

А. С. Балашевский¹,
С. Т. Мирошниченко²

¹Севастопольское отделение ОП НТЦ ГП НАЭК «Энерго-атом», Украина

²Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Украина

Анализ результатов расчёта максимальной проектной аварии с применением струйных распылителей-охладителей

Представлены результаты расчетного моделирования штатной спринклерной системы, струйных распылителей-охладителей (СРО) и их влияние на эффективность снижения давления и температуры в гермообъеме РУ АЭС с ВВЭР в условиях максимальной проектной аварии. С помощью расчетных кодов RALAP5/MOD3.4 и MELCOR 1.8.5 определены расходы пароводяной смеси, поступающей в гермообъем при наличии течи.

Ключевые слова: струйный распылитель-охладитель; атомная электрическая станция; водо-водяной энергетический реактор; реакторная установка; гермообъем; главный циркуляционный трубопровод; максимальная проектная авария.

О. С. Балашевський, С. Т. Мирошніченко

Аналіз результатів розрахунку максимальної проектної аварії із застосуванням струменевих розпилювачів-охолоджувачів

Наведено результати розрахункового моделювання штатної спринклерної системи, струменевих розпилювачів-охолоджувачів і їх вплив на ефективність зниження тиску і температури в гермооболонці РУ АЕС з ВВЕР в умовах максимальної проектної аварії. За допомогою розрахункових кодів RALAP5/MOD3.4 і MELCOR 1.8.5 визначено витрати пароводяної суміші, що надходить у гермооб'єм за наявності течі.

Ключові слова: струменевий розпилювач-охолоджувач; атомна електрична станція; водо-водяний енергетичний реактор; реакторна установка; гермооб'єм; головний циркуляційний трубопровід; максимальна проектна аварія.

© А. С. Балашевский, С. Т. Мирошниченко, 2012

Современное развитие атомной энергетики вызывает особое внимание к проблеме безопасности. Модернизация и усовершенствование действующих систем безопасности позволяет удовлетворить повышенные требования к их надежности, безопасности и экономичности в целом. Применяемая на АЭС спринклерная система обеспечивает поддержание давления в гермообъеме (ГО) в заданных пределах и отвод теплоты из ГО путем распыла воды и конденсацию выделенного пара, но ее срабатывание наносит значительный ущерб оборудованию реакторной установки. Поэтому необходимо создание системы, которая позволила бы исключить повреждение и залив борным раствором оборудования, находящегося в гермообъеме. В данном случае для локализации аварийных последствий при течи первого контура предлагается применение струйных распылителей-охладителей [1–4].

Тем не менее, исходя из того, что вероятность возникновения максимальной проектной аварии (МПА) на действующих энергоблоках АЭС Украины практически нулевая, возникает вопрос о необходимости проверки работоспособности струйных распылителей-охладителей (СРО) не только в условиях «малых» и «средних» течей, но и при двухстороннем разрыве главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ).

Целью научной работы является проверка работоспособности СРО в условиях МПА для предотвращения выброса радиоактивных веществ за пределы защитной оболочки. Для достижения поставленной цели необходимо провести расчетное моделирование с привлечением расчетных кодов RALAP5 и MELCOR 1.8.5.

Максимальная проектная авария, связанная с разрывом «холодных» и «горячих» ниток эквивалентным диаметром 850 мм, может оказать существенное влияние не только на целостность активной зоны реактора, но и определяющее влияние на целостность гермообъема [5–7]. Анализируя МПА с применением современных кодов и разработанной нами математической модели СРО, позволяющих получить более реалистичские результаты, были исследованы характеристики изменения параметров среды в ГО при наличии и отсутствии СРО.

Анализ МПА на реакторных установках с ВВЭР-1000/В-320 с применением расчетных кодов RELAP5 и MELCOR 1.8.5 выполнен при разрыве «холодной» нитки ГЦТ с двухсторонним истечением.

Процессы, протекающие в гермообъеме при аварии с потерей теплоносителя, можно описать системой уравнений на основе схемы массовых потоков пара, газа и тумана (рис. 1, а).

Скорость изменения параметров парогазовой смеси в ГО можно оценить из уравнения сохранения массы

$$V_{ГО} \frac{d\rho_{ПГ}}{dP} \cdot \frac{dP}{dt} = G_T(t) - G_{П} - G_{К} - G_{ПТ} + G_{П,СРО}^{ВЫХ} - G_{П,СРО}^{ВХ},$$

где $V_{ГО}$ — объем ГО; $\rho_{ПГ}$ — плотность парогазовой смеси; P — давление в ГО; t — время, в течение которого пароводяная смесь поступает в ГО; $G_T(t)$ — расход истекающего теплоносителя; $G_{П}$ — расход пара, поступающего в ГО из течи; $G_{К}$ — количество сконденсировавшегося пара в ГО; $G_{ПТ}$ — расход пара на образование тумана в ГО; $G_{П,СРО}^{ВЫХ}$ — расход пара на выходе из СРО; $G_{П,СРО}^{ВХ}$ — расход пара на входе в СРО.

Далее запишем уравнение баланса массы тумана в ГО:

$$V_{ГО} \frac{d\rho_T}{dt} = G_{ПТ} - G_{Т,СРО}^{ВХ},$$

где ρ_T — плотность капельной среды (тумана); $G_{Т,СРО}^{ВХ}$ — масса капель на входе в объём СРО.

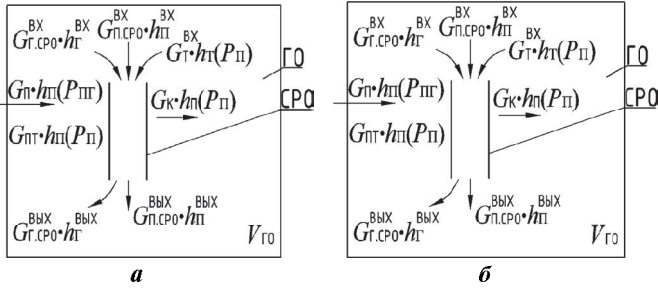


Рис. 1. Схема массовых (а) и энергетических (б) потоков пара, газа и тумана в системе ГО и СРО

В соответствии со схемой энергетических потоков парогазовой смеси с туманом (рис. 1, б) можно составить следующее балансовое энергетическое уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [G_T h_T + G_T h_T (P_{II}) + G_{II} h_{II} (P_{II})] = \\ = G_{II} h_{II} (P_{III}) - G_{II,СРО}^{ВХ} h_{II,СРО}^{ВХ} (P_{II}) + G_{II,СРО}^{ВЫХ} h_{II}^{ВЫХ} - \\ - G_{Т,СРО}^{ВХ} h_{Т,СРО}^{ВХ} + G_{Т,СРО}^{ВЫХ} h_T^{ВЫХ} - G_K h_{II} (P_{II}) - G_{Т,СРО}^{ВХ} h_T^{ВХ} (P_{II}), \end{aligned}$$

где $G_{Т,СРО}^{ВХ}$ — расход тумана на входе в СРО; $h_{II}^{ВЫХ}$, $h_T^{ВЫХ}$ — энтальпия пара и газа, выходящего из СРО; $h_{II}^{ВХ}$, $h_T^{ВХ}$ — энтальпия пара и газа на входе в СРО; h_T — энтальпия капельной среды (тумана).

Данные уравнения после дополнения конечными зависимостями для определения расходов пара на конденсацию внутри ГО и расхода пара в ГО через образовавшуюся течь

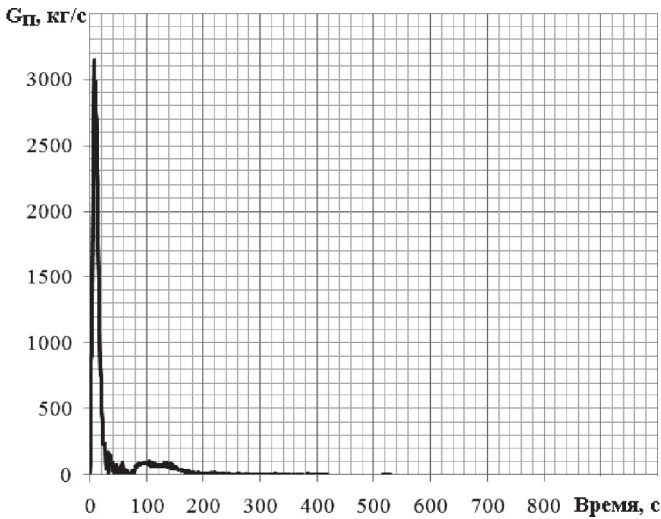


Рис. 2. Изменение расхода пара, поступающего в ГО при МПА (RELAP 5)

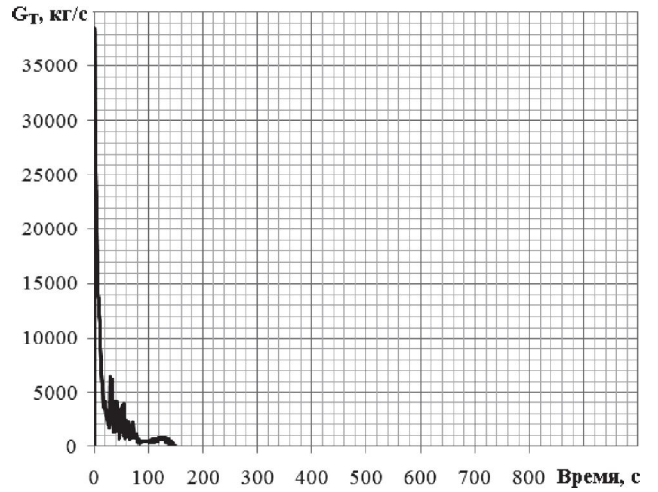


Рис. 3. Изменение расхода теплоносителя, поступающего в ГО при МПА (RELAP 5)

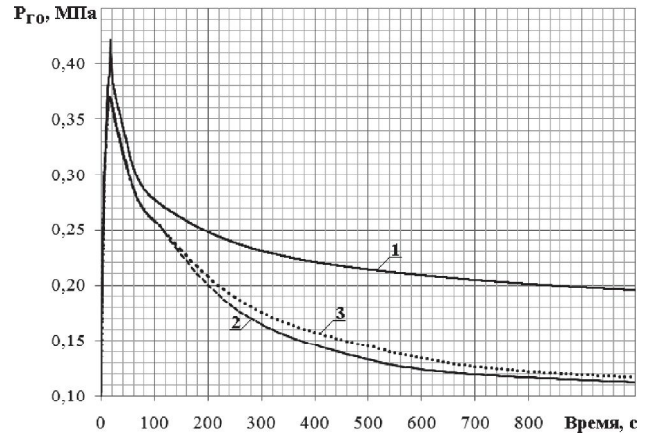


Рис. 4. Динамика изменения давления в ГО при МПА (MELCOR 1.8.5):
1 — изменение давления в ГО без включения СРО и спринклерной системы;
2 — изменение давления в ГО при включении спринклерной системы;
3 — изменение давления в ГО при включении СРО

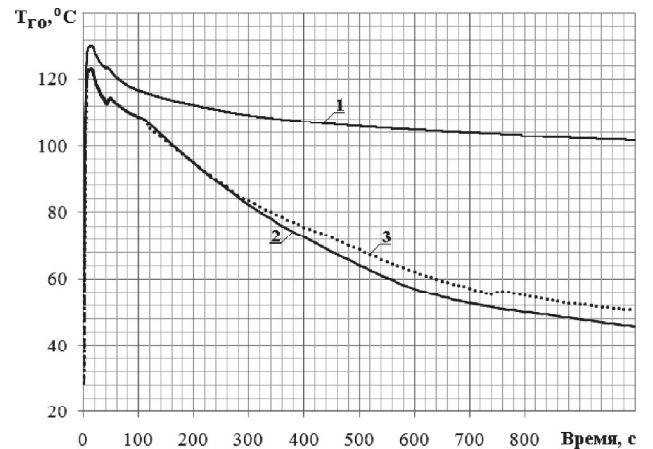


Рис. 5. Динамика изменения температуры в ГО при МПА (MELCOR 1.8.5):
1 — изменение температуры в ГО без включения СРО и спринклерной системы;
2 — изменение температуры в ГО при включении спринклерной системы;
3 — изменение температуры в ГО при включении СРО

позволяют определить количество труб СРО для поддержания безопасного давления в ГО без включения спринклерной системы.

Далее рассмотрим расход пара (рис. 2) и теплоносителя (рис. 3), поступающего в ГО при МПА.

Как показано на рис. 4 и 5, максимальные значения давления и температуры в ГО достигаются практически мгновенно — в течение 10...15 с от начала развития аварийного процесса.

В аварийной ситуации, связанной с поступлением пара в ГО, СРО полностью обеспечивают поддержание давления не более 4,0 кгс/см² (рис. 4), температура при этом не будет превышать расчётную — 150 °С (рис. 5).

На основании расчётного исследования можно сделать вывод, что для конденсации пара в ГО объемом 60·10³ м³ при МПА и снижении давления в ГО ниже проектного значения потребуется 10—12 труб СРО с расходом охлаждающей жидкости 1095—1315 м³/ч (соответствует работе двух каналов спринклерной системы с расходом 700 м³/ч).

Таким образом, СРО обеспечивает основную функцию ГО — предотвращение выброса радиоактивных изотопов в окружающую среду [8—10].

Важной характеристикой СРО является работа в различных условиях. Малые габариты, универсальность, надёжность позволяют использовать СРО не только для снижения давления в ГО, но и для пожаротушения, очистки газовой среды помещений от твердых и жидких аэрозолей [11, 12].

Выводы

Полученные результаты расчёта поведения паровой среды в ГО во времени с применением СРО показывают, что давление в ГО не превышает допустимое (проектное) значение, при этом СРО способствуют сохранению целостности гермообъёма и предотвращению выброса радиоактивных веществ за пределы ГО.

Список использованной литературы

1. 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.
2. Герлига А. В. Расчётный анализ снижения давления в гермообъёме контейнента с помощью струйных распылителей-охладителей при наличии течи / Г. Г. Балакан, А. В. Герлига, В. А. Герлига, А. Ю. Проходцев // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. — Севастополь, 2006. — Вып. 3 (19). — С. 30—37.
3. Герлига А. В. Результаты расчётного моделирования системы аварийного снижения давления под гермооболочкой реакторной установки АЭС с ВВЭР-1000 на основе струйного распылителя-охладителя / Г. Г. Балакан, А. В. Герлига, И. И. Свириденко // Вестник СевГТУ. — Севастополь, 2007. — Вып. 77: Механика, энергетика, экология. — С. 158—165.

4. Герлига А. В. Влияние параметров струйного распылителя-охладителя на снижение давления в гермообъёме 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.

5. Васильченко В. Н. Моделирование аварий на ядерных энергетических установках атомных электростанций / В. Н. Васильченко, Е. З. Емельяненко, В. В. Ким, А. Е. Смышляев // Одесса: «Резон 2000», 2002. — С. 466.

6. Коврижкин Ю. Л. Оптимизация планирования ремонтов и испытаний систем гермооболочки АЭС на основе риск-ориентированных подходов / Ю. Л. Коврижкин, Ю. А. Комаров, В. М. Пышный и др. — Одесса: ТЭС, 2006. — С. 383.

7. Комаров Ю. А. Методы оптимизации испытаний на герметичность системы гермооболочки реакторной установки в период ремонтных кампаний АЭС с ВВЭР-1000 / Ю. А. Комаров, С. И. Косенко, В. И. Скалзубов, И. М. Фольтов // Проблемы безопасности АЭС и Чернобыля. — К., 2008. — Вып. 9. — С. 15—22.

8. Балашевский А. С. Аварийное расхолаживание гермообъёма 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.

9. Балашевский А. С. Предотвращение орошения охлаждающим раствором гермообъёма 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.

10. Балашевский А. С. Оптимизация конструктивных параметров струйного распылителя-охладителя / А. С. Балашевский, В. А. Герлига // Сб. науч. труд. СНУЯЭиП. — 2011. — Вып. 3(39). — С. 7—12.

11. Сухов А. К. Повышение надёжности 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.

12. Бейнер К. С. Использование универсальной эжекторной установки для конденсации радиоактивного пара в целях продления ресурса последней / К. С. Бейнер, А. К. Сухов, Е. Н. Сычев // Сб. науч. тр. СНИЯЭиП. — Севастополь: СНИЯЭиП, 2002. — Вып. 6. — С. 12—15.

Получено 10.11.2011.