morrison S.L., Parks G.T. The effect of Am241 on UK plutonium recycle options in thorium-plutonium fuelled LWRs – Part II: BWRs. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2020. – Vol. 135. – Art. No. 106974. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.106974.

References

1. Bedretdinov M.M., Stepanov O.E. Validation of codes KORSAR/GP and SOKRAT/V1 for conditions of loss of cooling of the spent nuclear fuel pool. VANT. Serija: Jaderno-reaktornye konstanty. 2021. Issue 3. pp. 213–225. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-3-213-226. (In Russ)
2. Brigida V.S., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z., Golik V.I. Use of destressing drilling to ensure safety of Donbass gas-bearing coal seams extraction. Occupational Safety in Industry. 2019. No. 3. pp. 7–11. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-7-11. (In Russ)
3. Golik V.I., Burdzieva O.G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014. (In Russ)
4. Zherdev G.M., Suvorov A.P. The program “Nuclear Calculator EGP-6” for engineering calculations of the radiation characteristics of spent fuel assemblies of the Bilibino NPP. VANT. Serija: Jaderno-reaktornye konstanty. 2020. Issue 3. pp. 72–79. DOI: 10.55176/24141038-2020-3-72-79. (In Russ)
5. Zaalshvili V.B., Burdzeva O.G., Zaks T.V., Kanukov A.S. Information monitoring of distributed physical fields within an urbanized territory. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2013. No. 4. pp. 8–16. (In Russ)

6. Zaalshvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Kanukov A.S., Gabaraev A.F., Shepelev V.D. A rock-ice avalanche in the area of the Devdorak glacier on 17 May 2014 according to instrumental data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2014. No. 4. pp. 122–128. (In Russ)
7. Zaalishvili V.B., Golik V.I. Geophysical support of mining production. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 85–98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d. (In Russ)
8. Klyuev R.V., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Bosikov I.I., Morgoev I.D. Forecasting planned electricity consumption for the united power system using machine learning. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. pp. 392–402. (In Russ)
9. Kolpakov G.N., Selivanikova O.V. Design of fuel rods, channels and cores of power reactors. Tomsk. Tomsk Polytechnic University Publishing House. 2009. 118 p. (In Russ)
10. Krasnov M.A., Kiselev A.I., Makarenko G.I., Shikin E.V., Zalyapin V.I. All higher mathematics. Vol. 4. Moscow. URSS. 2004. 192 p. (In Russ)
11. Morgoeva A.D., Morgoev I.D., Klyuev R.V., Gavrina O.A. Forecasting of electric energy consumption by an industrial enterprise using machine learning methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022. Vol. 333. No. 7. pp. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527. (In Russ)
12. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Theoretical principles of automation of design of selective water intake devices. *Computing technologies*. 2016. Vol. 21. No. 4. pp. 99–110. (In Russ)
13. Muzaev I.D. Mathematical modeling of selective water intake processes in a two-layer stratified reservoir. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 29–40. DOI: 10.46698/y4376-5315-2395-x. (In Russ)
14. Sergeev V.V. Features of computational modeling of thermal regimes of BiNPP cooling pools. *VANT. Serija: Jaderno-reaktornye konstanty*. 2021. Issue 3. pp. 91–107. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-1-97-107. (In Russ)
15. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 15.0. 2013. 220 p.
16. Brigida V., Golik V.I., Voitovich E.V., Kukartsev V.V., Gozbenko V.E., Konyukhov V.Y., Oparina T.A. Technogenic reservoirs resources of mine methane when implementing the circular waste management concept. *Resources*. 2024. Vol. 13. Issue 2. Art. No. 33. DOI: 10.3390/resources13020033.
17. Brigida V.S., Golik V.I., Dzeranov B.V. Modeling of coalmine methane flows to estimate the spacing of primary roof breaks. *Mining*. 2022. Vol. 2. pp. 809–821. DOI: 10.3390/mining2040045.
18. Chierici A., Ciolini R., Siqueira Nascimento D., d’Errico F. An autonomous IoT monitoring unit for radiological and nuclear emergency management. *European Physical Journal Plus*. 2025. Vol. 14 (1). Art. No. 8. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05936-z.
19. Gauld I.C., Murphy B.D. Technical basis for a proposed expansion of regulatory guide 3.54-decay heat generation in an independent spent fuel storage installation. Oak Ridge. United States Nuclear Regulatory Commission. 2010. 230 p.
20. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. Vol. 5. pp. 47–54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.
21. Karami Fath I., Niknejad A., Zare-Zardini H. Design optimization of pangolin inspired composites for enhanced energy absorption. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15(1). Art. No. 4443. DOI: 10.1038/s41598-025-88474-7.
22. Kile R.F., Epiney A.S., Brown N.R. RELAP5-3D validation studies based on the High Temperature Test facility. *Nuclear Engineering and Design*. 2024. Vol. 426. Art. No. 113401. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2024.113401.
23. Klyuev R.V., Morgoev I.D., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Martyushev N.V., Efremenkov E.A., Mengxu Q. Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review. *Energies*. 2022. Vol. 15. Art. No. 8919. DOI: 10.3390/en15238919.

24. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A. Circular mining wastes management for sustainable production of *camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

25. Morrison S.L., Parks G.T. The effect of Am241 on UK plutonium recycle options in thorium-plutonium fuelled LWRs – Part II: BWRs. *Annals of Nuclear Energy*. 2020. Vol. 135. Art. No. 106974. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.106974.