

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В СИСТЕМАХ АВАРИЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ БАСЕЙНОВ АЭС С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

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

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251, Политехническая ул., д. 29, г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: yu_kar@mail.ru*

В докладе представлена математическая модель, предназначенная для определения локальных значений температур элементов хранилища отработавшего ядерного топлива в различные моменты времени как в штатной, так и в аварийной ситуации, связанной с прекращением циркуляции воды через бассейн. Модель включает в себя решение нестационарных уравнений переноса теплоты и учитывает механизмы теплопроводности, конвекции, теплового излучения, массообмена между водой и воздушной средой в надводном пространстве, а также фазовые переходы – испарение воды и конденсацию водяного пара. Предложен способ управления аварийной ситуацией в бассейне с использованием гидроаккумулятора.

Введение. Аварии на хранилищах отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ), расположенных на территории атомных станций и других ядерно-опасных объектов, являются маловероятными, но возможными событиями. Об этом свидетельствует мировой опыт, в частности: кратковременная (порядка суток) потеря охлаждения бассейнов с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) на предприятии по переработке топлива в Селлафилде (Великобритания), а также недавняя длительная потеря охлаждения приреакторных бассейнов на энергоблоках АЭС «Фукусима-1».

В Центре «Техническая диагностика и надежность АЭС и ТЭС» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета разработана тепловая 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. Модель объединяет все процессы, определяющие тепловое состояние хранилища отработавшего ядерного топлива, и включает в себя решение нестационарных уравнений переноса теплоты, учитывающих механизмы теплопроводности, конвекции и теплового излучения при наличии массообмена между водой и воздушной средой в надводном пространстве и соответствующих фазовых переходов – испарения воды и конденсации водяного пара.

В стационарном режиме эксплуатации ХОЯТ процессы тепломассообмена сбалансированы таким образом, что температуры всех элементов ХОЯТ практически постоянны, т.е. подвержены только сезонным колебаниям. В аварийной ситуации (прекращение циркуляции охлаждающей воды, а также прекращение принудительной воздушной вентиляции надводного пространства) этот баланс нарушается в сторону превышения тепловыделения над теплоотводом, и это положение сохраняется до тех пор, пока вновь не установится равновесие, но уже на более высоком температурном уровне. Повышение температуры воды в пеналах и бассейне выдержки (БВ) сопровождается увеличением темпа испарения воды, что ведет к снижению уровня воды в пеналах и БВ и, как следствие, полному или частичному осушению отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС).

Расчетная модель. Расчетная модель ХОЯТ представляет собой приведенное к одной ОТВС «микрохранилище» ОЯТ, содержащее все участвующие в вышеупомянутых процессах элементы натурального хранилища отработавшего ядерного топлива: тепловыделяющие элементы, пеналы, вода пеналов и БВ, торцевое и боковое ограждения БВ и т.д.

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

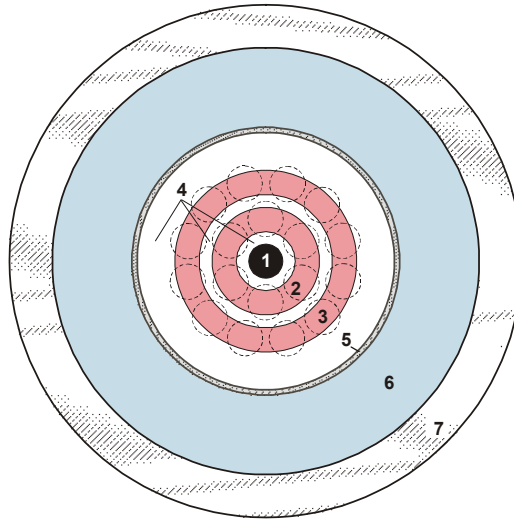


Рисунок 1- Вид в плане двумерной осесимметричной модели «элементарной» ячейки ХОЯТ (масштаб 1:2): 1 – центральный (несущий) стержень; 2 – внутреннее «кольцо» твэлов; 3 – внешнее «кольцо» твэлов; 4 – пространство между твэлами в пенале; 5 – стенка пенала (нержавейка); 6 – межпенальное пространство (канал), заполненное охлаждающей водой (влажным воздухом); 7 – слой, моделирующий наружные стены бассейна

Поскольку в реальном хранилище лишь небольшая часть пеналов непосредственно примыкает к боковым стенам БВ, внешний периметр кольцевого бетонного ограждения модели в расчете на одну ОТВС оказывается значительно больше, чем в натуре, а его толщина, соответственно, – меньше (рис.2). По этим причинам «эффективный» (расчетный) коэффициент теплопроводности эквивалентного бетонного ограждения оказывается на несколько порядков меньше, чем у железобетона. Необходимое условие $\dot{V}_{\text{модели}} = \dot{V}_{\text{натуры}}$ выполнено путем соответствующего выбора коэффициента конвективной теплоотдачи α .

Основные уравнения задачи. Система дифференциальных уравнений сохранения для «ячейки» модели ХОЯТ имеет вид [1]-[3]

$$c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(x \lambda \frac{\partial T}{\partial x} - c_p U x T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} - c_p V T \right) + Q_v;$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(xD \frac{\partial C}{\partial x} - Ux C \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} - VC \right);$$

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + 2\mu \frac{1}{x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{U}{x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \rho F_x;$$

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + 2\mu \frac{1}{x} \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \rho F_y;$$

$$\frac{1}{x} \frac{\partial (xU)}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0; \quad F = g\beta(T_a - T). \quad (1)$$

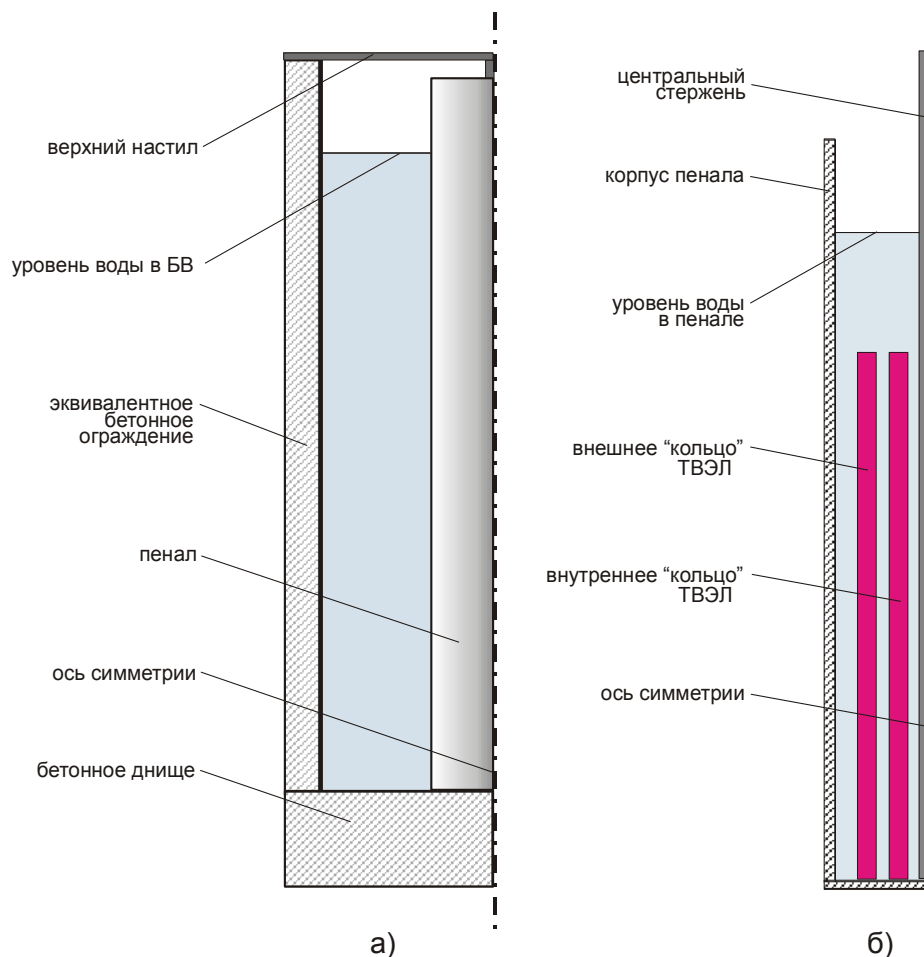


Рисунок 2 – Вертикальное сечение модели «элементарной» ячейки ХОЯТ (а) и разрез пенала (б)

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

Граничные условия для решения задачи определены 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 паровоздушной смеси зависели от температуры и относительной влажности, 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 (средняя по объему) температура воды в пенале – 40 °С, что соответствует нормальным 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.

Начальный период аварии. По данным моделирования на начальном этапе развития аварии (через несколько часов после прекращения циркуляции теплоносителя) тепловое состояние бассейна ХОЯТ имеет 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 (рис. 3);

- темп разогрева воды составляет 0,43 °С/час, темп испарения – 1,6 г/час в пенале и 1,9 г/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 БВ. Так как вентиляция отсутствует, пар удаляется из-под настила только за счет диффузии (скорость вблизи настила равна нулю, концентрация водяного пара в воздухе постоянна).

Поздние стадии развития аварии. В расчете, моделирующем более поздние стадии развития аварии, высота уровня воды в пенале была задана равной 2,4 м, средняя температура воды – 92 °С. Межпенальное пространство не рассматривалось; на основании результатов предыдущих расчетов была зафиксирована плотность теплового потока на внешней границе пенала – 20 Вт/м² в области ОТВС и 5 Вт/м² между настилом и ОТВС. Температура настила БВ – 50 °С.

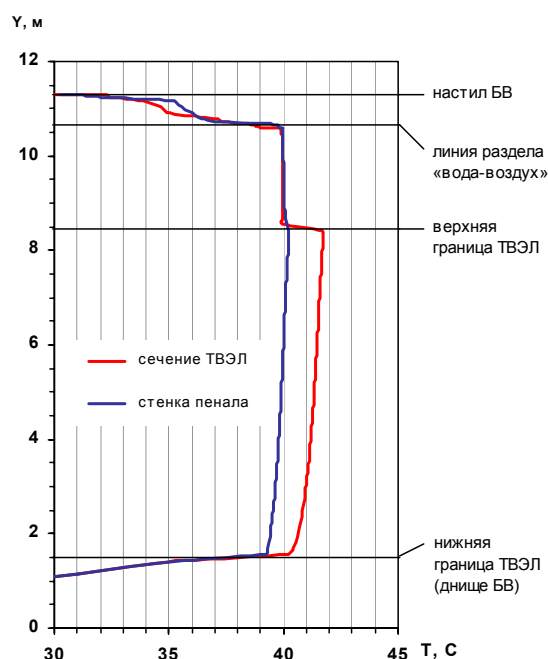
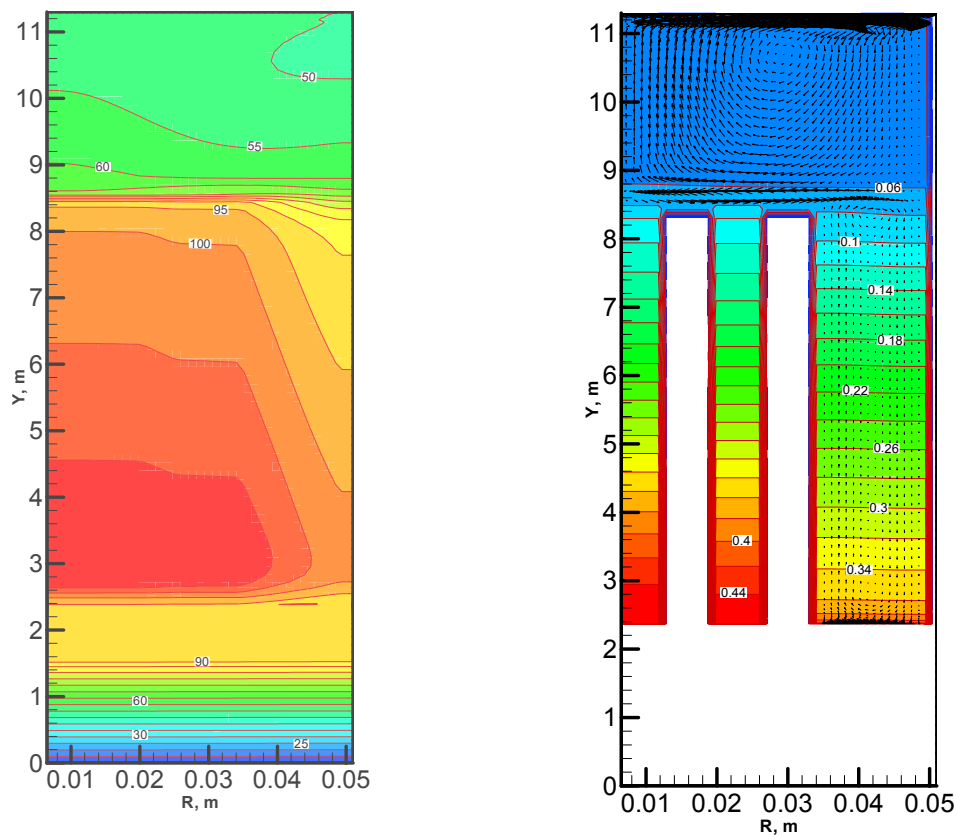


Рисунок 3 - Профиль температуры в пенале вдоль вертикальной координаты в начальный момент развития аварии

Максимальная температура ОТВС (рис. 4, а), зафиксированная в области между уровнем воды и верхним торцом ОТВС, составила 120 °С и увеличивалась с темпом $\approx 3,5$ °С/час. Верхний торец ОТВС имел более низкую температуру (96 °С) благодаря конвективному теплообмену с влажным воздухом, циркулирующим в пространстве между ОТВС и верхним настилом. Температура воды, имеющейся в пенале, не увеличивалась. Это свидетельствует о том, что вся теплота, поступающая к воде от ОТВС, расходовалась на ее испарение и частично на теплоотдачу от внешней поверхности пенала. Темп испарения составил 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, моделировался процесс конденсации. Он состоял в том, что концентрация пара в соответствующих узлах уменьшалась до значений насыщения (при температуре в узле) и вычислялась масса конденсата, которая достигала 20% от массы испарившейся жидкости.



а)

б)

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

Для оценки влияния температуры воды в БВ на тепловое состояние ХОЯТ была выполнена серия из трех расчетов, в которых средняя температура воды в ХОЯТ была равна ~40, ~60 и ~80 °С.

Исходные данные, идентичные для всех расчетов серии:

- высота уровня воды в пенале – 9,1 м;
- высота уровня воды в бассейне – 9,2 м;
- температура верхнего настила – 30 °С;
- относительная влажность воздуха вблизи настила – 50 %.

Вентиляции пространства под настилом отсутствовала, люки верхнего настила закрыты.

Результаты серии расчетов обобщены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительные результаты расчетов аварийных режимов ХОЯТ, выполненных при трех значениях температуры воды в БВ.

	$T_{\text{cp}} \approx 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{cp}} \approx 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{cp}} \approx 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
	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
Удельный 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 темп-ры ТВЭЛ, °С/час	0,47	–	0,39	–	0,19	–

Значения, указанные в табл. 1, относятся к модельной «ячейке» ХОЯТ, содержащей один пенал. Аналогичные параметры для отсека БВ могут быть рассчитаны по этим данным пропорционально числу пеналов в отсеке.

Расчеты показали, что 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.

Способ управления аварийной ситуацией с использованием гидроаккумулятора.

Поскольку в настоящее время пассивный, т.е. не зависящий от работоспособности питающих насосов, долив воды в бассейны с ОЯТ не предусмотрен, через некоторое время после начала аварии (от нескольких суток до нескольких недель в зависимости от условий) уровень воды в бассейне или пеналах понизится настолько, что верхние концы ОТВС оголятся. Теплоотдача к влажному воздуху хуже, чем к воде, поэтому темп роста температуры осушенной поверхности твэлов еще более увеличится. Когда температура твэлов достигнет примерно 900 °С, начнется активная химическая реакция циркониевых оболочек твэлов с водяным паром с выделением водорода. При неработающей вытяжной вентиляции водород будет скапливаться в помещении реакторного зала или помещении ХОЯТ. При концентрации водорода 4 % в воздухе помещения образуется взрывоопасная «гремучая» смесь. Наихудшие последствия аварии: взрыв, разрушения, выброс радиоактивности.

В настоящей работе предложен способ управления аварийной ситуацией в приреакторном бассейне выдержки кассет или в ХОЯТ, связанной с прекращением циркуляции воды, с использованием гидроаккумулятора. Приведены методика и результаты расчетов. При этом убыль воды из БВ или ХОЯТ компенсируется путем долива воды по мере ее испарения. Добавление более холодной воды способствует также охлаждению воды бассейна и находящегося в нем ОЯТ.

Предлагаемая автономная энергонезависимая система подачи воды в бассейн состоит из резервуара (гидроаккумулятора), заполненного водой и расположенного выше уровня воды в бассейне. Вода из гидроаккумулятора по трубопроводу подается в бассейн. Автоматический клапан открывает подачу воды, если ее уровень в бассейне опустится ниже установленного уровня. 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. В течение этого времени должны быть приняты все меры по восстановлению работоспособности насосов, охлаждающих БВК или ХОЯТ в штатном режиме.

Разработанная методика позволяет 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.

Методом теплового расчета является метод интегрального теплового баланса. В рассматриваемом случае интегральное балансное соотношение имеет вид

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

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

$$C_{\text{басс}} = C_{\text{ОТВС}} + m_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \quad (3)$$

Изменение массы воды в пеналах (нижний индекс «1») и бассейне (нижний индекс «2») будем определять из уравнений

$$\frac{dm_{\text{в1}}}{d\tau} = -j_1 \cdot S_{\text{исп1}} + G_1, \quad (4a)$$

$$\frac{dm_{\text{в2}}}{d\tau} = -j_2 \cdot S_{\text{исп2}} + G_2. \quad (4б)$$

Обе величины j_k и G_k изменяются во времени. При этом зависимость $G(\tau)$ имеет вид δ -функции конечной ширины, что соответствует двум возможным положениям клапана подачи воды – «открыт» или «закрыт» (рис.5).

Поскольку в БВ пеналы полностью погружены в воду (глубина приреакторного бассейна выдержки более чем вдвое превышает высоту пеналов с ОТВС), масса воды в пеналах будет оставаться неизменной. Следовательно, для БВ уравнение (4a) можно исключить из рассмотрения и положить $S_{\text{исп1}} \equiv 0$, $G_1 \equiv 0$.

В ХОЯТ вода в пеналах не сообщается с водой в бассейне. Добавление воды в бассейн ХОЯТ не компенсирует убыли ее из пеналов (и наоборот), поэтому для ХОЯТ уравнения (4а) и (4б) независимы.

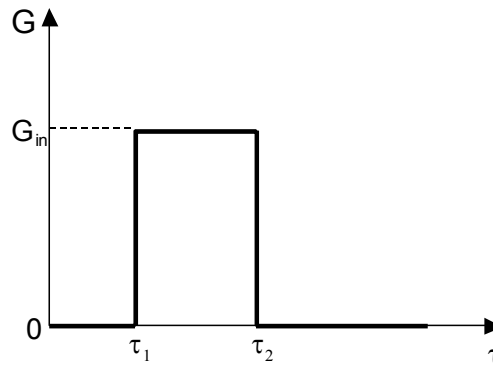


Рисунок 5 - Зависимость $G(\tau)$: момент времени τ_1 – уровень воды в бассейне достиг нижней предельной отметки, открытие клапана; момент времени τ_2 – уровень воды в бассейне достиг верхней предельной отметки, закрытие клапана.

В аварийном режиме вода в бассейне может нагреться до температуры кипения. В этом случае должно выполняться условие $dT/d\tau = 0$ или, согласно уравнению (2),

$$Q_{\text{исп1}} = Q_{\text{ОЯТ}} - Q_{\text{конв}} - Q_{\text{бет}}, \quad \text{или} \quad (5a)$$

$$Q_{\text{исп2}} = Q_{\text{ОЯТ}} - Q_{\text{конв}} - Q_{\text{бет}}. \quad (5б)$$

Формула (5а) используется при расчете ХОЯТ, если $T = T_{\text{кип}}$. Она позволяет найти удельный поток испарения из пеналов j_1 в режиме кипения. Аналогично, формула (5б) используется при расчете БВ и позволяет выразить удельный поток испарения из бассейна j_2 .

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

$$m_{\text{исп}}(\tau) = \int_0^{\tau} (j_1(\tilde{\tau}) \cdot S_{\text{исп1}} + j_2(\tilde{\tau}) \cdot S_{\text{исп2}}) d\tilde{\tau}. \quad (6)$$

Уравнения (4а) и (4б) решены численно методом конечных разностей. Расчетный алгоритм реализован в виде компьютерного кода в среде программирования Delphi. Расчетный

код снабжен пользовательским интерфейсом и модулем для графического представления результатов.

Результаты расчетов гидроаккумулятора. Расчеты выполнены для отсека бассейна ХОЯТ Ленинградской АЭС.

Предполагалось, что количество ОТВС в одном отсеке ХОЯТ (по состоянию на 2011 год) равно 7000 шт. Суммарное тепловыделение, принятое в расчете, для ОЯТ 10-ти летней выдержки равно 613 кВт/отсек, для ОЯТ 30-ти летней выдержки – 368 кВт/отсек.

Расход (темп долива) воды в бассейн и пены из гидроаккумулятора, одинаковый для бассейна и пеналов, был равен 2 л/с. Температура доливаемой воды – 15 °С. Аварийный клапан открывал 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 %.

На рис. 6 и 7 показаны результаты расчета для ОЯТ 30-летней выдержки (обозначения на графиках даны в подписи к рисункам).

На рис. 8 и рис. 9 показаны аналогичные результаты для ОЯТ 10-летней выдержки.

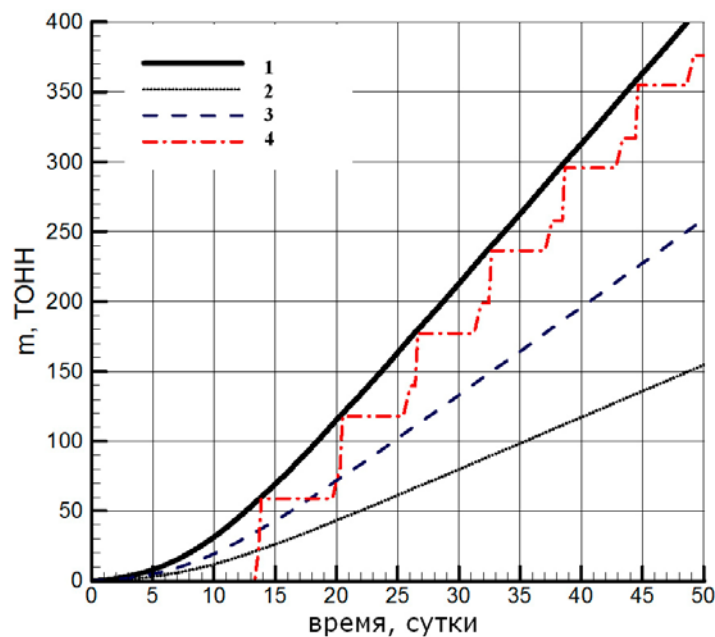


Рисунок 6 - Зависимость массы воды в отсеке бассейна ХОЯТ от времени ($Q_{\text{ОЯТ}} = 368$ кВт/отсек): 1 – воды, испаренной из отсека (бассейн + пеналы); 2 – воды, испаренной из

пеналов; 3 – воды, испаренной из бассейна; 4 – воды, добавленной в отсек (бассейн + пеналы) из гидроаккумулятора

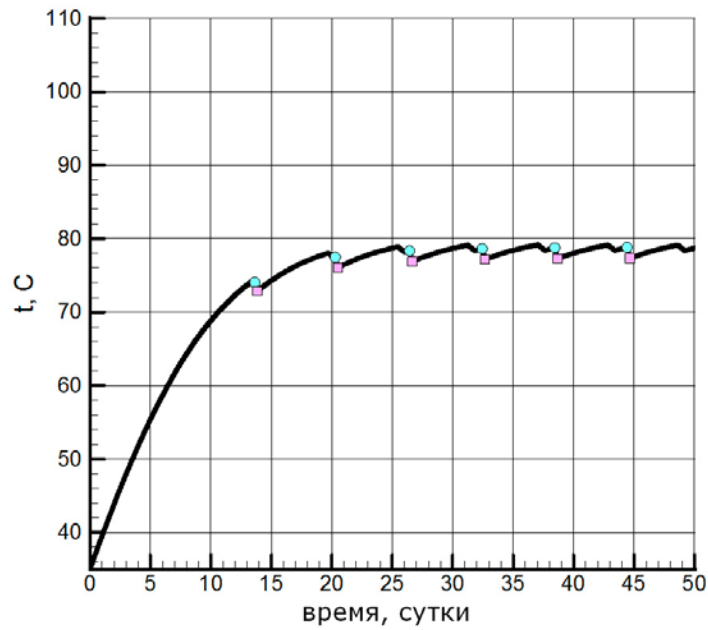


Рисунок 7 - Зависимость температуры воды в отсеке бассейна ХОЯТ от времени ($Q_{\text{ОЯТ}} = 368$ кВт/отсек): \circ – момент открытия клапана подачи воды в бассейн; \square – момент закрытия клапана подачи воды в бассейн

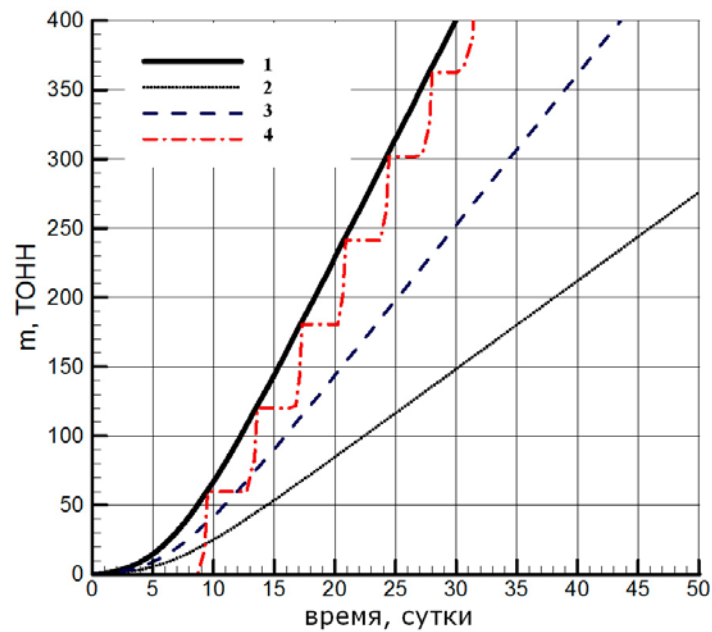


Рисунок 8 - Зависимость массы воды в отсеке бассейна ХОЯТ от времени ($Q_{\text{ОЯТ}} = 613$ кВт/отсек): 1 – воды, испаренной из отсека (бассейн + пеналы); 2 – воды, испаренной из пеналов; 3 – воды, испаренной из бассейна; 4 – воды, добавленной в отсек (бассейн + пеналы) из гидроаккумулятора

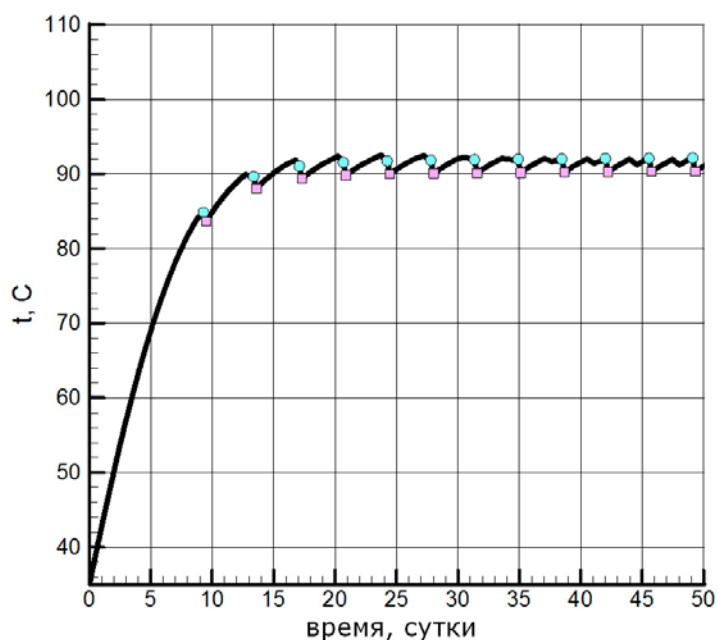


Рисунок 9 - Зависимость температуры воды в отсеке бассейна ХОЯТ от времени ($Q_{\text{ОЯТ}} = 613$ кВт/отсек): \circ – момент открытия клапана подачи воды в бассейн; \square – момент закрытия клапана подачи воды в бассейн

Таким образом, система автономной подачи воды в бассейн выдержки ОЯТ позволяет стабилизировать температурный режим ХОЯТ или БВ и поддерживать его на безопасном уровне (ниже температуры кипения воды) до тех пор, пока имеется запас воды в гидроаккумуляторе.

Время выхода ХОЯТ на квазистационарный тепловой режим зависит от количества пеналов и суммарной мощности остаточных тепловыделений ОЯТ в отсеке БВ. В исследованных режимах при мощности $Q_{\text{ОЯТ}} = 368$ кВт/отсек (7000 пеналов с ОЯТ 30-ти летней выдержки) оно составляет примерно 25 суток, при $Q_{\text{ОЯТ}} = 613$ кВт/отсек (7000 пеналов с ОЯТ 10-ти летней выдержки) – 15 суток.

Расчетный установившийся темп испарения воды из отсека ХОЯТ для двух исследованных режимов, указанных выше, составил 10 и 17 тонн/сутки, соответственно.

Автономность системы аварийной подачи воды в ХОЯТ должна быть не менее 10 суток. Исходя из расчетного темпа испарения воды из отсека ХОЯТ и количества отсеков, следует рекомендовать запас воды в гидроаккумуляторе около 800 тонн.

Обозначения

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); C – концентрация водяного пара, кг/м³; $C_{\text{басс}}$ – полная теплоемкость бассейна, Дж/К; $C_{\text{ОТВС}}$ – теплоемкость ОТВС и пеналов; D – коэффициент диффузии, м²/с; \vec{g} – вектор ускорения силы тяжести, м/с²; G_k – темп поступления воды

(массовый расход воды из гидроаккумулятора), кг/с; j_k – массовый поток пара с единицы поверхности испарения, кг/(м²·с) ($k = 1,2$); $m_v = m_{v1} + m_{v2}$ – суммарная масса воды в бассейне (m_{v2}) и пеналах (m_{v1}); P – давление, Па; Q_v – удельная мощность источника тепловыделения, Вт/м³; $Q_{OЯТ}$ – полная мощность источника тепловыделения (остаточного тепловыделения ОЯТ), Вт; $Q_{конв}$ – конвективный поток тепла с поверхности испарения; $Q_{исп1}$ – мощность, расходуемая на испарение воды из пеналов, Вт; $Q_{исп2}$ – мощность, расходуемая на испарение воды из бассейна, Вт; $Q_{бет}$ – тепловая мощность, расходуемая на нагрев и теплопередачу через бетонные ограждения бассейна, Вт; $S_{исп}$ – площадь поверхности испарения, м²; T – температура, °С; T_a – «опорная» температура для свободной конвекции, °С; U, V – компоненты вектора скорости вдоль координат x, y , м/с; β – коэффициент теплового объемного расширения, 1/К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; τ – время, с.

Литература

1. Fedorovich E.D., Karyakin Y.E., Mikhailov V.E., Pletnev A.A., Astafyeva V.O. Modeling of heat and mass transfer processes in “wet” and “dry” type storages for spent nuclear fuel // Abstracts of the 14th International Heat Transfer Conference (August 8-13, 2010, Washington, DC USA). 2010. P. 144.
2. Fedorovich E., Karyakin Y. Modeling of heat and mass transfer processes in “wet” and “dry” storages for spent nuclear fuel / In: Nuclear Fuels: Manufacturing Processes, Forms and Safety. Editors: A. Lerose and J.Tondreau. Nova Science Publishers, Inc., 2010. P. 337-347.
3. Astafyeva 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 // 2011 Baltic Heat Transfer Conference – 6th BHTC (August 24-26, 2011, Tampere, Finland). Extended Abstracts. Tampere Univ. of Technology, 2011. P. 81-82.