

А. С. Балашевский¹, С. Т. Мирошниченко²¹Севастопольское отделение
ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом»²Севастопольский национальный университет
ядерной энергии и промышленности

Анализ системы расхолаживания гермооболочки реакторной установки АЭС с ВВЭР-1000 в аварийный период

Проведен анализ эффективности и целесообразности применения струйных распылителей-охладителей (СРО) в сравнении с применением существующей на АЭС спринклерной системой для локализации пара в гермооболочке при аварии с потерей теплоносителя. Дана методика поэтапного расчёта с использованием кодов RELAP5 и MELCOR 1.8.5. Представлены результаты расчёта в зависимости от длины труб СРО и температуры охлаждающего раствора, влияющие на качество снижения давления в гермооболочке.

Ключевые слова: струйный распылитель-охладитель; атомная электрическая станция; водо-водяной энергетический реактор; реакторная установка; гермооболочка; импульсное предохранительное устройство; компенсатор давления; главный циркуляционный контур.

О. С. Балашевський, С. Т. Мирошниченко

Аналіз системи розхолодження гермооболонки реакторної установки АЕС з ВВЕР-1000 в аварійний період

Проаналізовано ефективність й доцільність застосування струменевих розпилювачів-охолоджувачів (СРО) порівняно із застосуванням наявної на АЕС спринклерної системи для локалізації пари в гермооболонці в разі аварії з втратою теплоносія. Надано методику поетапного розрахунку з використанням кодів RELAP5 і MELCOR 1.8.5. Наведено результати розрахунку залежно від довжини труб СРО і температури охолоджуючого розчину, що впливають на якість зниження тиску в гермооболонці.

Ключові слова: струменевий розпилювач-охолоджувач; атомна електрична станція; водо-водяний енергетичний реактор; реакторна установка; гермооболонка; імпульсний запобіжний пристрій; компенсатор тиску; головний циркуляційний контур.

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

Завершающим барьером безопасности на АЭС по предотвращению выброса радиоактивных веществ в окружающую среду является гермооболочка (ГО). Аварии с потерей теплоносителя, возникающие в процессе эксплуатации реакторной установки (РУ), снижают надежность и безопасность энергоблока в целом. К числу таких аварий относятся течи первого и второго контура в пределах ГО, сопровождаемые разгерметизацией главного циркуляционного контура (ГЦК), разрывом парового трубопровода, течью из трубопровода по линии подачи питательной воды, запретом на закрытие предохранительных клапанов, ложным срабатыванием защитных систем и т. п. Их причиной является развитие коррозионных процессов, дефектов в металле, усталость оборудования в процессе работы.

В настоящее время на существующих водоохлаждаемых реакторах для поглощения энергии в ГО реакторной установки при истечении теплоносителя в результате разрыва трубопровода используются локализующие системы безопасности — спринклерные системы. Воздействуя на энергетический баланс внутри защитной оболочки, спринклерные системы играют значительную роль в поддержании давления и температуры в приемлемых пределах.

Функция спринклерной системы как устройства для поглощения энергии заключается в том, чтобы отобрать тепловую энергию из атмосферы ГО с целью ограничения максимальных значений и длительности воздействия высоких давлений и температур в пределах границ гермооболочки после проектной аварии.

Спринклерная система спроектирована таким образом, чтобы обеспечить:

эффективное снижение давления в гермооболочке в аварийный период при разрывах трубопровода первого (второго) контура;

непопадание радиоактивности и непревышение максимально допустимых пределов уровня радиоактивности за пределами ГО;

недопущение разогрева топливных кассет в отсеках бассейна выдержки выше допустимых температур;

отвод тепловыделений из-под ГО в послеаварийный период;

перемешивание парогазовой среды для равномерной концентрации водорода по ГО.

С другой стороны, срабатывание спринклерной системы приводит к прямому орошению охлаждающим раствором всего оборудования ГО и к появлению целого ряда недостатков, подробно описанных в [1], [2]. Эти недостатки подтверждаются инцидентом, произошедшим на энергоблоке № 3 Ровенской АЭС [3] при проведении плановых работ в режиме «горячего» останова с последующим запретом на закрытие импульсно-предохранительных клапанов компенсатора давления (ИПУ КД). Как показало исходное событие, подрыв ИПУ и его заклинивание в открытом положении привело к отрицательным последствиям, связанным с выбросом пара в гермооболочку (повышение параметров пара в ГО) и включением спринклерной системы после достижения уставки её срабатывания, не говоря уже о двухмесячном простое энергоблока.

В данный момент на действующих АЭС Украины с РУ ВВЭР-1000 отсутствуют системы безопасности, способные эффективно противодействовать прямому орошению борным раствором всего оборудования, находящегося в гермооболочке при срабатывании спринклерных систем в условиях аварии с потерей теплоносителя. Потому стоит

задача усовершенствования существующей спринклерной системы за счёт внедрения новой технологии локализации пара в ГО.

Реализация способа. Систему для безопасного расхолаживания ГО предлагается реализовать подачей охлаждающего раствора не на спринклерные (потолочные) форсунки, а на форсунки, размещенные непосредственно внутри струйных распылителей-охладителей (СРО). Таким образом, обеспечивается конденсация пара внутри СРО между парогазовой средой и распыленной жидкостью за счёт самоэжекции, создаваемой капельным потоком с организованным отводом образующегося конденсата и охлаждающей жидкости в бак-приямок гермооболочки [4]. При этом исключается прямое орошение оборудования ГО, ликвидируются все недостатки [1], [2], что способствует продлению ресурса и срока службы энергоблока.

При внедрении данной технологии не требуется масштабного изменения спринклерной системы, необходимо лишь модернизировать ее, дополнив СРО. По габаритам СРО представляет собой трубы прямоугольного сечения длиной в пределах 2–4 м с поперечным сечением 1,5–6 м², что полностью соответствует размещению СРО по периферии у основания купола гермооболочки без дополнительных препятствий для работы перегрузочной машины. Иными словами, к напорному трубопроводу спринклерной системы подсоединяется дополнительный трубопровод для закачки воды на СРО, что по сравнению с имеющейся системой позволяет проводить периодические испытания форсуночной системы с отсутствием залива оборудования герметичной оболочкой.

Особенностью СРО является широкий спектр их применения на АЭС в качестве многофункциональной системы безопасности: удаление влаги из ГО с помощью СРО; применение СРО как системы пожаротушения; ликвидация образовавшегося в ГО водорода.

Рассмотрим процессы, происходящие в ГО при появлении течи, с учетом работы СРО на основе: 1) энергетического и 2) материального баланса.

1. Изменение количества энергии $\bar{Q}_{ГО}$ в ГО запишем так (рис. 1):

$$\frac{d\bar{Q}_{ГО}}{dt} = Q_{пр} - Q_{СРО} - Q_{конд}, \quad (1)$$

а энергию, которая забирается из ГО в единицу времени при помощи СРО, в виде

$$Q_{СРО} = Q_{СРО}^{ВХ} - Q_{СРО}^{ВЫХ} \quad (2)$$

или

$$Q_{СРО} = Q_{О.В}^{ВЫХ} - Q_{О.В}^{ВХ}, \quad (3)$$

где $Q_{пр}$ — энергия, приходящая в единицу времени с паром в месте течи; $Q_{СРО}$ — энергия, забираемая СРО из ГО в единицу времени; $Q_{конд}$ — энергия, уходящая из ГО в единицу времени с паром, сконденсировавшимся на оборудовании и стенах; $Q_{СРО}^{ВХ}$, $Q_{СРО}^{ВЫХ}$ — энергия, поступающая и уходящая в единицу времени из СРО с паровоздушной смесью и туманом; $Q_{О.В}^{ВХ}$, $Q_{О.В}^{ВЫХ}$ — энергия, переносимая поступающей и исходящей в единицу времени из СРО охлаждающей водой.

2. При истечении теплоносителя из трубопровода происходит повышение параметров в ГО. Когда парциальное

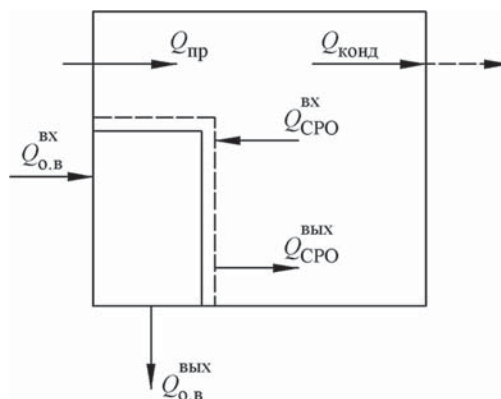


Рис. 1. Схема энергетических потоков в ГО

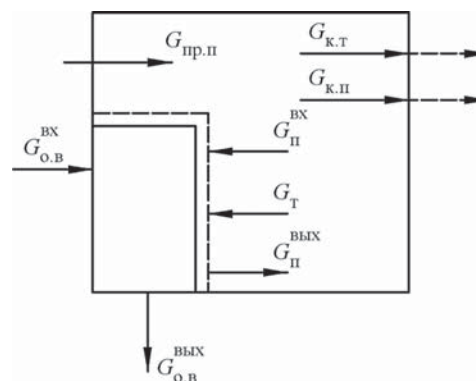


Рис. 2. Схема материальных потоков в ГО

давление пара $P_{п}$ соответствует давлению насыщения пара $P_{п}^s$ ($P_{п} = P_{п}^s$) или температура насыщения пара T_s равна температуре парогазовой среды T_0 ($T_s = T_0$), пар конденсируется в виде тумана равномерно по объему. В этом случае сверху в струйный распылитель-охладитель кроме пара и воздуха попадает капельный туман (рис. 2).

Изменение массы тумана и пара в ГО запишется в виде

$$\frac{dM_T}{dt} + \frac{dM_{п}}{dt} = G_{пр.п} - G_{п}^{ВХ} + G_{п}^{ВЫХ} - G_{к.п} - G_{к.т} - G_T, \quad (4)$$

где $G_{пр.п}$ — приход пара в ГО в месте течи; $G_{к.т}$ — количество тумана, конденсирующегося на оборудовании и стенах ГО за единицу времени; $G_{к.п}$ — количество пара, конденсирующегося на оборудовании и стенах ГО за единицу времени; $G_{п}^{ВХ}$, $G_{п}^{ВЫХ}$ — расход пара на входе и выходе СРО; G_T — расход тумана на входе в СРО.

Здесь принято допущение, что вышедший из СРО туман далее не попадает в гермообъем с насыщенным паром, а эвакуируется с помощью сепарационного устройства и отводящей трубы.

Как видно из выражения (4), изменение количества влаги в объёме ГО равно разности пришедшего и ушедшего расходов. Для этого нам необходимо учесть то количество влаги, которое забирается из ГО при помощи СРО с учетом конденсации пара на оборудовании и стенах ГО. Таким образом, количество влаги $G_{вл}$ за единицу времени, забираемое из объёма ГО при помощи СРО, составит

$$G_{вл} = G_{п}^{ВХ} - G_{п}^{ВЫХ} + G_T, \quad (5)$$

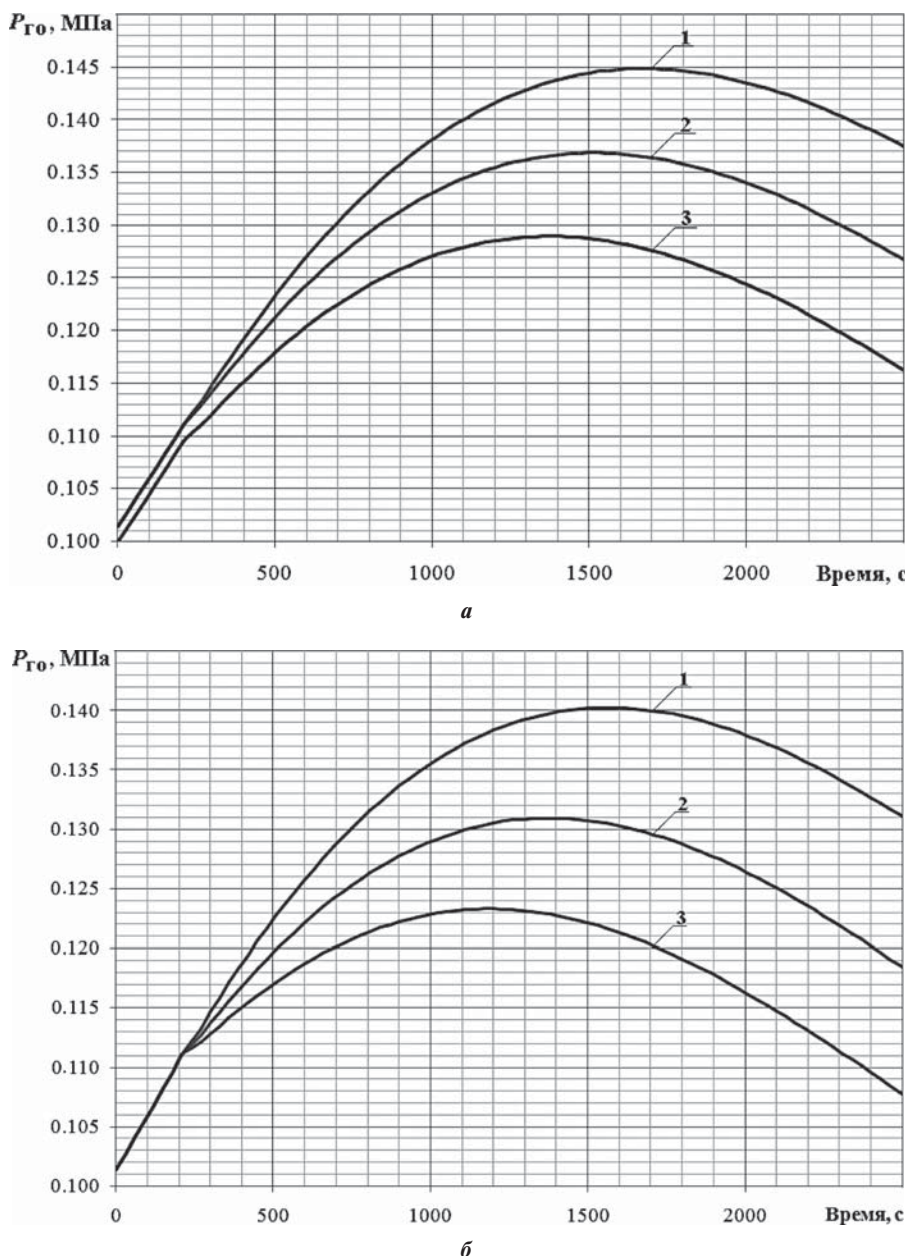


Рис. 3. Влияние температуры охлаждающей воды на динамику изменения давления в ГО при установке 10 труб СРО:
 а — длиной 2 м; б — длиной 4 м:
 1 — температура спринклерного раствора 55 °С; 2 — то же, 45 °С; 3 — то же, 35 °С

или, выразив через $G_{вл}$ изменение расхода охлаждающей воды, что более удобно, запишем

$$G_{вл} = G_{0,в}^{в\text{ых}} - G_{0,в}^{в\text{х}}, \quad (6)$$

где $G_{0,в}^{в\text{х}}$, $G_{0,в}^{в\text{ых}}$ — расход охлаждающей воды на входе и выходе СРО.

Отметим, что в случае исчезновения тумана в ГО представленная система уравнений упрощается.

Разработанная нами программа модели ГО при использовании математической модели СРО описывает уравнения неразрывности, энергии и количества движения для парогазовой смеси как при наличии тумана, так и без

тумана внутри и вне факела, а также уравнения изменения массы, энергии и количества движения потока капель в факеле [5].

Методика проведения расчета. Для того чтобы проследить динамику изменения давления и температуры в ГО без подключения и с подключением СРО при аварии с потерей теплоносителя, выполнены расчёты с привлечением теплогидравлических кодов RELAP5/MOD3.4, MELCOR 1.8.5 и разработанной собственными силами математической модели системы ГО и СРО.

Расчеты проводились последовательно в три этапа.

На первом этапе расчёта использовалась четырехпетлевая модель РУ для REALP5/MOD3.4, адаптированная

под параметры ВВЭР-1000. Далее определялись параметры пароводяной смеси, поступающей в ГО из течи диаметром от 20 до 50 мм (область «малых» течей) и от 50 до 80 мм (область «средних» течей) без учета работы вспомогательных поглотительных систем.

На втором этапе расчета для моделирования процессов в ГО использовалась полная модель ГО с помощью расчетного кода MELCOR 1.8.5 с учетом конденсации пара на стенках, оборудовании и металлоконструкциях ГО.

На третьем, завершающем этапе расчета к модели ГО подключалась математическая модель СРО, чтобы проследить качество снижения давления в ГО, определить максимальную границу течи, при которой параметры в ГО будут ниже уставки срабатывания спринклерной системы, а также определить оптимальные конструктивные и режимные характеристики СРО, влияющие на надежность и безопасность расхолаживания ГО.

В качестве примера рассмотрим два основных параметра, влияющих на эффективность работы СРО и снижение давления в ГО.

Сравнив кривые 1, 2, 3 на рис. 3, а и б, видим, что в первом и втором случае давление в гермооболочке не достигает уставки срабатывания спринклерной системы для серийных энергоблоков (ВВЭР-1000/В-320) — 0,13 МПа и малосерийных энергоблоков (ВВЭР-1000/В-302) — 0,17 МПа.

Изменение длины трубы СРО от 2 до 4 м и температура охлаждающего раствора в пределах 35...55 °С играет существенную роль в обеспечении надежного и безопасного расхолаживания ГО.

Полученные результаты расчетного моделирования подтвердили актуальность применения предлагаемого способа снижения давления в ГО при аварии с потерей теплоносителя.

Более подробно зависимость остальных конструктивных и режимных параметров СРО на качество снижения давления в ГО и интенсификации пара с помощью СРО представлена в [6], [7].

Выводы

Наличие СРО в гермооболочке РУ позволит избежать последствий срабатывания спринклерных устройств: прямого орошения борным раствором всего оборудования, находящегося в ГО; радиационного загрязнения оборудования после повторного залива ГО; простоя энергоблока; дезактивации оборудования в послеварийный период и т. п., что станет основанием для продления ресурса и проектного срока службы энергоблока в целом.

Реализация предлагаемой технологии конденсации пара позволит разработать рекомендации по внедрению СРО на действующих, проектируемых и строящихся АЭС.

Для окончательного принятия решения об эффективности и целесообразности применения СРО необходимо провести экспериментальное исследование с созданием экспериментального стенда и соответствующие сравнения с результатами расчетного моделирования и экспериментальными данными.

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. 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.
3. Отчет о расследовании нарушения в работе РАЭС. ЗРОВ-П07-002-09-09, 16.10.2009 / ОП «Ровненская АЭС» НАЭК «Энергоатом» Минтопэнерго Украины. — 2009. — С. 15.
4. 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.
5. Герлига А. В. Математическое моделирование работы струйного распылителя-охладителя (СРО) / Г. Г. Балакан, А. В. Герлига // Тр. 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. труд. СНУЯЭиП. — 2007. — Вып. 4(24). — С. 43–48.
7. 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.

Надійшла до редакції 21.01.2011.