

УДК 621.647

Г.Г. Балакан, инженер, ОП Юж.-Укр. АЭС,
А.В. Герлига, инженер,
Одес. нац. политехн. ун-т

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТРУЙНОГО РАСПЫЛИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ

Г.Г. Балакан, А.В. Герлига. **Математичне моделювання роботи струминного розпилювача-охолоджувача.** Запропоновано математичну модель процесів у гермооб'ємі контейменту АЕС та струминних розпилювачів-охолоджувачів, яка дозволяє розрахувати зміну тиску в гермооб'ємі при наявності течії без увімкнення спринклерної системи залежно від температури охолоджувальної води та кількості струминних розпилювачів-охолоджувачів.

G.G. Balakan, A.V. Gerliga. **Mathematical modelling of stream nebulizer-cooler operation.** The mathematical model of processes taking place in NPP's containment germovolume and stream nebulizers-coolers is proposed. The model allows to calculate the pressure change in the germovolume at the presence of flow without including of the sprinkler system depending on the temperature of cooling water and amount of stream nebulizers-coolers.

Существуют прямоточные распылительные охладители, базирующиеся на современных достижениях техники распыления жидкостей и способности капельного потока эжектировать в полость своего факела тысячи кубометров паровоздушной смеси на каждый кубометр распыливаемой жидкости [1, 2].

В распылительных аппаратах требуемая производительность обеспечивается установкой необходимого числа форсунок. Распылитель представляет собой трубу круглого или прямоугольного сечения, над которой устанавливаются распылительные форсунки, а на выходе — сепарационное устройство (см. рисунок).

Струйный распылитель-охладитель (СРО) предназначается для охлаждения парогазовой смеси герметического объема (ГО) контеймента АЭС в случае появления течи из первого контура. Это предназначение накладывает на конструкцию и характеристики СРО определенные требования:

— Необходима значительная вертикальная скорость капель воды после форсунок, следовательно, и значительные (до 1 МПа) перепады давлений на форсунках, т.к. величина эжектируемого расхода парогазовой смеси пропорциональна перепаду давлений на форсунках [1].

— Поперечные размеры СРО должны быть ограничены, чтобы не загромождать внутреннее пространство ГО. Это требование заставляет выбирать форсунки с малым углом распыла.

В связи с тем, что за время прибытия парогазокапельной смеси в СРО параметры ГО (давление, температура) практически не изменяются в динамическом процессе, в дальнейшем все процессы в СРО будут рассматриваться как квазистационарные.

В парогазовом объеме при достижении паром температуры насыщения дальнейшее поступление пара вызовет образование тумана.

Расчетный анализ показал, что в ГО практически всегда температура находится на линии насыщения, соответствующей парциальному давлению пара. На основании этого примем: в ГО все время находится парогазовая смесь с туманом; в межфакельное пространство СРО сверху входит парогазовая смесь с туманом, и эта среда движется до выхода и частично засасывается в капельный факел; в капельном факеле между охлаждающими каплями пар может быть как в насыщенном состоянии с возможным образованием тумана, так и в перегретом состоянии.

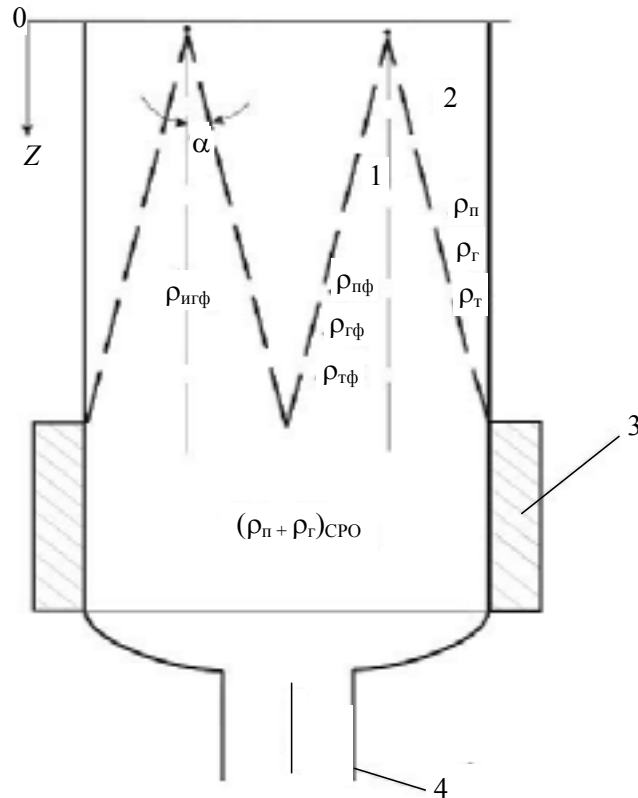


Схема СРО: 1 — капельный факел; 2 — межфакельное пространство;
3 — сепаратор капель; 4 — труба отвода жидкости.

В связи с тем, что длина капельного факела, создаваемого форсункой, намного больше его диаметра, то принято одномерное описание стационарного процесса в СРО и при этом давление вне факела принималась равным давлению в факеле в каждом поперечном сечении СРО, т.е.

$$P_{\text{пг}} = P_{\text{г}} + P_{\text{п}} = P_{\text{пгф}} = P_{\text{гф}} = P_{\text{пф}}. \quad (1)$$

Процесс в межфакельном (внефакельном) пространстве описывается следующей системой уравнений.

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

$$\frac{d(W_{\text{пг}} \rho_{\text{п}} F_{\text{пг}})}{dz} = -\rho_{\text{п}} \frac{\Pi_{\text{пгк}} W_{\text{пгк}}}{\cos \alpha} - F_{\text{пг}} q_{\text{мг}}, \quad (2)$$

$$\frac{d(W_{\text{пг}} \rho_{\text{г}} F_{\text{пг}})}{dz} = -\rho_{\text{г}} \frac{\Pi_{\text{пгк}} W_{\text{пгк}}}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

$$\frac{dG_{\text{т}}}{dz} = -\rho_{\text{т}} \frac{\Pi_{\text{пгк}} W_{\text{пгк}}}{\cos \alpha} + F_{\text{пг}} q_{\text{мт}}; \quad (4)$$

— уравнение энергии для парогазотуманной смеси

$$\frac{d}{dz} [G_{\text{п}} i_{\text{п}}'' + G_{\text{г}} i_{\text{г}} + G_{\text{т}} i_{\text{т}}'] = -\frac{\Pi_{\text{пгк}} W_{\text{пгк}}}{\cos \alpha} [\rho_{\text{п}} i_{\text{п}}'' + \rho_{\text{г}} i_{\text{г}} + \rho_{\text{т}} i_{\text{т}}']. \quad (5)$$

— уравнение количества движения

$$\rho_{\text{пгт}} F_{\text{пг}} W_{\text{пг}} \frac{dW_{\text{пг}}}{dz} = -F_{\text{пг}} \frac{dP}{dz} - \Pi_{\text{СРО}} \tau + W_{\text{пг}} \rho_{\text{пгт}} \frac{\Pi_{\text{пгк}} W_{\text{пгк}}}{\cos \alpha}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ПГТ}} = \rho_{\text{П}} + \rho_{\text{Г}} + \rho_{\text{Т}}$.

Для факельного пространства справедливы следующие зависимости:

— уравнения неразрывности:

для потока пара

$$\frac{d(W_{\text{ПГФ}}\rho_{\text{ПФ}}\bar{F}_{\text{Ф}})}{dz} = \rho_{\text{П}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}}W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} - F_{\text{Ф}}q_{\text{мТФ}} - \frac{dG_{\text{К}}}{dz}, \quad (7)$$

для потока газа

$$\frac{d(W_{\text{ПГФ}}\rho_{\text{ГФ}}\bar{F}_{\text{Ф}})}{dz} = \rho_{\text{Г}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}}W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha}, \quad (8)$$

для потока тумана

$$\frac{dG_{\text{ТФ}}}{dz} = \rho_{\text{Т}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}}W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} + \bar{F}_{\text{Ф}}q_{\text{мТФ}}; \quad (9)$$

— уравнение энергии для парогазотумановой смеси

$$\frac{d}{dz}[G_{\text{ПФ}}i''_{\text{ПФ}} + G_{\text{ГФ}}i'_{\text{ГФ}} + G_{\text{ТФ}}i'_{\text{ТФ}}] = \frac{\Pi_{\text{ПГК}}W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha}[\rho_{\text{П}}i''_{\text{П}} + \rho_{\text{Г}}i'_{\text{Г}} + \rho_{\text{Т}}i'_{\text{Т}}] - \frac{F_{\text{КФ}}}{V_{\text{К}}}[i''_{\text{ПФ}}q_{\text{м}} + q]; \quad (10)$$

— уравнение количества движения для парогазотумановой смеси

$$\rho_{\text{ПГТФ}}\bar{F}_{\text{Ф}}W_{\text{ПГФ}} \frac{dW_{\text{ПГФ}}}{dz} = -\bar{F}_{\text{Ф}} \frac{d\rho}{dz} - W_{\text{ПГФ}}\rho_{\text{ПГТ}} \frac{\Pi_{\text{ПГК}}W_{\text{ПГК}}}{\cos \alpha} + \frac{F_{\text{КФ}}[\rho + (W_{\text{ПГК}} - W_{\text{К}})q_{\text{м}}]}{V_{\text{К}}}. \quad (11)$$

где W — скорость;

ρ — плотность;

τ — касательное напряжение трения на стенке СРО;

$q_{\text{мТ}}$ — массовый расход пара на образование тумана в единицах объема во внефакельном пространстве (удельный расход пара на образование тумана);

$q_{\text{мТФ}}$ — массовый расход пара на образование тумана в единице объема факельного пространства;

F — площадь поперечного сечения;

$\Pi_{\text{ПГК}}$ — периметр капельного факела;

G — расход;

$\bar{F}_{\text{Ф}} = F_{\text{Ф}} - F_{\text{КФ}}$, $F_{\text{КФ}}$ — 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 — парогазотумановая 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 [1].

Система уравнений, описывающая движение капель в факеле представляется в виде

$$\frac{dV_K}{dz} = \frac{q_m}{W_K \rho_{ж}}, \quad (12)$$

$$\frac{dG_K}{dz} = \frac{F_{кФ} q_m}{V_K}, \quad G_K = W_K F_{кФ} n \rho_{ж} V_K, \quad F_{кФ} = F_{кФ} n V_{к0}, \quad (13)$$

$$\frac{dW_K}{dz} = \frac{g}{V_K} - \frac{\rho + (W_K - W_{пгФ}) q_m}{V_K \rho_{ж} W_K}, \quad (14)$$

$$\frac{dT_K}{dz} = \frac{(i_{пФ}'' - i_K) q_m + q}{C_{фк} V_K W_K \rho_{ж}}, \quad (15)$$

где q_m — массовый расход конденсирующегося пара на капле;

$F_{кФ}$ — площадь сечения потока капель в факеле;

f — сила действия капли на окружающую парогазовую смесь;

q — тепловой поток от ПГС к капле.

При записи уравнения сохранения количества движения для капли (14) пренебрегалось на основании оценок влиянием градиента движения.

Сила действия капли определяется как [3]

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

где $C_D = \frac{24}{Rek}$ при $Rek \leq 10^2$,

$$Rek = \frac{D_K}{v_{пгФ}} (W_K - W_{пгФ}).$$

Для q_m и q предлагаем использовать зависимости [4]:

$$q_m = \beta(\rho'' - \rho_n), \quad \beta = 8,6 \sqrt{\frac{W_K - W_{пгФ}}{D_K}}, \quad g = \alpha(T_S - T_{ж}), \quad \alpha = \sqrt[3]{\frac{W_K - W_{пгФ}}{D_K}},$$

где D_K — диаметр капли.

При исчезновении тумана в факеле система уравнений (7)...(11) изменяется и принимает вид

$$\frac{d(W_{пгФ} \rho_{пФ} \bar{F}_{\Phi})}{dz} = \rho_{п} \frac{\Pi_{пгк} W_{пгк}}{\cos \alpha} - \frac{dG_K}{dz}, \quad (16)$$

$$\frac{d(W_{пгФ} \rho_{гФ} \bar{F}_{\Phi})}{dz} = \rho_{г} \frac{\Pi_{пгк} W_{пгк}}{\cos \alpha}, \quad (17)$$

$$\frac{d}{dz} [G_{пФ} i_{пФ} + G_{гФ} i_{гФ}] = \frac{\Pi_{пгк} W_{пгк}}{\cos \alpha} [\rho_{п} i_{п} + \rho_{г} i_{г}] - \frac{F_{кФ}}{V_K} [i_{пФ}'' q_m + q], \quad (18)$$

$$\rho_{пгтФ} \bar{F}_{\Phi} W_{пгФ} \frac{dW_{пгФ}}{dz} = -\bar{F}_{\Phi} \frac{dP}{dz} - W_{пгФ} \rho_{пг} \frac{\Pi_{пгк} W_{пгк}}{\cos \alpha} + \frac{F_{кФ} [f + (W_{пгк} - W_K) q_m]}{V_K}. \quad (19)$$

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

Для завершения матмодели 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 [2].

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, как показали расчеты, за счет конденсации объем капли V_k изменялся незначительно, а относительная скорость капли по сравнению со скоростью парогазовой среды при $z > 0$ падает, тогда можно принять, что при $z > 0$ капли не распадаются [2].

При $z = L$ (L — длина СРО), т.е. перед выходом из СРО капли и туман с помощью сепаратора отделяются от газа и несконденсировавшегося пара и эвакуируются через трубу в приямок гермозоны.

Давление перед сепаратором $(P_{\Pi} + P_{\Gamma})_{\text{СРО}}$ связывается с давлением в ГО $(P_{\Pi} + P_{\Gamma})_{\text{ГО}}$ следующим соотношением:

$$(P_{\Pi} + P_{\Gamma})_{\text{СРО}} - (P_{\Pi} + P_{\Gamma})_{\text{ГО}} = \zeta \frac{\rho_{\Pi\Gamma} (W_{\Pi\Gamma}^c)^2}{2}, \quad (20)$$

где $\rho_{\Pi\Gamma}$ — плотность парогазовой среды перед сепаратором;

$W_{\Pi\Gamma}^c$ — скорость парогазовой среды в сепараторе.

Расчеты по разработанной математической модели показали, что практически сразу после появления течи в ГО пар достигает линии насыщения и даже до 8000 с (конечное время расчета) находится в насыщенном состоянии.

Процесс в ГО при этом рекомендуется приближенно описать как

$$V_{\text{ГО}} \frac{d\rho''(P_{\Pi}^S)}{dt} = G_{\text{мпн}} - G_{\text{нвх}} - G_{\text{нко}} + G_{\text{нвых}} - G_m, \quad (21)$$

$$V_{\text{ГО}} \frac{d\rho_m}{dt} = G_m - G_{\text{мвх}}, \quad (22)$$

$$V_{\text{ГО}} \frac{d}{dt} [\rho_{\Gamma} i_{\Gamma} + \rho_{\Gamma} i'(P_{\Pi}) + \rho_{\Pi}''(P_{\Pi}) i''(P_{\Pi})] = G_{\text{мпн}} i''(P_{\Pi\Gamma}) - G_{\text{нвх}} i''(P_{\Pi}) + G_{\text{нвых}} i_{\text{нвых}} - G_{\Gamma} i_{\Gamma\text{вх}} + G_{\Gamma} i_{\Gamma\text{вых}} - G_{\text{нко}} i''(P_{\Pi}) - G_{\text{мвх}} i'(P_{\Pi}), \quad (23)$$

где $G_{\text{мпн}}$ — расход пара из течи;

$G_{\text{нвх}}$ — расход пара из ГО в СРО;

$G_{\text{нвых}}$ — расход пара из СРО в ГО;

$G_{\text{нко}}$ — расход пара из ГО на конденсацию (на оборудовании, на строительных конструкциях...);

G_m — расход пара в единице объема ГО на образование тумана;

$G_{\text{мвх}}$ — расход тумана на входе в СРО;

$i_{\text{нвых}}$ — энтальпия пара, выходящего из СРО.

Система уравнений (1)–(23) 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 и их производительность с целью поддержания безопасного давления в ГО без включения форсунок спринклерной системы.

Литература

1. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 240 с.
2. Пажи Д.Г. Распылители жидкостей / Пажи Д.Г., Галустов В.С. — М.: Химия, 1979. — 214 с.
3. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. — М.: Мир, 1971. — 536 с.
4. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. — М.: Госэнергоиздат, 1957. — 320 с.

Поступила в редакцию 5 сентября 2006 г.
