

УДК 536.24

РАСЧЕТ ВЫНОСА КАПЕЛЬНОЙ ВЛАГИ ИЗ БРЫЗГАЛЬНОГО БАССЕЙНА АЭС

БРАТУТА Э. Г., ЯРОШЕНКО Т. И.

В последние годы в отечественной и зарубежной практике сооружения крупных тепловых и атомных станций мощностью 4–6 млн. кВт с оборотной системой водоснабжения все большее распространение получают брызгальные бассейны, применяемые для испарительного охлаждения циркуляционной воды конденсаторов паровых турбин и аварийного охлаждения ядерных реакторов. Интенсивность процессов тепло- и массообмена диспергированной жидкости с потоком воздуха, простота конструкций, устойчивость к сейсмической и другим внешним воздействиям определили перспективность использования этих объектов в современной энергетике.

В общем комплексе задач, связанных с исследованием, проектированием и эксплуатацией брызгальных бассейнов, особое значение приобретает вопрос о ветровом выносе капельной влаги за пределы бассейна. Актуальность исследования этого малоизученного процесса определяется необходимостью обоснованной экологической экспертизы возможных последствий воздействия крупной атомной станции на окружающую среду.

В соответствии с опытными данными [1] вынос влаги из брызгального бассейна не превышает 1%. Вместе с этим для электрической станции мощностью 6 млн. кВт это соответствует безвозвратным потерям воды порядка $3 \cdot 10^5$ м³/сут, что является серьезным недостатком не только в связи с дефицитом водных ресурсов, но и в силу ряда отрицательных экологических последствий, вызываемых упусом. К числу таковых относится обледенение транспортных коммуникаций и открытых распределительных устройств и строений в зимний период, интенсивное засоление почвы и деградация плодородия земель, непосредственно прилегающих к территории АЭС, а также угроза радиоактивного поражения персонала и заражения близлежащих строений (применительно к брызгальным бассейнам ответственных потребителей АЭС, вода в которых при аварии реактора может быть радиоактивной). Таким образом, при проектировании АЭС прогнозирование границ зоны капельного выноса и количества влаги, выносимой за пределы бассейна, имеет важное значение как с точки зрения охраны окружающей среды, так и рационального размещения необходимых сооружений на безопасном расстоянии от системы брызгальных бассейнов.

Анализ публикаций, посвященных исследованию процесса выноса влаги из брызгального бассейна [1–3], позволил выделить три основных недостатка рассмотренных моделей. Во-первых, замена реального полидисперсного состава капель монодисперсным неизбежно приводит к заниженным значениям величины капельного выноса и границы его распространения. Во-вторых, в расчетных моделях при определении границы зоны выноса влаги рассматриваются лишь те капли, горизонтальная составляющая скорости которых совпадает по направлению со скоростью ветра. Это упрощение существенно искажает реальную физическую картину. В-третьих, считается, что движение воздуха не оказывает влияния на дисперсный состав капель. С этим можно согласиться лишь при доста-

точно малых скоростях воздушного потока, что, естественно, ограничивает область применения расчетного метода.

Цель данной работы — дать методику расчета потерь воды из-за сноса в брызгальном бассейне любой геометрии в достаточно широком диапазоне изменения параметров задачи: скорость ветра $0 \leq W_n \leq 18$ м/с, перепад давления жидкости при выходе из устья форсунки $0,04 \leq \Delta p \leq 0,12$ МПа, высота устья разбрызгивателей над зеркалом бассейна $1 \leq h \leq 2$ м. Предлагаемая модель имеет следующие ограничения: 1 — движение воздуха в пространстве факела капель остается одномерным и стационарным, т. е. не учитывается влияние конвективных течений и турбулентных пульсаций, 2 — влияние испарения жидкости с поверхности капель на изменение их размеров пренебрежимо мало, 3 — взаимодействие факелов смежных распылителей не приводит к изменению дисперсного состава капель, т. е. эффекты коагуляции и вторичного дробления не учитываются, 4 — локальные расходы капель, продуцируемых форсункой, одинаковы по периметру сопла.

В основу математической модели положено трехмерное уравнение движения одиночной капли, записанное в предположении, что в течение всего времени полета с момента вылета из сопла форсунки до момента приземления на каплю действуют только сила тяжести и сила аэродинамического сопротивления. В этом случае уравнение имеет вид

$$m \frac{dW_k}{d\tau} = \pm mg - c_D \Psi(D) \rho_n f \frac{|u|u}{2}, \quad (1)$$

где m — масса капли, $u = W_n - W_k$ — относительная скорость капли, W_k — абсолютная скорость капли, τ — время, c_D — коэффициент аэродинамического сопротивления капли [4], $c_D = 24/\text{Re} + 4,4/(\text{Re})^{0,5} + 0,32$, $\Psi(D)$ — функция деформации капли [5], равная $\Psi(D) = \exp(0,03\text{We}^{1,5})$, $\text{We} = \rho_n |u|^2 D / \sigma$ — критерия Вебера, σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, D — диаметр капли, ρ_n — плотность воздуха, f — площадь миделева сечения капли.

Размеры капель в факеле распылителя определяются непрерывной функцией распределения вида [6]

$$V(D) = \frac{2}{3\pi} \alpha^4 D^3 K_1(\alpha D), \quad (2)$$

где α — параметр функции распределения,

$$\alpha = 7/D_{\text{макс}}, \quad (3)$$

$K_1(\alpha D)$ — функция Бесселя второго рода мнимого аргумента первого порядка.

Разобьем функцию (2) на N интервалов ΔD , внутри которых все капли с размерами от $(D_n - \Delta D/2)$ до $(D_n + \Delta D/2)$ имеют диаметры, равные D_n ($n=1, 2, 3, \dots, N$).

Через ось сопла разбрызгивателя, работающего по схеме сплзу вверх, проведем ряд вертикальных плоскостей, разделяющих все пространство факела на L секторов с равными углами при вершине. Будем считать, что вся масса капель в рассматриваемом секторе l ($l=1, 2, 3, \dots, L$) стартует в вертикальной плоскости, проходящей через биссектрису центрального угла. Таким образом, для решения задачи о выносе капель, продуцируемых единичной форсункой, необходимо рассчитать трехмерные траектории N капель в каждом из L секторов.

Если предположить, что гидравлические характеристики всех форсунок одинаковы, то результаты, полученные при рассмотрении процесса уноса капель от отдельного разбрызгивателя, можно распространить на весь брызгальный бассейн в целом с учетом пространственной планировки форсунок.

Для определения потерь воды из-за выноса капельной влаги за пределы брызгального бассейна, которые обычно оценивают коэффициентом уноса δ_y (равным отношению объемного расхода V_y , выносимой из бассейна воды, к суммарной производительности всех форсунок V_0), необходимо рассчитать локальную плотность орошения $g(x, y)$ подфакельного пространства единичного разбрызгивателя. Для этого разместим начало координат на оси одной из форсунок, приняв ось x , совпадающей с направлением скорости ветра, а $z=0$, соответствующей уровню воды в бассейне. Решением уравнения (1) является локальная скорость капель как функция времени.

Это позволяет определить координаты капли интервала n в любой момент времени ξ ее полета в виде

$$\begin{aligned}x_{n\xi} &= (W_{ix})_{n\xi} \Delta\tau + x_{n(\xi-1)}, \\y_{n\xi} &= (W_{iy})_{n\xi} \Delta\tau + y_{n(\xi-1)}, \\z_{n\xi} &= (W_{iz})_{n\xi} n\tau + z_{n(\xi-1)},\end{aligned}\quad (4)$$

где $\Delta\tau$ — интервал интегрирования по времени уравнения (1) при решении его численными методами.

Всю область орошения, находящуюся за границей бассейна $x \geq x_{гр}$, разобьем сеткой на равновеликие ячейки размера $\Delta x \Delta y$. Будем считать, что капля попала в данную ячейку, если

$$x_i \leq R_{xn} \leq (x_i + \Delta x), \quad y_j \leq R_{yn} \leq (y_j + \Delta y),$$

где R_{xn} , R_{yn} — проекции дальности R капли n -го разряда на оси x и y соответственно, i — номер интервала разбиения по оси x на отрезки Δx , j — номер интервала разбиения по оси y на отрезки Δy .

Выражения (4) дают возможность вычислить локальную плотность орошения в форме

$$g(x, y) = \frac{\sum_{n=n'}^{n=n''} \sum_{l=l'}^{l=l''} V_{nl}}{\Delta x \Delta y}, \quad (5)$$

где V_{nl} — расход капель разрядов $n' \leq n \leq n''$ из секторов $l' \leq l \leq l''$, осевших в квадрате $\Delta x \Delta y$.

При известной производительности форсунки V_0 величина V_{nl} вычисляется по формуле

$$V_{nl} = V_0/L \int_{D_n - \Delta D/2}^{D_n + \Delta D/2} V(D) dD. \quad (6)$$

Полагая значения x и y координатами центра ячейки $\Delta x \Delta y$, можно с помощью выражений (2), (5) и (6) построить двумерную энюру распределения локальных удельных расходов влаги, выносимой от единичного разбрызгивателя.

Полученное решение легко трансформировать для заданного множества форсунок с известной взаимной ориентацией. Полное количество влаги V_q , выносимое из бассейна от любого разбрызгивателя q ($q=1, 2, 3, \dots, Q$), можно определить, учитывая симметричность поля $g(x, y)$ относительно оси x , из выражения вида

$$V_q = 2 \int_{(x_{гр})_q}^{x_{макс}} \int_0^{y_{макс}} g(x, y) dx dy, \quad (7)$$

где $(x_{гр})_q$ — расстояние от q -й форсунки до границы бассейна.

Здесь возникает вопрос о протяженности зоны выноса в направлении, совпадающем с вектором скорости воздушного потока. В связи с вероятностным характером формирования дисперсного состава распыливаемой жидкости однозначное определение величины $x_{\text{макс}}$ невозможно. Это обусловлено тем, что при достаточно большом времени наблюдения всегда существует вероятность появления капель с диаметром меньшим, чем в первом из N интервалов разбиения функции $V(D)$ даже при сколь угодно большом числе N . Поэтому под $x_{\text{макс}}$ будем понимать такую протяженность зоны $(x_{\text{гp}})_q \leq x \leq x_{\text{макс}}$, в пределах которой выпадает определенная (отличная от единицы) доля всей уносимой влаги от q -й форсунки. Если эта доля равна 0,998, то такое значение $x_{\text{макс}}$ будем считать предельным и обозначим $x_{0,95}$.

Численное решение уравнения (7) позволяет найти, к примеру, величину $x_{0,95}$ из условия

$$\int_{x_{\text{гp}}}^{x_{0,95}} \int_0^{y_{\text{макс}}} g(x, y) dx dy / \int_{x_{\text{гp}}}^{\infty} \int_0^{y_{\text{макс}}} g(x, y) dx dy. \quad (8)$$

Аналогично определяется величина $x_{\text{п}}$.

Если вдоль линии, совпадающей с направлением ветра, расположено Q форсунок бассейна, то коэффициент уноса можно вычислить как

$$\delta_y = \frac{2}{QV_0} \sum_{q=1}^{q=Q} \int_{(x_{\text{гp}})_q}^{x_{\text{макс}}} \int_0^{y_{\text{макс}}} g(x, y) dx dy,$$

где соответствующее значение, например $x_{\text{макс}} = x_{0,95}$, находится из условия (8).

Реализация рассмотренной математической модели сопряжена с необходимостью решения ряда дополнительных задач, связанных как с процедурой непосредственно вычислительного процесса, так и с физическими особенностями движения капель в факеле и формированием их дисперсного состава при взаимодействии с воздушным потоком.

Кроме результатов, изложенных в [7], авторами были исследованы вопросы влияния степени дискретизации поставленной задачи (по времени, пространству и дисперсному составу), величины рассеяния по углам вылета γ капле из сопла форсунки относительно траектории их упорядоченного движения, распределения локальной концентрации капель β по длине факела на достоверность и точность получаемых решений.

На основании многочисленных расчетов, проведенных авторами по предлагаемой методике, можно рекомендовать следующие оптимальные значения параметров задачи: $\Delta t_{\text{опт}} = 0,001$ с, $N_{\text{опт}} = 50$, $L_{\text{опт}} = 9$ (с учетом симметрии факела распылителя относительно направления ветра). Влиянием концентрационного фактора и эффекта рассеивания можно пренебречь при траекторных расчетах воздушно-капельных потоков в открытых брызгальных бассейнах.

Особого внимания заслуживает выбор критического значения числа Вебера We' , определяющего, как известно, максимально возможный диаметр капли $D_{\text{макс}}$ в выражении (3). По опубликованным литературным данным величина We' изменяется в пределах от 2 до 40. Применительно к условиям взаимодействия факела распылителя с потоком окружающего воздуха в брызгальном бассейне решение вопроса об использовании (пусть даже вполне однозначно рекомендованного) значения We' представляется проблематичным. Это связано с тем, что в выражении $We' = \rho_v |\mathbf{u}|^2 D_{\text{макс}} / \sigma$ фигурирует величина относительной скорости \mathbf{u} капли, которая является переменной вдоль траектории движения, и, кроме того, неизвестный диаметр капли $D_{\text{макс}}$.

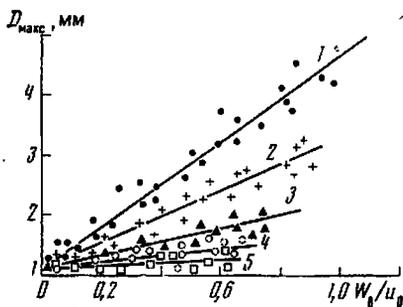


Рис. 1

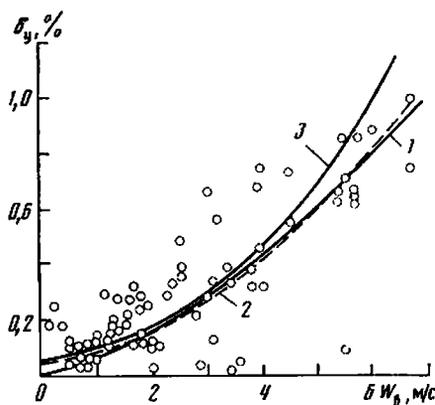


Рис. 2

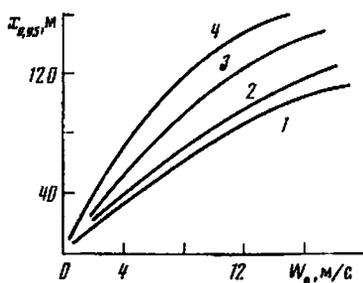


Рис. 3

Рис. 1. Зависимость максимального диаметра капель в спектре распыливаемой жидкости от безразмерной скорости в различных точках периметра сопла ($\Delta p = 0,1$ МПа): 1 - $\Psi = 0$, 2 - 45, 3 - 90, 4 - 135, 5 - 180°

Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по коэффициенту уноса капельной влаги из брызгального бассейна АЭС Rancho Seco (США): 1 - зависимость $\delta_y = 5,01 \cdot 10^{-2} + 4,1 \cdot 10^{-2} W_0 + 14,1 \cdot 10^{-3} W_0^2$, аппроксимирующая экспериментальные результаты, показанные точками (по данным [8]); 2 - теоретическая зависимость, полученная в [1], 3 - результаты расчетов авторов

Рис. 3. Протяженность зоны $x_{0,95}$: 1 - $\Delta p = 0,05$, 2 - 0,07, 3 - 0,09, 4 - 0,11 МПа

В связи с этим на экспериментальном брызгальном бассейне Запорожской АЭС и патурном бассейне Зуевской ГРЭС-2 были поставлены опыты по измерению величины D_{\max} . С помощью специального устройства можно было выделить из факела сектор, в котором среднее направление вектора стартовой скорости капель $W_{\text{но}}$ составляло заданный угол Ψ с вектором скорости воздуха W_0 . Методика измерения D_{\max} описана в [8]. Результаты опытов, часть которых приведена на рис. 1, аппроксимированы уравнением в форме

$$D_{\max} = 0,58 \Delta p^{-0,3} + (3,52 - 2,04 \Psi + 0,32 \Psi^2) W_0 u_0^{-1},$$

справедливом при $0 \leq W_0 \leq 18$ м/с, $0,04 \leq \Delta p \leq 0,1$ МПа, $0 \leq \Psi \leq 1,57$ рад.

Универсальный характер функции $V(D)$ [6] и связь параметра этой функции α с D_{\max} по уравнениям (3) и (9) позволяют определить дисперсный состав двухфазного потока (жидкость, распыленная в газовой фазе) в условиях произвольного взаимного расположения векторов скорости фаз. Поскольку относительная скорость между фазами u_0 неодинакова для капель, стартующих по направлению газового потока и против него, неодинаков по периметру сопла и дисперсный состав факела распыла. С наветренной стороны распылителя формируется мелкодисперсная

фракция капельного потока, а с подветренной стороны образуется крупнодисперсная фракция. Чем больше по абсолютному значению скорость воздушного потока, тем большую трансформацию дисперсного состава претерпевает капельная среда в процессе взаимодействия с потоком воздуха.

Для проверки достоверности разработанной математической модели был выполнен расчет коэффициента уноса δ_v капельной влаги из брызгального бассейна АЭС Rancho Seco, предназначенного для аварийного охлаждения реакторов [1, 9]. Сравнение расчетных данных авторов с результатами опытов, выполненных специалистами Калифорнийского университета [9], и теоретической зависимостью $\delta_v = f(W_v)$, опубликованной в [1], показало хорошее согласование результатов (рис. 2). К сожалению, исследования на бассейне Rancho Seco проводились при скорости ветра, не превышающей 7 м/с.

Метод расчета потерь воды из-за сноса для брызгальных систем охлаждения, предложенный американскими коллегами, имеет, по мнению авторов, два недостатка, существенно ограничивающих область применения метода. Первый состоит в пренебрежении влиянием деформации капель на их кинетические характеристики. Второй обусловлен допущением о пренебрежимо малом влиянии горизонтальной составляющей скорости капель на траекторные расчеты. Тем самым авторы работы [1] рассматривают факел как область, аэродинамически «непрозрачную» для внешнего потока воздуха. В том диапазоне изменения W_v , в котором выполнены расчеты [1], оба недостатка математической модели оказались незначительными. Однако в ряде равнинных местностей (к примеру, район Запорожской АЭС) скорость ветра достигает 18 м/с. При такой ветровой нагрузке указанные факторы становятся определяющими.

В качестве иллюстрации практического использования предложенной методики расчета (применительно к брызгальным бассейнам ответственных потребителей Запорожской АЭС, оснащенным форсунками Б-50) на рис. 3 дана зависимость протяженности зоны $x_{0,95}$ от скорости ветра и напора воды перед форсункой при высоте сопла над зеркалом бассейна равном 1,5 м.

Следует заметить, что в натуральных условиях состояния атмосферы приземного слоя стационарное течение воздуха с постоянной скоростью (принятое в расчетной модели), естественно, не реализуется. Всегда возможны порывы ветра с неким (как правило, неизвестным) законом парастания скорости $W_v(\tau)$ до ее максимального уровня $(W_v)_{\max}$. Однако в силу инерционных эффектов движения капле очевидно, что величина $x_{0,95}$, вычисляемая при $(W_v)_{\max} = \text{const}$, будет больше, чем в случае, когда в расчетной методике был бы учтен закон $W_v(\tau)$. Следовательно, если под W_v на рис. 3 понимать максимально возможную скорость ветра в стационарном или постационарном потоке воздуха, то в последнем случае прогноз величины $x_{0,95}$ делается с запасом.

Вывод. Предложенный метод расчета выноса капельной влаги из брызгального бассейна АЭС позволяет определять величину убыли циркуляционной воды из-за сноса, эпюру распределения локальных расходов жидкости и размеры территории, на которую выносятся разбрызгиваемая влага за пределами бассейна, в широком диапазоне режимно-геометрических параметров сооружения и скоростей ветра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чен, Тризек. Модели тепловых режимов работы и метод расчета потерь воды из-за сноса для брызгальных систем охлаждения // Теплопередача. 1977. Т. 99. № 2. С. 127–134.
2. Портер, Чен. Тепло- и массоперенос в брызгальных бассейнах // Теплопередача. 1974. Т. 96. № 3. С. 24–30.
3. Фарфоровский В. Б. О целесообразном расположении брызгальных бассейнов на промплощадке // Электр. станции. 1962. № 10. С. 81–83.

4. Ульянов В. М., Муштаев В. И., Пляновский А. Ш. К расчету гидродинамики дисперсных двухфазных потоков // Теорет. основы хим. технологии. 1977. Т. 11. № 5. С. 716-722.
5. Раушенбах Б. В., Белый С. А., Беспалов И. В., Волынский М. С. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1964. 526 с.
6. Братута Э. Г., Переселков А. Р. Обобщенная функция распределения объема капель по диаметрам // Изв. вузов. Энергетика. 1978. № 3. С. 86-90.
7. Братута Э. Г., Ярошенко Т. И., Заночкин Л. А., Манжай В. П. К расчету кипематических характеристик капель в факеле распылителя // Энергетическое машиностроение. Вып. 41. Харьков: Вища шк., 1986. С. 97-103.
8. Братута Э. Г., Заночкин Л. А. Модифицированный счетно-импульсный метод исследования дисперсного состава капельных потоков // Изв. вузов СССР. Энергетика. 1984. № 4. С. 82-85.
9. Шрок, Трезек, Килмен. Характеристики брызгального бассейна для отвода сбросного тепла атомной электростанции в аварийных условиях // Энергетические машины и установки: Тр. амер. об-ва инж-мех. 1977. № 4. С. 171-178.

Харьков

Получила в редакцию
7.V 1986
Переработана
27.IV 1987