

А. С. Балашевский¹, А. В. Герлига²,
С. Т. Мирошниченко³

¹Севастопольское отделение научно-технической поддержки ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом»

²ООО Научно-исследовательский институт АЭС, г. Одесса

³Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Повышение надежности и безопасности расхолаживания гермообъёма РУ АЭС с ВВЭР-1000

Рассмотрен способ повышения надежности и безопасности эксплуатации РУ АЭС с ВВЭР-1000 при аварии с течью 1-, 2-го контуров с помощью струйных распылителей-охладителей без прямого орошения оборудования реакторной установки от спринклерных устройств за счёт модернизации штатной спринклерной системы.

Приведены схема и описание предлагаемого способа. Представлены результаты расчетного анализа снижения давления в гермообъёме РУ АЭС для серийных энергоблоков ВВЭР-1000/В-320 и блоков «малой» серии ВВЭР-1000/В-302 на примере аварийного события на энергоблоке № 3 Ровенской АЭС.

Ключевые слова: струйный распылитель-охладитель (СРО); атомная электрическая станция (АЭС); водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР); реакторная установка (РУ); гермообъем (ГО); импульсное предохранительное устройство (ИПУ); компенсатор давления (КД).

О. С. Балашевський, О. В. Герліга, С. Т. Мирошниченко

Підвищення надійності й безпеки розхолювання гермооб'єма РУ АЕС з ВВЕР-1000

Розглянуто спосіб підвищення надійності й безпеки експлуатації РУ АЕС з ВВЕР-1000 в разі аварії з течею 1-, 2-го контурів за допомогою струменевих розпилювачів-охолоджувачів без прямого зрошення устаткування реакторної установки від спринклерних пристроїв за рахунок модернізації штатної спринклерної системи.

Наведено схему й опис пропонованого способу. Представлено результати розрахункового аналізу зниження тиску в гермооб'ємі РУ АЕС для серийних енергоблоків ВВЕР-1000/В-320 і блоків «малої» серії ВВЕР-1000/В-302 на прикладі аварійної ситуації на енергоблоці № 3 Рівненської АЕС.

Ключові слова: струменевий розпилювач-охолоджувач (СРО); атомна електрична станція (АЕС); водо-водяний енергетичний реактор (ВВЕР); реакторна установка (РУ); гермооб'єм (ГО); імпульсний запобіжний пристрій (ІЗП); компенсатор тиску (КТ).

© А. С. Балашевский, А. В. Герлига, С. Т. Мирошниченко, 2011

Для решения проблем, возникающих в условиях аварии с течью 1-, 2-го контуров в гермообъеме РУ АЭС с ВВЭР-1000 при срабатывании спринклерной системы, необходимо внедрение новых современных технологий, которые повышают надежность и безопасность эксплуатации АЭС.

Как известно, специалистами Российской Федерации (РФ) была разработана технология конденсации пара для условий аварии с течью в РУ АЭС с ВВЭР-440 с помощью струйного (вихревого) конденсатора. Вихревой конденсатор в реакторном отделении ВВЭР-440 устанавливается в районе бокса парогенератора, но его массогабаритные показатели не приемлемы для установки в гермообъеме РУ АЭС с ВВЭР-1000.

Модернизация спринклерной системы с внедрением струйных распылителей-охладителей (СРО) позволит исключить ряд существенных недостатков [1].

Предлагаемый способ по сравнению с применяемым на АЭС методом конденсации пара в гермообъеме АЭС при аварии с течью позволяет одновременно снизить проектный предел допустимого уровня давления в гермообъеме и избежать прямого орошения охлаждающим раствором горячего оборудования реакторной установки, исключив термшок конструкционных материалов.

Благодаря организации локальной конденсации пара и организованного отвода конденсата из труб СРО по сливным трубопроводам в бак-приямок реакторного отделения предотвращается размывание теплоизоляции оборудования и трубопроводов [2], [3]. Это исключает возможное перекрытие фрагментами размывающей теплоизоляции отверстий в фильтрующих сетках бака-приямка и обеспечивает постоянный расход охлаждающего раствора на рециркуляцию.

Одним из важнейших преимуществ СРО является то, что по сравнению со спринклерной системой предлагаемый способ дает возможность осуществлять периодическую проверку работоспособности форсуночной системы без прямого орошения оборудования гермообъема РУ, тем самым повышая функциональность применения СРО.

Данный способ может быть реализован при работе локализующих систем безопасности в аварийных условиях с малыми и средними течами — в гермообъеме РУ серийных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000/В-320 и в гермообъеме РУ энергоблоков АЭС «малой» серии с ВВЭР-1000/В-302.

Описание способа. В [4] изложены математические модели, описывающие процессы, протекающие в системе ГО и СРО, которые использованы нами для получения результатов, приведенных в данной работе.

Гермообъем рассматривается как сосредоточенный нульмерный объем и процессы в нём описываются нульмерными нестационарными уравнениями баланса массы пара, баланса массы тумана и нестационарным уравнением энергии парогазовой смеси.

В самой трубе СРО выделяются три потока парогазовой смеси:

поток парогазовой смеси между капельными факелами, образуемыми форсунками;

поток парогазовой смеси в межфакельном пространстве; поток капель в капельных факелах.

В общем случае для каждого из указанных потоков записываются одномерные стационарные уравнения неразрывности, энергии и количества движения.

Предложенный способ снижения давления в ГО с помощью СРО состоит в том, что при появлении течей в ГО

происходит срабатывание спринклерной системы не на потолочные форсунки, а на форсунки, расположенные в специальных трубах [5]. При этом исключаются отрицательные последствия работы спринклерной системы, повышается надежность и безопасность расхолаживания гермообъёма и реакторной установки.

Струйные распылители-охладители помимо конденсации пара на каплях охлаждающей воды и снижения давления в гермообъёме РУ выполняют еще очень важную задачу — удаление водорода из гермообъёма.

Применение подобного способа для конденсации пара в гермообъёме должно позволить, по полученным расчётам, снизить максимальное значение давления в гермообъёме до 0,5 МПа и менее, что может стать основанием для продления сроков эксплуатации гермообъёма АЭС с ВВЭР-1000 сверх проектного. Поэтому предлагаемый способ локализации аварии в гермообъёме РУ весьма актуален.

Реализация способа позволит сформировать адаптированную к условиям АЭС схему новой системы снижения давления в гермообъёме в условиях аварии с течью. При этом снижение давления и расхолаживание гермообъёма в условиях течи с помощью СРО формирует условия, при которых повышение параметров в ГО не будет достигать верхних проектных пределов, что обеспечит эффективное управление ресурсом системы герметичных ограждений РУ АЭС и продление ее сроков эксплуатации сверх проектных.

Полученные результаты позволят выполнить проектирование СРО для энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 и внедрить их на всех действующих, проектируемых и строящихся АЭС, а также сформулировать рекомендации по внедрению СРО на зарубежных АЭС с другими типами реакторных установок.

Способ предотвращения роста давления в ГО с помощью СРО выше давления локализации гермооболочки при течи имеет теоретическое обоснование.

Внедрение СРО не предусматривает размещения принципиально нового оборудования с большими массо-габаритными показателями. СРО монтируются как элементы существующей спринклерной системы, потому их внедрение характеризуется как модернизация существующей на АЭС с ВВЭР-1000 системы безопасности.

Результаты расчетного моделирования. Данная статья является продолжением работы [6] с более детальным

анализом исходного события, имевшего место на энергоблоке № 3 Ровенской АЭС 22 сентября 2009 г. [7] из-за полного открытия ИПУ КД с отказом на закрытие в режиме «горячий останов». Для повышения эффективности использования СРО выполнен расчёт по аналогичному исходному событию [7], но при работе энергоблока на номинальной мощности для РУ АЭС с ВВЭР-1000/В-320 и с ВВЭР-1000/В-302.

Перед тем как перейти к анализу результатов расчёта, рассмотрим порядок возникновения данного инцидента.

При выполнении штатной программы испытаний проверки ИПУ (ИК) КД путём повышения давления 1-го контура до 185 кгс/см² проектно открылся импульсный ПК КД, а потом главный ПК КД, и давление 1-го контура начало снижаться. Однако после снижения давления первого контура до 175 кгс/см² главный ПК КД не закрылся, хотя блокировка на его закрытие сработала своевременно. С этого момента начинается собственно расчет переходного процесса. Из-за длительного сброса пара из КД начали расти параметры (давление и температура) в барботере и при давлении 12 кгс/см² произошёл разрыв мембраны, защищающей бак-барботер от разрушения. С этого момента теплоноситель из ставшего неплотным 1-го контура (сначала в виде пара, а далее, при снижении параметров и расхолаживании РУ, — в виде пароводяной смеси) стал поступать в гермообъём.

Для расчета переходного процесса использовалась четырехпетлевая модель РУ АЭС с ВВЭР-1000 для программы RELAP5/Mod3.4. Расчет выполнялся с целью получения функций течи (расхода, удельной энтальпии пара и воды) в помещение бака-барботера КД для дальнейшего расчёта изменения параметров в гермообъёме с помощью разработанной нами математической модели СРО и программного кода MELCOR 1.8.5.

Расчетное моделирование процессов в гермообъёме выполнено для течей теплоносителя 1-го контура с учетом и без учета конденсации пара на оборудовании.

Расчет показал, что после 6000-й секунды процесса в помещение 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 (давление, расход) для первых 6000 секунд аварии, представленные на рис. 1–3.

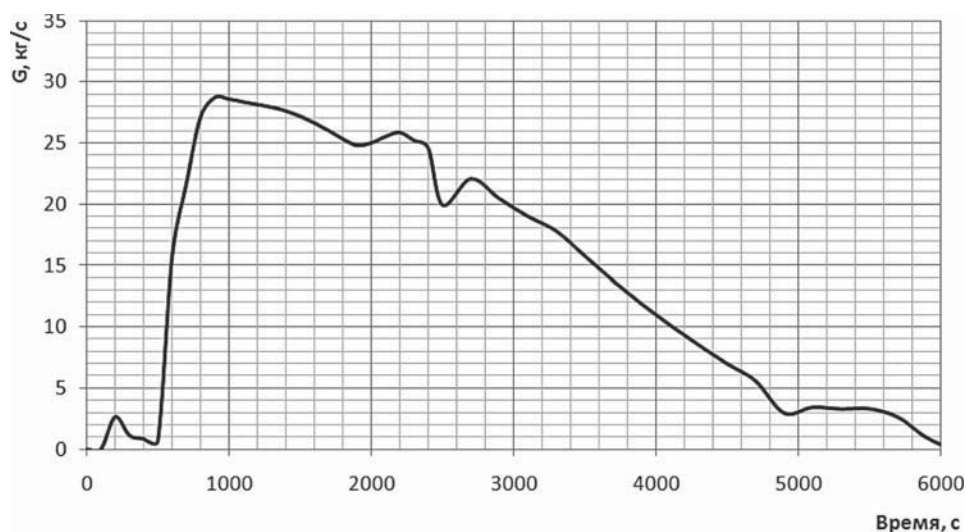


Рис.1. Расход пара из бака-барботера (RELAP5)

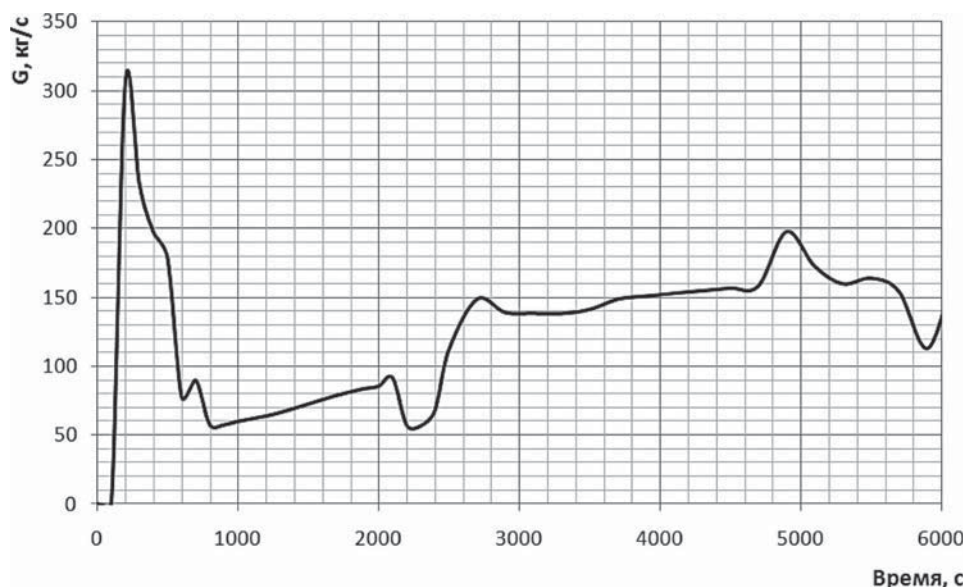


Рис.2. Расход воды из бака-барботера (RELAP5)

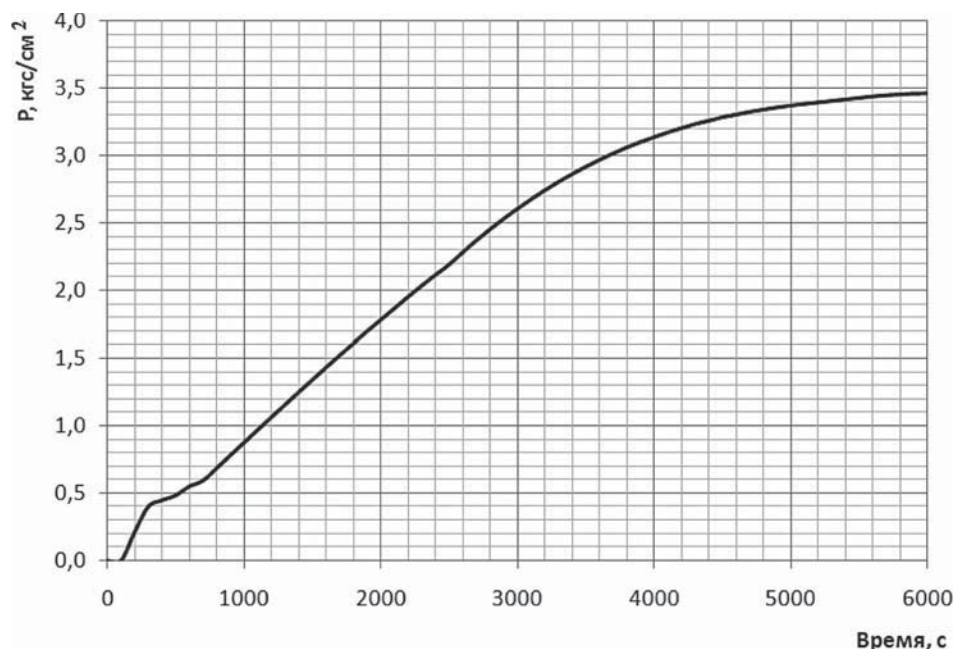


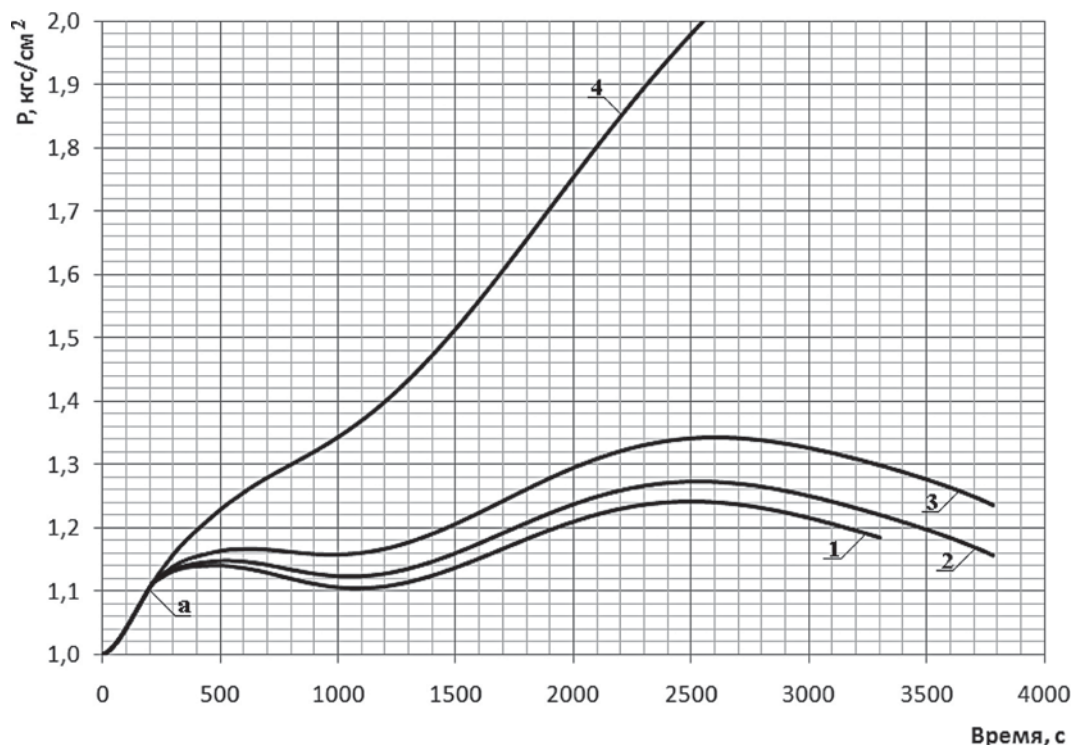
Рис.3. Изменение давления в ГО при истечении паровоздушной смеси из бака-барботера (RELAP5)

На основе полученных результатов расчета поведения параметров в гермообъёме (рис. 1—3) с помощью разработанной нами математической модели ГО и СРО ниже представлены два варианта расчета изменения давления в ГО при работе энергоблока на номинальной мощности: для серийного энергоблока АЭС с ВВЭР-100/В-320 и для энергоблока «малой» серии АЭС с ВВЭР-100/В-302.

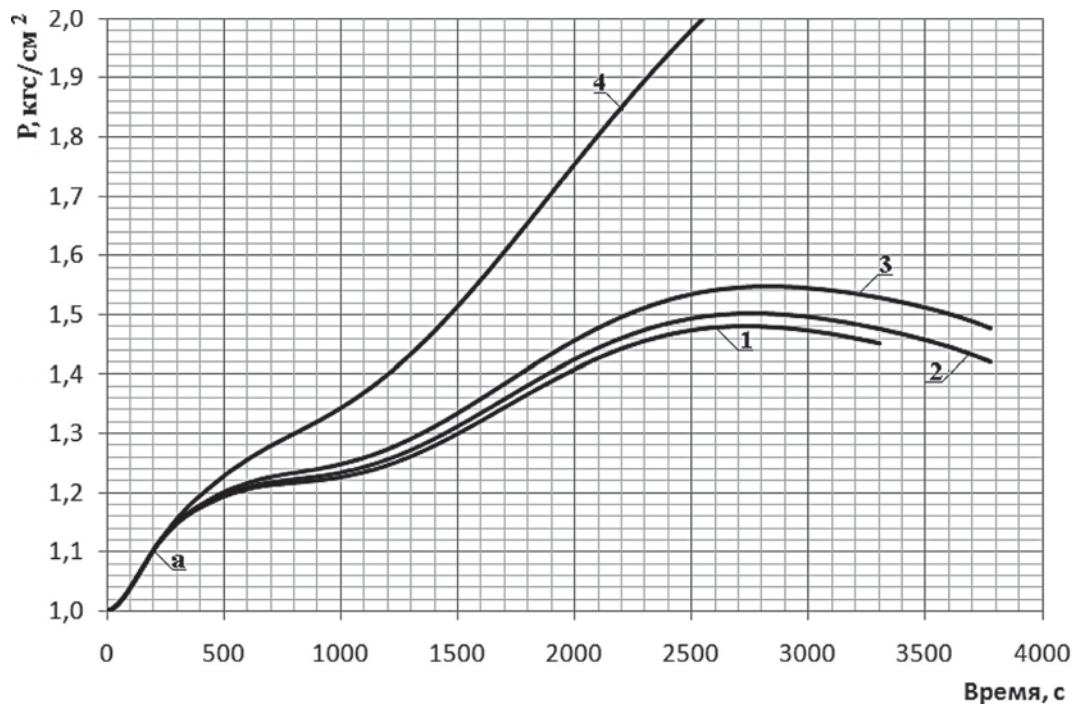
На рис. 4 приведена динамика изменения давления в гермообъёме РУ в условиях рассматриваемого аварийного процесса, что позволяет определить необходимое количество труб СРО для достижения заданного результата (в каждой трубе 24 форсунки, перепад давления на форсунках 0,5 МПа, температура спринклерного раствора 35 и 55 °С, расход через одну форсунку 1,264 кг/с).

Результаты расчета показали, что при увеличении длины труб СРО в диапазоне от 2 до 4 м давление в гермообъёме значительно ниже уставки срабатывания спринклерной системы; тем самым исключается прямое орошение оборудования гермообъёма.

Зная поступление пара в ГО (по данным расчета 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.



а

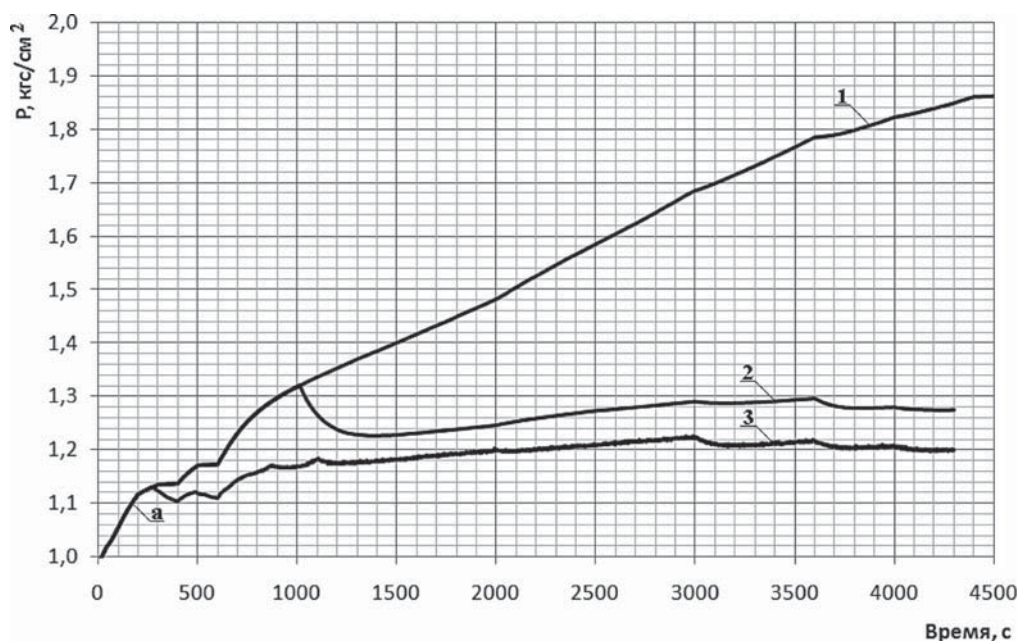


б

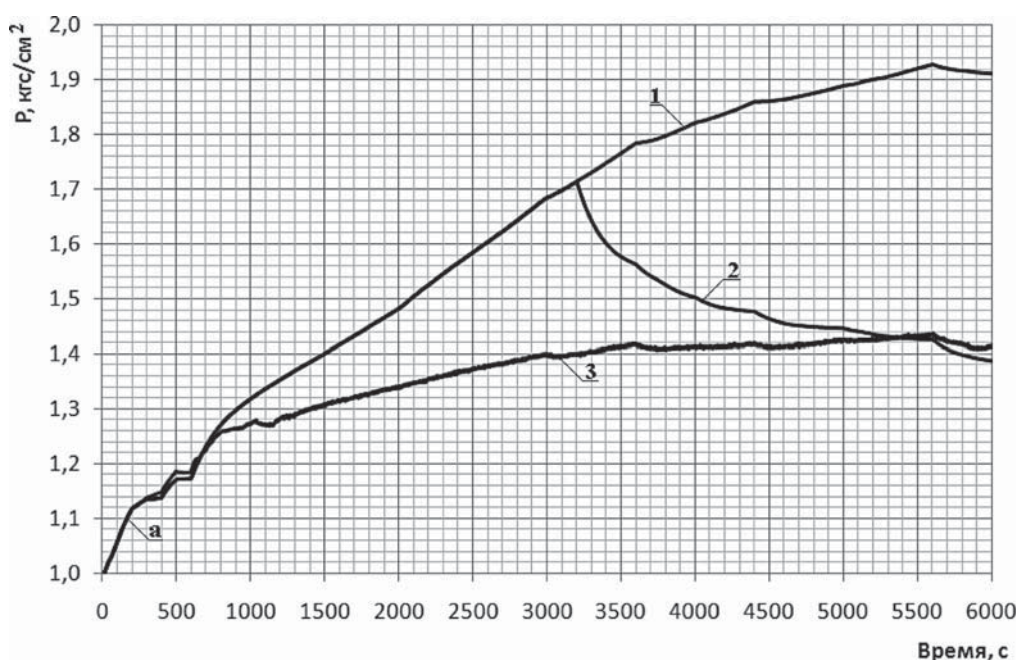
Рис. 4. Динамика изменения давления в гермообъеме при установке 10 труб СРО без учета конденсации пара на оборудовании и работы спринклерной системы:
a – для серийного энергоблока; *б* – для энергоблока «малой» серии;
 1, 2, 3 – изменение давления в ГО при длине труб $L = 4, 3$ и 2 м, соответственно;
 4 – изменение давления в ГО без учета СРО и спринклерной системы;
 точка «а» – момент срабатывания СРО

Выполнены расчеты динамики параметров в ГО без СРО и спринклерной системы, а также с учетом спринклерной системы, при включении в работу 10 труб СРО длиной 2 м и умеренно-консервативно завышенной температуре

спринклерного раствора 35 °С. Количество СРО определялось исходя из расходной характеристики спринклерных насосов: для работы 10 труб СРО достаточно двух каналов спринклерной системы.



а



б

Рис. 5. Динамика изменения давления в ГО с включением и отключением спринклерной системы и СРО для энергоблока «малой» серии (MELCOR 1.8.5):

- а — для серийного энергоблока; б — для энергоблока «малой» серии;
- 1 — изменение давления в ГО без наличия спринклерной системы и СРО;
- 2 — изменение давления в ГО при срабатывании спринклерной системы;
- 3 — изменение давления в ГО при срабатывании СРО;
- точка «а» — момент включения СРО

В модели также учитывается конденсация пара на стенках гермообъема и оборудовании внутри ГО.

Результаты моделирования показывают, что давление в ГО (рис. 5) не достигает уставки срабатывания спринклерной системы в штатном режиме. Соответственно, спринклерный раствор не подается на потолочные распылители и не происходит орошения охлаждающим раствором оборудования, находящегося в ГО.

Кривая 1 на рис. 5 иллюстрирует повышение давления паровоздушной смеси в ГО без учета работы СРО и спринклерной системы. Видно, что давление в ГО для серийного энергоблока на 1000-й секунде достигает значения срабатывания спринклерной системы ($P = 1,3 \text{ кгс/см}^2$), а на 3200-й секунде достигает уставки срабатывания спринклерной системы ($P = 1,7 \text{ кгс/см}^2$) для энергоблока «малой» серии и впоследствии продолжает расти.

Кривая 2 характеризует интенсивное снижение давления в ГО после включения спринклерной системы. Кривая 3 — включение СРО на 200-й секунде при избыточном давлении в ГО, равном 0,1 кгс/см². При этом давление в гермообъеме за все время работы СРО не достигает значения срабатывания спринклерной системы.

При увеличении длины труб СРО и изменении температуры спринклерного раствора можно получить еще более эффективное снижение избыточного давления в гермообъеме.

Расчетным путем как с помощью разработанных нами программ, так и с привлечением результатов расчета, полученных в коде RELAP5 и MELCOR 1.8.5, показано, что использование предлагаемого способа снижения давления в гермообъеме позволяет максимально ограничить рост давления в гермообъеме на приемлемо низком уровне после локализации гермооболочки для энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000. Эффективность работы СРО подтверждается результатами расчетного моделирования изменения давления в гермообъеме в условиях течи 1-го контура.

Для сравнения с математическими расчетами необходимо экспериментальное моделирование СРО во всем диапазоне конструктивных и режимных параметров, что позволит снизить риски при внедрении новых технологических процессов в системах безопасности реакторных установок АЭС.

Выводы

1. Реализация предлагаемого способа позволит сформировать адаптированную к условиям АЭС схему новой системы снижения давления в гермообъеме в условиях аварии с течью методом локальной конденсации пара струйным распылителем-охладителем.

2. Расчетное исследование показало, что при температуре спринклерного раствора 35 и 55 °С можно обеспечить снижение давления в гермообъеме для ВВЭР-1000/В-320 и ВВЭР-1000/В-302 при малых и средних течах.

3. Полученные результаты расчетов подтвердили возможность реализации предложенного способа снижения давления в ГО. Наличие СРО в гермообъеме при аварийном событии на блоке № 3 РАЭС позволило бы исключить

прямое орошение оборудования РУ от спринклерных устройств, не допуская роста давления в гермообъеме выше проектного предела.

4. Для окончательного принятия решения об использовании СРО на АЭС с ВВЭР-1000 необходимо провести экспериментальное исследование и сравнение с полученными результатами расчетного моделирования.

Список литературы

1. Герлига А. В. Способ эффективного снижения давления под гермооболочкой при аварийной течи теплоносителя // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. — Севастополь, 2008. — Вып. 1 (25). — С. 26–33.
2. 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. — № u200713338; заявл. 30.11.2007; опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10.
3. 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. труд. СНУЯЭиП. — 2009. — Вып. 4 (32). — С. 9–15.
4. Герлига А. В. Математическое моделирование работы струйного распылителя-охладителя (СРО) / Г. Г. Балакан, А. В. Герлига // Труды ОНПУ. — Одесса, 2006. — Вып. 2 (26). — С. 71–75.
5. 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. труд. СНУЯЭиП. — 2007. — Вып. 4 (24). — С. 43–48.
6. Балашевский А. С. Применение струйных распылителей-охладителей для предотвращения орошения охлаждающим раствором гермообъема реакторного отделения при срабатывании спринклерной системы / А. С. Балашевский, А. В. Герлига, И. И. Свириденко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2010. — Вып. 2 (46). — С. 42–49.
7. Отчет о расследовании нарушения в работе РАЭС. ЗРОВ-П07-002-09-09, 16.10.2009. — ОП «Ровенская АЭС» НАЭК «Энергоатом» Минтопэнерго Украины, 2009. — С. 15.

Надійшла до редакції 24.09.2010.