

УДК 621.039

А.В. Герлига, научн. сотрудник

*Научно-исследовательский институт АЭС
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
gerliga@stel.sebastopol.ua;*

И.И. Свириденко, доц., канд. техн. наук

*Севастопольский национальный технический университет
Студгородок, ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053
emss@stel.sebastopol.ua;*

Г.Г. Балакан, гл. специалист по энергетическим реакторам

*ОП «Южно-Украинская АЭС» НАЭК «Энергоатом»
г. Южноукраинск, Украина, 55000
balakan@sunpp.atom.gov.ua*

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО СНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПОД ГЕРМООБОЛОЧКОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ АЭС С ВВЭР–1000 НА ОСНОВЕ СТРУЙНОГО РАСПЫЛИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ

Разработана система аварийного снижения давления под гермооболочкой АЭС с ВВЭР–1000 на основе струйного распылителя-охладителя. Представлена математическая модель, описывающая процессы в гермообъеме реакторной установки при работе струйного распылителя-охладителя, приведены результаты расчетов работы системы.

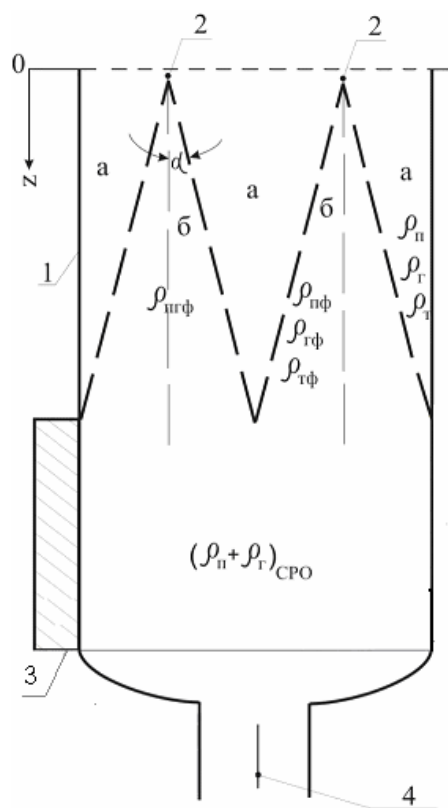
Для обеспечения защиты гермооболочки реакторного отделения атомной электростанции (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) от превышения давления в условиях аварии с течью теплоносителя 1-го и 2-го контуров применяется спринклерная система. Спринклерная система относится к локализирующим системам безопасности и включает бак с запасом спринклерного раствора (используется раствор борной кислоты), спринклерный насос, распылители, связывающие их трубопроводы и арматуру. Система обеспечивает поддержание давления в гермообъеме (ГО) ниже расчетного значения, которое для гермооболочки реакторного отделения АЭС с ВВЭР–1000 не должно превышать 0,5 МПа, температуры – 150 °С.

Свою основную задачу (снижение давления под гермооболочкой) спринклерная система выполняет путем конденсации образующегося при аварии с течами пара за счет распыла спринклерного раствора в ГО. При этом происходит прямое орошение оборудования реакторной установки спринклерным раствором, что является главным недостатком этой системы. Кроме того, при попадании спринклерного раствора на теплоизоляцию оборудования и трубопроводов происходит ее размывание с выносом крупных твердых фрагментов теплоизоляционного материала в бак-приямок гермооболочки. Эти фрагменты перекрывают отверстия в фильтрующих сетках бака-приямка, ограничивая расход спринклерного раствора на рециркуляцию, ухудшая, тем самым, условия функционирования спринклерной системы, что может привести к нарушению безопасного расхолаживания реакторной установки и ГО.

Наиболее эффективным методом снижения давления пара за счет его конденсации в замкнутом объеме является использование прямооточных струйных распылительных аппаратов, обеспечивающих локальную конденсацию пара в объеме аппарата с организованным отводом образующегося конденсата. В энергетике струйные теплообменные аппараты достаточно широко используются в деаэраторах, конденсаторах и смешивающих подогревателях [1]. Применение подобного метода для конденсации пара в ГО АЭС при аварии с течью позволит обеспечить организованный отвод образующегося конденсата в бак-приямок и защиту оборудования реакторной установки от прямого залива спринклерным раствором, а также от попадания раствора борной кислоты на электрооборудование и металлоконструкции, расположенные под гермооболочкой.

Впервые использование прямооточных распылительных устройств для снижения давления под гермооболочкой реакторного отделения АЭС было предложено проф. А.К. Суховым [2]. Предполагалось, что водо-воздушная эжекторная установка, состоящая из отдельных параллельно работающих модулей, обеспечит конденсацию пара в локальном объеме корпуса модуля. Проведенные в Севастопольском ВВМИУ экспериментальные исследования различных конструкций прямооточных распылительных аппаратов показали возможность их применения для конденсации пара в замкнутом отсеке, а также для снижения температуры атмосферы при пожаре.

Целью статьи является рассмотрение нового устройства локальной конденсации пара для системы, обеспечивающей повышение надежности и безопасности гермооболочки реакторного отделения АЭС, исключающей орошение реакторной установки при локализации аварии с течью 1-го и 2-го контура. Устройство для локальной конденсации пара представляет собой струйный распылитель-охладитель (СРО), схема которого изображена на рисунке 1. Снижение давления под гермооболочкой обеспечивается за счет увлечения паровоздушной смеси из ГО в трубу струйного аппарата потоком капель охлаждающей воды и снижения давления в объеме СРО за счет конденсации пара. Эти два факта приводят к возникновению перепада давления и связанному с этим активному поступлению во внутреннюю полость СРО «горячих» потоков парогазовой среды. Пар конденсируется на струях спринклерного раствора, а конденсат из объема СРО организованно отводится к приемку ГО.



СРО включает корпус 1, в верхней части которого расположены форсунки 2, предназначенные для распыла капельного факела, увлекающего паровоздушную смесь из ГО в полость СРО, где пар частично конденсируется на каплях факела, а воздух охлаждается. Охлажденный воздух и остаток пара выбрасываются в ГО через сепаратор 3, а спринклерный раствор вместе с конденсатом пара удаляются по трубопроводу 4 в бак-приямок. Вода в форсунки подается спринклерными насосами. В состав системы аварийного снижения давления входит комплект СРО, устанавливаемых параллельно и размещаемых у основания купола гермооболочки.

Рисунок 1 – Схема СРО: 1 – корпус СРО; 2 – форсунки; 3 – выходной коллектор с сепаратором; 4 – трубопровод для отвода жидкости; а – пространство, занятое паровоздушной смесью, поступающей из ГО (межфакельное пространство); б – капельные факелы форсунок (факельное пространство)

Обзор литературных источников и анализ проектов эксплуатируемых в настоящее время энергоблоков АЭС показал отсутствие расчетных методик, позволяющих определить давление в ГО при использовании СРО. Для создания такой методики необходима разработка математической модели СРО, которая бы учитывала известные физические процессы, протекающие в струйных аппаратах [2, 3]. В связи с этим, целью данной работы стала разработка математической модели СРО и создание на ее основе расчетной методики, которая позволила бы расчетным путем проверить эффективность использования СРО для снижения давления в ГО АЭС с ВВЭР.

На основе анализа термодинамических процессов, протекающих в ГО при утечке теплоносителя первого и/или второго контура, установлено, что образующаяся при этом паровоз-

душная смесь имеет параметры линии насыщения при соответствующем парциальном давлении.

При распыле охлаждающего раствора в СРО процесс в межфакельном (внефакельном) пространстве описывается следующей системой уравнений:

1) уравнения неразрывности для пара, газа и тумана, соответственно,

$$\frac{d(W_{\Pi\Gamma}\rho_{\Pi}F_{\Pi\Gamma})}{dz} = -\rho_{\Pi}\frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha} - F_{\Pi\Gamma}q_{m\Gamma}; \quad (1)$$

$$\frac{d(W_{\Pi\Gamma}\rho_{\Gamma}F_{\Pi\Gamma})}{dz} = -\rho_{\Gamma}\frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha}; \quad (2)$$

$$\frac{dG_{\Gamma}}{dz} = -\rho_{\Gamma}\frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha} + F_{\Pi\Gamma}q_{m\Gamma}; \quad (3)$$

2) уравнение энергии для парогазотуманной смеси

$$\frac{d}{dz}[G_{\Pi}i''_{\Pi} + G_{\Gamma}i_{\Gamma} + G_{\Gamma}i'_{\Gamma}] = -\frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha}[\rho_{\Pi}i''_{\Pi} + \rho_{\Gamma}i_{\Gamma} + \rho_{\Gamma}i'_{\Gamma}]; \quad (4)$$

3) уравнение количества движения

$$\rho_{\Pi\Gamma\tau}F_{\Pi\Gamma}W_{\Pi\Gamma}\frac{dW_{\Pi\Gamma}}{dz} = -F_{\Pi\Gamma}\frac{dP}{dz} - \Pi_{\text{СРО}}\tau + W_{\Pi\Gamma}\rho_{\Pi\Gamma\tau}\frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha}, \quad (5)$$

где $W_{\Pi\Gamma}$ – скорость парогазовой смеси, м/с; $W_{\Pi\Gamma\kappa}$ – скорость прихода парогазовой смеси в факельное пространство, м/с; $F_{\Pi\Gamma}$ – площадь сечения парогазового потока вне факелов, м²; $\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}$ – периметр сечения конуса факела, м; $\Pi_{\text{СРО}}$ – периметр корпуса СРО, м; $q_{m\Gamma}$ – массовый поток пара, идущего на образование тумана в единице объема в единице времени, кг/м³·с; ρ – плотность, кг/м³; z – координата длины факела, м; α – ½ угла распыла факела, град.; G – расход, кг/с; i – энтальпия, Дж/кг; τ – касательное напряжение трения на стенке, Н/м²; индексы: Π – пар; Γ – туман; Γ – газ; $\Pi\Gamma\tau$ – парогазовая смесь с туманом; ' – жидкость на линии насыщения; '' – пар на линии насыщения.

Плотность парогазовой смеси с туманом определяется как сумма плотностей составляющих смесь

$$\rho_{\Pi\Gamma\tau} = \rho_{\Pi} + \rho_{\Gamma} + \rho_{\tau}.$$

Для процесса в факельном пространстве справедливы следующие уравнения:

1) уравнения неразрывности

- для потока пара

$$\frac{d(W_{\Pi\Gamma\Phi}\rho_{\Pi}\bar{F}_{\Phi})}{dz} = \rho_{\Pi}\frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha} - F_{\Phi}q_{m\Gamma\Phi} - \frac{dG_{\kappa}}{dz}; \quad (6)$$

- для потока газа

$$\frac{d(W_{\Pi\Gamma\Phi}\rho_{\Gamma}\bar{F}_{\Phi})}{dz} = \rho_{\Gamma}\frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha}; \quad (7)$$

- для потока тумана

$$\frac{dG_{\Gamma\Phi}}{dz} = \rho_{\Gamma}\frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha} + \bar{F}_{\Phi}q_{m\Gamma\Phi}; \quad (8)$$

2) уравнение энергии для парогазотуманной смеси

$$\frac{d}{dz}[G_{\Pi\Phi}i''_{\Pi\Phi} + G_{\Gamma\Phi}i_{\Gamma\Phi} + G_{\Gamma\Phi}i'_{\Gamma\Phi}] = \frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha}[\rho_{\Pi}i''_{\Pi} + \rho_{\Gamma}i_{\Gamma} + \rho_{\Gamma}i'_{\Gamma}] - \frac{F_{\kappa\Phi}}{V_{\kappa}}[i''_{\Pi\Phi}q_m + q]; \quad (9)$$

3) уравнение количества движения для парогазотуманной смеси

$$\rho_{\Pi\Gamma\tau\Phi}\bar{F}_{\Phi}W_{\Pi\Gamma\Phi}\frac{dW_{\Pi\Gamma\Phi}}{dz} = -\bar{F}_{\Phi}\frac{dP}{dz} - W_{\Pi\Gamma\Phi}\rho_{\Pi\Gamma\tau}\frac{\Pi_{\Pi\Gamma\kappa}W_{\Pi\Gamma\kappa}}{\cos\alpha} + \frac{F_{\kappa\Phi}[\rho + (W_{\Pi\Gamma\kappa} - W_{\kappa})q_m]}{V_{\kappa}}, \quad (10)$$

где \bar{F}_{Φ} – площадь сечения, занятое паром и газом в факеле, м²; F_{Φ} – площадь сечения всех факелов, м²; q_m – массовый поток конденсирующегося пара на одной капле, кг/с; q – тепловой поток от парогазовой смеси к капле, Дж; W_{κ} – осредненная по сечению факела скорость

капли, м/с; V_K – средний в сечении факела объем капли, м³; $F_{K\Phi}$ – площадь сечения факела занятая каплями, м²; индексы: ϕ – факел, K – капля.

Система уравнений, описывающая движение капель в факеле, представляется в виде:

$$\frac{dV_K}{dz} = \frac{q_m}{W_K \rho_{ж}}; \quad (11)$$

$$\frac{dG_K}{dz} = \frac{F_{K\Phi} q_m}{V_K}, \quad G_K = W_K F_{\phi} n \rho_{ж} V_K, \quad F_{K\Phi} = F_{\phi} n V_{K0}; \quad (12)$$

$$\frac{dW_K}{dz} = \frac{g}{W_K} - \frac{f + (W_K - W_{\Pi\Gamma\Phi}) q_m}{V_K \rho_{ж} W_K}; \quad (13)$$

$$\frac{dT_K}{dz} = \frac{(i''_{\Pi\Phi} - i_K) q_m + q}{C_{PK} V_K W_K \rho_{ж}}, \quad (14)$$

где C_{PK} – изобарная теплоемкость капель, кДж/кг·К; n – количество капель в единице объема, шт./м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; f – сила воздействия капли (трения) на поток парогазовой смеси факела, Н; V_{K0} – начальный средний по сечению факела объем капли, м³; индексы: $ж$ – жидкость.

При окончательной записи уравнения сохранения количества движения для капли (13) влиянием на ее движение градиента окружающего давления пренебрегалось, что было подтверждено соответствующими расчетами.

Выражение для силы трения капли согласно [4] запишем в виде

$$f = \frac{C_D}{2} \pi D_K^2 \rho_{ж} (W_K - W_{\Pi\Gamma\Phi})^2,$$

где $C_D = 24/Re_K$ при $Re_K \leq 10^2$.

Здесь

$$Re_K = \frac{D_K (W_K - W_{\Pi\Gamma\Phi})}{\nu_{\Pi\Gamma\Phi}},$$

где C_D – коэффициент распыливания; D_K – диаметр капли, м; Re_K – число Рейнольдса.

Для q_m и q в разрабатываемой модели предлагаем использовать зависимости [5]

$$q_m = \beta(\rho'' - \rho_{\Pi}), \quad q = \alpha(T_S - T_{ж}),$$

где β – приведенный коэффициент массоотдачи, м³/с [5]; D_K – диаметр капли, м; α – приведенный коэффициент теплоотдачи, Вт/К [5]; T_S – температура насыщения, К.

При исчезновении тумана в факеле система уравнений (6)–(10) изменяется и принимает вид

$$\frac{d(W_{\Pi\Gamma\Phi} \rho_{\Pi\Phi} \bar{F}_{\Phi})}{dz} = \rho_{\Pi} \frac{\Pi_{\Pi\Gamma K} W_{\Pi\Gamma K}}{\cos \alpha} - \frac{dG_K}{dz}; \quad (15)$$

$$\frac{d(W_{\Pi\Gamma\Phi} \rho_{\Gamma\Phi} \bar{F}_{\Phi})}{dz} = \rho_{\Gamma} \frac{\Pi_{\Pi\Gamma K} W_{\Pi\Gamma K}}{\cos \alpha}; \quad (16)$$

$$\frac{d}{dz} [G_{\Pi\Phi} i_{\Pi\Phi} + G_{\Gamma\Phi} i_{\Gamma\Phi}] = \frac{\Pi_{\Pi\Gamma K} W_{\Pi\Gamma K}}{\cos \alpha} [\rho_{\Pi} i_{\Pi} + \rho_{\Gamma} i_{\Gamma}] - \frac{F_{K\Phi}}{V_K} [i''_{\Pi\Phi} q_m + q]; \quad (17)$$

$$\rho_{\Pi\Gamma\Phi} \bar{F}_{\Phi} W_{\Pi\Gamma\Phi} \frac{dW_{\Pi\Gamma\Phi}}{dz} = -\bar{F}_{\Phi} \frac{dP}{dz} - W_{\Pi\Gamma\Phi} \rho_{\Pi\Gamma} \frac{\Pi_{\Pi\Gamma K} W_{\Pi\Gamma K}}{\cos \alpha} + \frac{F_{K\Phi} [f + (W_{\Pi\Gamma K} - W_K) q_m]}{V_K}. \quad (18)$$

Сравнив системы уравнений (2)–(6) и (16)–(19), запишем уравнения и для случая, когда в межфакельном пространстве туман отсутствует, а парциальное давление пара ниже давления насыщения.

Для завершения модели системы «СРО + ГО» необходимо для уравнений (2)–(19) записать краевые условия. При $z = 0$ на входе в СРО все параметры: плотность пара, плотность газа, плотность тумана, парциальные давления газа и пара, энтальпии пара и газа равны значениям соответствующих параметров в ГО. Кроме того, при $z = 0$ задается температура капель охлаждающей воды, которая подается в СРО через форсунки. Диаметр капель выбирается в соответствии с рекомендациями [1].

При заданном на входе в СРО среднем диаметре капель рассчитывается количество капель n в единице объема потока в капельном факеле.

В связи с тем, что за счет конденсации объем капли V_k изменяется незначительно, а относительная скорость капли по сравнению со скоростью парогазовой среды при $z > 0$ падает, можно принять, что при $z > 0$ капли не распадаются [1].

При $z = L$, где L – длина СРО, капли и туман перед выходом из СРО отделяются с помощью сепаратора от газа и несконденсировавшегося пара и затем эвакуируются через сливной трубопровод в приямок гермозоны.

Давление перед сепаратором $(P_{II} + P_{Г})_{СРО}$ связано с давлением в ГО $(P_{II} + P_{Г})_{ГО}$ следующим соотношением

$$(P_{II} + P_{Г})_{СРО} - (P_{II} + P_{Г})_{ГО} = \zeta \frac{\rho_{IIГ} (W_{IIГ}^c)^2}{2}, \quad (19)$$

где $\rho_{IIГ}$ – плотность парогазовой среды перед сепаратором; $W_{IIГ}^c$ – скорость парогазовой среды в сепараторе.

Результаты расчетов по разработанной нами полной модели показывают, что практически сразу после появления течи в ГО пар достигает линии насыщения и вплоть до 8000 секунды аварийного процесса (конечное время расчета) находится в состоянии насыщения.

Процесс в ГО при этом приближенно описывается следующей системой уравнений:

$$V_{ГО} \frac{d\rho''(P_{II}^S)}{dt} = G_{мпн} - G_{нex} - G_{нко} + G_{нвых} - G_m; \quad (20)$$

$$V_{ГО} \frac{d\rho_m}{dt} = G_m - G_{mex}, \quad (21)$$

$$V_{ГО} \frac{d}{dt} [\rho_{Г} i_{Г} + \rho_{Г} i'(P_{II}) + \rho''_{II}(P_{II}) i''(P_{II})] = G_{мпн} i''(P_{IIГ}) - G_{нex} i''(P_{II}) + G_{нвых} i_{нвых} - G_{Г} i_{Гex} + \quad (22)$$

$$+ G_{Г} i_{Гвых} - G_{нко} i''(P_{II}) - G_{mex} i'(P_{II}).$$

Здесь $G_{мпн}$ – расход пара из течи, кг/с; $G_{нex}$ – расход пара из ГО в СРО, кг/с; $G_{нвых}$ – расход пара из СРО в ГО, кг/с; G_m – расход пара в единице объема ГО на образование тумана, кг/с; G_{mex} – расход тумана на входе в СРО, кг/с; $i_{нвых}$ – энтальпия пара, выходящего из СРО, Дж/кг; $V_{ГО}$ – объем гермообъема, м³; P_{II}^S – давление пара на линии насыщения, Па; ρ''_{II} – плотность пара на линии насыщения, кг/м³; индексы: m – туман; mex – туман на входе в СРО; $Гex$ – газ на входе в СРО; $Гвых$ – газ на выходе из СРО.

Система уравнений (1)–(22) после дополнения конечными зависимостями для определения расходов пара на конденсацию внутри ГО и расхода пара в ГО через образовавшуюся течь позволяет определить количество труб СРО, количество форсунок в СРО, а также их производительность.

В качестве исходных данных для проведения расчета были использованы результаты расчетного моделирования, проведенного с использованием теплогидравлического кода MELCOR, который учитывает динамику 1-го и 2-го контура и теплообменные процессы в ГО при появлении течи. Расчет производился без участия штатной спринклерной системы реакторной установки АЭС с ВВЭР-1000.

Для оценки расхода пара, конденсирующегося на оборудовании реакторной установки, был проведен пошаговый расчет изменения давления под гермооболочкой и найден расход пара, идущего на повышение давления в ГО. Зная расход пара на изменение давления, с использованием уравнений (20)–(22) определялось изменение давления в ГО на текущем временном интервале расчета. Далее задавался расход парогазовой смеси на входе в СРО и выполнялся расчет по всем уравнениям, описывающим процессы в СРО. В конце расчета определялось давление в ГО. При несовпадении с ранее полученными значениями проводилось новое приближение с измененной скоростью парогазовой смеси на входе в СРО. Процедура последовательных приближений выполнялась до тех пор, пока значения давления на входе и на выходе из СРО не совпадали. Далее осуществлялся переход на следующий временной шаг

переходного процесса и расчет повторялся. Подробное описание методики расчета изменения параметров в ГО при течи изложено в [6].

На рисунке 2 показаны результаты расчета динамического процесса изменения давления среды в ГО. В отличие от варианта расчета модели ГО без СРО после двухтысячной секунды аварийного процесса давление и температура пара начинают снижаться. Это обеспечивается интенсификацией удаления влаги в СРО при повышении давления в ГО и уменьшением расхода пара, поступающего из течи ГЦК с течением времени.

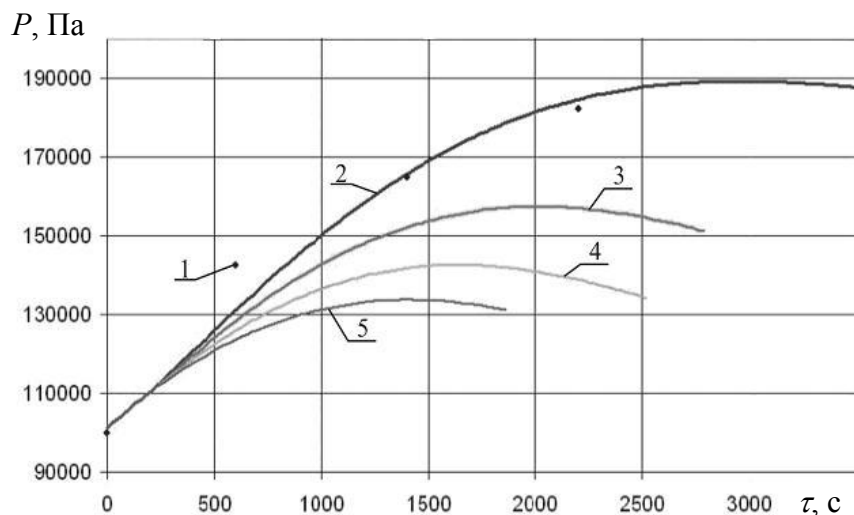


Рисунок 2 – Динамика изменения давления в ГО при эквивалентном диаметре течи $d_{\text{экв}} = 60$ мм и температуре спринклерного раствора $T = 60$ °С: 1 – давление паровоздушной смеси в ГО (MELCOR); 2 – расчетные данные моделирования состояния ГО без СРО; 3 – расчетные данные моделирования состояния ГО при установке пяти СРО; 4 – десяти СРО; 5 – пятнадцати СРО, соответственно

Необходимо отметить, что расход тумана из ГО в СРО значительно меньше расхода пара, поэтому, как показывают расчеты, количество тумана образующегося в ГО практически не влияет на производительность СРО. Наибольшее влияние на эффективность работы СРО оказывает разность температур между парогазовой средой ГО и охлаждающей водой (рисунок 3). Анализ зависимости количества энергии, отбираемой одним СРО из ГО, как функции от температуры среды в ГО, показывает, что с уменьшением этой разности температур на 10 °С эффективность СРО увеличивается практически в два раза.

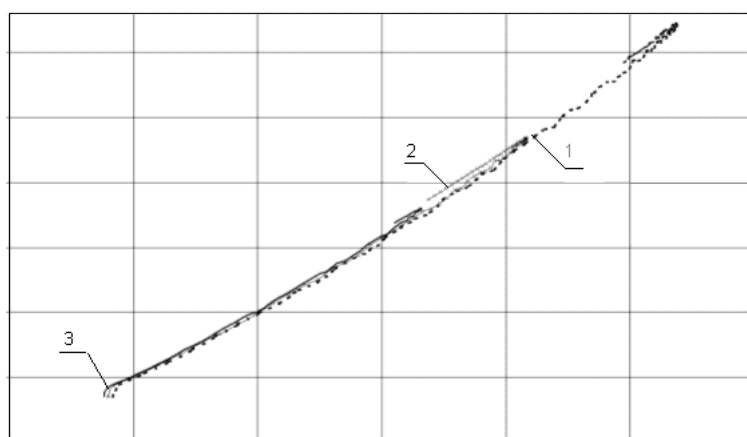


Рисунок 3 – Зависимость эффективности СРО от температуры среды в ГО: 1 – расчетные данные моделирования состояния ГО при установке пяти СРО; 2 – десяти СРО; 3 – пятнадцати СРО, соответственно

Из полученных данных видно, что изменение давления парогазовой смеси в СРО существенным образом зависит от температуры спринклерного раствора. При понижении его температуры давление в ГО значительно падает.

В связи с этим было проведено расчетное моделирование изменения параметров в ГО при различных значениях температуры охлаждающего спринклерного раствора, результаты которого изображены на рисунках 4 и 5.

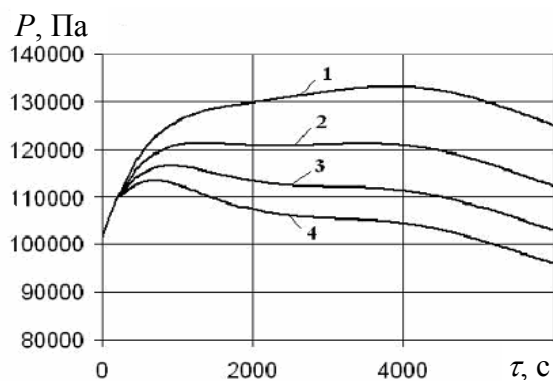


Рисунок 4 – Динамика изменения давления в ГО в зависимости от температуры спринклерного раствора: 1 – 60 °С; 2 – 50 °С; 3 – 40 °С; 4 – 30 °С ($d_{\text{экв}} = 40$ мм, десять СРО)

Так, например, при течи эквивалентным диаметром $d_{\text{экв}} = 60$ мм снижение температуры до 30 °С дает понижение максимального давления почти до $1,3 \cdot 10^5$ Па.

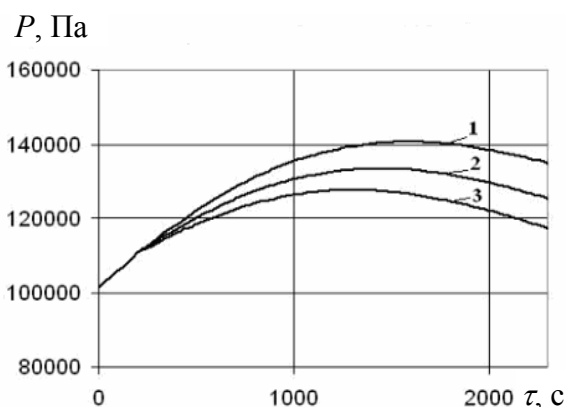


Рисунок 5 – Динамика изменения давления в ГО в зависимости от температуры спринклерного раствора: 1 – 50 °С; 2 – 40 °С; 3 – 30 °С ($d_{\text{экв}} = 60$ мм, десять СРО)

В процессе расчетного моделирования изменения параметров в ГО при работе СРО было определено значение его коэффициента эжекции. Результаты расчета представлены на рисунке 6, из которого видно, что отношение расхода поступающей в СРО парогазовой смеси к расходу жидкости близко к единице. Некоторое понижение коэффициента эжекции в течение аварийного процесса связано со снижением давления в ГО.

Проведена расчетная оценка влияния перепада давления на форсунках $\Delta P_{\text{ф}}$ на величину коэффициента эжекции. Со снижением $\Delta P_{\text{ф}}$ коэффициент эжекции растет. Это объясняется тем, что при меньшем $\Delta P_{\text{ф}}$ время контакта капле существенно увеличивается. С дальнейшим снижением $\Delta P_{\text{ф}}$ данный эффект исчезает.

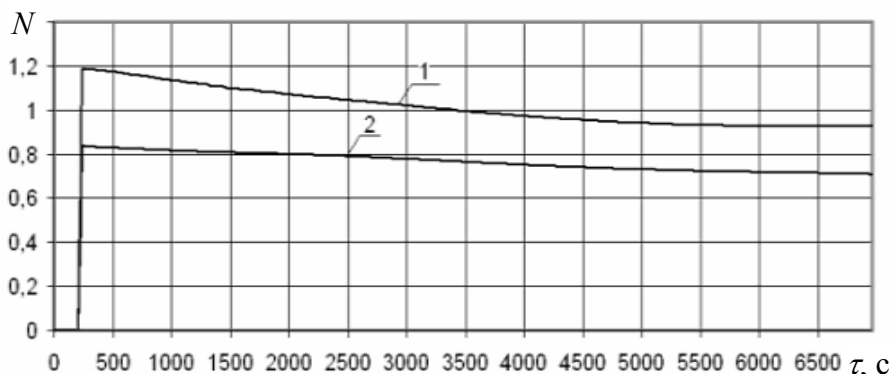


Рисунок 6 – Изменение коэффициента эжекции N во время аварийного процесса для разных перепадов давления на форсунках $\Delta P_{\text{ф}}$: 1 – 0,2 МПа; 2 – 0,5 МПа

Таким образом, предложена схема СРО для снижения давления в ГО при аварии с течью и разработана ее математическая модель. Проведено расчетное моделирование изменения параметров под гермооболочкой. Результаты расчетного моделирования подтвердили возможность использования СРО для эффективного снижения давления в ГО АЭС с ВВЭР–1000

при малых и средних течах теплоносителя. Кроме того, определено влияние снижения температуры охлаждающего спринклерного раствора на характер понижения давления в ГО. Для подтверждения результатов расчетного моделирования изменения параметров в ГО при течи теплоносителя первого и/или второго контура, а также для верификации расчетной модели СРО необходимо проведение специальных экспериментальных исследований с моделированием натуральных эксплуатационных условий, что является задачей дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике / В.С. Галустов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
2. 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, 2002. – Вып. 6. – С. 12 – 15.
3. Пажи Д.Г. Распылители жидкостей / Д.Г.Пажи, В.С.Галустов. – М.: Химия, 1979. – 214 с.
4. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / С.Соу. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
5. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 320 с.
6. Балакан Г.Г. Математическое моделирование работы струйного распылителя-охлаждителя (СРО) / Г.Г.Балакан, А.В.Герлига // Труды ОПУ. – Одесса, 2006. – Вып. 2(26). – С. 71 – 75.

A.V. Gerliga, I.I. Sviridenko, G.G. Balakan

Settlement modeling results of pressure reducing emergency system in WWER-1000 NPP containment with stream nebulizer-cooler.

The system of emergency pressure decrease under air-tight volume of WWER-1000 NPP is developed on the basis of a stream nebulizer-cooler. The mathematical model describing processes in air-tight volume reactor installation at work of a stream nebulizer-cooler is submitted, results of calculations of work of system are resulted.