

ПРИМЕНЕНИЕ КОДА COCOSYS ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ АЭС С ВВЭР-1200 ПРИ АВАРИИ С БОЛЬШОЙ ТЕЧЬЮ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

А. В. Дойникова, Д. Л. Третинников

Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь эксплуатируется энергоблок № 1 атомной электрической станции проекта АЭС-2006 с реакторной установкой (РУ) типа ВВЭР-1200 модели В-491 и готовится к пуску второй энергоблок.

В соответствии с требованиями НП-010-16 [1] в проекте атомной станции должно быть обосновано, что максимальное значение избыточного давления среды в пространстве, ограниченном защитной оболочкой (ЗО), при проектных авариях (ПА) не превысит проектного давления. Должно быть также обосновано непревышение значения проектной температуры при проектных авариях. В соответствии с требованиями МАГАТЭ NS-G-1.2 [2] необходимо использовать компьютерные коды по теплогидравлике, основанные на детерминистическом подходе к анализу безопасности.

В соответствии с требованиями норм МАГАТЭ SSG-2 [3] и NS-R-1 [4] при анализе безопасности АЭС должна проводиться независимая оценка обоснования безопасности экспертами, не связанными с проектировщиками. Расчетное обоснование безопасности АЭС должно выполняться с применением программных средств, отличных от применяемых проектировщиками. Для расчета теплогидравлических параметров под ЗО при ПА и запроектных авариях (ЗПА) российскими проектировщиками АЭС с ВВЭР используются программные средства (ПС) КУПОЛ-М [5], АНГАР [6].

В докладе представлены результаты расчетного моделирования развития аварии в защитной оболочке АЭС с РУ ВВЭР-1200 с помощью кода COCOSYS.

В качестве вычислительного инструмента использовался программный код COCOSYS (версия v2.4), официально переданный в распоряжение специалистов научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси немецкими разработчиками (GRS) в рамках международной программы BE/RA/07 «Развитие технического сотрудничества в области ядерной безопасности».

Для моделирования была выбрана проектная авария с «большой» течью теплоносителя: разрыв главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду850 полным сечением на входе в реактор с учетом обесточивания блока.

Описание программного кода COCOSYS. Программный код COCOSYS (Containment Code System) разрабатывается Обществом по безопасности ядерных реакторов и установок (Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS), Германия).

ПС COCOSYS – основанный на современных детерминистических моделях теплогидравлический реалистический код, позволяющий моделировать физические процессы, протекающие под защитной оболочкой легководного ядерного реактора при протекании аварийных процессов [7].

Программное средство предназначено для моделирования изменения во времени теплофизических параметров и фракционного состава парогазовой среды в помещениях ЗО и других параметров при различных условиях эксплуатации с учетом работы систем безопасности.

В программном коде используется многозонный метод представления исследуемого объекта: моделируемый реальный объект условно делится на взаимосвязанные расчетные зоны (контрольные объемы), каждая из которых имеет несколько связей с другими зонами или с окружающей средой. Предполагается, что газокapельная среда в расчетной зоне

идеально перемешана (постулируются гомогенные условия), т.е. определяются средние параметры среды в каждом контрольном объеме. Гидродинамические процессы моделируются как перенос массы, импульса и энергии между зонами.

Каждая расчетная зона имеет заданный свободный объем, заполненный атмосферой. Атмосфера зоны состоит из пара, заданного количества неконденсирующихся газов (O_2 , N_2 , CO , CO_2 , He , H_2) и капель жидкости в виде тумана. Постулируется, что всегда существует термодинамическое равновесие с газовой фазой.

Зона может быть полностью или частично ограничена поверхностями стен. Стена может состоять из нескольких слоев материалов с различными теплофизическими свойствами. В программе учитывается тепломассообмен между атмосферой зоны и граничными поверхностями – стенами, полом и потолком.

ПС COCOSYS содержит модели активных и пассивных систем безопасности, предусмотренные проектом АЭС, включая спринклерную систему, систему удаления водорода, систему вентиляции и т.п.

ПС COCOSYS имеет модульную структуру и состоит из нескольких программных модулей (ПМ), каждый из которых обеспечивает моделирование некоторой части всей совокупности рассматриваемых процессов.

Основные модули, образующие ПС COCOSYS:

- ПМ THY (Thermal Hydraulic) – основной теплогидравлический модуль, моделирующий термогидродинамические процессы в ЗО, распространение газовой фазы, распределение давлений в помещениях, горение водорода, поведение систем безопасности и т. д.;
- ПМ AFP (Aerosol-Fission Product) – модуль, моделирующий поведение аэрозолей и продуктов деления;
- ПМ CCI (Core Concrete Interaction) – модуль, моделирующий взаимодействие остатков активной зоны (кориума) с бетоном.

ПС COCOSYS применяется во взаимодействии с другими кодами, моделирующими процессы, протекающие при аварии с течью теплоносителя в пределах ЗО. Расчет параметров первого контура при разрывах трубопроводов выполняется с помощью соответствующих теплогидравлических кодов (ATHLET, ТРАП КС, RELAP и т.п.). Рассчитанная скорость изменения выбросов массы и энергии теплоносителя через разрыв в герметичные помещения является граничным условием для задачи моделирования физических процессов, протекающих под защитной оболочкой.

Описание защитной оболочки АЭС с РУ ВВЭР-1200. Назначение защитной оболочки – не допустить выхода радиоактивности во внешнюю среду в случае максимальной проектной аварии (МПА), ограничить выбросы в случае ЗПА, а также оградить оборудование и внутренние конструкции здания реактора от возможных внешних воздействий. Для достижения указанных целей оболочка выполняется двойной (рис. 1). Конструкция состоит из внутренней герметичной оболочки, выполняющей локализующие функции, и дополнительной внешней защитной оболочки.

Внутренняя герметичная оболочка является защитой от внутренних воздействий, обеспечивает герметичность при всех режимах работы АЭС, включая аварийные, и является системой локализации аварии. Выполнена из предварительно напряженного железобетона, что делает ее несущей конструкцией, хорошо воспринимающей растягивающие напряжения при действии аварийного избыточного давления.

Наружная защитная оболочка служит физической защитой от внешних воздействий и выполняется из обычного, не преднапряженного железобетона, так как применение последнего нецелесообразно в случае наличия внешних ударных воздействий, при которых возникают значительные дополнительные сжимающие усилия.

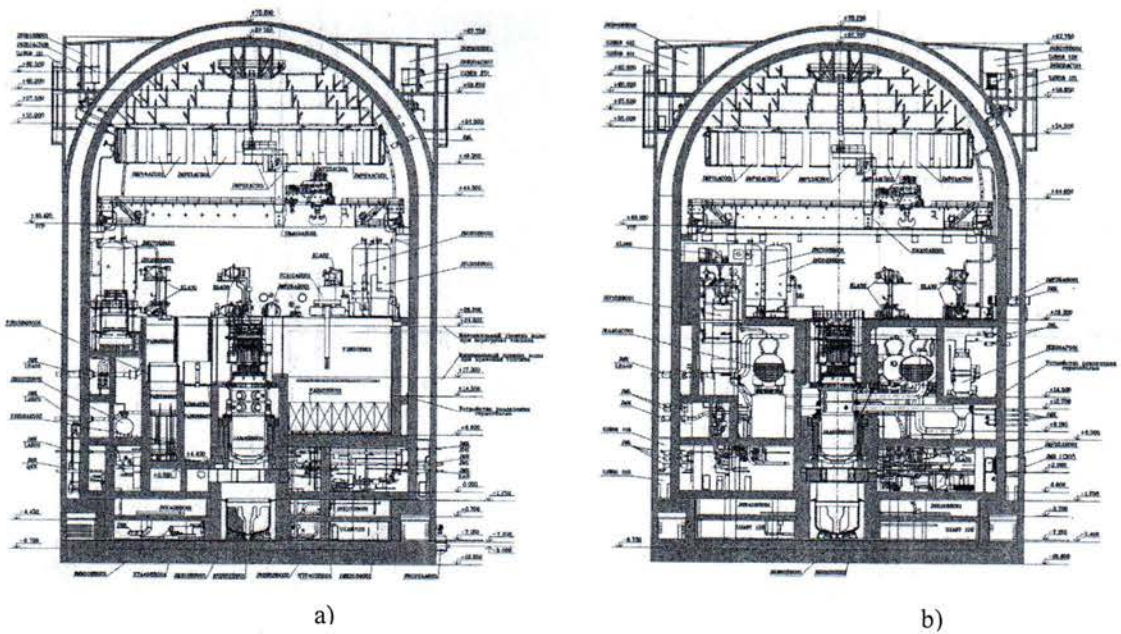


Рис. 1. Общий вид двойной оболочки АЭС с ВВЭР-1200 с обозначением основного оборудования в помещениях здания реактора: а) разрез 1-1; б) разрез 2-2

Внутренняя герметичная оболочка представляет собой сооружение, состоящее из цилиндрической части и полусферического купола. Внутренний диаметр 44,00 м. Нижняя, горизонтальная часть в бетоне фундаментной плиты расположена на отметке минус 8,730. Внешняя поверхность купола внутренней оболочки находится на отметке +67,700. Толщина стены в цилиндрической части равна 1,2 м, в сферическом куполе – 1,1 м. Внутренняя поверхность облицована для герметичности углеродистой сталью толщиной 6 мм.

Внешний диаметр наружной защитной оболочки 51,60 м. Нижняя часть наружной оболочки находится на отметке минус 1,250. Верх купола наружной защитной оболочки соответствует отметке +70,200. Толщина стены равна 800 мм. Ширина зазора между оболочками 1,8 м в цилиндрической части и в верхней части. На внешней стороне наружной защитной оболочки находятся помещения оборудования и трубопроводов системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки (СПОТ ЗО) и пассивного отвода тепла через парогенераторы (СПОТ ПГ).

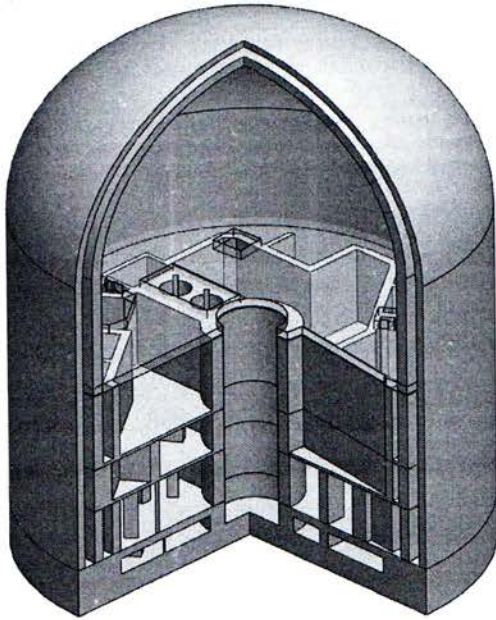
Внутри ЗО центральное место занимает железобетонная шахта реактора с расположенным в ней реактором. По разные стороны от шахты реактора расположены бассейн выдержки и шахты ревизии внутрикорпусных устройств, два бокса парогенераторов (ПГ) и четыре отсека для главных циркуляционных насосных агрегатов (ГЦНА).

Внутренние бетонные перекрытия не находятся в контакте с предварительно напряженным цилиндром оболочки. Между стеной оболочки и перекрытием предусмотрен зазор 200 мм. Распыливаемая спринклерной системой вода при аварии стекает через зазоры с главного перекрытия на отметке +26,300 на отметку 0,000 и через отверстия для слива воды в баки-приямки запаса борированной воды, расположенные под отметкой 0,000, отметка днища баков минус 3,700.

Для аварийного режима типа «большая течь» теплоносителя проектом установлены следующие проектные пределы параметров в помещениях защитной оболочки:

- абсолютное давление от 0,079 до 0,5 МПа;
- температура до 150 °С (допустимо до 190 °С в течение 70 с).

a)



b)

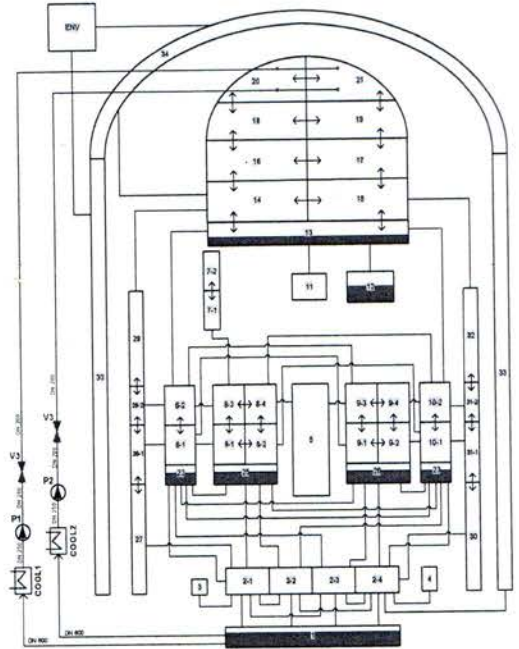


Рис. 2. Модель защитной оболочки АЭС: а) трехмерная геометрическая модель; б) нодализационная схема

Расчетная область защитной оболочки АЭС с ВВЭР-1200 представляет собой весь внутренний объем ЗО. Была создана трехмерная геометрическая модель защитной оболочки (рис. 2, а). Для дискретизации расчетной области (разделения на контрольные объемы) была разработана схема нодализации (рис. 2, б). Она содержит информацию о связях (соединениях) между контрольными объемами, через которые осуществляется движение среды между помещениями.

Нодализационная схема ЗО содержит:

- 48 контрольных объемов,
- 89 атмосферных и 64 дренажных соединений,
- 160 теплообменных структур.

Контрольные объемы R1 – R32 задают помещения под внутренней герметичной оболочкой, объемы R33 и R34 моделируют межоболочечное пространство, объем «ENV» – окружающую среду, задание которой необходимо для моделирования утечки из ЗО и теплообмена с окружающей средой через строительные конструкции.

Стены, перекрытия защитной оболочки, а также оборудование, расположенное внутри помещений, моделируются тепловыми структурами (теплообменными поверхностями), которые задаются как эквивалентные прямоугольные пластины.

Нодализационная схема ЗО включает модель спринклерной системы, которая осуществляет забор воды из баков-приямков запаса борированной воды (моделируются одним контрольным объемом R1) и по двум каналам, включающим теплообменник, спринклерный насос и клапан, по коллектору подает борированную воду в атмосферу подкупольного пространства (контрольные объемы R20, R21), где вода распыскивается спринклерными соплами.

Описание сценария протекания аварии. Рассматривалась проектная авария с потерей теплоносителя первого контура при разрыве ГЦТ на холодной нитке с учетом обесточивания блока.

Принятые при расчете допущения:

- течь из холодной нитки первого контура – предполагается мгновенный гильотинный разрыв трубопровода Ду850 полным сечением (в действительности же раскрытие сечения происходит в течение некоторого промежутка времени);
- предполагается, что одновременно с разрывом ГЦТ происходит обесточивание блока, что приводит к закрытию стопорных клапанов (СК) турбины, отключению ГЦНА, прекращению подачи питательной воды;
- предполагается, что срабатывание аварийной защиты (АЗ) происходит по второму сигналу (первый сигнал пропускается);
- задержка в подаче борного раствора от насосов САОЗ составляет 40 с;
- расчет выполнялся для двух работающих каналов спринклерной системы: в качестве допущения принято, что один канал находится на момент начала аварии в ремонте, ко второму применяется принцип единичного отказа;
- при превышении давления в помещениях ЗО значения 0,129 МПа, подается сигнал на запуск работы спринклерной системы. В расчете консервативно принято, что включение системы происходит через 150 с после начала аварии;
- функционирование системы СПОТ ЗО не учитывается, т.е. теплообменники-конденсаторы моделируются как тепловая структура, а отвод тепла к бакам аварийного отвода тепла (БАОТ) консервативно не учитывается.

В таблице приведена хронологическая последовательность событий при протекании аварии в реакторной установке.

Таблица. Хронологическая последовательность событий при протекании аварии

Время, с	Событие	Блокировка, уставка на срабатывание или иная причина
0,00	Разрыв ГЦТ на входе в реактор Обесточивание блока Начало формирования сигнала аварийной защиты (первый сигнал пропускается)	Исходное событие Принятое допущение Обесточивание блока
0,02	Начало формирования сигнала АЗ (второй сигнал)	Давление над активной зоной менее чем 15,2 МПа при мощности реактора более 75 % $N_{НОМ}$
0,60	Полное закрытие СК турбины	Обесточивание блока
2,02	Начало падения поглощающих стержней СУЗ	Действие АЗ
7,20	Начало подачи борного раствора из емкостей САОЗ	Снижение давления в реакторе до 5,89 МПа
41,90	Начало подачи борного раствора насосами активной части САОЗ	Уменьшение запаса до кипения в любой из горячих ниток петель менее 8 °С (с учетом задержки с момента обесточивания и времен формирования сигнала 40,0 с)
67,50	Окончание подачи борного раствора из емкостей САОЗ	Опорожнение емкостей
3600,00	Окончание расчета	

Начальные условия в помещениях защитной оболочки консервативно приняты:

- начальное давление среды в помещениях защитной оболочки – 0,103 МПа (максимальное абсолютное давление для режима нормальной эксплуатации);
- начальная температура парогазовой среды в помещениях защитной оболочки – 60 °С (максимальная температура в ЗО в режиме нормальной эксплуатации);
- начальная относительная влажность в помещениях ЗО – 90 % (максимальная относительная влажность в режиме нормальной эксплуатации АЭС).

Результаты расчетов. Результаты расчетов изменения во времени абсолютного давления и температуры парогазовой среды в защитной оболочке при описанном сценарии аварии представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

Изменение теплогидравлических параметров в объеме защитной оболочки определяется соотношением темпа поступления пара из первого контура (скорость выхода массы и энергии теплоносителя через разрыв) и скоростью конденсации пара на поверхностях «холодных» строительных конструкций и оборудования.

Из графиков видно, что с первых секунд после разрыва ГЦТ давление и температура в помещениях защитной оболочки резко увеличиваются. Через 2,02 с вследствие резкого падения давления в первом контуре срабатывает аварийная защита: начало падения поглощающих стержней (ПС) СУЗ. В 7,20 с давление в реакторе снижается до 5,89 МПа, срабатывают быстродействующие обратные клапаны Ду300 гидроемкостей САОЗ, и вода из гидроемкостей поступает в реактор. Вследствие этого темп роста давления и температуры в защитной оболочке немного снижается.

Максимальные значения давления среды в ЗО достигается на 21-й секунде и составляет 0,376 МПа. Температура парогазовой среды в подкупольном пространстве через 14 с достигает пикового значения 181 °С. Затем значения параметров начинают снижаться вследствие уменьшения расхода массы и энергии теплоносителя через разрыв первого контура.

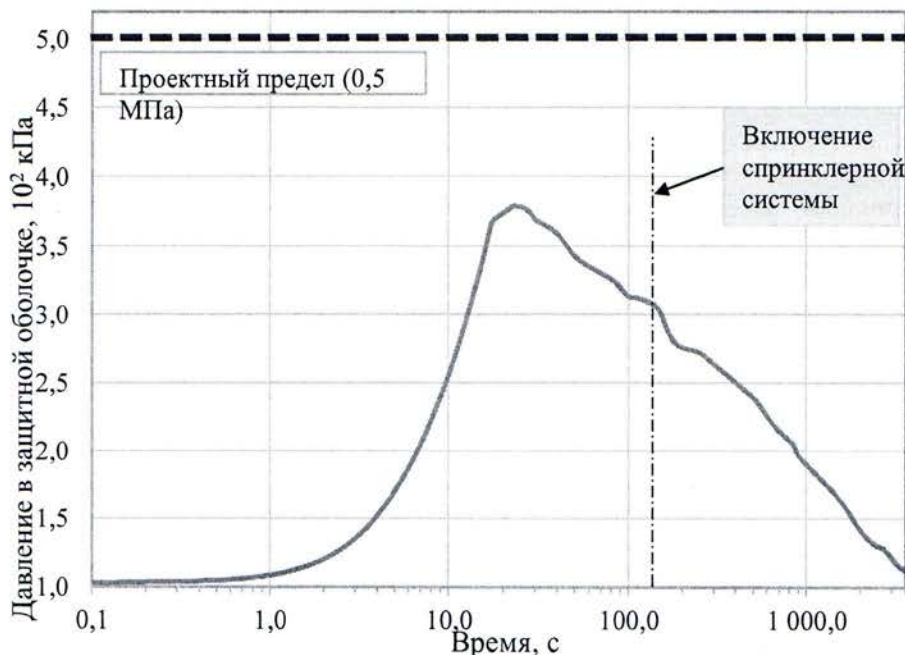


Рис. 3. Изменение абсолютного давления парогазовой среды в защитной оболочке

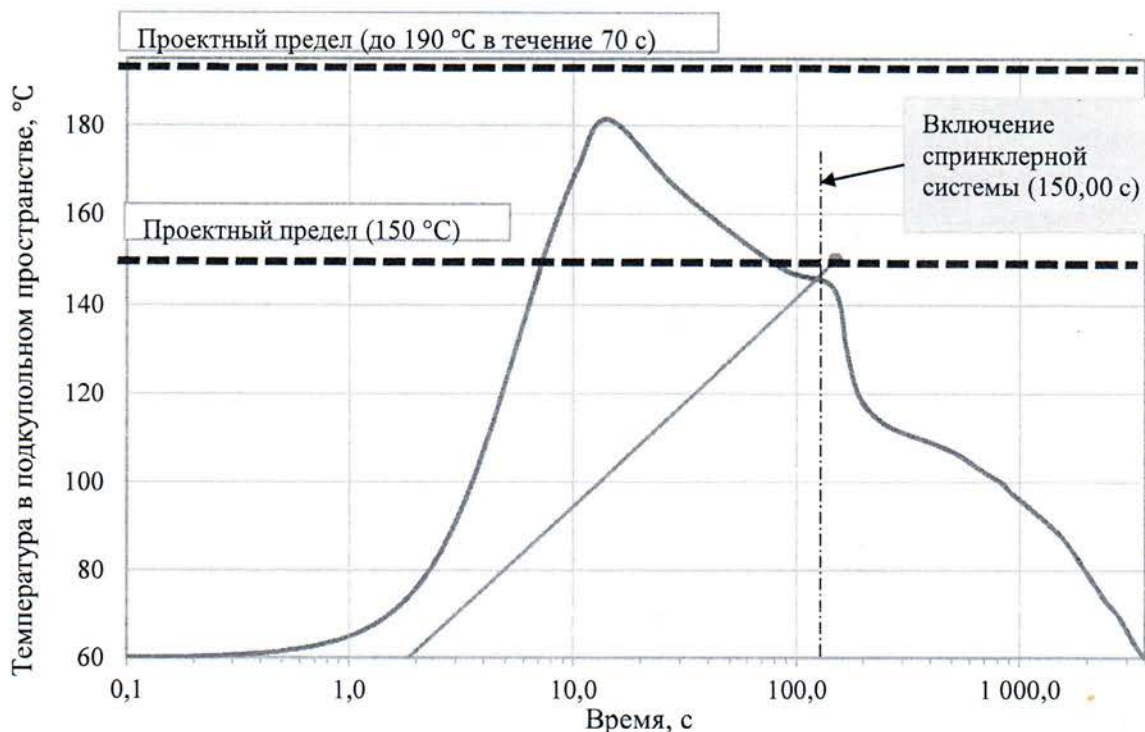


Рис. 4. Изменение температуры парогазовой среды в подкупольном пространстве ЗО

В момент времени 41,9 с (вследствие задержки 40 с момента обесточивания и времени формирования сигнала на включение) включаются насосы высокого и низкого давления САОЗ и начинается подача борного раствора низкой концентрации из баков-приямков в петли ГЦТ, сборную и напорную камеры реактора. Вследствие этого темп снижения давления и температуры среды немного увеличивается на $\approx 15 \dots 20$ с, затем снова стабилизируется. При значении времени 67,50 с происходит опорожнение гидроемкостей САОЗ, срабатывают отсечные клапаны, которые не допускают поступления азота в реактор и вытеснения им воды из активной зоны. Существенного изменения параметров под защитной оболочкой это не вызывает.

Дальнейший рост давления и температуры сдерживается за счет большой аккумулирующей способности конструкций ЗО и работы спринклерной системы.

Через 150 с момента разрыва ГЦТ включаются два из четырех каналов спринклерной системы. Вследствие конвективной теплоотдачи к холодным каплям распырскиваемой через спринклерные сопла борированной воды наблюдается увеличение интенсивности снижения параметров давления и температуры под защитной оболочкой. Спринклерная система остается в рабочем состоянии до окончания расчета (3600 с), однако после ≈ 2000 с интенсивность конденсации снижается вследствие достижения критических значений плотности пара под ЗО, а также снижения расхода пара через разрыв. К моменту окончания расчета давление в защитной оболочке снижается в зависимости от варианта расчета до 116 кПа.

Выводы. Полученные результаты расчетов показывают, что максимальные значения параметров парогазовой среды в помещениях защитной оболочки, достигаемые в ходе протекания аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода Ду850 полным сечением с учетом обесточивания блока, не превышают проектных пределов, установленных для защитной оболочки с РУ ВВЭР-1200.

Список использованных источников

1. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций [Текст]: федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-010-16. – Введ. 24.02.2016. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. – 63 с.
2. Оценка безопасности и независимая проверка для атомных электростанций [Текст]: серия изданий по безопасности № NS-G-1.2. – Вена: МАГАТЭ, 2004. – 109 с.
3. Детерминистический анализ безопасности атомных электростанций [Текст]: серия изданий по безопасности № SSG-2. – Вена: МАГАТЭ, 2014. – 95 с.
4. Безопасность атомных электростанций: проектирование [Текст]: серия изданий по безопасности № NS-R-1. Вена: МАГАТЭ, 2003. – 60 с.
5. Программа КУПОЛ-М. Аттестационный паспорт программного средства № 397 от 14.06.2016.
6. Программа АНГАР. Аттестационный паспорт программного средства № 296 от 29.09.2011.
7. COCOSYS V2.4. User's Manual, Revision 1. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2016. – 929 p.