

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАСЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ БИЛИБИНСКОЙ АЭС ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ ОЯТ

А.А. Воробьева*, И.В. Московченко*, Р.И. Мухамадеев*, В.В. Сергеев*,
А.П. Суворов*, В.Ф. Тимофеев*, Е.С. Низента**, В.А. Титаренко**,
О.А. Голосов***, Н.В. Глушкова***

* АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко 1

** Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Билибинская АЭС»

689450, Чукотский АО, г. Билибино

*** АО «ИРМ»

642250, Свердловская обл., г. Заречный



На базе разработанной интегральной динамической модели бассейна выдержки (БВ) с учетом специфики Билибинской АЭС и соответствующей расчетной программы представлены результаты расчетов динамики температур теплоносителей и оболочек твэлов ОТВС, находящихся в БВ 1 – 4 АЭС, на период до 2035 г. На основании полученных результатов выполнен анализ динамики коррозионного состояния оболочек твэлов ОТВС и стенок пеналов хранения.

Билибинская АЭС состоит из четырёх энергоблоков с водографитовыми канальными реакторами ЭГП-6. В настоящее время энергоблок № 1 остановлен, блоки № 2 – 4 получили лицензию на эксплуатацию до декабря 2025 г.

Отработавшее топливо и каналы СУЗ в первом и втором БВ хранятся в герметичных пеналах из углеродистой стали 20, заполненных азотом в «сухих» условиях, а ОТВС и КСУЗ в третьем и четвёртом БВ хранятся в пеналах из нержавеющей стали в «мокрых» условиях.

Для дальнейшего продления эксплуатации энергоблоков Билибинской АЭС необходимы анализ и обоснование возможности длительного безаварийного хранения ОЯТ в БВ после окончательного останова всех реакторов.

Ключевые слова: Билибинская АЭС, бассейн выдержки, отработавшее ядерное топливо, теплогидравлические коды, изотопная кинетика, теплообменник, испарение с поверхности воды.

Воробьева А.А., Московченко И.В., Мухамадеев Р.И., Сергеев В.В., Суворов А.П., Тимофеев В.Ф., Низента Е.С., Титаренко В.А., Голосов О.А., Глушкова Н.В. Расчетный анализ теплогидравлических параметров бассейнов выдержки Билибинской АЭС при длительном хранении ОЯТ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 44-56. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.04> .

© *Воробьева А.А., Московченко И.В., Мухамадеев Р.И., Сергеев В.В., Суворов А.П., Тимофеев В.Ф., Низента Е.С., Титаренко В.А., Голосов О.А., Глушкова Н.В., 2023*

ВВЕДЕНИЕ

Билибинская АЭС состоит из четырёх энергоблоков мощностью 62 МВт (тепловых) каждый, предназначенных для выработки электроэнергии и отопительного тепла. Каждый реактор водографитового типа, одноконтурной схемы с естественной циркуляцией пароводяной смеси. Первый энергоблок в настоящее время остановлен.

Особенностью конструкции Билибинской АЭС является общий реакторный зал четырёх энергоблоков, в котором между шахтами реакторов размещены бассейны выдержки. Соответственно, часть стен БВ дополнительно «подогреваются» за счет работы прилегающих реакторов.

При темпе выгрузки 200 – 240 ОТВС в год из четырех реакторов ЭГП-6 уже в начале 1980-х гг. Билибинская АЭС столкнулась с проблемой хранения отработавшего топлива, так как имеющихся проектных емкостей было достаточно только на 10 – 12 лет без учета полной выгрузки реакторов. Проблема усугублялась решением о продлении проектного срока службы Билибинской АЭС. Вопрос оценки продолжительности последующего безопасного хранения ОЯТ в БВ после останова всех работающих энергоблоков БиАЭС является ключевым, определяющим подходы к разработке Проекта длительного хранения ОЯТ в БВ.

Для прогнозирования тепловых режимов бассейнов «мокрого» и «сухого» хранения на срок до 2035 г., включая режимы с остановкой энерговыработки на АЭС, возможных потерь теплоснабжения здания, сезонных изменений внешних условий необходима разработка математической модели тепловых режимов в БВ на большой срок и соответствующего программного средства (кода).

Существующие системные (отраслевые) теплогидравлические коды КОРСАР, RELAP, TRAC [1 – 3] в полной мере не позволяют решать задачи сквозного прогнозирования на большие интервалы времени (от одного года до десятков лет). Одной из причин является ограничение расчетного шага по времени критерием Куранта, используемого во всех отраслевых кодах (не более одной секунды).

В статье на основе ранее специально для БиАЭС разработанной интегральной (точечной) модели бассейна [4] представлены результаты верификационных расчетов и результатов прогнозирования теплового состояния БВ на срок до 2035 г. Точечная динамическая модель основана на представлении всего водяного («мокрое» хранение) или воздушного («сухое» хранение) объема в бассейне одной балансовой текущей температурой с соответствующей теплоемкостью и массой. В данной постановке возможен сквозной расчет динамики теплового режима БВ на срок до нескольких десятков лет.

Основой для проведения тепловых расчетов являются расчеты динамики остаточных энерговыделений отдельной ОТВС с заданным выгоранием и выдержкой на основании модели изотопной кинетики, а также результаты расчетов динамики энерговыделения всех ОТВС в БВ, базирующихся на данных по истории загрузки каждого бассейна.

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЙ ДЛЯ ОТВС РЕАКТОРОВ ЭГП-6 БИЛИБИНСКОЙ АЭС

Расчет динамики остаточного энерговыделения ОТВС во всех четырёх БВ выполнен с использованием программы «Ядерный калькулятор ЭГП-6» (ЯК ЭГП-6, аттестационный паспорт № 511 от 30.01.2021) [5] для ОТВС с проектным выгоранием 300 и 400 МВт-сут, с топливными композициями на основе UO_2 и первоначальным обогащением 3,6%. Эти данные приведены в табл. 1. В этой программе реализован метод изотопной кинетики [6, 7], позволяющий проводить расчеты остаточного тепловыделения на большие сроки выдержки отдельной ОТВС. Точность расчетов обеспечивается учетом большого количества радионуклидов (более 200), а также верификацией метода на калориметрических измерениях отдельной ОТВС (по скорости разогрева в теплоизолированном со-

суде). Важно заметить, что через восемь лет выдержки темп снижения мощности замедляется, что обусловлено распадом радионуклидов со средним периодом жизни.

Таблица 1

Остаточное энерговыделение [Вт/ОТВС] реактора ЭГП-6 с UO_2 -топливом, первоначальным обогащением 3,6% для различных времен выдержки

Время выдержки	Выгорание 300 МВт-сут	Выгорание 400 МВт-сут
1 месяц	299	400
1 год	57	79
2 года	30,3	42
5 лет	12,6	17,2
10 лет	9,2	12,3
20 лет	7,1	9,5
30 лет	5,7	7,8
50 лет	3,9	5,4

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ В БВ

Принципиальная схема бассейна хранения ОТВС БиАЭС представлена на рис. 1.

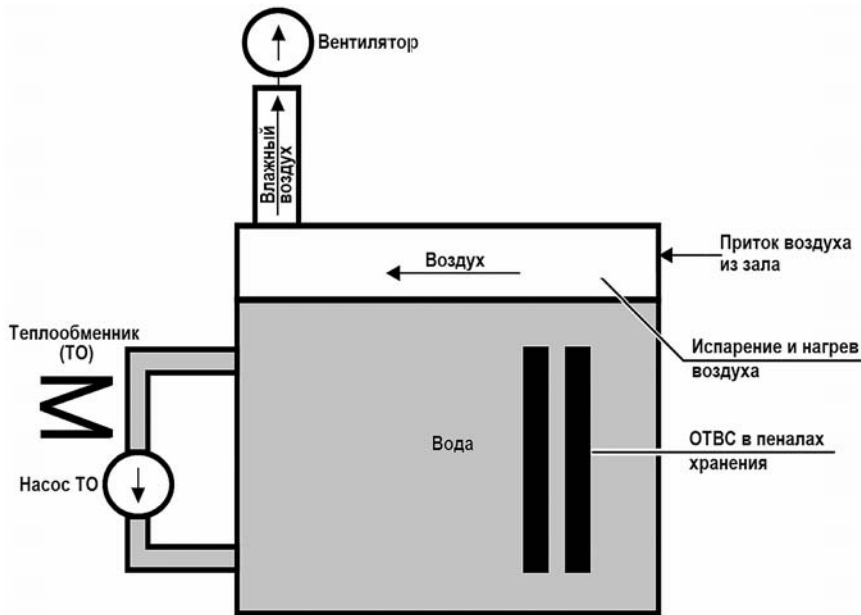


Рис. 1. Принципиальная схема БВ «мокрого» хранения с трактом вытяжной вентиляции и теплообменником

Интегральная (точечная) модель включает в себя одно уравнение баланса подводимой и отводимой мощности БВ в нестационарной постановке [4]. Таким образом, исключен расчет гидродинамики, что позволило снять ограничение на расчетный временной шаг по критерию Куранта. Также исключен большой объем вычислений при использовании трехмерной теплогидравлической модели пористого тела БВ в отмеченных сетевых кодах. Нестационарная постановка дает возможность учета высокой тепловой инерции бассейнов «мокрого» хранения. Тепловая инерция (в основном, воды) является дополнительным пассивным механизмом, сдерживающим изменение температуры оболочек ОТВС при отказе теплообменника принудительного охлаждения и в экстремальных внешних условиях. Точечная модель не учитывает

неравномерность температуры теплоносителя по высоте, что имеет некоторое значение только для «сухого» режима хранения. Однако при «сухом» хранении фактический уровень температур воздуха в БВ ниже 80°C , что не является критичным. Более важно возможное снижение температур воздуха на дне сухого БВ до точки «росы», что данная модель не позволяет рассчитывать.

В уравнение баланса энергии входят следующие механизмы теплоотвода:

- испарение воды (при температуре воды ниже точки насыщения), совместно с конвективным прогревом воздуха над зеркалом, обусловленное наличием постоянной принудительной вытяжной вентиляции в БВ;
- тепловые потери через стены и дно БВ;
- принудительное охлаждение за счет эпизодической работы теплообменника (ТО) (только для «мокрого» хранения).

Внешние температуры стен и дна БВ в модели представляются как граничные условия в виде синусоидальных зависимостей от сезонных температур. Учитывается подогрев стен бассейнов от тепловыделений соседних рабочих энергоблоков. В качестве исходных данных для расчета температур и влажности в бассейнах на входе воздуха в БВ используются фактические данные в центральном зале. Расход вытяжной вентиляции задается в соответствии с регламентом эксплуатации.

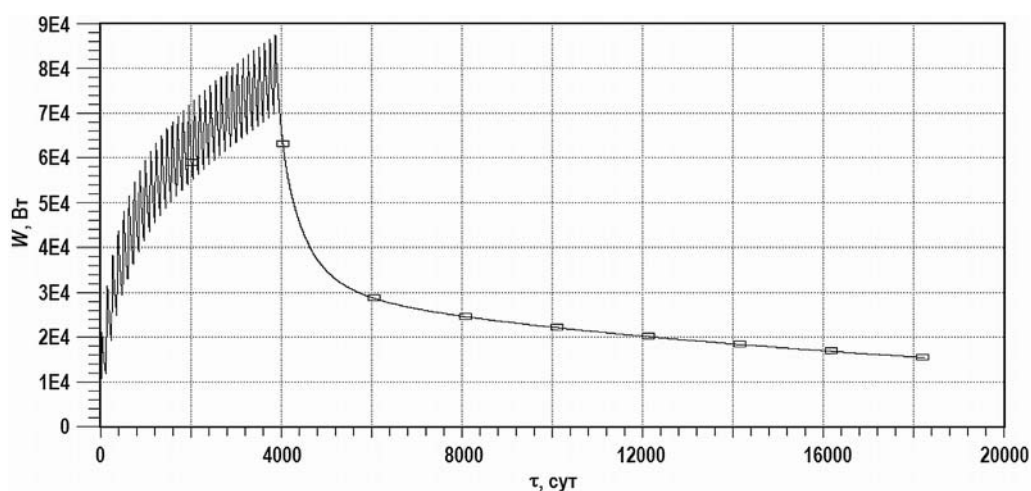


Рис. 2. Проектная (теоретическая) динамика мощности остаточного тепловыделения в отдельном БВ в течение 50-ти лет эксплуатации по сценарию плановой загрузки по 60 ОТВС через каждые четыре месяца в интервале 11-ти лет (4000 сут) до полной-2000 ОТВС и выгоранием каждой ОТВС 12 МВт-сут/кг

В качестве источника тепловой мощности в БВ используется заранее рассчитанная таблица динамики мощности текущего количества ОТВС в конкретном бассейне за всю историю эксплуатации, включая этапы заполнения бассейнов. На рисунке 2 представлен характерный график динамики тепловой мощности в БВ БиАЭС (без конкретизации номера бассейна) при проектной (равномерной) загрузке на основании данных табл. 1. График получен расчетом динамики мощности тепловыделения в БВ с учетом равномерно-эпизодической догрузки бассейна ОТВС с одинаковым средним выгоранием в интервале 4000 суток (11 лет) до полного заполнения и с учетом распада радионуклидов. В период заполнения БВ темп подъема суммарной мощности замедляется, что связано с распадом радионуклидов ранее загруженных ОТВС. Реальная динамика, имеющая значительно более сложный вид за счет простоев, приводит к меньшему максимальному уровню мощности (для первого и второго БВ примерно в 1,5 раза). Исключение составляет непрерывная 40-суточная выгрузка всех 273 ОТВС из реактора блока № 1 в четвертом БВ при выводе его из эксплуатации. При этом максимум тепловой мощности

составил 110 кВт (расчетная). При выдержках ОТВС в бассейнах более 20-ти лет после окончания заполнения влияние истории загрузки не существенно.

МОДЕЛЬ ИСПАРЕНИЯ

Обзор работ по обоснованию тепловых режимов в БВ мощных АЭС [8] показал отсутствие в них учета испарения воды с зеркала. Таким образом, при отказе ТО («мокрое» хранение) температура воды в бассейнах автоматически достигает 100°C , что является недопустимым.

Это допущение справедливо при высоких удельных энерговыделениях ($\text{kВт}/\text{м}^3$). Для БВ БиАЭС достигнутые удельные показатели теплонапряженности составили $0,2 \text{ кВт}$ на тонну воды и $1,7 \text{ кВт}$ на 1 м^2 поверхности зеркала испарения. При таких низких нагрузках отказ ТО при сохранении расхода вытяжной вентиляции на проектном уровне не приводит к прогреву воды до 100°C в силу экспоненциальной зависимости тепловой мощности, отводимой испарением, от температуры воды в БВ. Расчеты показали, что при отказе ТО и работе вытяжной вентиляции в номинальном режиме при максимально фактически достигнутой мощности в БВ, равной 110 кВт , рост температуры воды останавливается на отметке $60 - 70^{\circ}\text{C}$.

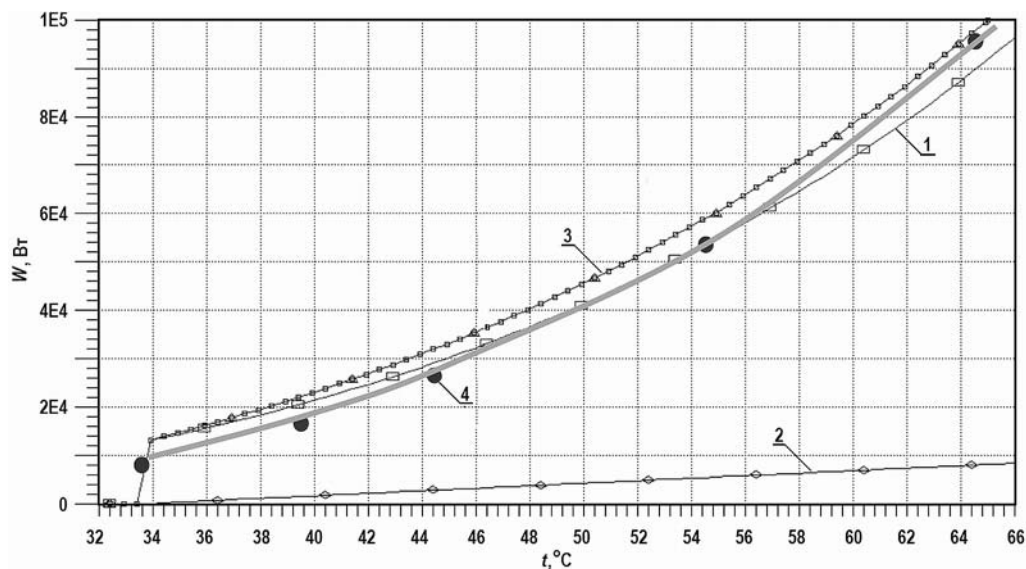


Рис. 3. Зависимости снимаемой тепловой мощности по аналитической модели с зеркала на испарение (1), конвективный нагрев воздуха (2) и суммарной (3) от температуры воды в бассейне в сравнении с 3D-расчетом (4) суммарной отводимой тепловой мощности с зеркала в коде TRAC в условиях постоянной принудительной вентиляции с номинальным расходом

Соответственно, для интегральной модели БВ была вновь разработана модель теплоотвода за счет испарения совместно с конвективным нагревом воздуха при постоянной вынужденной вентиляции БВ. Модель основана на теории подобия теплообменных и массообменных процессов [9, 10]. Используется аналитическое решение двух дифференциальных уравнений для прогрева циркулирующего воздуха над зеркалом воды в БВ и его увлажнения за счет испарения в одномерной постановке. Унос прогретого воздуха и пара из бассейна осуществляется вентиляцией БВ. Подробно модель испарения представлена в [4]. Таким образом, расход вентиляции и условия в центральном зале используются в расчете испарения. Модель испарения прошла кроссверификацию путем сравнения результатов с трехмерным расчетом в коде TRAC PF [3]. (Модель испарения отмеченного системного кода основана также на теории подобия). Результаты сравнения представлены на рис. 3. Отличия оказались в пределах 16%. Трехмерная мо-

дель показала более низкий уровень мощности, отводимой испарением совместно с конвекцией в силу расположения канала вытяжной вентиляции на одном краю бассейна и образования застойной зоны воздуха на противоположной стороне, что снижает интенсивность теплоотвода с зеркала путем испарения и конвекции.

Отметим, что в отличие от системных кодов разработанная интегральная модель БВ позволяет рассчитывать теплоотвод испарением даже при отрицательных температурах воздуха над зеркалом воды в БВ [11].

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Для практического использования разработанной модели тепловых режимов БВ была создана соответствующая программа (код). В настоящее время программа не аттестована. Для верификации интегральной модели и расчетной программы был проведен расчет непрерывной выгрузки всех 273 ОТВС блока № 1 в БВ-4, осуществленный в 2018 г. Результаты представлены на рис. 4.

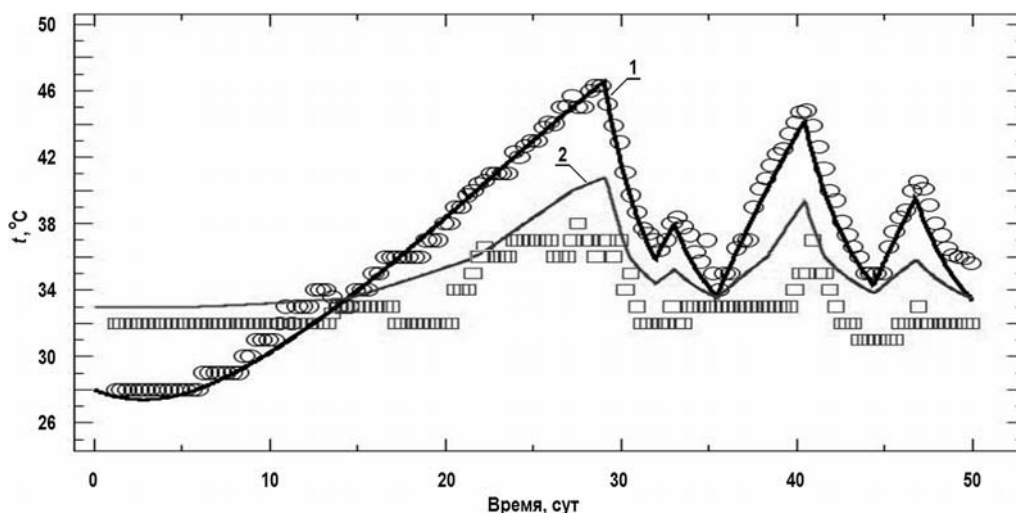


Рис. 4. Измеренная («точки») и расчетная (линии) динамика температур воды в бассейне (1) и воздуха (2) над зеркалом испарения в процессе непрерывной выгрузки 273 ОТВС блока № 1 БиАЭС в БВ-4

На рисунке показаны четыре периода снижения температуры воды, которые соответствуют периодам эпизодической работы теплообменника. Сравнение показало достаточную точность расчетов. Именно в этом режиме была достигнута максимальная суммарная мощность тепловыделения в бассейне, по расчетам составляющая 110 кВт.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ДИНАМИКИ МОЩНОСТЕЙ И ТЕМПЕРАТУР ПО ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ БВ

На рисунке 5 демонстрируются результаты тестового расчета динамики подводимой (ОТВС) и составляющих отводимой мощностей в БВ «мокрого» хранения при проектной (равномерной) загрузке бассейна. Показана определяющая роль теплоотвода с зеркала испарения до момента запуска ТО в эпизодическом режиме по температурным уставкам на запуск и останов.

На рисунке 6 представлены соответствующая динамика температуры воды в БВ при постоянных внешних условиях и динамика температур оболочек твэлов разных временных этапов выгрузки в БВ.

На рисунке 7 изображена расчетная динамика температур теплоносителя (воды и после осушения воздуха) в БВ-1 по фактическим данным истории загрузки бассейна и с учетом сезонных изменений. Моменту осушения соответствует 6800 суток (18 лет) от начала эксплуатации (в начале имелся период простоя в загрузке БВ-1). В этот момент

показан подъем температуры теплоносителя на 15 градусов, что связано с прекращением теплоотвода испарением. В момент 17000 суток (46 лет) от начала эксплуатации моделировался полный останов энерговыработки на АЭС со снижением температур стен БВ, примыкающим к шахтам соседних реакторов. В результате температура воздуха в сухом БВ по расчетному прогнозу снижается на 15 градусов. Точками на графике показаны результаты измерений температуры воздуха в БВ-1.

На рисунке 8 показаны результаты прогноза динамики воды в БВ-4 «мокрого» хранения в зимнее время при увеличении срока аномального холода до 2,5 месяцев. Показан значительный оперативный запас времени для предотвращения заморозки воды в бассейне.

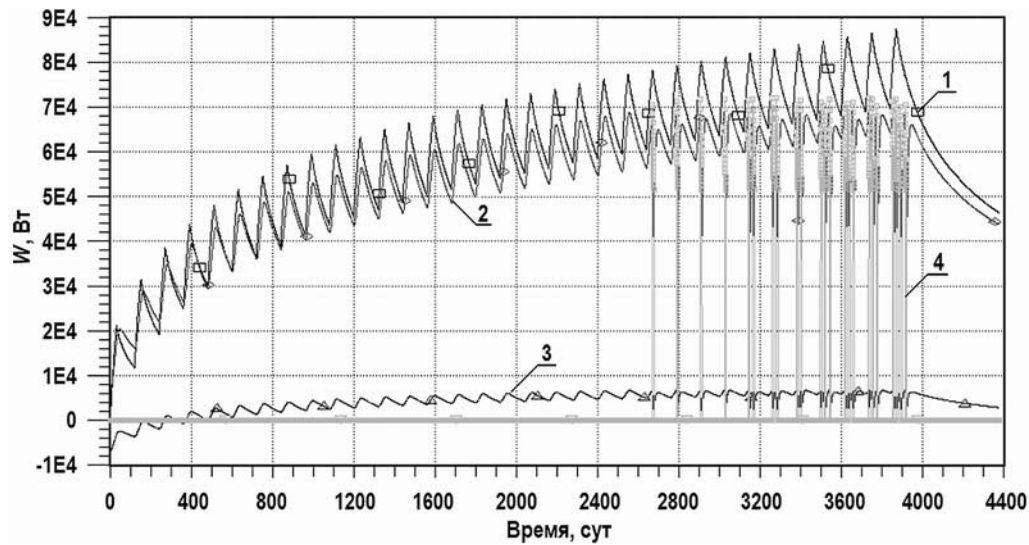


Рис. 5. Динамика суммарной тепловой мощности ОТВС проектной загрузки в БВ-1 в 33 этапа и составляющих отводимой тепловой мощности в интервале 12-ти лет эксплуатации («мокрое» хранение): 1 – суммарная мощность теплоотвода ОТВС в БВ; 2 – суммарная мощность теплоотвода с зеркала испарения; 3 – тепловые потери через стены и дно БВ; 4 – мощность, отводимая ТО в эпизодическом режиме

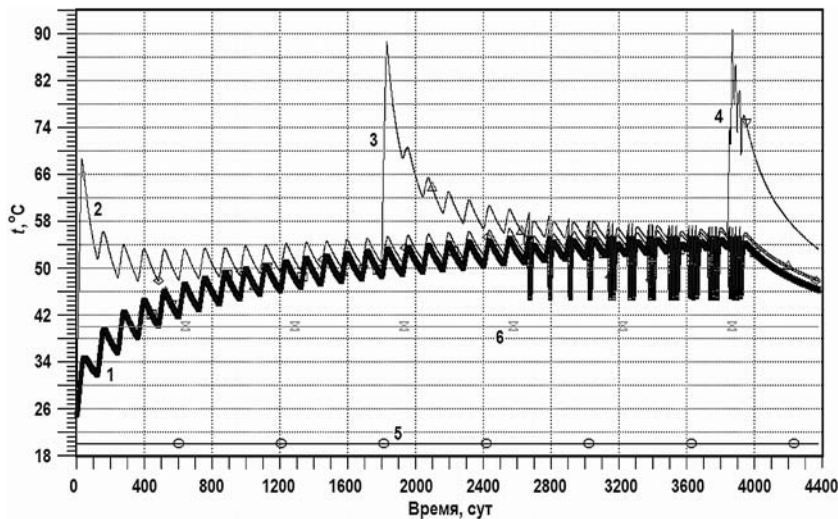


Рис. 6. Динамика температуры воды в БВ-1 проектной загрузки и оболочек твэлов загрузок 1, 16 и 33: 1 – вода; 2 – оболочки твэлов загрузки 1; 3 – оболочки твэлов загрузки 16; 4 – оболочки твэлов загрузки 33; 5 – воздух в зале; 6 – внешняя поверхность всех стен БВ

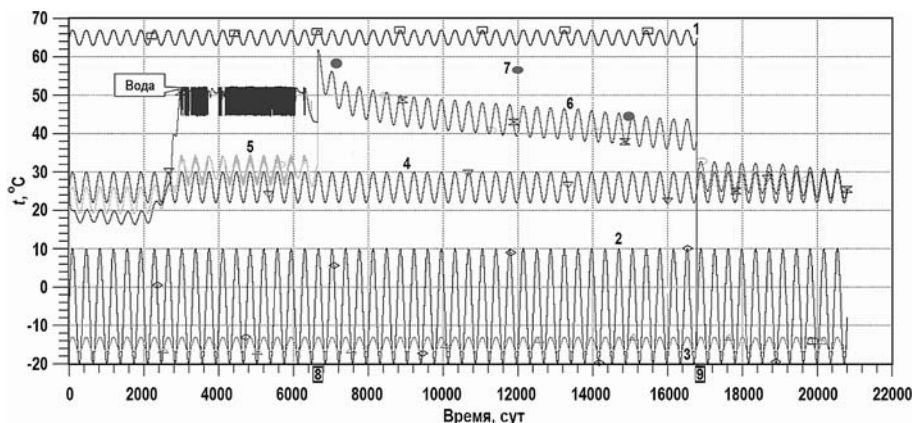


Рис. 7. Динамика температур в БВ-1 фактической загрузки до 2035 г. с учетом сезонных изменений в режимах «мокрого» хранения, «сухого» хранения и остановки энерговыработки АЭС при номинальном расходе вытяжной вентиляции: 1 – внешняя температура «горячих» стен БВ; 2 – внешняя температура «холодных» стен; 3 – дно БВ; 4 – воздух в зале; 5 – воздух на входе в вытяжную вентиляцию БВ; 6 – вода при «мокром» хранении и воздух на входе в вытяжную вентиляцию БВ при «сухом» хранении; 7 – результаты измерений температуры воздуха в БВ при «сухом» хранении; 8 – момент осушения БВ; 9 – принятый момент остановки АЭС

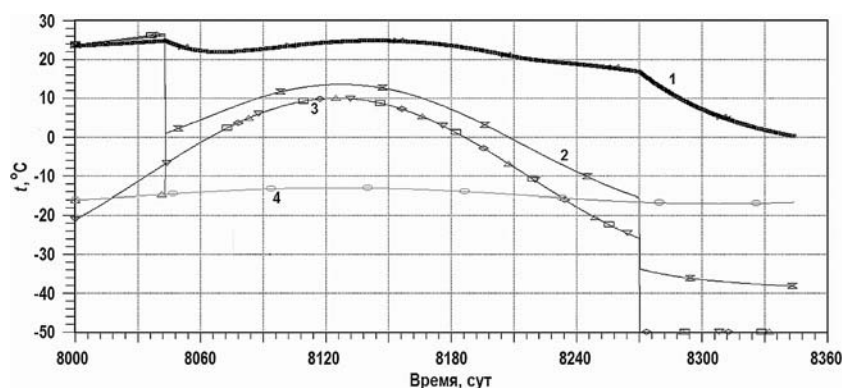


Рис. 8. Динамика температуры воды и воздуха в БВ при снижении температуры атмосферного воздуха до отметки минус 50°С зимой сроком на 2,5 месяца при суммарной постоянной тепловой мощности ОТВС 20кВт и номинальном расходе вентиляции 1кг/с: 1 – вода; 2 – воздух на входе в вытяжную вентиляцию БВ; 3 – воздух в зале и внешняя поверхность всех стен БВ; 4 – внешняя поверхность дна БВ

Таблица 2

Результаты расчетов температур воздуха в БВ-1, 2, воды в БВ-3, 4, температур пеналов и оболочек ОТВС

Температура, °С	БВ-1	БВ-2	БВ-3	БВ-4
Воздух (вода) в настоящее время	47 «сухой»	73 «сухой»	(46) «мокрый»	(40) «мокрый»
Воздух (вода) 2025 г.	27	27	(35)	(40)
Воздух (вода) 2035 г.	27	27	(35)	(25)
Пеналы (оболочки) ОТВС в настоящее время	52 (54)	77 (79)	50 (62)	40 (129)
Пеналы (оболочки) ОТВС 2025 г.	31 (33)	30 (32)	42 (45)	40 (44)
Пеналы (оболочки) ОТВС 2035 г.	30 (32)	30 (32)	40 (42)	25 (28)

В таблице 2 представлены результаты расчетов температур воздуха в БВ-1, 2 и воды в БВ-3, 4, а также температуры пеналов и оболочек ОТВС.

Таким образом, продемонстрирован широкий спектр возможностей расчетной методики и программы.

АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОРРОЗИЕЙ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ОТВС И СТЕНОК ПЕНАЛОВ ПРИ ИХ ХРАНЕНИИ

С использованием данных по изменению температурного режима ОЯТ, пеналов и металлоконструкций ОТВС был выполнен расчетный анализ повреждения коррозией оболочек твэлов ОТВС и стенок пеналов их хранения, основанный на данных о повреждении коррозией «черных» и нержавеющей сталей во влажной среде при хранении ОЯТ реактора АМБ. Было получено, что изменение толщины стенки внутренних оболочек твэлов ОТВС к 2045 г. во всех БВ не приводит к потере их герметичности. Также было показано, что ни оболочки твэлов, ни сварные соединения не подвержены коррозионному растрескиванию в течение всего расчетного периода (с 1977 по 2045 гг.).

Установлено, что материал пальца подвесной системы БВ-4 не подвержен коррозионному растрескиванию под напряжением в течение всего периода хранения пеналов с ОТВС в БВ-4 с 2013 по 2045 гг.

Прогнозные значения минимальной остаточной толщины стенок пеналов при длительном хранении с параметрами воздуха в БВ (температура воздуха не ниже +25°C и его относительной влажности не выше 25%) обеспечивают условия прочности и устойчивости пеналов на конец 2045 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании расчетов, по разработанной интегральной модели БВ «мокрого» и «сухого» хранения ОЯТ, было решено значительное количество актуальных инженерных задач, связанных с прогнозированием тепловых режимов бассейнов БиАЭС.

Были рассчитаны температуры в БВ при «мокром» и «сухом» хранении для режимов генерации электроэнергии и её полного отсутствия, а также при отрицательных температурах стен БВ и воздуха в центральном зале АЭС.

Разработанная интегральная модель БВ в виде расчетной программы является по существу тренажером для принятия решений по управлению БВ БиАЭС.

С использованием результатов расчета динамики температур в БВ выполнен расчетный анализ повреждения коррозией оболочек твэлов ОТВС и стенок пеналов их хранения.

Все расчеты проводились в предположении работоспособности принудительной вытяжной вентиляции БВ «мокрого» и сухого хранения с номинальным расходом (от электропитания). Для проведения расчетов в условиях только естественной вентиляции необходима экспериментальная информация о её производительности. Теоретические оценки в данном случае непредставительны в силу большой неопределенности коэффициентов фактического аэросопротивления фильтров в системе вентиляции.

Литература

1. РК КОРСАР. Руководство пользователя. – Сосновый Бор, 2006. – 257 с. Электронный ресурс: https://korsar.niti.ru/wp-content/uploads/sites/2/2022/04/um_v3_ru.pdf (дата доступа 10.07.2022).
2. RELAP 5-3D. Code Manual. User's Guidelines NUREG/CR-5535. – Idaho National Engineering and Environmental Laboratory INEL-95/0174. – 2002. – Vol. 5. – Rev. 1. Электронный ресурс: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/008/27008531.pdf (дата доступа 10.07.2022).
3. Spore J. W., Jolly-Woodruff S. J., Knight T. K., Lin J. C., Nelson R. A., Pasamehmetoglu K. O.,

Steinke R.G. and Unal C. TRAC-PF1/М0D2 Code Manual. Volume 1. Theory Manual. NUREG/CR-5673, LA-12031-M, 1993.

4. *Сергеев В.В.* Особенности расчетного моделирования тепловых режимов бассейнов выдержки БиАЭС. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – Вып. 1. – С. 91-107. DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2021-1-97-107>.

5. *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: [10.55176/2414-1038-2020-3-72-79](https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-3-72-79).

6. *Ade B.J., Gauld I.C.* Decay Heat Calculations for PWR and BWR Assemblies Fueled with Uranium and Plutonium Mixed Oxide Fuel Using Scale. // Oak Ridge National Laboratory. – 2011. Электронный ресурс: <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub31857.pdf> (дата доступа 10.07.2022).

7. *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. – United States Regulatory Commission, 2010. Электронный ресурс: <https://www.nrc.gov/docs/ML1008/ML100850213.pdf> (дата доступа 10.07.2022).

8. *Балашевский А.С., Шевелев Д.В., Власенко Н.И., Козлов В.Я.* Моделирование с помощью программного кода MELCOR аварии в бассейне выдержки ОЯТ энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС при нарушении теплоотвода. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013 г. – № 3. – С. 15-23. DOI: <https://doi.org/10.26583/нре.2013.3.02>.

9. Справочник по теплообменникам. Т. 1 – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с. Интернет ресурс: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12959> (дата доступа 10.07.2022).

10. *Орвос М., Сзабо В., Пус Т.* Скорость испарения со свободной поверхности нагретой жидкости. // Прикладная механика и техническая физика. – 2016. – Т. 57. – № 6. – С. 168-179. DOI: <https://doi.org/10.15372/PMTF20160619>.

11. *Бурцев С.И., Цветков Ю.Н.* Влажный воздух. Состав и свойства: Учеб. пособие. – СПб.: Санкт-Петербургская государственная академия холода и пищевых технологий, 1998. – 146 с. Электронный ресурс: <http://booksshare.net/index.php?id1=4&category=chem&author=burcev-si&book=1998> (дата доступа 10.07.2022).

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

Авторы

Воробьева Анастасия Александровна, инженер-исследователь
E-mail: aavorobeva@ipre.ru

Московченко Ирина Владимировна, начальник лаборатории
E-mail: idemeneva@ipre.ru

Мухамадеев Рубен Ильдарович, старший научный сотрудник, канд. техн. наук
E-mail: ben@ipre.ru

Сергеев Владимир Викторович, старший научный сотрудник
E-mail: vsergeev@ipre.ru

Суворов Альберт Петрович, старший научный сотрудник
E-mail: asuvorov@ipre.ru

Тимофеев Владимир Федорович, ведущий инженер
E-mail: vtimofeev@ipre.ru

Низента Евгений Сергеевич, начальник отдела
E-mail: nizenta-es@bilnpp.ru

Титаренко Владислав Альбертович, инженер-физик 2 категории
E-mail: titarenko-va@bilnpp.ru

Голосов Олег Александрович, руководитель направления
E-mail: golosov_oa@irmatom.ru

Глушкова Наталья Владимировна, начальник отдела
E-mail: glushkova_nv@irmatom.ru

UDC 621.039.743

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THERMAL-HYDRAULIC PARAMETERS OF STORAGE POOLS OF THE BILIBINO NPP DURING LONG-TERM STORAGE OF SPENT NUCLEAR FUEL

Vorobeva A.A.*, Moskovchenko I.V.*, Mukhamadeev R.I.*, Sergeev V.V.*,
Suvorov A.P.*, Timofeev V.F.*, Nizenta E.S.**, Titarenko V.A.**,
Golosov O.A.***, Glushkova N.V.***

* IPPE JSC

1, Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

** Branch of Rosenergoatom Concern JSC Bilibino NPP

689450 Bilibino, Chukotka Autonomous Okrug, Russia

*** IRM JSC

642250 Zarechny, Sverdlovsk Reg., Russia

ABSTRACT

On the base of the developed integral dynamic model of the fuel storage pool (SP), taking into account the specifics of the Bilibino NPP and the corresponding calculation program, the results of calculations of the temperature dynamics of the coolants and claddings of the fuel elements located in the spent fuel pools 1 – 4 of this facility for the period up to 2035 are presented. Based on the obtained results, the analysis of the dynamics of the corrosion state of the SFA fuel rod claddings and the walls of the storage canisters was carried out.

The Bilibino Nuclear Power Plant consists of 4 Power Units with EGP-6 water-graphite channel reactors. At the moment, Power Unit No 1 has been shut down, Units No 2 – 4 have received a license for operation until December 2025. Currently, spent fuel assemblies (SFA) and CPS channels in storage pools SP-1,2 are stored in hermetic canisters made of carbon steel 20 filled with nitrogen in «dry» conditions, while SFA and CPS in storage pools SP-3, 4 are stored in stainless steel canisters in «wet» conditions. An important point in substantiating the further extension of the operation of the power units of the Bilibino NPP is the analysis and justification of the possibility of long-term accident-free storage of spent nuclear fuel in the fuel storage pool after the final shutdown of all reactors.

Key worlds: Bilibino Nuclear Power Plant (BiNPP), fuel storage pool (SP), spent fuel assembly (SFA), thermohydraulic industry codes, isotope kinetics, heat exchanger (HE), evaporation from the water surface.

Vorobeva A.A., Moskovchenko I.V., Mukhamadeev R.I., Sergeev V.V., Suvorov A.P., Timofeev V.F., Nizenta E.S., Titarenko V.A., Golosov O.A., Glushkova N.V. Computational Analysis of Thermal-Hydraulic Parameters of Storage Pools of the Bilibino NPP During Long-Term Storage of Spent Nuclear Fuel. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 1, pp. 44-56; DOI:

<https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.04> (in Russian).

REFERENCES

1. *CORSAR Calculation Code User Manual*. Sosnovy Bor, 2006, 257 p. Available at: https://korsar.niti.ru/wp-content/uploads/sites/2/2022/04/um_v3_ru.pdf (accessed Jul. 10, 2022) (in Russian).
2. *RELAP 5-3D. Code Manual. User's Guidelines NUREG/CR-5535* Idaho National Engineering and Environmental Laboratory INEL-95/0174. 2002, v. 5, rev. 1. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/008/27008531.pdf (accessed Jul. 10, 2022).
3. Spore J.W., Jolly-Woodruff S.J., Knight T.K., Lin J-C., Nelson R.A., Pasamehmetoglu K.O., Steinke R.G. and Unal C. *TRAC-PF1/MOD2 Code Manual, Vol. 1, Theory Manual*, NUREG/CR-5673, LA-12031-M, 1993.
4. Sergeev V.V. Specific Features of Numerical Simulation of Thermal Operation Mode the Spent Fuel Pools of Bilibino NPP. *VANT. Ser. Yadernye i Reaktornye Konstanty*. 2021, iss. 1, pp. 91-107; DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2021-1-97-107> (in Russian).
5. Zherdev G.M., Suvorov A.P. Nuclear Calculator EGP-6 Code for the Engineering Calculations of Radiation Characteristics of Spent Fuel Assemblies of Bilibino NPP. *VANT. Ser. Yadernye i Reaktornye Konstanty*. 2020, iss. 3, pp. 72-79; DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-3-72-79> (in Russian).
6. Ade B.J., Gauld Ian C. *Decay Heat Calculations for PWR and BWR Assemblies Fueled with Uranium and Plutonium Mixed Oxide Fuel Using Scale*. Oak Ridge National Laboratory. 2011. Available at: <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub31857.pdf> (accessed Jul. 10, 2022).
7. 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*. United States Regulatory Commission, 2010. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML1008/ML100850213.pdf> (accessed Jul. 10, 2022).
8. Balashevsky A.S., Shevelev D.V., Vlasenko N.I., Kozlov V.Ya. Simulation of an Accident in the SNF Pool of Power Unit No. 1 of the South Ukrainian NPP in Case of Heat Removal Failure Using the MELCOR Code. *Izvestiya Vyshikh Uchebnykh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 3, pp. 15-23; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2013.3.02> (in Russian).
9. *Heat Exchanger Handbook. Vol. 1*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987, 560 p. Available at: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12959> (accessed Jul. 10, 2022) (in Russian).
10. Orvos M, Szabo V, Pus T. Rate of Evaporation from the Free Surface of the Heated Liquid. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*. 2016, v. 57, no. 6, pp. 168-179; DOI: <https://doi.org/10.15372/PMTF20160619> (in Russian).
11. Burtsev S.I., Tsvetkov Yu.N. *Wet Air. Composition and Properties*. Saint Petersburg. St. Petersburg State Academy of Refrigeration and Food Technologies Publ., 1998, 146 p. Available at: <http://booksshare.net/index.php?id1=4&category=chem&author=burcev-si&book=1998> (accessed Jul. 10, 2022) (in Russian).

Authors

Vorobeva Anatsiya Alexandrovna, Research Engineer

E-mail: aavorobeva@ippe.ru

Moskovchenko Irina Vladimirovna, Head of Laboratory

E-mail: idemeneva@ippe.ru

Mukhamadeev Ruben Ildarovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: ben@ippe.ru

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА

Sergeev Vladimir Viktorovich, Senior Researcher
E-mail: vsergeev@ippe.ru.

Suvorov Albert Petrovich, Senior Researcher
E-mail: asuvorov@ippe.ru

Timofeev Vladimir Fedorovich, Leading Engineer
E-mail: vtimofeev@ippe.ru

Nizenta Eugeny Sergeevich, Head of Departement
E-mail: nizenta-es@bilnpp.ru

Titarenko Vladislav Albertovich, Engineer Physisist
E-mail: titarenko-va@bilnpp.ru

Golosov Oleg Aleksandrovich, Head of Division
E-mail: golosov_oa@irmatom.ru

Glushkova Nataliya Vladimirovna, Head of Departament
E-mail: glushkova_nv@irmatom.ru