

УДК 621.039.743

Ю.Е. Карякин, А.А. Плетнев, Е.Д. Федорович

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ В ХРАНИЛИЩЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Yu.E. Karyakin, A.A. Pletnev, E.D. Fedorovich

NUMERICAL SIMULATION OF THE HEATMASSTRANSFER PROCESSES IN EMERGENCY SITUATION AT A STORAGE FOR SPENT NUCLEAR FUEL

В статье представлена математическая модель и результаты расчетов по определению локальных значений температур в хранилище отработавшего ядерного топлива в различные моменты времени как в штатной, так и в аварийной ситуации, связанной с прекращением циркуляции воды через бассейн. Предложен способ управления аварийной ситуацией в бассейне с использованием гидроаккумулятора.

АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ОТРАБОТАВШЕЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО. ХРАНИЛИЩЕ «МОКРОГО» ТИПА. АВАРИЙНАЯ СИТУАЦИЯ. ГИДРОАККУМУЛЯТОР. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

In the paper are presented the mathematical model and the results of calculations of local temperatures in «wet» type storage for spent nuclear fuel. There are considered normal and accident non-stationary situations, connected with the stopping of water circulation through pool. It is suggested a mode of control with use of hydroaccumulators.

NUCLEAR POWER PLANT. SPENT NUCLEAR FUEL. «WET» TYPE STORAGE. EMERGENCY SITUATION. HYDRAULIC ACCUMULATOR. NUMERICAL SIMULATION.

В настоящее время большая часть отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) атомных электростанций (АЭС) находится в условиях так называемого «мокрого» хранения в хранилищах отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ). Это бассейны, через которые прокачивается вода, нагреваемая теплотой остаточного энерговыделения ОЯТ и охлаждаемая затем в теплообменниках внешней системы охлаждения. На Ленинградской АЭС охлаждающей средой теплообменников служит вода Финского залива.

ХОЯТ «мокрого» типа располагаются как на территории атомной электростанции, так и на территориях предприятий ядерного топливного цикла, предназначенных для последующей химической переработки ОЯТ, либо для его «окончательного» захоронения. Одновременно в одном ХОЯТ может храниться до нескольких десятков тысяч отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС). Мощность

тепловыделения одной ОТВС относительно невелика, например для ХОЯТ Ленинградской АЭС — от 30 до 80 Вт в зависимости от промежутка времени, прошедшего после выгрузки из реактора. Однако при наличии большого числа ОТВС общая мощность тепловыделения в хранилище оказывается достаточной, чтобы при прекращении принудительной циркуляции воды через отсеки бассейна температура воды спустя несколько суток достигла высоких значений, при которых интенсивность испарения становится недопустимо большой.

Именно такая ситуация возникла на АЭС «Фукусима-1» (Япония) в 2011 году [1]. Как известно, ее последствия были крайне тяжелыми: полная потеря (выпаривание) воды из бассейна, перегрев циркониевых оболочек тепловыделяющих элементов, пароциркониевая реакция с выделением водорода, образованием гремучей смеси и взрывом. Известны также случаи утечек

и прекращения циркуляции воды через бассейны хранения ОЯТ атомного предприятия в Селлафилде (Англия) [2].

Один из возможных способов охлаждения отработавшего топлива в условиях прекращения циркуляции воды через бассейн — использование предварительно запасенной в специальных баках-гидроаккумуляторах относительно холодной воды, подаваемой автоматически в бассейн самотеком по сигналу противоаварийной системы, действующей даже в условиях полного длительного обесточивания объектов АЭС.

Для условий Российской Федерации возможные причины потери электроснабжения объектов АЭС и потерь воды из бассейнов ХОЯТ отличаются от зарубежных. Например, для российских АЭС возникновение цунами маловероятно, но причиной аварии могут быть иные природные или техногенные катастрофы: землетрясения, смерчи, наводнения, падение самолетов с горящим топливом или атаки террористов, вероятность которых, к сожалению, нельзя исключить. Во всех этих случаях может возникнуть длительное прекращение циркуляции воды через бассейны ХОЯТ и ее усиленное испарение.

Данное обстоятельство делает актуальной разработку сценариев возникновения и развития гипотетических аварий, которые могут быть в результате длительного обесточивания объектов АЭС и прекращения циркуляции воды через бассейн хранения отработавшего ядерного топлива. Наиболее полная информация в этой области может быть получена с помощью методов математического моделирования. Этому вопросу и посвящена данная статья.

Расчетная модель ХОЯТ

В центре «Техническая диагностика и надежность АЭС и ТЭС» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета разработана математическая модель, предназначенная для определения локальных значений температур элементов ХОЯТ в различные моменты времени как в штатной, так и в аварийной ситуации, связанной с прекращением циркуляции воды через бассейн.

Расчетная модель ХОЯТ представляет собой приведенную к одной ОТВС элементарную осесимметричную ячейку хранилища ОЯТ, содержащую все участвующие в теплообмене элементы

натурного хранилища отработавшего ядерного топлива: тепловыделяющие элементы, пеналы, воду пеналов и бассейна, торцевое и боковое ограждение бассейна и т. д.

В модели все вертикальные размеры, размеры пенала и его содержимого сохранены натурными (рис. 1), а межпенальное пространство смоделировано более простым для рассмотрения, но подобным в отношении конвективной теплопередачи кольцевым каналом. При этом радиальные размеры модели выбраны так, чтобы в расчете на одну ОТВС в модели и в натурном ХОЯТ были равны следующие площади: а) поперечного сечения межпенального пространства; б) поперечного сечения боковых

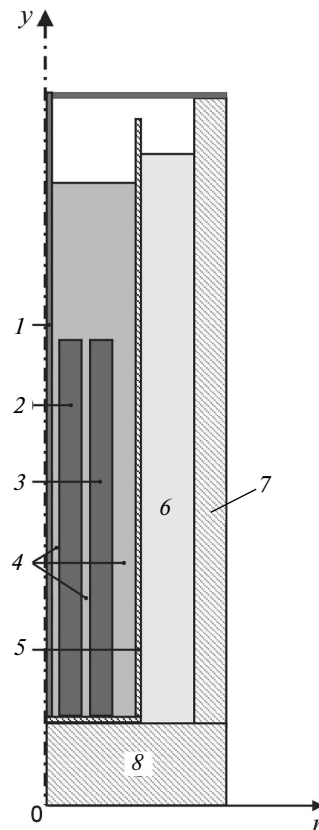


Рис. 1. Вертикальное сечение двумерной осесимметричной модели элементарной ячейки ХОЯТ:

1 — центральный (несущий) стержень; 2, 3 — твэлы внутреннего и внешнего ряда; 4 — пространство между твэлами в пенале; 5 — стенка пенала; 6 — межпенальное пространство; 7 — внешнее бетонное ограждение; 8 — днище бассейна

бетонных ограждений; в) поверхности испарения внутри пенала. Таким образом, в расчете на одну ОТВС в модели и в натурном хранилище соблюдено равенство объемов, масс и теплоемкостей рассматриваемых элементов ХОЯТ.

Условия теплопередачи через внешние ограждения бассейна определены с использованием критерия краевого подобия Био, представляющего собой отношение внутреннего и внешнего термических сопротивлений, $Bi = \alpha\delta/\lambda$, где α — коэффициент конвективной теплоотдачи, δ — толщина стенки, λ — коэффициент ее теплопроводности.

Поскольку в реальном хранилище лишь небольшая часть пеналов непосредственно примыкает к боковым стенам бассейна, внешний периметр кольцевого бетонного ограждения модели в расчете на одну ОТВС оказывается значительно больше, чем в натуре, а его толщина соответственно меньше. По этим причинам «эффективный» (расчетный) коэффициент теплопроводности эквивалентного бетонного ограждения оказывается на несколько порядков меньше, чем у железобетона. Необходимое условие $Bi_{\text{модел}} = Bi_{\text{натур}}$ выполнено путем соответствующего выбора коэффициента конвективной теплоотдачи α .

Аналогично [3] предполагалось, что источник тепловыделения Q_v , обусловленный поглощением гамма-квантов и электронов, испускаемых продуктами деления, сосредоточен в топливных элементах, тепловая мощность которых известна и одинакова для всех ОТВС. Система дифференциальных уравнений теплообмена для элементарной ячейки ХОЯТ имеет вид [4]

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} - c\rho UrT \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} - c\rho VT \right) + Q_v; \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rD \frac{\partial C}{\partial r} - UrC \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} - VC \right); \\ \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) &= \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} + 2\mu \frac{1}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial r} \right) \right] + \rho f_r; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial r} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) &= \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2\mu \frac{1}{r} \left(\frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial r} \right) \right] + \rho f_y; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial (rU)}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial y} &= 0; \quad \mathbf{f} = \mathbf{g}\beta(T_a - T). \end{aligned}$$

Здесь: t — время; r — радиальная координата; y — вертикальная координата; T — температура; C — концентрация водяного пара; U, V — компоненты вектора скорости соответственно вдоль осей r, y ; p — давление; c — удельная теплоемкость; r — плотность; D — коэффициент диффузии; m — коэффициент динамической вязкости; Q_v — удельная мощность источника тепловыделения; b — коэффициент теплового объемного расширения; \mathbf{g} — вектор ускорения силы тяжести; T_a — «опорная» температура для свободной конвекции; \mathbf{f} — вектор силы Архимеда.

Система дифференциальных уравнений теплообмена (1) для элементарной ячейки ХОЯТ представлена в ламинарной постановке [4]. В случае турбулентного движения авторами использовалась низкорейнольдсовая k - ϵ -модель турбулентности [5].

Численное решение системы дифференциальных уравнений (1) с соответствующими граничными и начальными условиями выполнено неявным конечно-разностным методом.

Граничные условия для решения задачи заданы на основе экспериментальных данных эксплуатации ХОЯТ Ленинградской АЭС; начальные условия определены из стационарного решения исходной системы уравнений в штатном режиме эксплуатации ХОЯТ.

В расчетах физические свойства паро-воздушной смеси зависят от температуры и относительной влажности, а физические свойства воды и твердых сред были приняты постоянными.

Высота уровня воды в межпенальном пространстве в момент возникновения аварии принята 10,7 м, в пенале — 10,6 м. Начальная среднееобъемная температура воды в пенале — 40 °С, что соответствует штатным условиям эксплуатации бассейнов ХОЯТ. Все расчеты выполнены

при заполнении отсеков ОЯТ на 80 % от максимальной проектной вместимости (7100 ОТВС на один отсек) для тепловой мощности одной ОТВС, равной 100 Вт, что примерно соответствует ее остаточному тепловыделению после 10-летней выдержки.

Результаты расчетов

Согласно результатам численного моделирования на начальном этапе развития аварии через несколько часов после прекращения циркуляции теплоносителя тепловое состояние бассейна ХОЯТ имело следующие особенности. Вследствие перемешивания за счет действия свободной конвекции при весьма малой плотности теплового потока на поверхности твэлов вода в пенале и межпенальном пространстве имеет практически одинаковую температуру во всем объеме.

Темп разогрева воды составляет $0,43\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$, темп испарения — $1,6\text{ г}/\text{час}$ в пенале и $1,9\text{ г}/\text{час}$ в межпенальном пространстве. С учетом разницы площадей зеркала испарения ($7,41 \cdot 10^{-3}\text{ м}^2$ в пенале и $12,65 \cdot 10^{-3}\text{ м}^2$ в межпенальном пространстве) скорость понижения уровня воды в пенале

несколько выше скорости снижения уровня воды, заполняющей бассейн. Так как вентиляция отсутствует, пар удаляется из-под настила только за счет диффузии (скорость вблизи настила равна нулю, концентрация постоянна).

Для моделирования более поздних стадий развития аварии высота уровня воды в пенале была задана равной 2,3 м, средняя температура воды — $92\text{ }^{\circ}\text{C}$. Межпенальное пространство не рассматривалось, так как на основании результатов предыдущих расчетов была зафиксирована плотность теплового потока на внешней границе пенала, равная $20\text{ Вт}/\text{м}^2$ в области твэла и $5\text{ Вт}/\text{м}^2$ между настилом и твэлом. Температура настила бассейна — $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Максимальная температура твэла (рис. 2), зафиксированная в области между уровнем воды и верхним торцом твэла, составляет $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ и увеличивается с темпом приблизительно $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$. Верхний торец твэла имеет более низкую температуру ($96\text{ }^{\circ}\text{C}$) благодаря конвективному теплообмену с влажным воздухом, циркулирующим в пространстве между твэлом и верхним настилом. Температура воды, имеющей в пенале, не увеличивается. Это свидетельствует

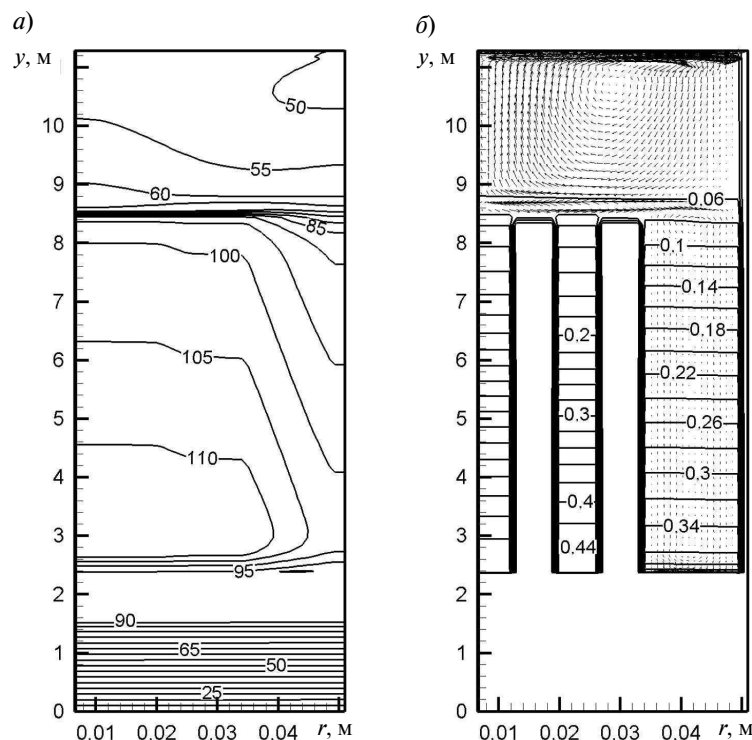


Рис. 2. Расчетные поля температур (а), осредненной скорости и концентрации (б) в пенале при высоте уровня воды в пенале 2,4 м

о том, что вся теплота, поступающая к воде от твэла, расходуется на ее испарение и частично на теплоотдачу от внешней поверхности пенала. Темп испарения составляет 16,2 г/час, что в 10 раз больше, чем в начальном тепловом состоянии при температуре воды в бассейне 40 °С. Можно утверждать, что при дальнейшем снижении уровня воды в пенале темп испарения будет уменьшаться вследствие уменьшения площади контакта воды с теплоотдающей поверхностью твэла, а также из-за увеличения гидравлического сопротивления выходу пара из пенала.

Если расчетная концентрация пара вблизи поверхности испарения или около ограничивающих поверхностей превышала параметры насыщения, то в этом случае моделировался процесс конденсации: концентрация пара в соответствующих узлах уменьшалась до значений насыщения (при температуре в узле) и вычислялась масса конденсата, которая достигала 20 % от массы испарившейся жидкости.

Для оценки влияния температуры воды в бассейне на тепловое состояние ХОЯТ была выполнена серия из трех расчетов, в которых средняя температура воды в ХОЯТ была при-

близительно равна 40, 60 и 80 °С, а температура верхнего настила принята равной соответственно 30, 40 и 50 °С.

Исходные данные, одинаковые для всех расчетов серии: высота уровня воды в пенале — 9,1 м; высота уровня воды в бассейне — 9,2 м; относительная влажность вблизи настила — 50 %.

Вентиляция пространства под настилом отсутствовала, люки верхнего настила предполагались закрытыми.

Результаты серии расчетов обобщены в таблице.

Поскольку значения тепловых потоков и темпа испарения, указанные в таблице, относятся к элементарной ячейке ХОЯТ, содержащей один пенал, параметры для всего отсека ХОЯТ могут быть получены путем умножения на число пеналов в отсеке.

Расчеты показали, что темп роста температуры воды в бассейне на начальном этапе развития аварии составил 0,43 °С/час; время полного испарения воды из пеналов и бассейна — не менее 48 суток. До момента полного испарения воды из ХОЯТ температура твэлов не превысит 200 °С.

Таблица 1

Сравнительные результаты расчетов аварийных режимов ХОЯТ, выполненных для трех значений температуры воды в бассейне

Название параметра	Значения параметров воды в бассейне и пенале при разных температурах					
	$T_{cp} \approx 40\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{cp} \approx 60\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{cp} \approx 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	Пенал	Бассейн	Пенал	Бассейн	Пенал	Бассейн
Максимальная температура, °С	42,7	41,2	60,2	58,7	79,5	77,8
Средняя по объему температура воды, °С	41,1	40,6	58,5	58,0	77,6	77,1
Тепловой поток через ограждения, Вт	0,5	3,0	1,9	8,0	3,6	11,6
Мощность на нагрев воды, Вт	23,8	64,1	19,7	53,0	9,2	22,9
Мощность на нагрев ОТВС, Вт	5,8	—	5,4	—	2,9	—
Мощность на испарение, Вт	1,2	1,4	5,2	6,8	14,6	35,2
Тепловой поток за счет испарения, кВт/м ²	0,16	0,11	0,7	0,54	2,0	2,8
Темп испарения, г/час	1,75	2,05	7,7	10,1	21,6	52,1
Темп снижения уровня воды, мм/час	0,24	0,16	1,04	0,80	2,92	4,13
Темп роста ср. температуры воды, °С/час	0,44	0,44	0,34	0,33	0,17	0,15
Темп роста max температуры ТВЭЛ, °С/час	0,47	—	0,39	—	0,19	—

Использование гидроаккумуляторов

Для предотвращения тяжелых последствий аварии, связанной с прекращением циркуляции воды через бассейн ХОЯТ, авторами настоящей работы предложено использовать автономную энергонезависимую систему подачи воды в бассейн. Основной элемент системы — резервуар (бак-гидроаккумулятор), заполненный водой и расположенный выше уровня воды в бассейне. Автоматический клапан открывает подачу воды, если ее уровень в бассейне опустится ниже установленного. Клапан остается открытым до тех пор, пока уровень воды не восстановится, т. е. не поднимется до заданной верхней отметки. Долив воды в бассейн происходит порциями. Система функционирует, пока имеется вода в гидроаккумуляторе (считается, что целостность корпуса бассейна не нарушена, т.е. аварийной течи из него нет).

Выполняя тепловой расчет бассейна ХОЯТ в аварийном режиме, мы имели цель определить:

установившиеся (квазистационарные) тепловые параметры при работающей системе автономной подачи воды; время достижения такого квазистационарного теплового состояния;

среднечасовой расход воды из гидроаккумулятора в установившемся тепловом режиме.

Как показали результаты численного моделирования, из-за относительно малой удельной мощности остаточного тепловыделения ОЯТ (менее 4 кВт/м³ после 10 лет хранения) градиенты температур в бассейнах выдержки малы и не превышают 2 °С как в штатном режиме, так и в режиме аварийного нагрева (см. таблицу). Поэтому для расчета тепловых параметров ХОЯТ при работающей системе автономной подачи воды был выбран метод интегрального теплового баланса, дифференциальное уравнение которого в рассматриваемом случае имеет вид

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{\text{ОЯТ}} - Q_{\text{конв}} - Q_{\text{исп1}} - Q_{\text{исп2}} - Q_{\text{бет}}}{C_{\text{басс}}}, \quad (2)$$

где T — средняя по объему ХОЯТ температура воды; t — время; $C_{\text{басс}}$ — полная теплоемкость бассейна с ОЯТ; $Q_{\text{ОЯТ}}$ — полная мощность остаточного тепловыделения ОЯТ; $Q_{\text{конв}}$ — конвективный поток тепла с поверхности испарения; $Q_{\text{исп1}}$ — мощность, расходуемая на испарение воды из пеналов; $Q_{\text{исп2}}$ — мощность, расходуемая на испарение воды из бассейна; $Q_{\text{бет}}$ — тепловая

мощность, расходуемая на нагрев бетонных ограждений бассейна и теплопередачу через указанные ограждения к окружающему воздуху.

Полная теплоемкость бассейна за вычетом внешних ограждений складывается из теплоемкости ОТВС, пеналов и теплоемкости воды, т. е.

$$C_{\text{басс}} = C_{\text{ОТВС}} + m_{\text{в}} c_{\text{в}}.$$

Изменение массы воды в пеналах (нижний индекс «1») и бассейне (нижний индекс «2») выразим так:

$$\frac{dm_{\text{в1}}}{d\tau} = -j_1 S_{\text{исп1}} + G_1; \quad (3a)$$

$$\frac{dm_{\text{в2}}}{d\tau} = -j_2 S_{\text{исп2}} + G_2. \quad (3б)$$

Здесь: $m_{\text{в}}$ — масса воды в пеналах ($m_{\text{в1}}$) или бассейне ($m_{\text{в2}}$), G — темп поступления воды (массовый расход воды из гидроаккумулятора); j — массовый поток пара с единицы поверхности испарения; $S_{\text{исп}}$ — площадь поверхности испарения.

Удельный поток испарения равен $j = \beta_{\text{м}} (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{п вв}})$, где $\beta_{\text{м}}$ — коэффициент массоотдачи; $\rho_{\text{п}}$ — плотность водяного пара вблизи поверхности испарения (равна плотности насыщения при температуре воды); $\rho_{\text{п вв}}$ — плотность водяного пара в воздухе помещения.

Коэффициент массоотдачи $\beta_{\text{м}}$ обычно находят опытным путем, но если соответствующие экспериментальные данные отсутствуют, то его приближенное значение можно найти из аналогии тепло- и массообмена [6]:

$$\beta_{\text{м}} = \frac{\alpha}{c_{\text{р}}}.$$

Коэффициент теплоотдачи α был рассчитан по критериальным соотношениям для свободной конвекции на плоской горизонтальной поверхности, обращенной вверх [7]:

$$\text{Nu} = 0,96\text{Ra}^{1/6} \text{ при } 1 < \text{Ra} < 200;$$

$$\text{Nu} = 0,54\text{Ra}^{1/4} \text{ при } 200 < \text{Ra} < 8 \cdot 10^6.$$

В качестве характерного размера при вычислении критериев Нуссельта и Рэлея взято отношение площади отсека бассейна к его периметру.

Обе величины — j_k и G_k — изменяются во времени. При этом зависимость $G(t)$ имеет вид δ -функции конечной ширины, что соответствует двум возможным положениям клапана подачи воды — «открыт» или «закрыт».

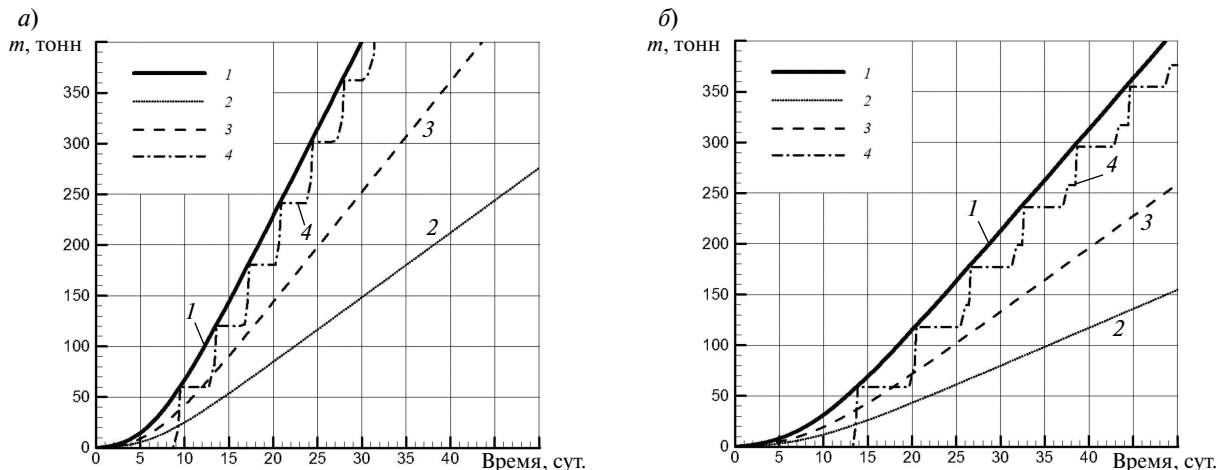


Рис. 3. Зависимость массы воды от времени в отсеке бассейна ХОЯТ, заполненного ОЯТ 10-летней (а) и 30-летней (б) выдержки: 1 — воды, испаренной из отсека (бассейн и пены); 2 — воды, испаренной из пеналов; 3 — воды, испаренной из бассейна; 4 — воды, добавленной в отсек из бака-аккумулятора

Суммарная масса воды $m_{исп}$, испарившейся из бассейна за время t , есть результат интегрирования

$$m_{исп}(t) = \int_0^t (j_1(\tau)S_{исп1} + j_2(\tau)S_{исп2})d\tau.$$

Уравнения (2) и (3) были решены численно методом конечных разностей.

Расчеты выполнены для одного отсека бассейна ХОЯТ Ленинградской АЭС. Принятое

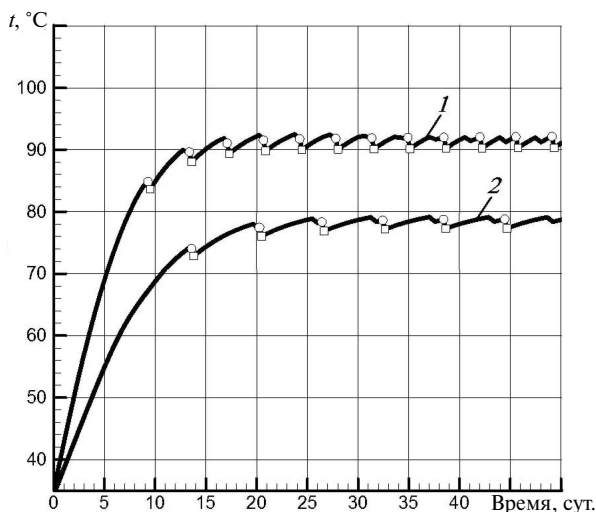


Рис. 4. Зависимость температуры воды от времени в отсеке бассейна ХОЯТ, заполненного ОЯТ: 1—10-летней выдержки, 2—30-летней выдержки (○ — момент открытия клапана подачи воды в бассейн; □ — момент закрытия клапана подачи воды в бассейн)

в расчете суммарное тепловыделение для ОЯТ 10-летней выдержки равно 610 кВт/отсек, для ОЯТ 30-летней выдержки — 370 кВт/отсек.

Расход (темп долива) воды в бассейн и пены из гидроаккумулятора, одинаковый для бассейна и пеналов, был принят 2 л/с. Температура доливаемой воды — 15 °С. Аварийный клапан открывает подачу воды при снижении уровня воды в бассейне и пеналах на 0,4 м.

Влажность воздуха в здании ХОЯТ не вычислялась, она была принята постоянной и равной начальному значению — 60 %.

Результаты расчетов для ОЯТ 10-летней и 30-летней выдержки представлены на рис. 3, 4.

Для принятых исходных данных во время каждого срабатывания клапана из гидроаккумулятора в отсек бассейна ХОЯТ добавляется около 60 тонн воды (рис. 3, а, кривая 4). Масса одновременно добавляемой воды составляет менее 5 % от массы воды в отсеке на момент открытия клапана, в связи с чем колебания температуры воды в бассейне в установившемся тепловом режиме не превысили 4 °С.

Время выхода аварийного отсека ХОЯТ на квазистационарный тепловой режим и температура воды в таком режиме зависят от количества пеналов и суммарной мощности остаточных тепловыделений ОЯТ. В исследованном диапазоне $Q_{ОЯТ} = 400-600$ кВт/отсек время достижения установившегося теплового режима составило от 15 до 25 суток, а максимальная

температура воды в ХОЯТ — соответственно 93 °С и 79 °С, (см. рис. 4).

Автономность системы аварийной подачи воды в ХОЯТ должна быть не менее 10 суток. Исходя из расчетного темпа испарения воды из отсека с ОЯТ 10-ти летней выдержки следует рекомендовать иметь запас воды в гидроаккумуляторе около 100 тонн на отсек.

Методом численного моделирования на основе решений уравнений тепломассопереноса и уравнения теплового баланса выполнен расчет теплового состояния бассейна хранения обработавшего ядерного топлива в аварийной

ситуации, вызванной прекращением принудительной циркуляции воды через бассейн (на примере Ленинградской АЭС).

Темп роста среднеобъемной температуры воды в бассейне на начальном этапе развития аварии составил 0,43 °С/час. Расчетное время полного испарения воды из пеналов и бассейна — не менее 48 суток.

Показано, что система автономной подачи воды в бассейн из гидроаккумулятора в состоянии стабилизировать температурный режим ХОЯТ в аварийной ситуации и поддерживать его на безопасном уровне до тех пор, пока имеется запас воды в гидроаккумуляторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катастрофа на АЭС «Фукусима» [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/fukushima/index.html>.
2. **Bolter, H.** Inside Sellafield [Текст] / H. Bolter.— London: Quartet Books, 1996.— 298 p.
3. **Фромзель, В.Н.** Методика определения эффективной теплопроводности сборки твэлов и расчет температурного поля в сборках, размещенных в вертикальных контейнерах [Текст] / В.Н. Фромзель, Л.В. Фромзель, Н.В. Вдовец // Процессы тепломассообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640: Сб. трудов.— СПб: Изд-во АООТ «НПО ЦКТИ», 1997.— С. 139–150.
4. **Astafieva, V.** Modeling of heatmasstransfer in «wet» and «dry» storages of spent nuclear fuel— normal and accident situations [Текст] / V. Astafieva, E. Fedorovich,

- Yu. Karyakin, A. Pletnev, A. Trifonov // 2011 Baltic Heat Transfer Conference— 6th ВНТС (August 24–26, 2011, Tampere, Finland).— Extended Abstracts.— Tampere: Univ. of Technology, 2011.— P. 81–82.
5. **Lauder, B.E.** On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows [Текст] / B.E. Launder // Transaction of the ASME: Journal of Heat Transfer.— 1988. Vol. 110, №4 (B).— P. 1112–1128.
6. **Гухман, А.А.** Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. (Процессы переноса в движущейся среде) [Текст] / А.А. Гухман.— М.: Высшая школа, 1974.— 328 С.
7. **Мартьяненко, О.Г.** Свободно-конвективный теплообмен [Текст]: Справочник / О.Г. Мартьяненко, Ю.А. Соковишин.— Минск: Наука и техника, 1982.— 400 с.

REFERENCES

1. Katastrofa na AES «Fukusima» [Elektronnyi resurs].— Rezhim dostupa: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/fukushima/index.html>.
2. **Bolter H.** Inside Sellafield [Text] / H. Bolter.— London: Quartet Books, 1996.— 298 p.
3. **Fromzel' V.N., Fromzel' L.V., Vdovets N.V.** Metodika opredeleniia effektivnoi teploprovodnosti sborki tvelov i raschet temperaturnogo polia v sborkakh, razmeshchennykh v vertikal'nykh konteynerakh [Tekst] // Protsestry teplomassoobmena i gidrodinamiki v sistemakh bezopasnosti AES s VVER-640: Sb. trudov.— SPb: AOOT «NPO TsKTI», 1997.— S. 139–150. (rus.)
4. **Astafieva V., Fedorovich E., Karyakin Yu., Pletnev A., Trifonov A.** Modeling of heatmasstransfer in «wet» and «dry» storages of spent nuclear fuel— normal and accident

- situations [Text] // 2011 Baltic Heat Transfer Conference— 6th ВНТС (August 24–26, 2011, Tampere, Finland).— Extended Abstracts.— Tampere Univ. of Technology, 2011.— P. 81–82.
5. **Lauder, B.E.** On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows [Текст] / B.E. Launder // Transaction of the ASME: Journal of Heat Transfer.— 1988.— Vol. 110, №4 (B).— P. 1112–1128.
6. **Gukhman, A.A.** Primenenie teorii podobii k issledovaniu protsessov teplo-massoobmena. (Protsestry perenosa v dvizhushcheisia srede) [Tekst] / A.A. Gukhman.— М.: Vysshiaia shkola, 1974.— 328 s. (rus.)
7. **Martynenko O.G., Sokovishin Yu.A.** Svobodno-konvektivnyi teploobmen [Tekst]: Spravochnik.— Minsk: Nauka i tekhnika, 1982.— 400 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ /AUTHORS

КАРЯКИН Юрий Евгеньевич — доктор физико-математических наук профессор директор Центра технической диагностики и надежности АЭС и ТЭС Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: yu_kar@mail.ru

KARYAKIN Yuriy E. — St.-Petersburg State Polytechnic University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: yu_kar@mail.ru

ПЛЕТНЕВ Александр Александрович — кандидат технических наук старший преподаватель Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: aapletnev@yandex.ru

PLETNEV Alexandr A. — St.-Petersburg State Polytechnic University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: aapletnev@yandex.ru

ФЕДОРОВИЧ Евгений Данилович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: efed1@yandex.ru

FEDOROVICH Evgeny D. — St.-Petersburg State Polytechnic University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: efed1@yandex.ru