

АО «Государственный научный центр Российской Федерации —
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

ФЭИ-3285

Р. И. Мухамадеев, Ю. Д. Баранаев

**Методический подход к анализу последствий
запроектных аварий РУ ЭГП-6
для населения**

ОБНИНСК 2019

Р.И. Мухамадеев, Ю.Д. Баранаев. Методический подход к анализу последствий запроектных аварий РУ ЭГП-6 для населения : Препринт ФЭИ–3285. — Обнинск, ГНЦ РФ –ФЭИ, 2019. — 24 с.

В настоящей работе изложен принятый в Отчете по углубленному обоснованию безопасности (ОУОБ) энергоблоков Билибинской АЭС методический подход к анализу последствий запроектных аварий РУ ЭГП-6 для населения, включающий определение перечня исходных событий и сценариев аварий, оценку влияния физических и конструктивных особенностей РУ ЭГП-6 на протекание и формирование радиационных последствий аварий, обоснование возможности редукации количества исследуемых исходных событий и аварийных сценариев, критерии классификации аварий по группам по результатам анализа с выявлением аварий, потенциально приводящих к наибольшим радиологическим последствиям для населения.

Ключевые слова: Билибинская АЭС, реакторная установка ЭГП-6, исходное событие, запроектная авария, радиационные последствия.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Основы методического подхода к анализу радиационных последствий запроектных аварий	5
2. Анализ исходных событий аварий, обусловленных внутренними причинами..	6
3. Особенности конструкции РУ ЭГП-6, оказывающие влияние на протекание аварий	11
4. Анализ исходных событий аварий, приводящих к существенному повреждению твэлов в ТВС	14
5. Анализ запроектных аварий по степени повреждения барьеров безопасности, приводящих к выходу радионуклидов за пределы ОЦК	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	23
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	24

ВВЕДЕНИЕ

В состав Билибинской АЭС входят четыре энергоблока с реакторными установками (РУ) ЭГП-6, которые обеспечивают суммарную мощность генерации электрической энергии до 48 МВт и выработку тепла до 100 Гкал/ч. Эскизный проект БиАЭС был разработан в 1964 г., технический — в 1965 г. Строительство БиАЭС было начато в октябре 1966 года. Энергоблоки введены в эксплуатацию в 1974—1976 годах. За время эксплуатации энергоблоков БиАЭС проводилась многократная модернизация систем и оборудования, направленная на повышение их надежности и безопасности эксплуатации [1]. В целях продления эксплуатации БиАЭС до 2025 г. необходимо обосновывать существующий уровень безопасности как необходимый, отвечающий требованиям нормативных документов. А для этого требуется в том числе обоснование безопасности населения в условиях тяжелых запроектных аварий.

Цель работы — разработка методического подхода, позволяющего обеспечить оценку максимального радиологического воздействия потенциальных выбросов на население в результате тяжелых запроектных аварий на энергоблоках БиАЭС. В рамках этого подхода проводится анализ влияния физических и конструктивных особенностей РУ ЭГП-6 на протекание и формирование радиационных последствий запроектных аварий (ЗПА), что позволяет провести их классификацию и выделить аварии, обладающие наибольшими радиологическими последствиями, для последующего определения приемлемости этих последствий для населения, проживающего в районе размещения Билибинской АЭС.

1. Основы методического подхода к анализу радиационных последствий запроектных аварий

Причины, условия возникновения и протекания запроектных аварий на энергоблоках БиАЭС весьма многообразны и определяются физическими и конструктивными особенностями реакторов ЭГП-6, конструкцией предусмотренных в проекте систем безопасности, алгоритмами управления авариями. Однако все аварии с точки зрения формирования радиационных последствий сводятся к повреждению (отсутствию повреждений или сочетанию повреждений) имеющихся барьеров удержания радиоактивных продуктов (топливная матрица, оболочки твэлов, границы циркуляционных контуров и локализирующее оборудование и помещения станции). Характер этих повреждений определяет радионуклидный состав выбросов и может быть принят за основу при классификации радиационных аварий. Для каждого класса аварий можно выделить аварию, приводящую к наибольшей величине выбросов, и в дальнейшем ограничиться анализом последствий только для предельных аварий в каждом классе.

На основе данных системных исследований 2000—2016 гг., отраженных в Отчете по углубленному обоснованию безопасности (ОУОБ) [1], разработан методический подход к анализу радиационных последствий для населения, включающий:

1) Анализ тяжелых запроектных аварий из разработанного в ГНЦ РФ-ФЭИ и утвержденного Ростехнадзором перечня [1] и их классификацию по критерию повреждения барьеров безопасности.

2) Выявление исходных событий и сценариев аварий, характеризующих верхние пределы повреждения барьеров безопасности — поскольку именно эти повреждения ведут наибольшему облучению населения вследствие потенциально возможных выбросов.

Анализ проводился в несколько этапов. В результате первичного анализа из рассматриваемого перечня были исключены аварии по внешним причинам, поскольку:

а) Метеорологические условия (дожди, грозы, снег, обледенение, ветра) и природные факторы, ими определяемые (разливы рек, прорыв искусственных водоемов), не могут послужить причиной повреждения локализирующих барьеров безопасности и привести к выбросам в окружающую среду, поскольку конструкция реакторной установки (РУ) ЭГП-6, зданий и сооружений Билибинской АЭС выдерживают эти нагрузки, а их расположение на местности исключает такое воздействие.

б) Проектное землетрясение (ПЗ) составляет 4 балла по шкале MSK-64, максимальное расчетное (МРЗ) — 5 баллов. Здания и сооружения Билибинской АЭС спроектированы таким образом, чтобы выдержать эти нагрузки.

в) Техногенные воздействия на площадке размещения Билибинской АЭС, потенциально способные привести к авариям с разрушением локализирующих барьеров безопасности и выбросами в окружающую среду, отсутствуют:

- вблизи площадки расположения АЭС отсутствуют нефте- и газопроводы;
- взрывы при транспортировке взрывчатых веществ за пределами площадки не могут привести к разрушению объектов Билибинской АЭС;
- в зоне расположения АЭС запрещены полеты воздушных судов; аэропорт расположен на расстоянии более 20 км; вероятность авиационных происшествий над площадкой АЭС составляет $5,5 \cdot 10^{-11}$ [1].

2. Анализ аварий, обусловленных внутренними причинами

Анализ аварий, обусловленных внутренними причинами, был выполнен в два этапа: были проанализированы исходные события (ИС), приводящие к авариям на РУ ЭГП-6, и выделены ИС и условия возникновения запроектных аварий, после чего из выявленного спектра запроектных аварий выявлены аварии, сопровождаемые наибольшим повреждением барьеров безопасности.

Все возможные аварии на РУ ЭГП-6 можно разделить на категории в соответствии с исходным событием:

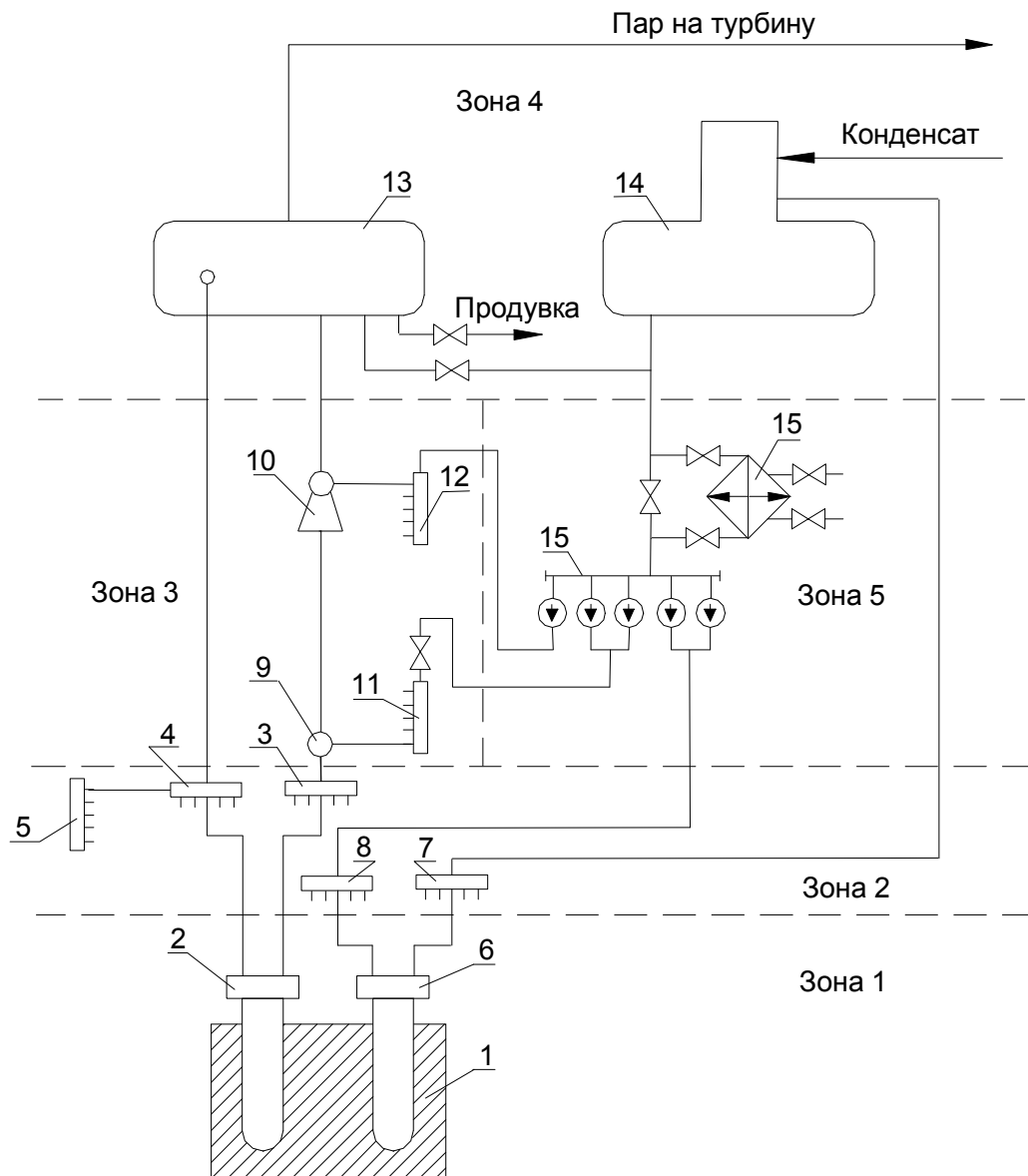
- 1) ИС, приводящие к потерям теплоносителя основного циркуляционного контура (ОЦК): разрывы коллекторов и трубопроводов ОЦК и контура охлаждения СУЗ, паропроводов, твэла и ТВС, трубопроводов питательной воды;
- 2) ИС, приводящие к переходным процессам;
- 3) специальные ИС, связанные с отказами по общей причине, приводящие к полной или частичной потере функций безопасности;
- 4) особые локальные воздействия (пожары, затопления, накопление и взрыв водорода).

2.1 Исходные события аварий, сопровождаемых потерей теплоносителя основного циркуляционного контура

Все аварии были сгруппированы в соответствии с размерами разрывов и местом их расположения (рис. 1, табл. 1).

Большие течи формируются через разрывы ОЦК и паропроводов (или связанных систем). Они требуют немедленного останова реактора и проведения аварийного расхолаживания. Большая течь характеризуется эквивалентным диаметром не менее 80 мм.

Средние течи формируются через разрывы ОЦК (или связанных систем), характеризуются необходимостью останова и аварийного расхолаживания реактора. В случае средней течи срабатывает АЗ от изменения одного (или нескольких) технологических параметров. Средняя течь характеризуется эквивалентным диаметром в диапазоне 30—80 мм.



- 1 – реактор ЭГП-6, 2 – ТВС, 3 – раздаточный коллектор петли ТВС, 4 – сборный коллектор петли ТВС, 5 – перепускной коллектор, 6 – канал СУЗ, 7 – сборный коллектор СУЗ, 8 – раздаточный коллектор СУЗ, 9 – ввод АСПОВ, 10 – ввод питательной воды (СПН), 11 – раздаточный коллектор АСПОВ, 12 – раздаточный коллектор питательной воды, 13 – барабан-сепаратор, 14 – деаэратор, 15 – всасывающий коллектор АПЭН, 16 – теплообменник глубокого расхолаживания

Рис. 1. Схема основного циркуляционного контура РУ ЭГП-6

Малые течи формируются через разрыв ОЦК и паропровода (или связанных систем) и характеризуются необходимостью проведения штатного расхолаживания РУ. В случае малой течи возможна остановка реактора оператором, не дожидаясь появления сигнала АЗ-1. Малые течи характеризуются эквивалентным диаметром 30 мм.

Компенсированные (очень малые) течи характеризуются отсутствием необходимости быстрой остановки и расхолаживания реактора. При отсутствии сигналов АЗ-1 реактор может быть остановлен оператором. Для компенсируемых течей эквивалентный диаметр составляет ~10 мм.

Аварии, связанные с потерей теплоносителя из ОЦК, для РУ ЭГП-6 можно разделить на происходящие внутри помещений ОЦК и исходные события с истечением теплоносителя за пределы помещений ОЦК и в другие системы (рис. 1). При этом разрыв ОЦК:

- в зоне 1 — приводит к течи теплоносителя в реакторное пространство,
- в зоне 2 — приводит к течи теплоносителя в надреакторное пространство,
- в зоне 3 — приводит к течи теплоносителя в шахту трубопроводов ОЦК,
- в зоне 4 — приводит к течи теплоносителя в бокс барабана-сепаратора,
- в зоне 5 — приводит к течи теплоносителя в машинный зал.

В соответствии с величиной течи и местом расположения, они представлены в таблице 1.

Таблица 1. Аварии с разрывом ОЦК и трубопроводов основных систем

Место расположения разрыва	Эквивалентный размер течи			
	Большая течь Ø 80 мм	Средняя течь Ø 30–80 мм	Малая течь Ø 10–30 мм	Очень малая (компенсир.) течь Ø10 мм
Зона 1. Реакторное пространство (РП)	Массовые разрывы ТВС и твэлов	Разрывы 28 ТВС	Разрывы 3 ТВС	Разрыв одной ТВС
Зона 2. Надреакторное пространство	Разрывы раздаточного и сборного групповых коллекторов (РГК и СГК), перепускного ОЦК	Индивидуальные трубопроводы ТВС, коллектора контура СУЗ	Индивидуальные трубопроводы каналов СУЗ	Импульсные трубки КИП
Зона 3. Шахта трубопроводов ОЦК	Опускные и подъемные трубопроводы групповых петель ОЦК, трубопровод расхолаживания барабана-сепаратора (БС)	Трубопроводы питательной воды и АСПОВ, трубопроводы деаэрата, контура СУЗ		Импульсные трубки КИП
Зона 4. Бокс барабана-сепаратора	Подъемные и опускаемые трубопроводы ОЦК, БС, паропровод, главный предохранительный клапан (ГПК), расхолаживание БС	Трубопровод аварийного слива БС	Трубопроводы выпарного аппарата и деаэрата	Импульсные трубки КИП
Зона 5. Машзал	Паропровод	Трубопроводы СППВ, АСПОВ, САППВ, БРУ-ОБ, БРУ-К	Трубопроводы питательной воды и конденсата	Импульсные трубки КИП

При отсутствии отказов в системах безопасности и важных для безопасности (основное — при отсутствии отказов в работе АЗ-1) все эти исходные события приводят к проектным авариям, последствия которых с помощью технических средств систем безопасности исключают превышение эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации.

Аварии с большими течами ОЦК (стлб. 1, табл. 1), сопровождаемые отказом системы защиты АЗ-1, являются запроектными. Вместе с тем необходимо отметить, что причиной аварии с массовым разрывом твэлов в ТВС, помимо потери теплоносителя ОЦК, может быть неконтролируемое введение реактивности вследствие самохода группы стержней систем управления реактором (АР или РР).

2.2 Исходные события, приводящие к переходным процессам

Исходные события, приводящие к переходным процессам, возникают из-за отказов систем безопасности и систем нормальной эксплуатации, а также ошибок персонала, вносящих значительные возмущения в работу энергоблока, которые приводят к необходимости остановки реактора и не связаны с потерей теплоносителя. К ним относятся:

- события, приводящие к недопустимому росту положительной реактивности;
- аварийное перекрытие проходных сечений теплоносителя в определенных местах гидравлического тракта ОЦК;
- изменения параметров теплоносителя, превысившие установленные пределы безопасной эксплуатации и требующие останова реактора;
- события, связанные с отказами оборудования и ошибками персонала при проведении регламентных эксплуатационных работ и перегрузке топлива.

Рассмотренные подгруппы событий не являются самостоятельными, т. к. приводят к переходному процессу или течи теплоносителя.

Таблица 2. Исходные события, не связанные с потерями теплоносителя и приводящие к переходным процессам

№ п/п	Исходные события аварий
1	Самоход стержня АР с максимальной скоростью из активной зоны, сопровождаемый несрабатыванием АЗ
2	Самоход стержня РР
3	Падение в зону полностью извлеченного стержня СУЗ
4	Прекращение подачи теплоносителя в один раздаточный групповой коллектор с несрабатыванием АЗ
5	Отказ питательного насоса
6	Отказ насоса контура охлаждения каналов СУЗ
7	Отказ при достижении уставки на закрытие главного предохранительного клапана или клапанов стерегущих регуляторов
8	Ложное включение аварийной системы подачи охлаждающей воды (АСПОВ)

При штатном срабатывании аварийной защиты и отсутствии отказов эти аварии также являются проектными. При отказе аварийной защиты (АЗ) аварии 1, 2 и 4 становятся запроектными.

2.3 Специальные исходные события, связанные с отказами по общим причинам

Специальные исходные события — это события-инициаторы отказов по общим причинам, которые приводят к полной или частичной потере функций безопасности. Они могут возникать как в системах нормальной эксплуатации, так и в системах безопасности и важных для безопасности. К ним относятся:

- отказы в конденсатно-деаэрационном тракте;
- обесточивания в системе внешнего электроснабжения, а также отдельных шин электропитания управляющих систем;
- потеря контроля за основными технологическими параметрами (давление, уровень, расход);
- потеря технического водоснабжения;
- потеря циркуляционной воды.

Таблица 3. Специальные исходные события — инициаторы отказов по общим причинам

№ п/п	Исходные события аварий
1	Пожар в машзале, приводящий к отказу насосов ПЭН, АПЭН или КО СУЗ
2	Обесточение в системе внешнего электроснабжения
3	Обесточение системы управления и защиты
4	Обесточение энергоблока с потерей штатного электропитания собственных нужд с несрабатыванием АЗ и АР
5	Потеря контроля за основными технологическими параметрами (давление, уровень, расход ОЦК)
6	Потеря технического водоснабжения
7	Потеря циркуляционной воды

При штатном срабатывании аварийной защиты и отсутствии отказов эти аварии также являются проектными и не могут привести к разрушению ТВЭлов ТВС [1]. При отказе системы АЗ аварии 1—5 могут перейти в категорию запроектных.

2.4 Особые локальные воздействия

Эти исходные события аварий являются следствием локальных воздействий в помещениях АЭС: пожары в помещениях БЩУ, кабельных коридорах, помещении приводов стержней СУЗ, падение технологического оборудования (перегрузочных механизмов и др.) на перекрытие реактора или бассейнов выдержки (БВ), прекращение охлаждения, обезвоживание, замерзание и затопление БВ, разрушение газового контура РУ.

В эту же категорию необходимо отнести возможность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) в БВ:

- вследствие падения пеналов на дно БВ,

- вследствие недопустимого перемещения ОТВС в системе хранения и обращения,
- падения технологического оборудования на перекрытие БВ с его разрушением, разрушением группы ОТВС и образование критического объема.

Перечень аварий приведен в таблице 4.

Аварии 1—7 относятся к запроектным, поскольку связаны с одновременным нарушением работы систем безопасности и важных для безопасности, а также сопровождаемые внешними причинами в качестве исходных событий.

Таблица 4. Аварии вследствие особых локальных воздействий

№ п/п	Исходные события аварий
1	Падение на перекрытия реактора крана, перегрузочных средств, строительных конструкций
2	Падение строительных конструкций или оборудования ЦЗ на перекрытия бассейнов выдержки ОЯТ
3	Прекращение охлаждения БВ
4	Обезвоживание БВ
5	Затопление БВ
6	Возникновение СЦР в БВ
7	Разрушение газового контура с поступлением воздуха в графитовую кладку реактора
8	Возникновение пожара в помещениях АЭС (в БЩУ, кабельных коридорах, помещениях СУЗ)
9	Накопление и взрыв водорода в РП, ББЗ, помещениях системы локализации «мокрой» аварии и др.

3. Особенности конструкции РУ ЭГП-6, оказывающие влияние на протекание аварий

Наибольшими радиационными последствиями для персонала и населения являются аварии, сопровождаемые разрушениями локализирующих барьеров безопасности и приводящие к существенному выбросу радиоактивных веществ в атмосферу. При эксплуатации РУ ЭГП-6 Билибинской АЭС радиоактивные вещества образуются и локализуются в нескольких системах:

1) ОЦК: вследствие процессов коррозии сталей, последующих процессов активации продуктов коррозии (ПК) в активной зоне и их дальнейшим перераспределением (удалением на фильтры внутриконтурной очистки, накоплением в застойных зонах и на поверхностях оборудования) в ОЦК;

2) ТВС: при эксплуатации в процессе энерговыработки образуются продукты деления (ПД) и актиноиды;

3) Газовая система содержит азот. Технологическая операция получения азота организована так, что в азоте содержится до 1% природного аргона. В результате процессов активации образуется ^{41}Ar .

Аварии, сопровождаемые разрушением элементов ОЦК, могут приводить к выбросу в окружающую среду как ПК, так и ПД, если разрушение элементов ОЦК сопровождается повреждением твэлов ТВС.

Повреждения газовой системы приводят к выбросу ^{41}Ar .

Анализ схемы ОЦК, экспериментальных данных о накоплении ПК на поверхностях оборудования ОЦК [1], а также конструкции барабана-сепаратора РУ ЭГП-6 установил, что именно он является основным накопителем ПК в ОЦК.

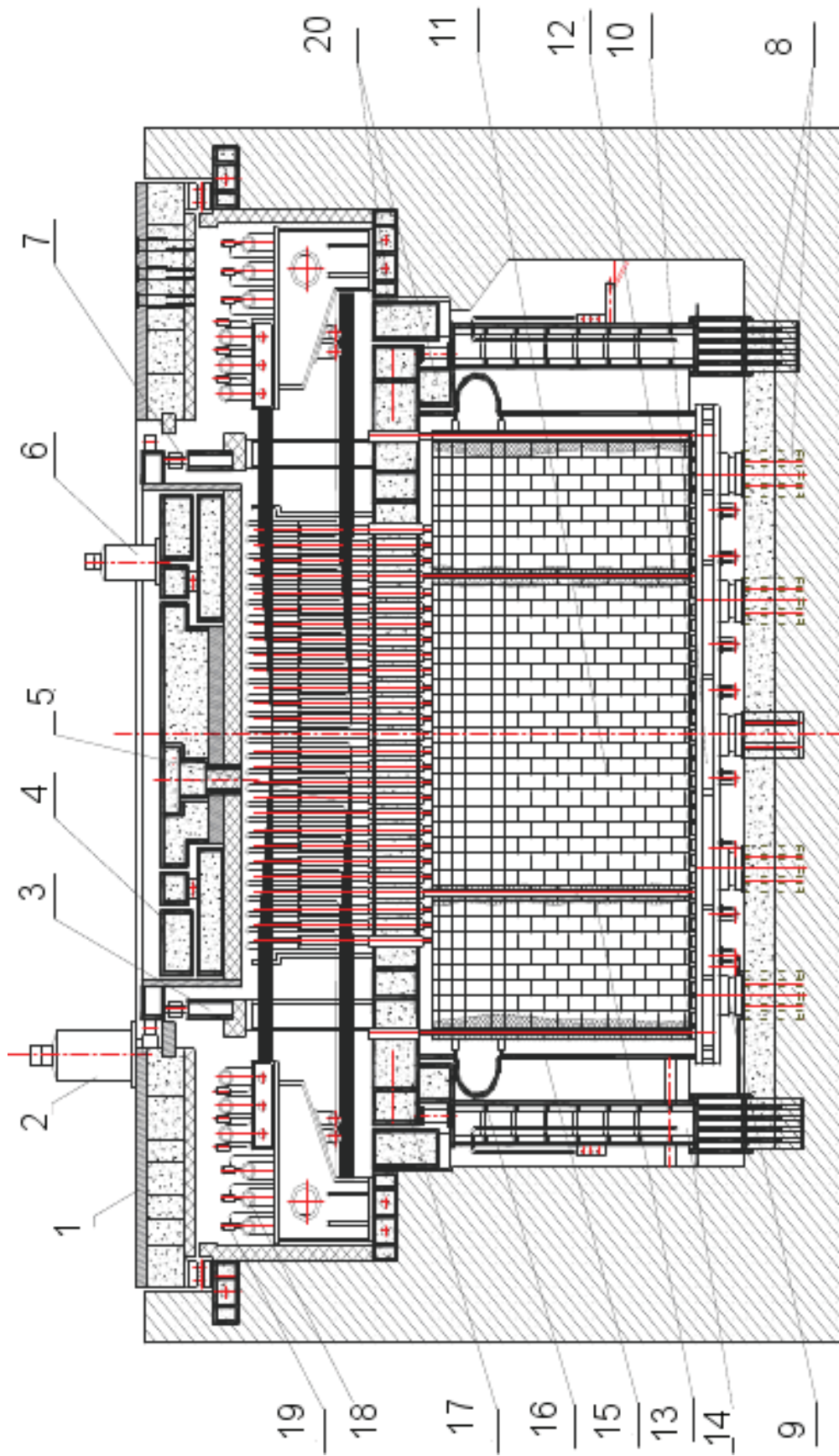
Процессы повреждения топлива, выход радиоактивных ПД из топлива, их транспорт через поврежденные локализирующие барьеры безопасности и выброс в окружающую среду определяются особенностями конструкции и режимом активной зоны РУ (рис. 2):

– наличие графитовой кладки: помимо того, что она является замедлителем и дополнительным элементом радиационной защиты, кладка выполняет роль «теплового аккумулятора», обеспечивая (вследствие большой теплоемкости) большую плавность процессов изменения температуры элементов конструкции активной зоны при переходных и аварийных процессах. Кроме того, кладка выполняет роль абсорбера для ПД при повреждении оболочек твэл и выходе ПД из материала твэлов вследствие аварий, существенно снижая величину выброса ПД в реакторное пространство;

– графитовая кладка находится в герметичном стальном кожухе реактора, который конструктивно связан сварным соединением с нижней опорной плитой и через гофр компенсатора напряжений — с верхней плитой. Пространство под кожухом реактора связано с системой локализации аварий (СЛА);

– ОЦК работает в режиме естественной циркуляции теплоносителя;

– использование дисперсионных трубчатых твэлов в составе тепловыделяющей сборки (рис. 3). При этом теплоноситель, поступающий в ТВС по индивидуальному подводящему трубопроводу, движется по центральной опускной трубе к нижней камере, из которой проходит параллельными потоками в 6 твэл. В твэлах осуществляется подогрев теплоносителя и его частичный переход в паровую фазу. Образовавшаяся пароводяная смесь поступает из твэлов в общую выходную камеру и далее, по индивидуальному отводящему тракту, проходит к отводящему петлевому коллектору ОЦК.



1.Верхнее боковое перекрытие; 2.привод большого вращающегося перекрытия; 3.центральная рама с опорами; 4.центральное вращающееся перекрытие; 5.стойки; 6.привод малого вращающегося перекрытия; 7.опора катковая; 8.закладные части; 9.опорные узлы; 10.нижняя плита; 11.графитовая кладка; 12.канал СУЗ; 13.ТВС; 14.бак биологической защиты; 15.кожух кладки; 16.компенсатор кожуха; 17.верхняя плита; 18.групповые коллекторы с рабочими трубопроводами; 19.вентили запорные; 20.нижний слой защитного перекрытия.

Рис. 2. Схема реактора ЭПП-6 Билибинской АЭС

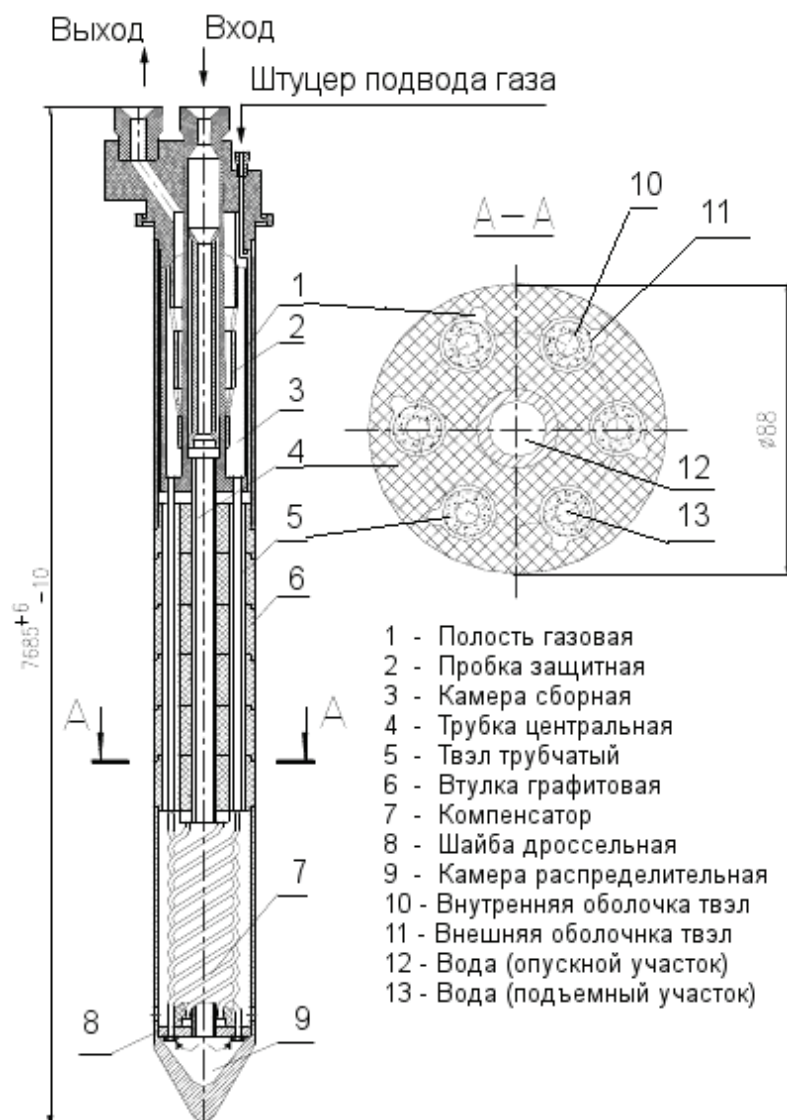


Рис. 3. Схема ТВС РУ ЭГП-6

4. Анализ исходных событий аварий, приводящих к существенному повреждению твэлов в ТВС

Для отбора запроектных аварий, приводящих к наибольшему повреждению локализирующих барьеров и, соответственно, обладающих наибольшими радиологическими последствиями, была построена логическая диаграмма (рис. 4).

Аварии с повреждением твэлов можно разделить на аварии, связанные с повреждением их внутренней или внешней оболочек.

Аварии с повреждением внешней оболочки твэлов, или «сухие» аварии, связаны с нарушением целостности их внешних оболочек. Внешняя трубка оболочки твэла $\varnothing 22 \times 0,3$ мм изготовлена из стали 08X18H10T. Между графитом втулок ТВС и оболочкой имеется вентилируемый газовый зазор (рис. 3). При повреждении внешней оболочки твэла возможен залповый выход инертных радиоактивных газов (ИРГ — продуктов деления) из твэл. Система контроля герметичности оболочек (КГО) формирует соответствующие сигналы на БЩУ и, в случае превышения уставок, вызовет сброс АЗ и останов энергоблока.

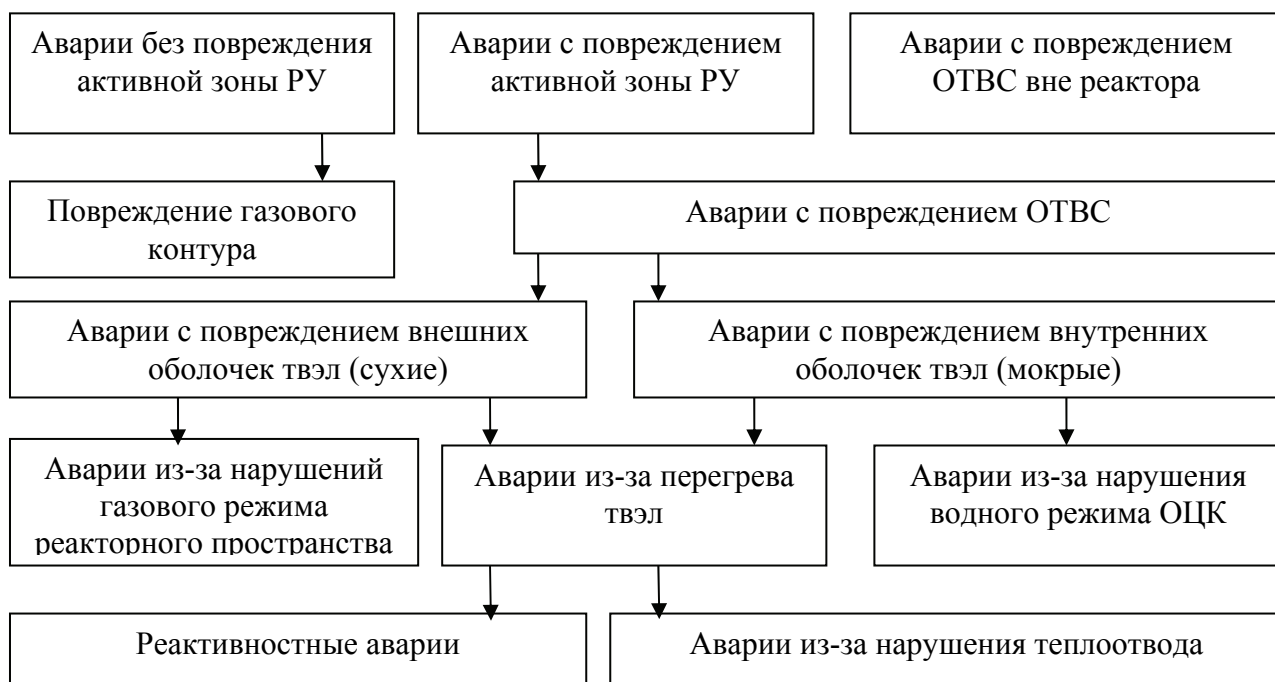


Рис. 4. Логическая диаграмма аварий вследствие внутренних причин

Уровень запроектной аварии может быть достигнут при одновременном разрыве газового контура, что приведет в поступлению ИРГ из поврежденных ТВС, а также активированного аргона (^{41}Ar) из газовой системы в системы вентиляции надреакторного пространства. Однако такое повреждение внешних оболочек ТВЭЛов возможно лишь при превышении температуры $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях наличия давления теплоносителя в ОЦК или $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ при отсутствии теплоносителя [2], т. е. определяется условиями перегрева ТВЭЛ. Данный вид аварии не может рассматриваться без учета условий достижения перегрева ТВЭЛов ТВС, которые могут осуществляться только при нарушениях теплоотвода, связанных в том числе с повреждением внутренних оболочек ТВЭЛ, т. е. «мокрыми» авариями в соответствии с классификацией, предложенной на рисунке 4.

Аварии с повреждением внутренней оболочки ТВЭЛ всегда имеют причиной нарушение теплоотвода. Что, в свою очередь, может быть связано с разрывом ОЦК и потерей теплоносителя, блокированием проходного сечения тракта теплоносителя, а также с резким возрастанием мощности, связанным с неконтролируемым введением положительной реактивности. Все эти причины (разрывы ОЦК на разных участках и неконтролируемое введение положительной реактивности) порождают сложные переходные процессы, оказывающие влияние на изменение параметров теплоносителя, что, в свою очередь, влияет на температуру ТВЭЛов в ТВС, определяя возможности ухудшения теплосъема с поверхности ТВЭЛ и даже их целостность, а также целостность иных элементов оборудования ОЦК.

5. Анализ запроектных аварий по степени повреждения барьеров безопасности, приводящих к выходу радионуклидов за пределы ОЦК

При анализе запроектных аварий, обусловленными внутренними причинами, с точки зрения степени повреждения барьеров безопасности, был сформирован и рассмотрен их следующий перечень, определенный на основании пп. 2—4:

1. Разрыв барабана-сепаратора (БС).
2. Прекращение подачи теплоносителя в один раздаточный коллектор.
3. Авария с полной потерей теплоносителя из ОЦК при отказе всех активных каналов отвода теплоты от РУ.
4. Авария, приводящая к максимальному высвобождению положительной реактивности, при несрабатывании аварийной защиты.
5. Поступление воздуха в графитовую кладку реактора (разгерметизация кожуха реактора, разрушение газового контура).
6. Падение строительных конструкций или перегрузочных средств (перегрузочной машины, установки перегрузочной самоходной):
 - на перекрытие реактора (вращающиеся и разборные);
 - на перекрытие бассейнов выдержки ОЯТ.
7. Накопление водорода (из-за радиолиза, окисления магния) и взрыв его в РП, контуре охлаждения каналов СУЗ, в помещениях системы локализации мокрой аварии.
8. Потеря электропитания собственных нужд от всех внешних и внутренних источников на длительное время.
9. Возникновение пожара в помещениях станции (БЩУ, кабельных коридорах, помещениях СУЗ и др.).

В анализе использовались материалы [1] по феноменологии ЗПА, полученные с использованием аттестованного для РУ ЭГП-6 ПС RELAP5/MOD3.2 [3, 4].

5.1 Разрыв барабана-сепаратора

Авария с разрывом БС, как показано в [1], не приводит к повреждению ТВС по критериям давления и температуры [1, 2] (рис. 5). Однако опасность представляют создаваемый перепад давления — для целостности бокса БС и систем вентиляции, и последующее поступление в помещения АЭС и выброс в окружающую среду радиоактивных продуктов коррозии (РПК), содержащихся в ОЦК (БС, в силу конструктивных особенностей, является основным накопителем РПК).

5.2 Прекращение подачи теплоносителя в один раздаточный коллектор [1]

При несрабатывании АЗ изменение реактивности компенсируется стержнями АР, нейтронная мощность поддерживается на номинальном уровне. На интервале 30—65 секунд, после прекращения расхода через опускной тракт одной петли, с достижением температуры топлива ~920–930 °С возникают разрывы твэл в 22 ТВС (мощностью 260 кВт и выше) из 30 (твэлы оставшихся разогреваются до 785—820 °С).

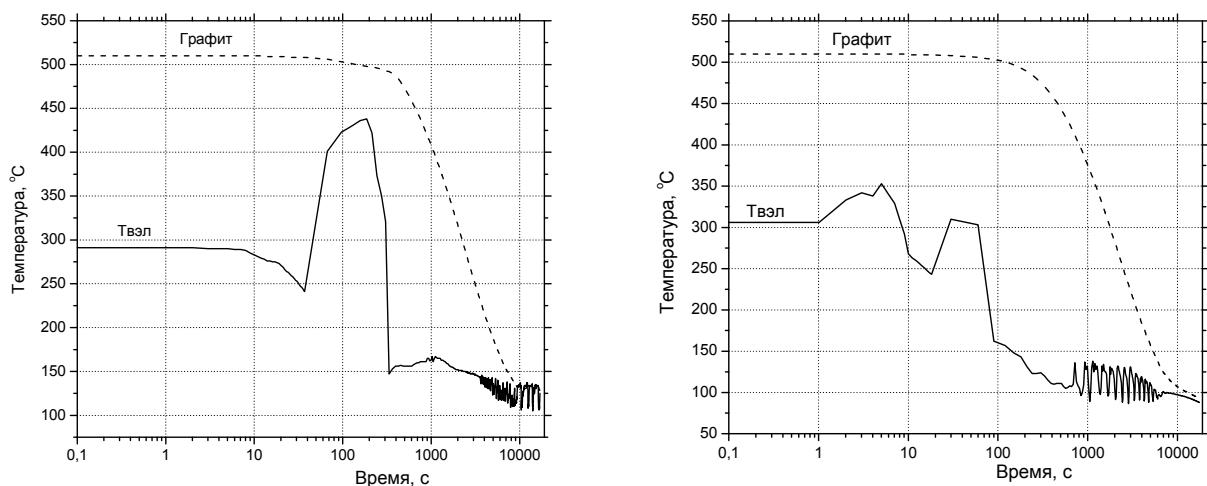
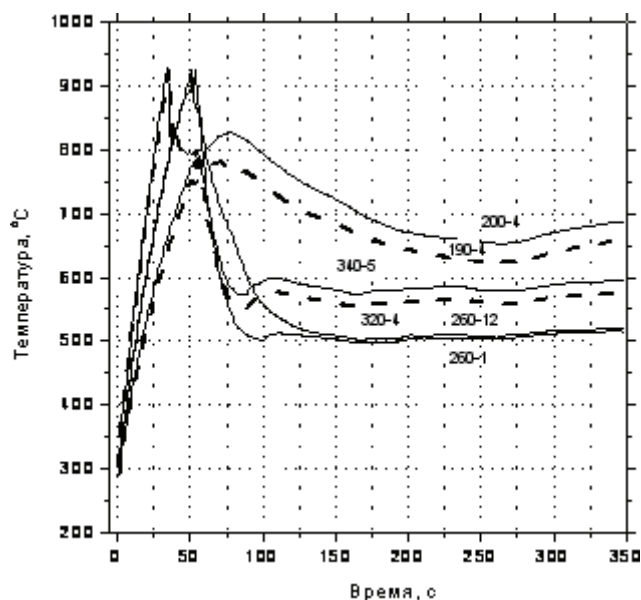


Рис. 5. Температуры топлива (ТВЭЛ) и графита ТВС при авариях с разрывом БС:
а) в нижней части; б) в верхней части



Температура твэла в центре по высоте для всех групп ТВС аварийной петли.
190, 200, 260, 320, 340 — мощность ТВС в кВт, -х — число поврежденных ТВС

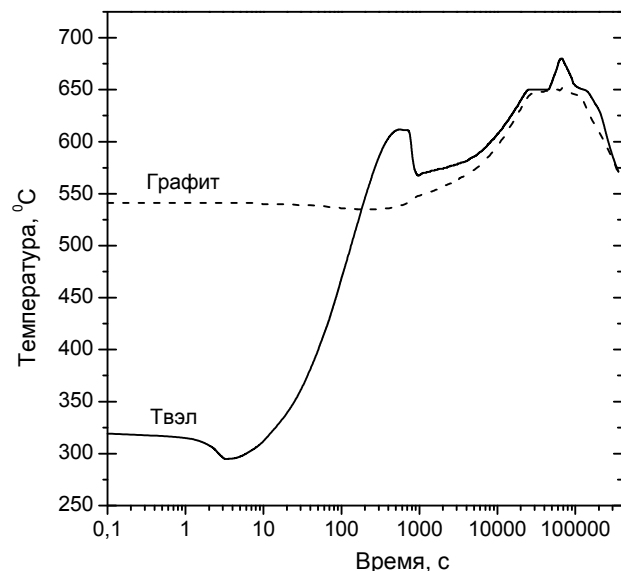
Рис. 6. Блокирование опускного тракта петли, АЗ не срабатывает

После разрыва температура твэлов поврежденных ТВС снижается до $\sim 500\text{--}590\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в неповрежденных — снижается до $\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 6). Через разрывы твэл начинается интенсивное истечение теплоносителя, выносящего продукты деления, в кладку реактора. Это приводит к росту давления в полости реактора, и примерно через 1 минуту реализуются условия для движения верхней плиты вверх (при превышении уровня избыточного давления $0,122\text{ МПа}$) с последующим разрывом кожуха реактора. Теплоноситель, после попадания в кладку реактора в виде воды и пара, выводится из реакторного пространства через систему СЛА в атмосферу и частично в дренажные баки. Опорожнение контура (при оцененных расходах истечения) происходит в течение 0,5 часа. Этого времени достаточно для возможности введения стержней АЗ в реактор.

5.3 Авария с полной потерей теплоносителя из ОЦК при отказе всех активных каналов отвода теплоты от РУ [1]

Рассматриваемым сценарием аварии является разрыв опускающего штуцера сепаратора с последующим изменением параметров режима. Срабатывание аварийной защиты происходит через 0,2 с после разрыва. На начальном этапе аварии температура твэлов снижается вследствие снижения мощности и интенсивного теплоотвода истекающим теплоносителем. Через ~80 с давление снижается до атмосферного и начинается рост температуры твэлов (сохраняется высокое энерговыделение, высокая температура графита, отсутствие теплоотвода) с локальным максимумом во временном интервале 500—700 с на уровне 640 °С. Далее уменьшение остаточного энерговыделения и отвод тепла к графиту кладки (который становится холоднее топлива) приводит к временному понижению температуры твэлов (рис. 7).

Температурный режим для активной зоны в целом характеризуется уменьшением локальных неравномерностей, возрастанием температуры в центральной области активной зоны и снижением ее на периферии отражателя. Это снижение постепенно распространяется вглубь активной зоны, между тем как в центре активной зоны процесс возрастания температуры продолжается ~18 часов. Максимально достигаемая в этом процессе температура твэла ТВС составляет 682 °С. При этом повреждений твэлов в ТВС с выходом продуктов деления из них не происходит.



Твэл — температура твэла ТВС максимальной мощности в центре по высоте активной зоны,
Графит — температура графита в центре по высоте активной зоны

Рис. 7. Авария с полной потерей теплоносителя из ОЦК при отказе всех каналов отвода тепла. Аварийная защита срабатывает

5.4 Авария, приводящая к максимальному высвобождению положительной реактивности, при несрабатывании аварийной защиты [1]

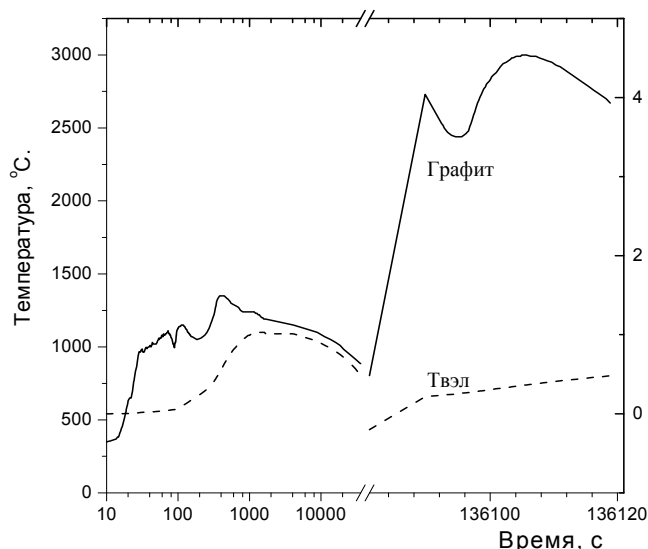
Авария с высвобождением максимальной положительной реактивности приводит к резкому росту мощности (на 419%), повышению давления в ОЦК, массовому разрушению ТВЭлов в 126 ТВС на начальном этапе, с последующим развитием разрушений, разгерметизацией ОЦК и истечением теплоносителя в надреакторное пространство.

После осушения активной зоны мощность несколько колеблется из-за изменения реактивностей от изменения температуры топлива, графита, концентрации Хе. Начинается разогрев ТВЭлов и кладки (рис. 8) в условиях отсутствия охлаждения со стороны ОЦК, но при продолжающемся охлаждении с помощью каналов СУЗ, а также потерь тепла. Максимальная достигаемая после осушения температура ТВЭлов равна 1400 °С (~500 секунда), в этот период происходит расширение зоны повреждения ТВС.

В случае если в течение первых 20—25 часов не удалось ввести в зону поглощающие стержни вручную, то через ~38 часов происходит разотравление реактора, приводящее к скачку мощности до 120% и возрастанию температуры ТВЭлов до 3000 °С, что приведет к дополнительному разрушению еще 15 ТВС.

Необходимо отметить, что к настоящему времени разработана и вводится в эксплуатацию система введения дополнительной отрицательной реактивности в условиях тяжелой запроектной аварии, позволяющая надежно заглушить реактор.

Авария сопровождается поступлением продуктов деления из поврежденных ТВС на всех ее этапах, сначала с истекающим теплоносителем, затем с конвективными токами воздуха. Из всех аварий, связанных с повреждением ТВС, является наиболее тяжелой (по количеству ТВС и степени их разрушения).



ТВЭЛ — температура ТВЭла ТВС максимальной мощности; Графит — температура графита

Рис. 8. Авария, сопровождающаяся введением максимальной положительной реактивности

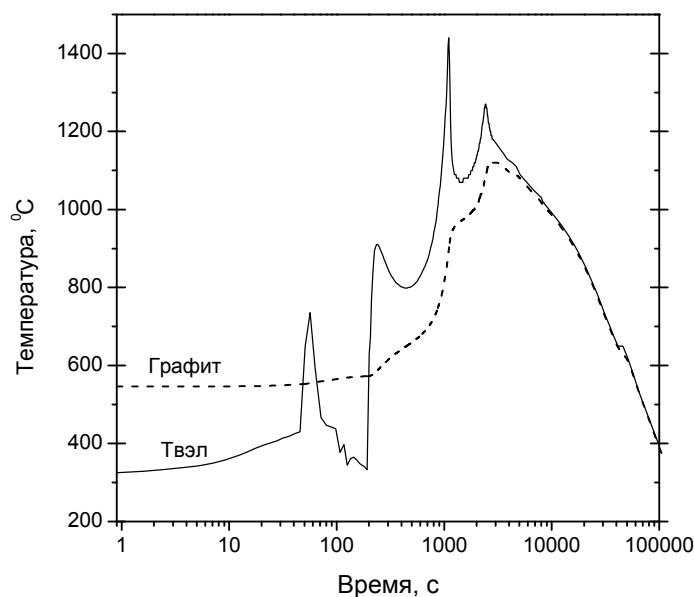
5.5 Падение строительных конструкций или перегрузочных средств (перегрузочной машины, установки перегрузочной самоходной)

Для данного варианта запроектной аварии были рассмотрены сценарии падения строительных конструкций или перегрузочных средств:

- на перекрытие реактора (вращающиеся и разборные) [1];
- на перекрытие бассейнов выдержки ОЯТ [1].

При запроектной аварии, сопровождаемой падением строительных конструкций (верхнего перекрытия, частей стен бокса БС) или перегрузочного оборудования на перекрытие реактора (за исключением предельного случая — падения верхней части стены от отметки +4,55 м до отметки +15,9 м, площадью $11,35 \times 18$ м) возможны изгиб и смятие с полным перекрытием проходного сечения отводящих трубопроводов каналов ТВС, калачей каналов СУЗ и ТВС, а также отводящих трубопроводов охлаждения каналов СУЗ, разрывы отдельных трубопроводов и калачей. В предельном случае к перечисленному добавится срез швов приварки стояков каналов СУЗ и перемещение каналов СУЗ в реакторное пространство. При отказе АЗ и одновременном перемещении вверх всех 16 стержней системы ручного регулирования (РР) на 10 см (предельный случай) происходит рост мощности (до 216 % за 51 секунду), что в условиях потери теплоотвода через 1061 секунд приводит к росту температуры оболочек твэл в 63 ТВС (рис. 9) и их повреждению, сопровождающемуся выходом продуктов деления.

Сценарий запроектной аварии с падением тяжелого перегрузочного оборудования на перекрытие бассейна выдержки (БВ) ОТВС также основан на консервативном подходе к последствиям и предусматривал механическое разрушение всех 35 ОТВС, выгруженных из реактора во время плановой выгрузки, сопро-



Твэл — температура твэла в центре по высоте ячейки ТВС максимальной мощности.

Графит — температура графита в центре по высоте ячейки ТВС максимальной мощности

Рис. 9. Падение строительных конструкций. Одновременное перемещение вверх 16 РР на 0,10 м. Аварийная защита не срабатывает

вождаемое выходом продуктов деления из них. Вместе с тем температуры фрагментов твэл не превысят 170 °С, что не приведет к существенному выходу ПД из матричного материала твэла.

5.6 Поступление воздуха в графитовую кладку реактора (разгерметизация кожуха реактора, разрушение газового контура) [1]

Разрушение газового контура реактора (разгерметизация кожуха или "гилютинное" разрушение трубопроводов газового контура) сопровождается поступлением через ТВС в реакторное пространство воздуха с расходом, равным рабочему расходу газа — 125 м³/ч. Потенциальными последствиями являются: взаимодействие кислорода воздуха с графитовым замедлителем, активирование аргона воздуха, вынос активированного аргона в помещения АЭС. Возникает радиационная опасность (для персонала и населения), отсутствуют средства предотвращения такой аварии.

Вместе с тем следует отметить, что при таком сценарии повреждения ТВС не происходит, и радиационная опасность определяется исключительно активацией аргона.

5.7 Накопление водорода (из-за радиолиза, окисления магния) и взрыв его в РП, контуре охлаждения каналов СУЗ, в помещениях системы локализации «мокрой» аварии [1]

В реакторной установке ЭГП-6 в условиях нормальной эксплуатации генерация водорода происходит в воде ОЦК, в контуре каналов СУЗ, баков биологической защиты (ББЗ) и реакторном пространстве (РП). В аварийных условиях, при наличии единичной «мокрой» аварии с ТВС или при массовых «мокрых» авариях, интенсивность образования водорода в реакторном пространстве возрастает.

Опасность возникновения опасных концентраций водорода в ОЦК возникает вдали от РУ на выхлопе из эжекторов, отсасывающих парогазовую смесь из конденсатора турбины. Требуемый уровень безопасности обеспечивается разбавлением парогазового потока из конденсатора турбины атмосферным воздухом в поток между первой и второй ступенями эжекторов.

Содержание водорода в контуре СУЗ (и вынос в деаэрактор) было оценено на основании прямых измерений и составило 0,02 % объемных, что не является опасным. Аналогично определялась и концентрация водорода в воздушном пространстве баков биологической защиты (ББЗ) при работе реакторов на номинальной мощности. Она составляет 0,15 % объемных (значительно ниже взрывоопасной концентрации).

Нарушение вентиляции воздушного пространства ББЗ может произойти при уменьшении проходного сечения линии забора или отвода воздуха. При полном перекрытии проходного сечения каким-либо посторонним предметом взрывоопасная концентрация водорода в воздушном пространстве ББЗ может быть до-

стигнута за ~24 часа. Для контроля циркуляции воздуха проводится периодическое (один раз в неделю) измерение содержания водорода в воздушной среде ББЗ.

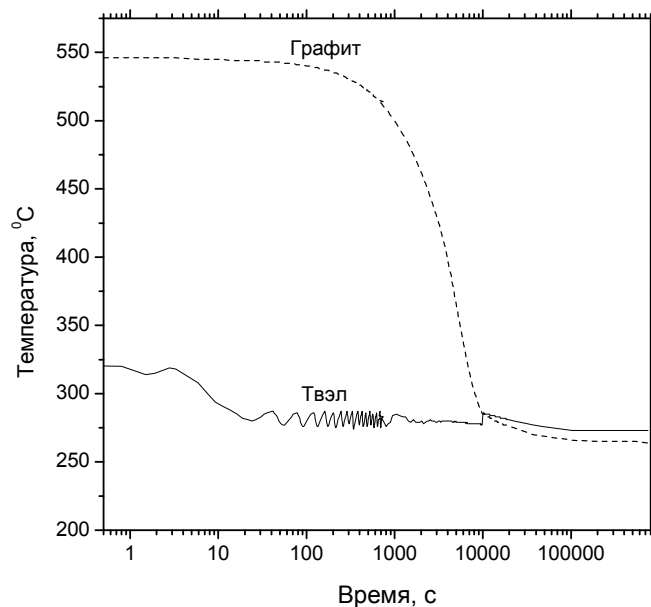
В условиях нормальной эксплуатации водород в объеме РП образуется за счет радиолитического разложения имеющихся в азоте паров воды (до 0,01 нл/ч) и взаимодействия паров воды со сталью элементов активной зоны (0,14 нл/ч). Взаимодействием паров воды с графитом кладки реактора при температурах до 500 °С можно пренебречь. Концентрация водорода в объеме газового контура реактора при этом будет менее $0,6 \cdot 10^{-3} \%$ объемных (существенно меньше опасной).

При проектных «мокрых» авариях (разрыв оболочек ТВЭЛ 1 ТВС, поступление теплоносителя в РП) реактор останавливается аварийной защитой (АЗ), при этом (по опыту эксплуатации реакторов АМ, АМБ-100 и АМБ-200), по консервативным оценкам, в течение первого часа после останова реактора образуется 54 нл водорода. Этот водород не несет опасности взрыва, т. к. выносится потоком парозотной смеси в систему локализации «мокрой» аварии. Возможная концентрация водорода составит ~0,1 % и весьма далека от опасной.

Среди запроектных аварий с повреждением ТВС наибольшие разрушения ТВЭЛОВ в ТВС, сопровождаемые потерей теплоносителя ОЦК, происходят при аварии с вводом максимально возможной положительной реактивности (п. 5.4). Объем образовавшегося водорода, по консервативным оценкам, составит 2,5 м³, и практически весь водород уходит в надреакторное пространство и далее — в реакторный зал (прежде всего выносится вытяжной вентиляцией надреакторного пространства, попасть в реакторный зал практически невозможно). Взрывоопасная концентрация не достигается за счет больших объемов помещений. Даже если допустить, что весь образовавшийся водород остается в объеме газового контура, его концентрация составит $2 \cdot 10^{-2} \%$ объемных, и в парозотной среде, заполняющей газовый контур, вероятность взрыва водорода исключается.

5.8 Потеря электропитания собственных нужд от всех внешних и внутренних источников на длительное время [1]

Потеря электропитания собственных нужд всех категорий (первая, самое надежное питание, — аккумуляторные батареи, вторая — дизель-генератор с временем запуска ~15 секунд, третья — внешняя сеть) вызывает срабатывание АЗ-1, происходит закрытие стопорного клапана турбины. В зону погружаются восемь стержней АЗ и десять РС-АЗ. Прекращается подача питательной воды в ОЦК, останавливаются насосы контура СУЗ, насосы технической воды, вентиляторы вентсистем. Основной контур сохраняет герметичность. Остаточное энерговыделение в ТВС снимается кипящим теплоносителем ОЦК, часть которого, вследствие роста давления, удаляется через главный предохранительный клапан (ГПК). Температура оболочек ТВЭЛ (рис. 10) не превысит опасных значений, топливо сохраняет герметичность.



Твэл — температура твэла ТВС максимальной мощности.
 Графит — температура графита ТВС максимальной мощности

Рис. 10. Потеря электропитания собственных нужд от всех внешних и внутренних источников

5.9 Возникновение пожара в помещениях станции (БЩУ, кабельных коридорах, помещениях СУЗ и др.) [1]

К неблагоприятным последствиям приводит аварийная ситуация с исходным событием «пожар в кабельных коридорах», что, в свою очередь, ведет к потере электропитания всех категорий. При этом повреждений твэлов не происходит, отсутствует опасность выхода радиоактивных продуктов деления в помещения АЭС и в окружающую среду. Совмещение нескольких исходных событий, связанных с пожаром (пожар в кабельных коридорах и на БЩУ, пожар в кабельных коридорах, помещении приводов СУЗ и на БЩУ) не приносит принципиальных отличий в рассмотренные аварийные ситуации и не приводит к более неблагоприятным последствиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ уменьшил общее количество ЗПА для проведения анализа, а по его результатам все ЗПА были отнесены к 3 категориям и для каждой выявлены аварии, обладающие наибольшими последствиями:

– аварии с наибольшим повреждением барьеров безопасности: с массовым повреждением ТВС, транспортом радиоактивных продуктов деления и продуктов коррозии через помещения АЭС в окружающую среду. Для этой категории аварий наибольшими последствиями обладает авария с самоходом двух пар стержней АР, сопровождаемая несрабатыванием системы аварийной защиты, приводящая к повреждению твэлов в 126 (из 273) ТВС;

– аварии с повреждением барьеров безопасности, при которых не происходит повреждение топлива, но сопровождающиеся повреждением ОЦК и транспортом накопленных в ОЦК радиоактивных продуктов коррозии через помещения АЭС в окружающую среду. Для этой категории аварий наибольшими последствиями обладает ЗПА с разрывом барабана-сепаратора;

– аварии, связанные с повреждением газового контура и поступлением ИРГ в помещения станции и атмосферный воздух. Для этой категории аварий наибольшими последствиями обладает разрушение газового контура.

Поскольку выявленные аварии в каждой группе покрывают по величине последствия аварии в группах, то для обоснования безопасности населения достаточно выполнить оценки радиологических последствий этих трех аварий.

Для оценки приемлемости радиологических последствий ЗПА необходимо рассмотреть протекание и последствия аварии с наибольшим повреждением барьеров безопасности — аварии с самоходом двух пар стержней АР, сопровождаемой несрабатыванием системы аварийной защиты.

В качестве критерия обеспечения безопасности населения, проживающего в районе размещения Билибинской АЭС, авторами предлагается рассматривать отсутствие необходимости его эвакуации при ЗПА с наибольшим повреждением барьеров безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет по углубленной оценке безопасности. Билибинская АЭС. Блоки 1-4. Глава 5 и Раздел 4.3 Приложения 4 / ОАО «Концерн Росэнергоатом», АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», АО «Атомэнергoproject», АО «Ижорские заводы», 2016.
2. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07. Ростехнадзор, 2007.
3. RELAP5/MOD3.2 Code Manual. User's Guide and Input Requirements. NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, Vol.2. INEL, 1995, 344 p.
4. Аттестационный паспорт RELAP5/MOD3.2, применительно к расчетам для реактора ЭГП-6. № 317 от 9.10.2012. Ростехнадзор, 2012.