

А. С. Балашевский¹, А. В. Герлига²,
И. И. Свириденко³

¹ Севастопольский национальный университет
ядерной энергии и промышленности

² ООО Научно-исследовательский институт АЭС, г. Одесса

³ Севастопольское отделение научно-технической поддержки
ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом»

Предотвращение орошения охлаждающим раствором гермообъема реакторного отделения при срабатывании спринклерной системы

Рассмотрен способ эффективного снижения давления под гермооболочкой реакторного отделения АЭС с ВВЭР-1000 в условиях течи первого/второго контура за счет конденсации пара струйными распылителями-охлаждителями без прямого орошения охлаждающим раствором атмосферы гермообъема и оборудования реакторной установки с организованным отводом конденсата в бак-приямок. Представлены результаты расчетного моделирования процесса снижения давления под гермооболочкой.

Ключевые слова: струйный распылитель-охладитель, АЭС, ВВЭР, гермооболочка, барбатажный бак, импульсное предохранительное устройство, компенсатор давления.

О. С. Балашевський, О. В. Герліга, І. І. Свириденко

Запобігання зрошуванню охолоджуючим розчином гермооб'єма реакторного відділення при спрацьовуванні спринклерної системи

Розглянуто спосіб ефективного зниження тиску під гермооболонкою реакторного відділення АЕС з ВВЕР-1000 в умовах течі першого/другого контура за рахунок конденсації пара струменевими розпилювачами-охолоджувачами без прямого зрошування охолоджуючим розчином атмосфери гермооб'єма і устаткування реакторної установки з організованим відведенням конденсату в бак-приямок. Представлено результати розрахункового моделювання процесу зниження тиску під гермооболонкою.

Ключові слова: струменевий розпилювач-охолоджувач, АЕС, ВВЕР, гермооболонка, барбота́жний бак, імпульсний запобіжний пристрій, компенсатор тиску.

© А. С. Балашевский, А. В. Герлига, И. И. Свириденко, 2010

Задача недопущения превышения давления в гермообъеме реакторного отделения (РО) АЭС с ВВЭР-1000 проектного значения при авариях с течью первого/второго контура определяется существующими ограничениями прочностных характеристик элементов системы герметичных ограждений. Во всех эксплуатационных режимах расчетные параметры в гермообъеме не должны превышать допустимых значений.

Применяемый на АЭС способ конденсации пара в гермообъеме РО с помощью спринклерной системы реализуется за счет распыла охлаждающего раствора спринклерными устройствами, размещенными внутри гермооболочки (ГО), что обеспечивает поддержание давления и температуры в гермообъеме ниже расчетного значения. Этот способ имеет ряд существенных недостатков [1], и основными из них являются прямое орошение охлаждающим раствором реакторного оборудования (используются растворы метабората калия и борной кислоты), радиационное загрязнение оборудования после забора раствора из бака-приямка, возможные отказы электрооборудования вследствие нарушения изоляции, развитие коррозионных процессов.

Для ликвидации этих недостатков необходимо модернизировать спринклерную систему. Предлагается реализовать метод локальной конденсации пара, поступающего в гермообъем, в струйных распылителях-охлаждителях (СРО) [2]. СРО вводятся в действие до срабатывания спринклерной системы на распыл охлаждающего раствор через распылительные форсунки, размещенные внутри СРО, обеспечивая при этом эффективное снижение давления под ГО с организованным отводом спринклерного раствора и конденсата в бак-приямок. Впервые идея этого технического решения была высказана проф. Суховым А. К. [3]. Известны экспериментальные исследования и ряд работ к. т. н. Мирошниченко С. Т., посвященные прямооточным распылительным теплообменникам [4] для снижения температуры в герметичном объеме.

Проверку эффективности СРО для снижения давления под ГО предлагается выполнить расчетно-экспериментальным методом.

Реализация способа

Особенностью предлагаемого метода является реализация режима локальной конденсации пара в объеме СРО с последующим организованным отводом в бак-приямок ГО практически всего образующегося конденсата. Это обеспечивается расположением трубы СРО в периферийной области гермообъема у основания купола ГО рядом с ее вертикальной стеной.

Конструкция СРО (рис. 1) представляет собой трубу 2 прямоугольного сечения, перед входом в которую несколькими рядами установлены струйные форсунки 1 с конически сходящимся входом и диаметром отверстия для выхода воды $(6\div 8)\cdot 10^{-3}$ м [4]. Подача охлаждающего раствора на форсунки производится из трубопровода спринклерной системы.

В нижней части СРО имеет патрубок выпара тумана с жалюзийным сепаратором 3, занимающим одну грань трубы СРО, и трубопровод 4 для отвода охлаждающей воды и конденсата.

Образующийся на стене конденсат вместе с конденсатом в СРО и охлаждающим раствором собирают и по трубопроводам организованно отводят к баку-приямку.

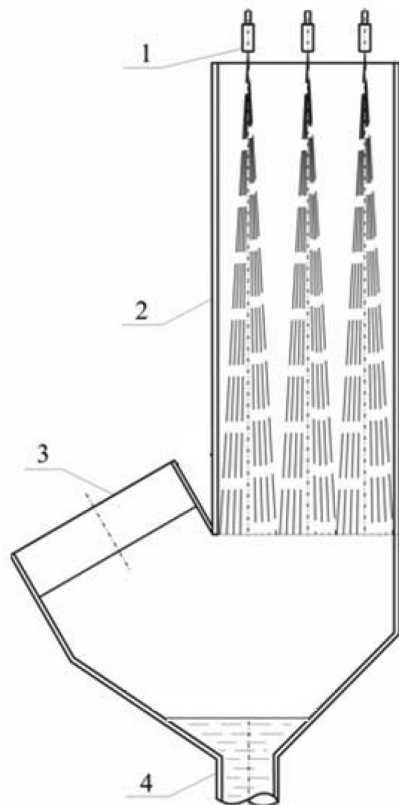


Рис. 1. Схема СРО

На рис. 2 представлена схема системы снижения давления в гермообъеме в условиях течи методом локальной конденсации пара в СРО [1]. При повышении давления в гермообъеме 2 из-за аварийной течи первого/второго контура РУ 1 охлаждающий раствор подается в СРО спринклерным насосом 12 из бака-приямка 5 по подъемному трубопроводу 13. Охлаждающий раствор распыляется во внутренней полости вертикальной трубы 7 СРО, тем самым в СРО формируются условия, при которых:

1) потоком капель охлаждающего раствора увлекается паровоздушная смесь из гермообъема 2 в трубу СРО 7;

2) давление внутри СРО снижается в сторону уровня, соответствующего температуре насыщения охлаждающего раствора, подаваемого спринклерным насосом 12.

Эти два эффекта приводят к возникновению необходимого перепада давления и связанному с этим активному поступлению горячих потоков парогазовой среды из гермообъема во внутреннюю полость СРО, где пар охлаждается и конденсируется на струях капельного факела 6 охлаждающего раствора. Конденсат вместе с охлаждающим раствором 10 собирается в нижней части трубы СРО 7.

Трубу СРО 7 размещают в периферийной области гермообъема у основания купола ГО 4 рядом с ее вертикальной стеной 3. Выпускной патрубок 8 СРО, предназначенный для эвакуации из СРО газа и неконденсировавшегося пара 14, направляют в сторону стены ГО 3. На этой стене частично конденсируется пар 14 и туман, оставшийся после сепаратора. Образующийся при этом конденсат 15 стекает по стене 3 вниз, где собирается в конденсатосборнике 9, расположенном у основания стены 3. Конденсат из конденсатосборника 9 вместе с конденсатом и охлаждающим раствором 10 из трубы СРО 7 по сливным трубопроводам 11 организованно отводится в бак-приямок 5 РО [1], [7].

Принципиальная схема применения СРО в составе спринклерной системы РУ с ВВЭР-1000 представлена на рис. 3.

Основное преимущество предлагаемого способа — создание условий, при которых давление в гермообъеме не будет подниматься до уставки запуска спринклерной системы на распыл охлаждающего раствора через потолочные распылители. Предполагается, что спринклерный насос будет включаться на начальной стадии аварии, начиная с повышения избыточного давления под ГО более чем на 0,01 МПа. При этом спринклерный раствор должен поступать только на СРО и не поступать на потолочные распылители спринклерной системы до тех пор, пока избыточное давление в гермообъеме не поднимется более чем до 0,07 МПа — для РУ АЭС с ВВЭР-1000 «малой» серии (В-302, 338), и более чем до 0,03 МПа — для серийной РУ (В-320). Тем самым исключаются указанные выше отрицательные последствия работы спринклерной

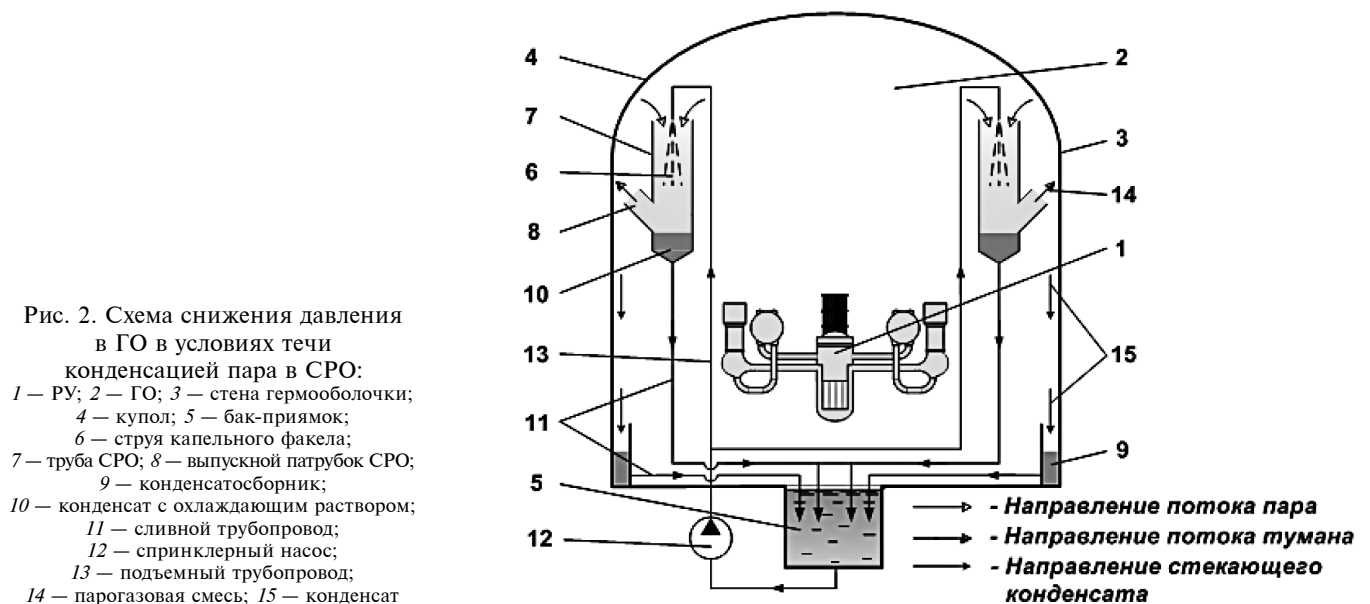


Рис. 2. Схема снижения давления в ГО в условиях течи конденсацией пара в СРО:

- 1 — РУ; 2 — ГО; 3 — стена гермооболочки;
- 4 — купол; 5 — бак-приямок;
- 6 — струя капельного факела;
- 7 — труба СРО; 8 — выпускной патрубок СРО;
- 9 — конденсатосборник;
- 10 — конденсат с охлаждающим раствором;
- 11 — сливной трубопровод;
- 12 — спринклерный насос;
- 13 — подъемный трубопровод;
- 14 — парогазовая смесь; 15 — конденсат

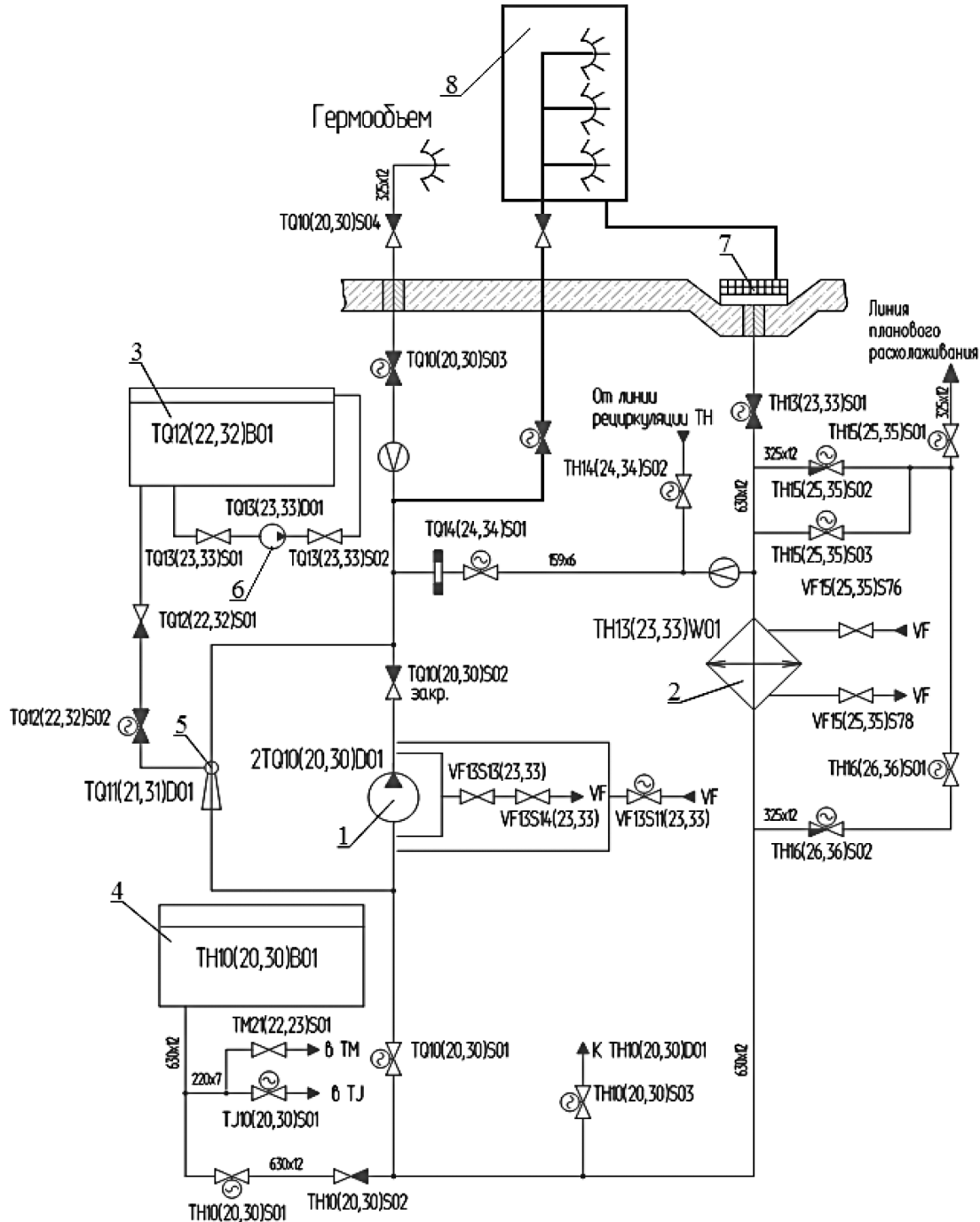


Рис. 3. Принципиальная схема одного канала спринклерной системы с применением СРО:

1 — спринклерный насос; 2 — теплообменник аварийного и планового расхолаживания; 3 — бак бората калия; 4 — бак аварийного запаса борной кислоты; 5 — водоструйный насос; 6 — насос перемешивания бората калия; 7 — сливное устройство; 8 — струйные распылители охладителя

системы и повышается надежность расхолаживания гермообъема и реакторной установки, т. е. обеспечивается безопасность протекания рассматриваемого аварийного процесса.

Математическое описание процессов теплообмена в СРО

Процесс в межфакельном (внефакельном) пространстве СРО описывается следующей системой уравнений [4]—[7]:

уравнением неразрывности для пара, газа и тумана, соответственно,

$$\frac{d(W_{\text{ПГ}} \rho_{\text{П}} F_{\text{ПГ}})}{dz} = -\rho_{\text{П}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} - F_{\text{ПГ}} q_{\text{мТ}}, \quad (1)$$

$$\frac{d(W_{\text{ПГ}} \rho_{\text{Г}} F_{\text{ПГ}})}{dz} = -\rho_{\text{Г}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

$$\frac{dG_{\text{T}}}{dz} = -\rho_{\text{T}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} + F_{\text{ПГ}} q_{\text{мТ}}; \quad (3)$$

уравнением баланса энергии для парогазотуманной смеси

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dz} [G_{\text{ПГ}} i''_{\text{ПГ}} + G_{\text{Г}} i'_{\text{Г}} + G_{\text{Т}} i'_{\text{Т}}] = \\ & = - \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} [\rho_{\text{ПГ}} i''_{\text{ПГ}} + \rho_{\text{Г}} i'_{\text{Г}} + \rho_{\text{Т}} i'_{\text{Т}}]; \end{aligned} \quad (4)$$

уравнением баланса количества движения

$$\begin{aligned} & \rho_{\text{ПГТ}} F_{\text{ПГ}} W_{\text{ПГ}} \frac{dW_{\text{ПГ}}}{dz} = \\ & = -F_{\text{ПГ}} \frac{dP}{dz} - \Pi_{\text{СРО}} \tau + W_{\text{ПГ}} \rho_{\text{ПГТ}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для факельного пространства запишем следующие уравнения:

уравнения неразрывности для потоков пара, газа и тумана, соответственно,

$$\frac{d(W_{\text{ПГФ}} \rho_{\text{ПФ}} \bar{F}_{\text{Ф}})}{dz} = \rho_{\text{П}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} - F_{\text{Ф}} q_{m\text{ТФ}} - \frac{dG_{\text{К}}}{dz}, \quad (6)$$

$$\frac{d(W_{\text{ПГФ}} \rho_{\text{ГФ}} \bar{F}_{\text{Ф}})}{dz} = \rho_{\text{Г}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha}, \quad (7)$$

$$\frac{dG_{\text{ТФ}}}{dz} = \rho_{\text{Т}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} + \bar{F}_{\text{Ф}} q_{m\text{ТФ}}; \quad (8)$$

уравнение баланса энергии для парогазотуманной смеси

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dz} [G_{\text{ПФ}} i''_{\text{ПФ}} + G_{\text{ГФ}} i'_{\text{ГФ}} + G_{\text{ТФ}} i'_{\text{ТФ}}] = \\ & = \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} [\rho_{\text{ПГ}} i''_{\text{ПГ}} + \rho_{\text{Г}} i'_{\text{Г}} + \rho_{\text{Т}} i'_{\text{Т}}] - \frac{F_{\text{КФ}}}{V_{\text{К}}} [i''_{\text{ПФ}} q_m + q]; \end{aligned} \quad (9)$$

уравнение баланса количества движения для парогазотуманной смеси

$$\begin{aligned} & \rho_{\text{ПГТФ}} \bar{F}_{\text{Ф}} W_{\text{ПГФ}} \frac{dW_{\text{ПГФ}}}{dz} = \\ & = -\bar{F}_{\text{Ф}} \frac{dP}{dz} - W_{\text{ПГФ}} \rho_{\text{ПГТ}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} + \\ & + \frac{F_{\text{КФ}} [f + (W_{\text{ПГФ}} - W_{\text{К}}) q_m]}{V_{\text{К}}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где ρ — плотность; i — энтальпия; W — скорость; F — площадь поперечного сечения; $\Pi_{\text{ПГК}}$ — периметр капельного факела; $q_{m\text{Т}}$ — массовая скорость образования тумана в единицах объема во внефакельном пространстве (удельный расход пара на образование тумана); τ — касательное напряжение трения на стенке СРО; $q_{m\text{ТФ}}$ — массовая скорость образования тумана в единице объема факельного пространства; G — расход; $\bar{F}_{\text{Ф}} = F_{\text{Ф}} - F_{\text{КФ}}$ — площадь парогазовой смеси внутри факела; $F_{\text{КФ}}$ — площадь поперечного сечения, занятого каплями; $V_{\text{К}}$ — объем капли; P — давление; подстрочные индексы: ПГ — парогазовая смесь, П — пар, Г — газ, Т — туман, Ф — факел, К — капли охлаждающей воды, ПФ — пар в факеле, ПГТФ — парогазотуманная смесь в факеле; $\frac{\Pi_{\text{ПГК}} W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha}$ — объемный расход смеси через единицу площади конуса факела; $W_{\text{ПГК}}$ — скорость, перпендикулярная к поверхности конуса капельного факела.

Особенностью анализируемых процессов является то, что, при наличии течи из ГО в СРО может поступать парогазовая смесь либо с перегретым паром, либо с паром, находящимся на линии насыщения. Во втором случае в СРО может поступать парогазовая смесь с туманом. Туман может, кстати, самостоятельно возникать и исчезать в СРО.

В связи с этим в СРО возможны следующие варианты протекающих процессов:

в межфакельном и факельном пространствах парогазовая смесь содержит перегретый относительно линии насыщения пар;

в межфакельном пространстве течёт парогазовая смесь с перегретым паром, в факельном пространстве — парогазовая смесь с туманом;

в межфакельном пространстве течёт парогазовая смесь с туманом, а в факельном пространстве — парогазовая смесь с перегретым паром;

в межфакельном и факельном пространствах находятся парогазовые смеси с туманом.

Указанные четыре состояния паровоздушной смеси в СРО с процессом в ГО описываются в сумме системой из 54 дифференциальных уравнений [7], характеризующей нестационарный теплообмен между парогазовой смесью в гермообъеме и каплями распыляемого в СРО раствора.

Результаты расчетного моделирования

Предварительное расчетное моделирование процессов в ГО выполнено для течей теплоносителя первого контура с учётом и без учёта конденсации пара на оборудовании. Анализ результатов показал, что использование данного способа в условиях аварии с течью позволяет максимально ограничить рост давления в гермообъеме на возможно низком уровне после его локализации. Эффективность работы СРО подтверждается результатами расчетного моделирования изменения давления в гермообъеме в условиях течи первого контура.

В работах [6]—[8] представлены результаты расчёта влияния конструктивных размеров и режимных параметров струйного распылителя-охладителя (СРО) на процесс снижения давления в ГО: длины и количества труб СРО, диаметра капли, перепада давления на форсунках, угла распыла факела.

На рис. 5 приведена динамика изменения давления в гермообъеме на примере импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления (ИПУ КД) с отказом на закрытие. Это позволяет определить необходимое количество труб СРО для достижения заданного результата (в каждой трубе 24 форсунки, перепад давления на форсунках 0,5 МПа, диаметр сопла 8 мм, температура спринклерного раствора 30 °С, расход через одну форсунку 1,26 кг/с).

Установлено, что абсолютное давление в гермообъеме не поднимается выше 0,14 МПа при 10 СРО, что исключает условия срабатывания спринклерной системы РУ с ВВЭР-1000 «малой» серии. Пик роста давления для течей эквивалентным диаметром 60 мм в период аварии достигается на 2400-й секунде.

Результаты расчёта получены с помощью разработанной нами математической модели процессов, происходящих как в отдельном СРО, так и в системе СРО+ГО при наличии течи.

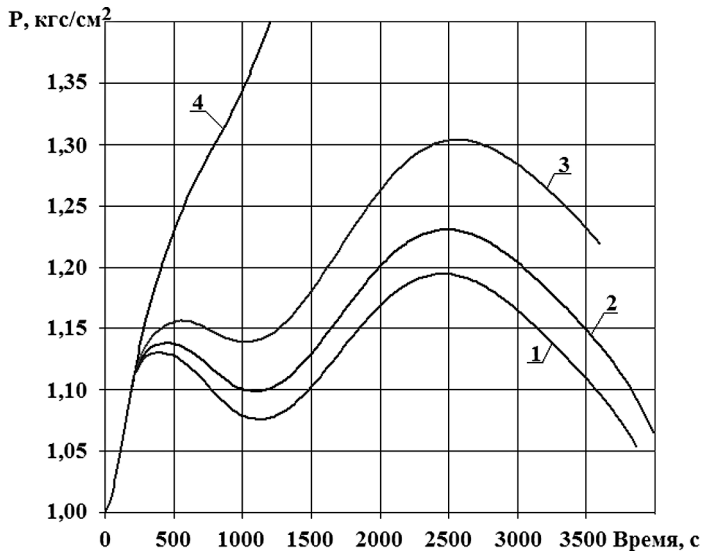


Рис. 5. Динамика изменения давления в гермообъеме при установке 10 труб СРО без учёта конденсации пара на оборудовании и спринклерной системы: 1, 2, 3 — изменение давления в ГО при длине трубы $L = 4, 3$ и 2 м, соответственно; 4 — изменение давления в ГО без учёта СРО

Для дальнейшего, более детального, анализа с применением описанной математической модели было выбрано исходное событие (ИС), имевшее место на энергоблоке № 3 РАЭС 22 сентября 2009 г. [9] из-за полного открытия ИПУ КД с отказом на закрытие при проведении испытаний в режиме «горячий останов», что сопровождалось повышением температуры и давления среды внутри гермооболочки.

Для расчета переходного процесса в РУ использовалась четырехпетлевая модель РУ ВВЭР-1000/В-320 для программы RELAP5/Mod3.4, адаптированная под параметры блока № 3 РАЭС. Расчет выполнялся с целью получения функций течи (расходы и удельные энтальпии пара и воды в помещение бака-барботера КД ГА503) для дальнейшего расчёта изменения параметров в ГО с помощью кода MELCOR 1.8.5.

Основные параметры блока перед рассматриваемым ИС: реактор подкритичен, концентрация борной кислоты в теплоносителе 1-го контура 16 г/кг. Мощность остаточных энерговыделений активной зоны при выполнении расчета практически постоянна — около 3 МВт, что соответствует стационарной четырехгодичной топливной загрузке после перегрузки топлива. В силу особенностей модели, расчет стационарного состояния выполнен при работающих ГЦН с теплоотводом в ПГ, при этом давление в последних выбрано из условия получения требуемой температуры теплоносителя $T_1 = 270$ °С на входе в реактор.

Затем, на заключительной стадии, уже при отключенных ГЦН давление в первом контуре было повышено с помощью трубчатых электрических нагревателей компенсатора давления (ТЭН КД) от 158 до $186,5$ кгс/см². С этого момента начинается собственно расчет переходного процесса. Сравнительная хронология событий (блочные данные и расчет) представлена в табл. 1. Расчетное время отсчитывается от момента ИС — полного открытия ИПУ КД (приведено в скобках).

Разрыв мембраны барботажного бака (ББ) в расчете происходит на 45-й секунде с момента ИС аварии.

Для более корректного задания граничных условий для кода RELAP5 предполагалось, что после разрыва мембраны истечение пароводяной смеси происходит в объеме около 250 м³. Это соответствует реальному свободному объему помещения ГА503. Данный расчетный объем проходным сечением $9,98$ м² (что также соответствует геометрии проемов в ГА503) соединен с объемом 6×10^4 м³ — объемом остальной части реакторного отделения внутри ГО. Поскольку для достижения требуемой точности расчета рассматриваемой течи требовалась лишь качественная оценка поведения основных параметров в указанных объемах (это было подтверждено анализом чувствительности), пассивные поглотители теплоты в данных объемах не моделировались. Не моделировалась и работа вентиляционных систем, а также работа спринклерной системы, поскольку расчет функций течи был необходим, прежде всего, для последующего сравнения эффективности различных инженерных систем подавления параметров в ГО. Начальные условия в данных объемах приняты следующими: температура $+27$ °С ($300,15$ К), давление $1,0 \cdot 10^5$ Па (абс.), среда — азот.

Как видно из таблицы, вплоть до 1700-й секунды результаты расчета демонстрируют хорошее совпадение с блочными данными. Единственное отличие связано с незначительным временным ростом давления в первом контуре после включения на контур насоса TQ23D01. Соответственно, достижение давления первого контура ($P_1 = 44$ кгс/см²), при котором оперативный персонал включил в работу на контур TQ33D01, произошло позже. Этот факт, однако, не оказал существенного влияния на функции течи, что впоследствии было подтверждено вариантным расчетом с включением третьего канала системы аварийного охлаждения активной зоны высокого давления (CAOЗ ВД) не по давлению, а по достижении заданного момента времени переходного процесса, в соответствии со стационарными данными.

Расчет показал, что после 4000-й секунды процесса в помещение ГА503 из бака-барботера поступает уже не пароводяная смесь, а исключительно вода с нулевым паросодержанием и сравнительно низкими параметрами. Поэтому для дальнейших расчетов были использованы полученные параметры внутри ГО (давления, расхода) для первых 4000 секунд аварии (рис. 6 и 7).

Зная поступление пара в ГО (по данным расчёта RELAP5), с помощью программы MELCOR 1.8.5 можно рассчитать изменение давления, температуры и других характеристик в атмосфере ГО с течением времени, а также оценить влияние работы СРО на протекающие в ГО процессы. Соответственно, изменяя геометрические параметры труб СРО, можно добиться желаемого результата в снижении давления и температуры паровоздушной смеси в ГО.

Были проведены расчеты динамики параметров в ГО без СРО и спринклерной системы, а также с учётом спринклерной системы и включением в работу 10 труб СРО длиной 2 м и умеренно-консервативно завышенной температуры спринклерного раствора 35 °С. Количество СРО определялось исходя из расходной характеристики спринклерных насосов: для работы 10 труб СРО достаточно двух каналов спринклерной системы.

Включение СРО происходит при избыточном давлении в ГО, равном $0,1$ кгс/см². В модели также учитывается конденсация пара на стенках гермообъема и оборудовании внутри ГО.

Таблица 1. Хронология инцидента

Время после ИС аварии, данные (расчет), с	Последовательность событий
0–4 (0)	Распитались электромагниты ИК YP21S03, S04 и открылся ГК YP21S01 при $P_1 = 186,5$ кгс/см ²
13 (18 — достижение уставки закрытия)	При $P_1 = 175,7$ кгс/см ² запитались ИК YP21S03, S04 и появилась индикация «закрыто» ГК YP21S01, но давление в 1-м контуре продолжало снижаться. Идентифицировано незакрытие ГК YP21S01 по снижению параметров 1-го контура и повышению параметров в ББ
61 (54)	Включились все группы ТЭН КД
74–134 (–)	Сработала блокировка по давлению в гермооболочке больше 0,003 кгс/см ² (изб.), закрылась локализирующая арматура систем TL 22.42
134–194 (181)	Аварийно отключились ТЭН КД по уровню в КД менее 4200 мм
194–254 (224)	Включены в работу насосы ТВ10D02,03 подачи борного концентрата из баков ТВ-10 на всас подпиточных насосов
289 (320)	При $P_{1к} = 66$ кгс/см ² произошло формирование сигнала защиты « $dT_s < 10$ °C» без воздействия на исполнительные механизмы CAO3
314–374 (360)	Зафиксировано открытие клапанов на линиях подачи раствора борной кислоты от гидроемкостей (ГЕ) 1–4 системы аварийного охлаждения зоны (CAO3) в 1-й контур. $P_{1к} = 58$ кгс/см ²
374–434 (481)	Включены в работу на 1-й контур насосы TQ14-34D01, TQ13D01 при $P_1 = 50$ кгс/см ²
696–879	Предпринята попытка закрытия YP21S01 кратковременным открытием YP21S08 и подачей питания на электромагниты закрытия клапана YP21S09 с последующим их закрытием, что не привело к закрытию YP21S01
1154–1214 (990)	Включен в работу на 1-й контур насос TQ23D01 при $P_1 = 48$ кгс/см ²
1334–1394 (1364)	После предварительного закрытия YR60S01,02 открытием арматуры на линии сдувок с реактора YR01-03S01, ПГ1-4 YR11-41,12-42S01, КД YR51-53S01 объединены в общий коллектор аварийные газовые сдувки реактора, парогенераторов (ПГ) 1–4 и КД
1754–1814 (3540)	Включен в работу на 1-й контур насос TQ33D01 при $P_1 = 44$ кгс/см ²
2067 (–)	Зафиксировано срабатывание защиты CAO3 по $P_{ГО} > 0,3$ кгс/см ² , локализация гермообъема, запуск механизмов CAO3 в проектном объеме, подача спринклерного раствора в ГО от насосов TQ11-31D01
2234–2474 (3969)	Выведены из работы на 1-й контур насосы TQ14-34D01, TQ33D01 при $P_1 = 70$ кгс/см ²
2414–2474 (4000)	Выведен из работы на 1-й контур насос TQ23D01 $P_1 = 60$ кгс/см ²
3494–3554 (6530)	Выведен из работы на 1-й контур насос TQ13D01 $P_1 = 31$ кгс/см ²
4514–4574 (7182)	Зафиксирована подача на 1-й контур РБК насосами TQ12-32D01 при $P_1 = 23$ кгс/см ²

Примечание. (–) — параметр не моделировался.

С использованием разработанной модели СРО получены характеристики снижения избыточного давления в гермообъеме РУ в условиях рассматриваемого аварийного процесса (рис. 8). Результаты моделирования показывают, что давление в ГО не достигает уставки срабатывания спринклерной системы в «штатном» режиме (1,3 кгс/см²). Соответственно, спринклерный раствор не подается на поточные распылители и не происходит орошения охлаждающим раствором оборудования, находящегося в ГО.

Кривая 1 на рис. 8 иллюстрирует повышение давления паровоздушной смеси в ГО без учёта работы СРО и спринклерной системы. Видно, что давление в ГО на 1800-й

секунде достигает значения срабатывания спринклерной системы ($P = 1,3$ кгс/см²) и впоследствии продолжает расти. Кривая 2 характеризует интенсивное снижение давления в ГО после 1800-й секунды при включении спринклерной системы. Как видно из рис. 8, кривая 3 (блочные данные поведения давления в гермооболочке) хорошо совпадает с расчётными данными (кривая 2), но с noticeably более поздним включением спринклерной системы.

При работе СРО (геометрические характеристики: длина трубы $L = 2$ м, кривая 4) давление в гермообъеме за всё время переходного процесса не достигает значения, при котором срабатывает спринклерная система.

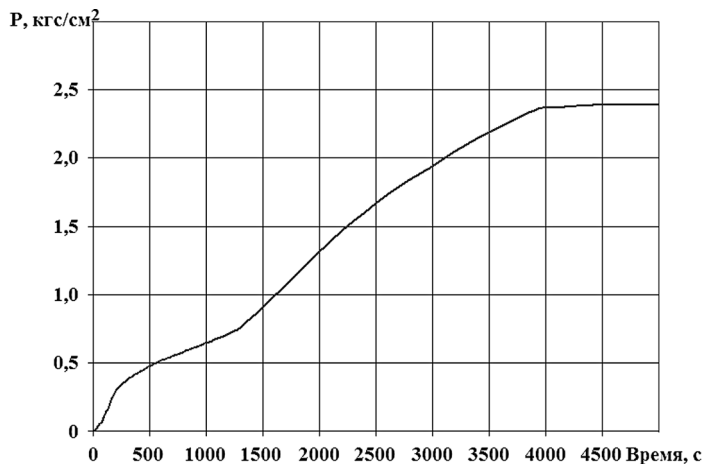


Рис. 6. Изменение давления в ГО при истечении паровоздушной смеси из бака-барботера (RELAP5)

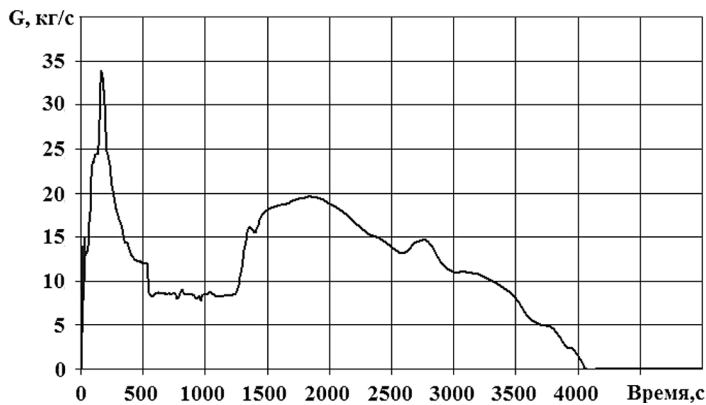


Рис. 7. Расход пара из бака-барботера в ГО (RELAP5)

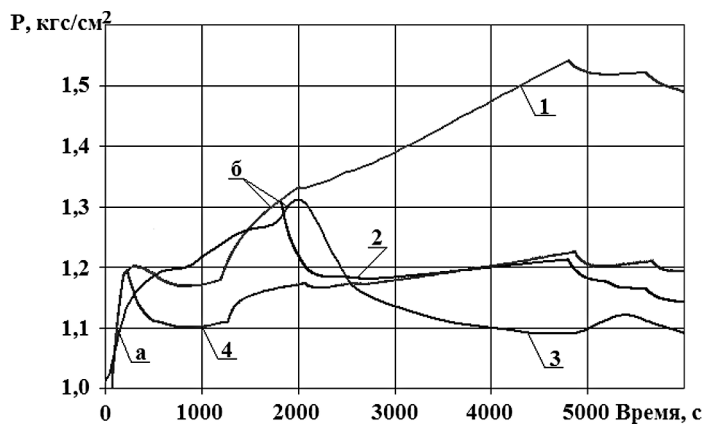


Рис. 8. Динамика изменения давления в ГО с включением и отключением спринклерной системы и СРО (MELCOR 1.8.5):

1 — расчётные данные изменения давления в ГО без учёта СРО и спринклерной системы; 2 — расчётные данные изменения давления в ГО без СРО и с учётом спринклерной системы; 3 — блочные данные изменения давления в ГО с учётом спринклерной системы; 4 — расчётные данные изменения давления в ГО с подачей охлаждающего раствора на СРО;
 а — момент включения СРО;
 б — момент включения спринклерной системы

При увеличении длины труб и оптимизации других конструктивных параметров СРО можно получить еще более эффективное снижение избыточного давления в гермообъеме.

Расчетным путем как с помощью разработанных нами программ, так и с привлечением результатов расчёта, полученных в коде RELAP5 и MELCOR 1.8.5, показано, что предлагаемый способ снижения давления в гермообъеме позволяет максимально ограничить рост давления в гермообъеме на приемлемо низком уровне после локализации гермооболочки для энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000.

Следует отметить, что для более детального анализа протекания процессов, происходящих в гермооболочке, необходимо провести расчёты по влиянию температуры охлаждающего раствора на эффективность работы СРО для энергоблоков АЭС «малой» серии с ВВЭР-1000/В-302 и серийных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000/В-320.

Выводы

1. Предлагаемый способ снижения давления в гермообъеме АЭС с ВВЭР-1000 состоит в том, что в аварийной ситуации при росте давления под ГО из-за появления течи подача охлаждающего раствора при срабатывании спринклерной системы происходит не на потолочные форсунки, а на форсунки, расположенные в трубах СРО. Это исключает прямое орошение оборудования ГО спринклерным раствором, что обеспечивает повышение безопасности расхолаживания РУ.

2. Пар из гермообъема «захватывается» и увлекается потоком капель в трубы СРО, где конденсируется с последующим организованным отводом образующегося конденсата по трубопроводам в бак-приямок, не попадая на поверхность оборудования, находящегося под ГО.

3. Результаты расчетов подтвердили работоспособность предложенного способа снижения давления в ГО. Наличие СРО в ГО при аварийном событии на блоке № 3 РАЭС (полное открытие ИПУ КД с отказом на закрытие) позволило бы исключить прямое орошение оборудования РУ от спринклерных устройств, не допуская повышения давления в гермообъеме выше проектного предела.

4. Для окончательного принятия решения об использовании СРО необходимо экспериментальное подтверждение результатов моделирования. Сотрудниками Севастопольского отделения НТЦ разработана схема экспериментального стенда и проведены соответствующие расчёты.

Список литературы

- Герлига А. В. Способ эффективного снижения давления под гермооболочкой при аварийной течи теплоносителя // Сб. науч. тр. СНИЯЭиП. — Севастополь, 2008. — Вып. 1 (25). — С. 26–33.
- Герлига А. В., Свириденко И. И., Балакан Г. Г. Способ конденсации пара в герметическом объеме реакторного отделения: пат. на полезную модель 32561 Украина, МПК 8 G21C15/00. — №u2007/13338; заявл. 30.11.2007; опублик. 26.05.2008, Бюл. № 10.
- Сухов А. К. Повышение надежности и пути продления ресурса локализирующей системы безопасности РУ с ВВЭР-1000 / А. К. Сухов, Е. А. Сухова // Стратегия развития ядерной энергетики: выбор Украины: Сб. тезисов докл. — К., 2001. — С. 27.

4. *Мирошниченко С. Т.* Устройство снижения температуры в герметичном объеме / С. Т. Мирошниченко, М. М. Крестелев, А. К. Сухов. — Деп. в ЦСИФ, № 5210. — 1991. — 29 с.

5. *Герлига А. В.* Математическое моделирование работы струйного распылителя-охладителя (СРО) / А. В. Герлига, Г. Г. Балакан // Труды ОНПУ. — Одесса, 2006. — Вып. 2 (26). — С. 71–75.

6. *Герлига А. В.* Влияние параметров струйного распылителя-охладителя на снижение давления в гермообъеме в аварийных случаях / А. В. Герлига, И. И. Свириденко, Г. Г. Балакан, А. С. Балашевский // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. — 2007. — Вып. 4 (24). — С. 43–48.

7. *Герлига А. В.* Снижение давления в гермообъеме АЭС с ВВЭР-1000 струйными распылителями-охладителями в условиях течи / А. В. Герлига // Дис. ... канд. техн. наук СевНТУ. — Севастополь, 2008. — С. 152.

8. *Балашевский А. С.* Аварийное расхолаживание гермообъема АЭС с ВВЭР-1000 при наличии течи с использованием струйного распылителя-охладителя / А. С. Балашевский, А. В. Герлига, С. Т. Мирошниченко // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. — 2009. — Вып. 4 (32). — С. 9–15.

9. Отчет о расследовании нарушения в работе РАЭС. ЗРОВ-П07-002-09-09, 16.10.2009. — ОП «Ривненская АЭС» НАЭК «Энергоатом» Минтопэнерго Украины, 2009. — С. 15.

Надійшла до редакції 30.03.2010.