

УДК 536.42:661.426

*К. В. Добрего<sup>1</sup>, В. Ф. Давыденко<sup>2</sup>, И. А. Козначеев<sup>2</sup>*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ БРЫЗГАЛЬНЫХ СОПЕЛ ДЛЯ ПРИДАНИЯ ВРАЩЕНИЯ ПАРОВОЗДУШНОМУ ПОТОКУ В НАДРОСИТЕЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ БАШЕННОЙ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ ГРАДИРНИ

*Статья рассматривает вопрос улучшения тепловой эффективности башенных испарительных градирен за счет вращательного движения паровоздушного потока в надросительном пространстве. Для придания вращения предложено использовать импульс разбрызгиваемой воды. Показано, что при существующих в настоящее время параметрах разбрызгивающих сопел в поступательное движение воздуха может быть переведено до 30% импульса водяного потока, что достаточно для существенного изменения аэродинамики паровоздушного потока в надросительном пространстве и улучшения работы градирни. Оценен оптимальный угол наклона оси факела. Даны рекомендации и поставлены задачи для технической реализации данной технологии на башенной градирне.*

**Ключевые слова:** брызгальная градирня, оптимизация теплообмена, капельный поток.

**Введение.** Башенные испарительные градирни (БИГ) являются важнейшим элементом системы охлаждения воды конденсационных и атомных электростанций. Для охлаждения воды, поступающей из конденсатора турбинных установок, используется как тепло-, так и массообмен с воздушным потоком [1]. Горячая вода разбрызгивается над оросителем, обладающим большой площадью поверхности теплообмена, и, стекая по нему, отдает тепло воздушному потоку. При контакте с воздухом происходит испарение воды, и относительная влажность воздуха приближается к 100%. Теплота испарения влаги изымается из воды, приводя к снижению ее температуры. Далее вода в капельно-струйном виде выпадает в подросительном пространстве (зона дождя), где отдает часть тепла поступающему воздуху, и попадает в бассейн БИГ, после чего направляется обратно в конденсатор (рис. 1). Оборот охлаждаемой воды на современных тепловых станциях может достигать 100 тысяч тонн в час, при этом до 1.5–2% воды может испаряться в градирне.

Вопросы оптимизации тепловой работы градирен привлекают внимание исследователей на протяжении многих лет [1, 2], что связано с высокой стоимостью строительства БИГ, а также с необходимостью повышения мощности электростанций. Кроме того, становятся все более актуальными вопросы экологического плана — акустический шум, унос влаги в капельной форме и др.

Среди методов управления работой БИГ можно особо выделить аэродинамические, основанные на регулировании движения паровоздушной смеси с использованием направляющих щитов, ветропреградителей, дефлекторов и других аэродинамических элементов. В работе [3] показано, что аэродинамические явления в подросительном пространстве могут оказать большое влияние на охлаждающую способность БИГ, и предложено исследовать работу БИГ в условиях сильного ветра.

Недавно [4, 5] были проведены исследования влияния вращения потока в надросительном пространстве на тепломассообмен в БИГ и ее работу в условиях ветровых нагрузок. В работе [4] показано, что хотя вращение потока в надросительном пространстве мало влияет на тепло- и массообмен в двухфазном потоке, однако приводит к смещению капельной фазы к периферии, перераспределению областей конденсации и испарения в надросительном пространстве. Это перераспределение, в частности, повышает вероятность коалесценции капель и выпадения в периферийной части сечения градирни дождя, способствующего изъятию влаги в капельной форме из потока и имеющего, таким образом, положительный экологический эффект.

В работе [5] исследовано влияние вынужденного вращения потока на тепловую эффективность градирни. Показано, что закрутка потока в надросительном пространстве улучшает его стабилизацию в условиях ветрового напора и приводит к увеличению тепловой эффективности градирни на 5–10%, а в сочетании с другими

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет. 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65; э-почта: [dobrego@bntu.by](mailto:dobrego@bntu.by); <sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; э-почта: [ivkozn@hmti.ac.by](mailto:ivkozn@hmti.ac.by); [dvf@hmti.ac.by](mailto:dvf@hmti.ac.by). Поступила 23.01.2015.

аэродинамическими методами управления работой БИГ (ветровые перегородки, воздухонаправляющие щиты на входе в градирню) может иметь еще большую эффективность. Отметим, что в упомянутой статье закрутка потока создавалась путем установки над оросителем крупномасштабных дефлекторов. Такие дефлекторы неизбежно приводят к увеличению гидравлического сопротивления градирни, особенно заметному при угле установки больше  $60^\circ$  от вертикали [5]. Очевидно, что монтаж крупномасштабных дефлекторов над оросителем является трудоемкой и дорогостоящей операцией, экономическая целесообразность которой требует изучения.

Вихревое движение паровоздушного потока в надоросительном пространстве возможно также организовать за счет придания соответствующей азимутальной ориентации капельным потокам, создаваемым разбрызгивателями. Такой метод не создает дополнительного сопротивления для вертикального движения потока и в этом смысле более эффективен, чем использование дефлекторов, кроме того, его реализация не требует существенных капитальных затрат и дополнительных затрат энергии.

Массовые расходы воды и паровоздушной смеси в БИГ примерно равны, поэтому передача импульса от капельного потока к паровоздушному в принципе может быть осуществлена достаточно эффективно. Однако ввиду большого количества различных конструкций разбрызгивателей и каплеуловителей, требований к фракционному составу капельного потока и равномерности орошения необходимо более детальное обсуждение данного метода придания вращения паровоздушному потоку.

В настоящей статье предпринята попытка проанализировать применимость метода ориентирования разбрызгивающих сопел для придания вращения паровоздушному потоку в надоросительном пространстве БИГ. Рассмотрены вопросы традиционных конструктивных решений разбрызгивателей, сделаны оценки эффективности передачи импульса от воды к паровоздушному потоку, даны рекомендации по применению данного подхода.

**Системы водораспределения БИГ.** Основные принципы, конструкции и правила эксплуатации систем водораспределения БИГ изложены в литературе [1, 6]. Водораспределительная система градирни представляет собой коллекторную систему труб с расположенными регулярным образом водоотводящими патрубками. На патрубках устанавливаются водоразбрызгивающие устройства. Трубы размещаются на системе опор, являющейся единой несущей системой для оросителя, каплеулавливателей, мостков для обслуживания зоны оросителя, сигнальных, измерительных и других технических систем. Скорость движения воды в трубах коллектора, как правило, не превосходит 2 м/с.

Водораспределительные системы могут быть напорные и безнапорные. Большинство БИГ работает при напоре воды в коллекторе 1–2 м водяного столба. В большинстве напорных систем белорусских БИГ факел разбрызгивания направлен вверх. Именно такие системы мы рассматриваем в данной работе. Разбрызгивающие сопла изготавливаются из пластмассы или металла, могут иметь дополнительные элементы в виде вкладышей, регулирующих зазоры, или проходные сечения. В настоящее время наиболее распространены разбрызгивающие сопла трех типов [1]: 1) эвольвентные (центробежные) с диаметром выходного отверстия (далее диаметром) 25, 40 и 50 мм; 2) отражательные (ударные) с диаметром 24, 26 и 28 мм; 3) раструбные (струйно-винтовые) с диаметром раструба 150 мм. Схематическое изображение разных видов сопел показано на рис. 2.

Эвольвентные сопла (рис. 2, а, б) устанавливаются на трубопроводах водораспределительной системы, они обеспечивают оптимальное разбрызгивание воды.

Отражательные сопла (рис. 2, в), как правило, имеют трехстоечное крепление отражателя к корпусу, причем лучшим решением является перфорированный отражатель, обеспечивающий более раннее дробление струи

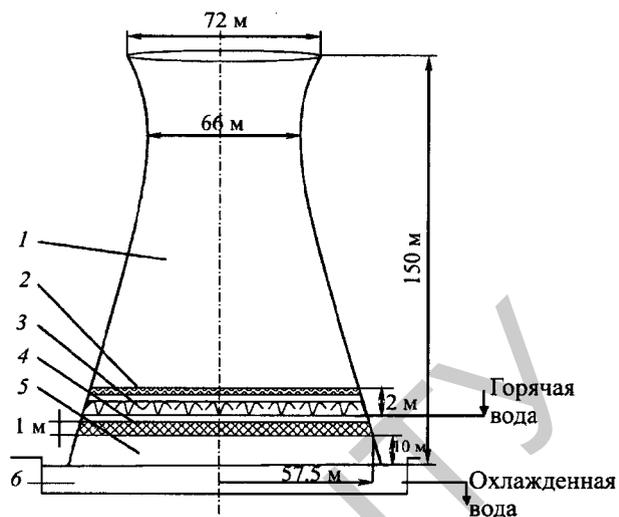


Рис. 1. Схема башенной испарительной градирни: 1 — надоросительное пространство; 2 — каплеуловители; 3 — разбрызгиватели; 4 — ороситель; 5 — зона дождя; 6 — бассейн

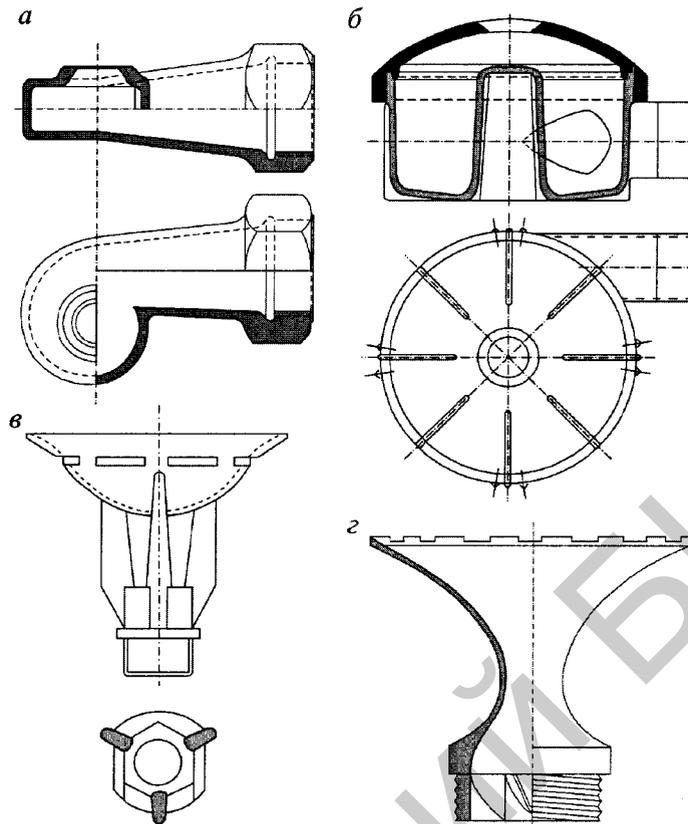


Рис. 2. Основные виды сопел: а — эвольвентное сопло; б — вариант эвольвентного сопла для брызгальных градирен; в — отражательное сопло с перфорированным отражателем; z — раструбное сопло

на капли при одинаковом напоре. Данный тип разбрызгивателей по сравнению с другими обладает преимуществом по равномерности орошения, а также по долговечности.

Раструбные сопла (рис. 2, z) чаще используются в брызгальных градирнях при работе с загрязненной оборотной водой. Для создания достаточной поверхности и времени контакта воды с воздухом высоту факела разбрызгивания раструбного сопла следует устанавливать равной 3–4 м. При напоре у сопла до 1.8 м вод. ст., что принимается как характерный напор БИГ, площадь факела и равномерность разбрызгивания раструбного сопла недостаточны [6].

Гидравлические характеристики разбрызгивающих сопел — зависимости расхода воды через сопло  $Q$ , высоты факела разбрызгивания  $h_s$  и радиуса факела разбрызгивания  $R_s$  от напора  $h_w$  и геометрии сопел приведены в литературе [1, 6].

**Размер капель.** Размер капель, производимых разбрызгивателем, будет оказывать существенное влияние на интенсивность передачи импульса паровоздушному потоку. На величину диаметра капель влияют конструкция разбрызгивателя, скорость потока на выходе из сопла, температура воды. Размер капель должен быть достаточно мал, чтобы препятствовать образованию струй, обеспечивать хорошую равномерность орошения и достаточные радиус и высоту факела разбрызгивания. При этом их средний размер должен быть достаточно велик для минимизации капельного уноса влаги. Кроме того, для разбрызгивания более мелких капель требуется больший перепад давления в сопле, а следовательно, увеличиваются потери энергии на прокачивание воды. Исходя из этих соображений, оптимальным считается [1] размер капель  $d = 2-3$  мм. Следует отметить, что в литературе используются различные определения среднего размера капель — средний арифметический, квадратичный, средний кубический диаметр, эквивалентный диаметр по Заутеру [1] и другие. Более подробно с методами расчета диспергирования капель и характеристиками сопел можно ознакомиться, например, в работах [1, 7, 8].

С точки зрения физики аэродинамического распыления характерный размер определяется отношением сил вязкого трения к силам поверхностного натяжения, а также отношением кинетической энергии потока к энергии поверхностного натяжения. В общем виде размер капель может быть выражен через соответствующие критерии:

$$d = AWe^l M^n (\rho_g / \rho_w)^k, \quad (1)$$

где  $A, l, n, k$  — эмпирические константы,  $We = u_w^2 \rho_w d_0 / \sigma$  — число Вебера,  $M = \mu_w^2 \rho_w d_0 / \sigma$ . Здесь  $u$  — скорость истечения воды,  $\mu_w$  — динамическая вязкость воды,  $\rho_g, \rho_w$  — плотности воздуха и воды,  $d_0$  — диаметр отверстия истечения струи,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения воды.

Исследования показали [7], что средний диаметр капель может быть вычислен с достаточной точностью через напор воды:

$$d = Bh_w^n, \quad (2)$$

где  $B$  и  $n$  — эмпирические параметры,  $h_w$  — напор воды перед соплом. По данным НИИ ВОДГЕО [1]

$$d = B/\sqrt[3]{h_w}. \quad (3)$$

В [7] приведено следующее выражение для размера капель при аэродинамическом распылении:

$$d = Bd_0/\sqrt{h_w}. \quad (4)$$

Соответствующие константы определялись в работах [8, 9] и других.

**Передача импульса паровоздушному потоку.** Принимая характерное значение напора воды в водораспределительной системе  $h_w = 1.8$  м вод. ст., а характерное значение скорости паровоздушного потока в области разбрызгивателей  $U_{g,0} = 1$  м/с, легко оценить потоки импульса воды  $G_w \sqrt{2gh_w}$  и паровоздушного потока  $G_g U_{g,0}$ . Учитывая, что  $G_w \sqrt{2gh_w} \sim G_g U_{g,0}$ , можно полагать, что имеется принципиальная возможность управления движением паровоздушного потока за счет ориентации струй. Для количественной оценки возможности придания вращения паровоздушному потоку следует учитывать следующее: 1) ввиду конечного времени взаимодействия капель воды с паровоздушным потоком возможна лишь частичная передача импульса; 2) поскольку поперечная компонента скорости паровоздушной смеси всегда меньше таковой капельной фазы, то поперечная скорость, которую можно сообщить паровоздушному потоку, удовлетворяет неравенству  $U_{g,x} < \frac{G_w}{G_w + G_g} \sqrt{2gh_w}$ ; 3) поскольку разбрызгивание ведется под углом к плоскости орошения и в широком телесном угле, составляющая импульса в выбранном направлении будет ниже импульса, достигающегося в случае остро направленной горизонтальной струи; 4) пространственная неравномерность капельного потока также приводит в среднем к снижению эффективности передачи импульса; 5) для создания равномерного вращения паровоздушного потока как целого максимальный импульс должен передаваться лишь на периферии потока, передаваемый импульс должен снижаться с уменьшением расстояния до оси градирни; 6) система каплеуловителей, размещенная над разбрызгивающими соплами, может (в зависимости от конструкции) уменьшить или полностью погасить созданное разбрызгивающими соплами вращение паровоздушного потока, поэтому данный метод придания вращения достаточно эффективен только для использования в градирнях без каплеуловителей.

Найдем значение импульса, переданного паровоздушному потоку от единичной капли. Пусть капля вылетает из сопла со скоростью  $u$  под углом  $\alpha$  к плоскости горизонта (рис. 3).

Считаем скорость паровоздушной смеси в направлении оси  $z$  постоянной и равной скорости паровоздушного потока на входе в зону разбрызгивателей  $U_{g,z} = U_{g,0}$ , а в направлении оси  $x$  — равной нулю. Это допущение несколько завышает величину переданного импульса. На каплю действуют силы тяжести и сопротивления воздушного потока:

$$F = mg - C_f \frac{\rho_g (u - U_g)^2}{2} \frac{\pi d^2 (u - U_g)}{4 |u - U_g|}. \quad (5)$$

Последний множитель представляет собой единичный вектор, направление которого соответствует скорости капли относительно паровоздушного потока. В проекциях на оси уравнение (5) имеет вид:

$$F_x = -\frac{1}{8} C_f \rho_g u_x (u_x^2 + (u_z - U_{g,z})^2)^{1/2} \pi d^2,$$

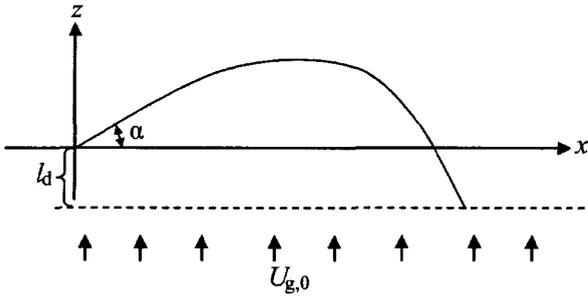


Рис. 3. Траектория движения капли при ограничении доступного для движения пространства снизу:  $l_d$  — расстояние до оросителя,  $\alpha$  — угол вылета,  $U_{g,0}$  — скорость паровоздушного потока

$$F_z = -mg - \frac{1}{8} C_f \rho_g (u_z - U_{g,z}) (u_x^2 + (u_z - U_{g,z})^2)^{1/2} \pi d^2 .$$

С учетом допущения о постоянстве вертикальной скорости паровоздушного потока дифференциальные уравнения для скорости движения капли запишутся как:

$$\frac{du_x}{dt} = -\frac{1}{8m} C_f \rho_g u_x (u_x^2 + (u_z - U_{g,0})^2)^{1/2} \pi d^2 , \tag{6}$$

$$\frac{du_z}{dt} = -g - \frac{1}{8m} C_f \rho_g (u_z - U_{g,0}) (u_x^2 + (u_z - U_{g,0})^2)^{1/2} \pi d^2 .$$

Численное решение уравнений (6) при начальных условиях  $u_x = u_0 \cos \alpha$ ,  $u_z = u_0 \sin \alpha$  позволяет найти зависимость скорости капли от времени. Передаваемый каплей паровоздушному потоку импульс оценивается по изменению горизонтальной проекции скорости капли за время полета. Время  $t_1$  полета капли до оросителя находится численным решением уравнения:

$$-l_d = \int_0^{t_1} u_z dt . \tag{7}$$

Оценивая число Рейнольдса как  $Re \sim 1000$ , для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления применим одну из рекомендуемых для этого диапазона формул —  $C_f = 4/Re^{1/3}$ , где  $Re = \frac{\rho_g d |u - U_g|}{\mu_g}$  [10].

Результаты расчета изменения горизонтальной компоненты скорости в зависимости от угла вылета капли и расстояния до оросителя  $l_d$  приведены на рис. 4.

Данные рис. 5 показывают достаточно сильную зависимость изменения горизонтальной компоненты скорости капли от ее размера. Приближенно можно считать, что увеличение диаметра в два раза уменьшает величину переданного импульса в это же количество раз.

Отметим, что вопрос выбора эмпирической зависимости для гидродинамического сопротивления далеко не прост ввиду того, что в сильно возмущенных потоках может наблюдаться так называемый ранний кризис обтекания капли, что выражается в снижении коэффициента гидродинамического сопротивления. С другой стороны, известно, что сопротивление для частицы, движущейся в ансамбле частиц, ниже такового для одиночной частицы. В связи с этим расчеты, выполненные для одиночной капли, могут дать верхнюю оценку силы сопротивления. Нижняя оценка может быть сделана в предположении о стоксовом обтекании каплей.

При стоксовом обтекании  $C_f = \frac{24}{Re}$  в системе уравнений (6) компоненты скорости разделяются:

$$\frac{du_x}{dt} = -3\pi d \mu_g u_x / m , \quad \frac{du_z}{dt} = -g - 3\pi d \mu_g (u_z - U_{g,0}) / m . \tag{8}$$

Интегрирование уравнений дает для компонент скоростей следующие выражения:

$$u_x = u_{0,x} e^{-At} , \quad u_z = (u_{0,z} + B/A) e^{-At} - B/A , \tag{9}$$

где  $A = 3\pi d \mu_g / m$ ,  $B = g - AU_{g,0}$ . Изменение поперечной компоненты скорости капли за время полета:

$$\Delta u_x = u_0 \cos \alpha (1 - e^{-At_1}) , \tag{10}$$

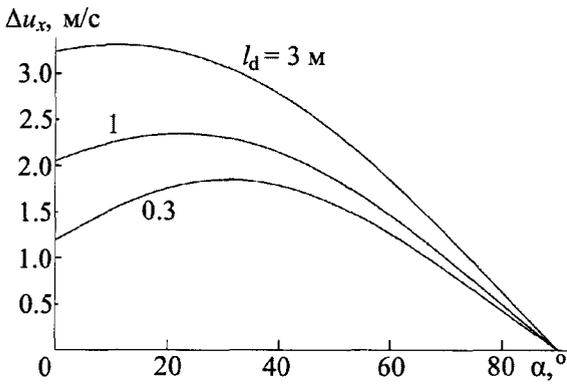


Рис. 4. Зависимость изменения горизонтальной компоненты скорости капли от угла вылета  $\alpha$  при разных значениях расстояния  $l_d$  до оросителя при обтекании по закону  $C_f = 4/Re^{1/3}$ . Параметры:  $d = 2$  мм,  $m = \rho_w \pi d^3 / 6$ ,  $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5}$  Па·с,  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>,  $U_{g,0} = 1$  м/с,  $u_0 = 5$  м/с,  $\rho_g = 1.18$  кг/м<sup>3</sup>

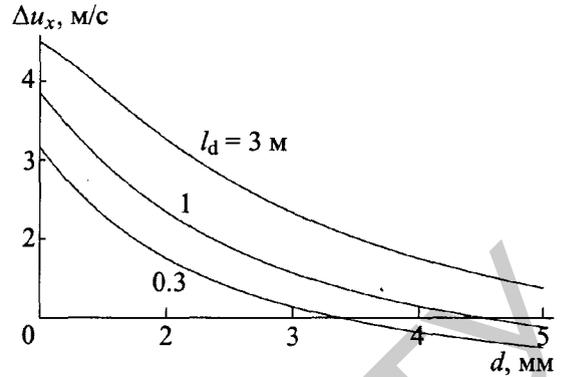


Рис. 5. Зависимость изменения горизонтальной компоненты скорости капли от диаметра капли при разных значениях расстояния  $l_d$  до оросителя при обтекании по закону  $C_f = 4/Re^{1/3}$  при  $\alpha = 20^\circ$ . Остальные параметры те же, что и на рис. 4

где  $t_1$  — время движения капли, определяемое границами области ее движения. Время  $t_1$  находится из уравнения (7) после подстановки (9) и интегрирования. График зависимости  $\Delta u_x$  от  $\alpha$  при нескольких значениях  $l_d$  приведен на рис. 6.

Как известно [11, 12], коэффициент аэродинамического сопротивления при обтекании сферы  $C_f$  падает с ростом числа Рейнольдса по закону  $24/Re$ , затем пропорционально  $1/Re^{1/3}$ , а в области  $Re \sim 1000-10\ 000$  сохраняет постоянное значение в диапазоне 0.4–0.5. Поскольку именно в этом диапазоне проходит основное взаимодействие капли с газом, сделаем оценки динамики торможения, исходя из значения  $C_f = 0.5$ . Результаты расчета показаны на рис. 7.

Расчет с использованием различных моделей динамического взаимодействия капли с потоком дает представление о характерной точности, а также нижнюю оценку интенсивности данного взаимодействия. Оценки относительной величины потери импульса капли при использовании моделей взаимодействия  $C_f = 24/Re$  (стоксово обтекание),  $C_f = 4/Re^{1/3}$  и  $C_f = 0.5$  представлены в табл. 1.

На рис. 8 показаны зависимости угла вылета капли, при котором наблюдается максимум изменения горизонтальной компоненты скорости капли, от расстояния до оросителя. На рис. 9 представлено время полета капли при оптимальном угле для трех моделей обтекания как функция расстояния до оросителя. Из рис. 8 следует,

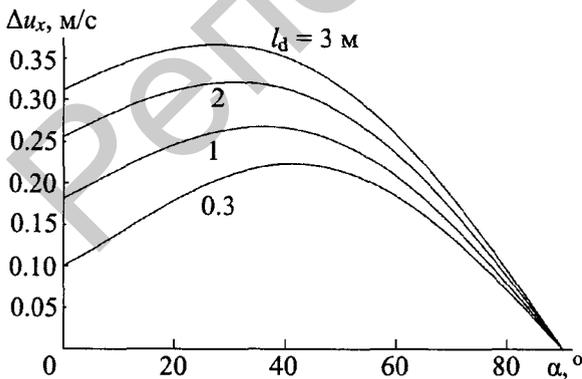


Рис. 6. Зависимость изменения горизонтальной компоненты скорости капли от угла вылета  $\alpha$  при разных значениях расстояния  $l_d$  до оросителя при стоксовом обтекании. Параметры те же, что и на рис. 4

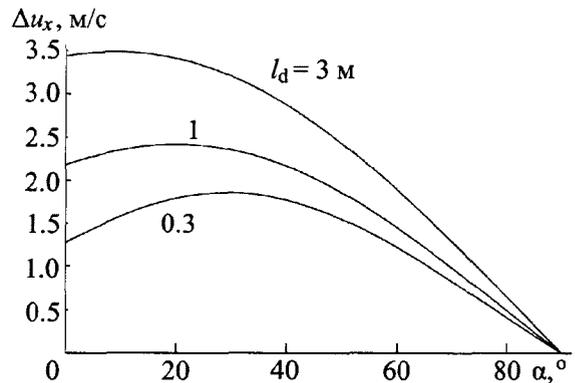


Рис. 7. Зависимость изменения горизонтальной компоненты скорости капли от угла вылета  $\alpha$  при разных значениях расстояния  $l_d$  до оросителя при обтекании по закону  $C_f = 0.5$ . Параметры те же, что и на рис. 4

Таблица 1. Относительная потеря импульса за 1 с при диаметрах каплей  $d = 2$  и  $5$  мм

Модель обтекания	Диаметр капли $d$ , мм	
	5	2
Стоксово обтекание $C_f = 24/Re$	1.5%	8%
$C_f = 4/Re^{1/3}$	24%	55%
$C_f = 0.5$	31%	53%

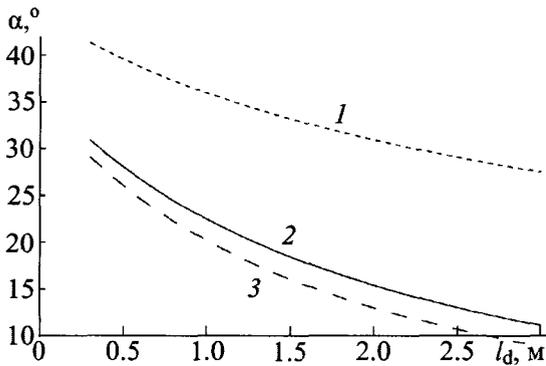


Рис. 8. Зависимости оптимального угла разбрызгивания от расстояния до оросителя: 1 — стоксово обтекание; 2 —  $C_f = 4/Re^{1/3}$ ; 3 —  $C_f = 1/2$ . Параметры те же, что и на рис. 4

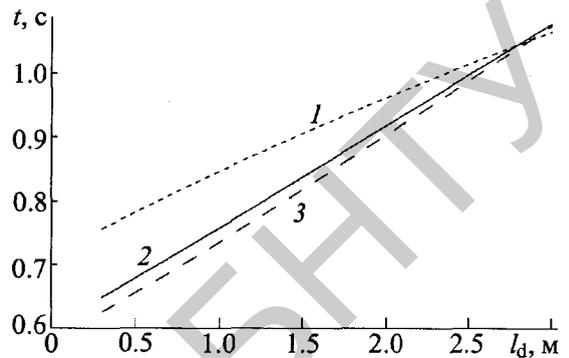


Рис. 9. Зависимость времени полета капли при оптимальном угле распыла от расстояния до оросителя: 1 — стоксово обтекание; 2 —  $C_f = 4/Re^{1/3}$ ; 3 —  $C_f = 1/2$ . Параметры те же, что и на рис. 4

что при заниженном коэффициенте сопротивления при стоксовом обтекании оптимальный угол разбрызгивания выше, чем для моделей  $C_f = 4/Re^{1/3}$  и  $C_f = 0.5$ . При этом последние модели дают близкий результат как для оптимального угла разбрызгивания, так и для времени полета капли. Несмотря на пренебрежение рядом факторов, рассмотренные модели могут быть использованы для оценок характеристик динамического взаимодействия капель с паровоздушным потоком.

К факторам, влияющим на передачу импульса, относятся неоднородность скорости потока как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, увлечение потока в горизонтальном направлении (не учитываемое в вышеприведенных оценках), дисперсия капель по размерам, коллективные эффекты взаимодействия капель с потоком и другие. Их учет представляет собой весьма сложную для теоретического анализа задачу и поэтому должен быть проведен экспериментально. При этом данные факторы могут быть эффективно учтены поправочными коэффициентами.

Факт относительно малой потери импульса каплей является обоснованием использованного допущения о незначительной скорости движения паровоздушного потока по оси  $x$  при взаимодействии с каплей. Полный импульс, переданный каплей в тангенциальную составляющую скорости паровоздушного потока, найдется из уравнения баланса

$$G_w \Delta u_{w,x} = G_g U_{g,x} ,$$

где величина  $\Delta u_{w,x}$  рассчитывается на основе модели (5) или аналогичной.

Для факела, образованного капельным потоком

$$U_{g,x} = K_1 K_2 \frac{G_w}{G_g} \Delta u_{w,x} , \tag{11}$$

где коэффициент  $K_1$  характеризует геометрию факела (см. табл. 2),  $K_2$  учитывает влияние пространственной неоднородности капельного потока и дисперсию размера капель.

При типичном значении  $G_g/G_w = 1.2$  горизонтальная составляющая скорости потока может составить  $U_{g,x} = 0.3-0.5$  м/с, а отношение горизонтальной составляющей к вертикальной, соответственно,  $U_{g,x}/U_{g,z} = 0.3-0.5$ . Такой интенсивности вращения потока достаточно для заметного влияния на работу БИГ [4, 5]. При полном или почти полном торможении капель эта скорость оценится как

Таблица 2. Доля импульса в направлении оси разбрызгивателя  $K_1$  для простейших геометрий факела при различных углах полураскрытия  $\varphi$

Форма факела	Угол полураскрытия $\varphi$			
	30°	45°	60°	90°
Кольцевой конус	0.866	0.707	0.5	0
Сплошной конус	0.93	0.853	0.75	0.5
Сплошной сектор	0.955	0.9	0.827	0.635

$$U_{g,x} = K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{G_w}{G_w + G_g} \sqrt{2gh_w}, \quad (12)$$

где  $K_3 = \cos \alpha$  задается углом наклона оси факела разбрызгивателя, а  $K_4$  обусловлен потерей напора на разбрызгивателе и в подводящем канале. Заметим, что коэффициент  $K_4$  эквивалентен коэффициенту расхода  $\mu^*$  по терминологии [1].

**Угол установки сопла разбрызгивателя и геометрия факела.** Оптимальный угол установки разбрызгивателя зависит от размера капель, скорости паровоздушного потока, конструктивных особенностей зоны. Существенного отличия значений  $\alpha$  для режимов обтекания с  $C_f = 4/Re^{1/3}$  и  $C_f = 0.5$  нет (рис. 8).

Угол раскрытия факела эвольвентного сопла составляет, как правило,  $2\varphi = 100-120^\circ$  ( $\varphi$  — угол полураскрытия). Производители предлагают сопла с различными углами раскрытия и производительностью. Влияние угла раскрытия факела разбрызгивания на величину импульса в направлении оси факела относительно невелико и зависит от геометрии факела. Для простейших геометрий факела это кольцевой конус, сплошной однородный конус и сплошной плоский сектор. Доля импульса в направлении оси разбрызгивателя, рассчитанная из геометрических соображений, представлена в табл. 2.

Факел разбрызгивания в форме сплошного плоского сектора имеет преимущество, связанное с высоким импульсом в направлении оси разбрызгивания, равномерностью разбрызгивания, удобством регулирования направления и площади орошения. В БИГ такие разбрызгиватели не используются, но их разработка может быть выполнена в короткие сроки, например, модификацией отбойника отражательных (ударных) сопел.

**Равномерность орошения.** Важное требование к водораспределительной системе БИГ — обеспечение равномерности орошения. Как правило, используя геометрические модели факелов, удается оценить равномерность лишь в первом приближении. Это связано со случайной асимметрией факелов и гидродинамическим взаимодействием факелов между собой. Первая причина неравномерности — неравномерность отдельного факела, вторая — невозможность согласовать эпюры отдельных факелов так, чтобы суперпозиция давала равномерное орошение. Мерой неоднородности орошения отдельного факела  $K'_{ih}$  обычно является приведенный модуль отклонения плотности потока орошения  $q(r)$  от средней плотности орошения  $\bar{q}$ :

$$K'_{ih} = \sum_{r=0}^{R_s} |q(r) - \bar{q}| \Delta r / R_s q(r). \quad (13)$$

Величина  $q(r)$  для осесимметричного разбрызгивателя является функцией радиальной координаты  $r$  (расстояния от оси) и обычно определяется опытным путем. В формуле (13)  $R_s$  — радиус факела, суммирование идет по кольцевым областям с шириной  $\Delta r$ . Практика показывает [1], что для сопел, направленных вверх, с увеличением напора неравномерность уменьшается, а в случае обращения факела вниз — увеличивается.

Данные измерения общей равномерности распределения воды над оросителем обобщаются [1] формулой:

$$K_{ih} = CK'_{ih} (f/h_w R_s)^{0.4}. \quad (14)$$

Здесь коэффициент  $C$  зависит от ориентации сопла,  $f$  — площадь оросителя, обслуживаемая одним соплом. Из уравнения следует, что универсальным подходом к повышению равномерности орошения в градирне является улучшение равномерности орошения отдельным соплом и повышение площади разбрызгивания.

Ориентирование факела для придания вращения паровоздушному потоку приведет к уменьшению площади орошения, что связано с введением асимметрии в эпюру направления разбрызгивания (выделением сектора разбрызгивания). При сохранении характерного напора на прежнем уровне площадь орошения может уменьшиться в 2–2.5 раза. В этом случае согласно уравнению (14) общая неравномерность распределения воды может вырасти в 1.3–1.5 раз.

По данным [1] общая неравномерность орошения с использованием раструбных сопел с диаметром входного отверстия 50 мм и диаметром суженной части 25 мм составляет  $K_{ih} = 0.12-0.13$ . Если ориентация разбрызгивания обеспечивается простым ограничением направления разбрызгивания от 360 до 180 градусов, то площадь орошения уменьшается в два раза. Поскольку допускаемая неравномерность распределения потока по площади оросителя  $K_{ih} < 0.25$  [1], то увеличение  $K'_{ih}$ , связанное с уменьшением площади орошения направленным соплом, согласно (10) останется в рамках допустимого значения общей неравномерности. Следует также иметь в виду, что некоторые типы оросителей допускают при своей эксплуатации более высокую неоднородность орошения.

**Заключение.** В работе обсуждена возможность использования разбрызгивающих устройств для придания вращения паровоздушному потоку в надоросительном пространстве БИГ. Сделаны простейшие оценки эффективности такой технологии.

Несмотря на значительный поток импульса разбрызгиваемой воды, имеющий место при обычных напорах воды в водораспределительной системе (1–2 м вод. ст.), для создания вращения паровоздушного потока можно использовать лишь небольшую его часть. Основным ограничением является относительно слабое аэродинамическое взаимодействие капель с воздушным потоком. Согласно выполненным оценкам, отношение тангенциальной составляющей скорости потока к вертикальной составляющей на периферии градири при ориентировании разбрызгивателей может составить  $U_{g,x}/U_{g,z} \sim 0.4-0.5$ . Оптимальным с этой точки зрения можно признать использование разбрызгивателей с плоским или овальным факелом распыла с углом наклона оси разбрызгивателя  $\alpha = 20-30^\circ$  к плоскости орошения. Оптимальный угол  $\alpha$  зависит от расстояния между разбрызгивающим соплом и оросителем. Угол раскрытия плоского сплошного факела может составлять  $90-180^\circ$ . Необходимая форма факела может быть обеспечена использованием специально спрофилированного отбойника в отражательном (ударном) сопле.

Как показывают расчеты [4, 5], вращение с интенсивностью  $U_{g,x}/U_{g,z} \sim 0.4-0.5$  оказывает влияние на устойчивость работы БИГ в условиях ветра, приводит к улучшению тепловой работы градири, интенсификации коалесценции капель и возврата капельной влаги из паровоздушного потока в бассейн. При сильных ветровых нагрузках  $U_{sw} > 10$  м/с оптимальным является более сильное вращение  $U_{g,x}/U_{g,z} \sim 0.7-0.8$ . Поскольку эффективность передачи импульса растет с увеличением напора воды в водораспределительной системе, можно предложить использование повышенного напора в условиях сильного ветра, что может обеспечить дополнительную закрутку потока. Заметим, что управление градириной так или иначе подразумевает увеличение расхода и напора воды при дефиците производительности БИГ. Таким образом, данная технология согласуется со схемой управления работой БИГ при варьировании нагрузки и при изменении погодных условий. Внедрение технологии гидродинамического завихрения паровоздушного потока является практически беззатратным, поскольку может быть выполнено в течение планового обслуживания БИГ, включающего ремонт и замену брызгальных устройств. Ее использование может повысить устойчивость работы БИГ в условиях средних и больших ветровых нагрузок, улучшить экологические показатели (возврат капельной влаги), увеличить тепловую производительность БИГ.

Дальнейшее исследование данного вопроса должно включать моделирование тепло- и массообмена и аэродинамики в БИГ с наведенным вращением паровоздушного потока, а также создание соответствующих разбрызгивающих устройств.

### Обозначения

$A, B, l, m, n, k$  — эмпирические константы в формулах (1) и (2);  $a$  — ускорение,  $m^2/c$ ;  $C$  — безразмерный коэффициент в (14);  $C_f$  — коэффициент аэродинамического сопротивления при обтекании шара;  $d$  — диаметр капли, м;  $d_0$  — диаметр отверстия истечения струи, м;  $F$  — сила, действующая на каплю, Н;  $f$  — площадь оросителя, приходящаяся на одно сопло,  $m^2$ ;  $G_w$  — полный расход воды в БИГ, кг/с;  $G_g$  — полный расход паровоздушной смеси в БИГ, кг/с;  $g$  — ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $h_s$  — высота факела разбрызгивания, м;  $h_w$  — напор воды перед соплом, м вод. ст.;  $K_1, K_2, K_3, K_4$  — поправочные коэффициенты в (12);  $K_{ih}$  — коэффициент общей неравномерности орошения;  $K'_{ih}$  — коэффициент неоднородности орошения факела;  $l_d$  — расстояние от сопла разбрызгивателя до оросителя, м;  $M = \mu_w^2 \rho_w d_0 / \sigma$  — безразмерный критерий;  $m$  — масса капли, кг;  $Q$  — расход воды через сопло, кг/ч;  $Re$  — число Рейнольдса для обтекания шара;  $R_s$  — радиус факела разбрызгивания, м;  $U_g$  — скорость паровоздушной смеси, м/с;  $u$  — скорость капли, м/с;  $U_{g,0}$  — скорость восходящего паровоздушного потока при входе в область водораспределения, м/с;  $U_{g,x}/U_{g,z}$  — отношение горизонтальной составляющей скорости потока на периферии корпуса градири к вертикальной;  $U_{sw}$  — скорость ветра, м/с;  $We = u^2 \rho_w d_0 / \sigma$  — число Вебера для воды;  $x, z$  — координаты, м;  $\alpha$  — угол наклона оси факела разбрызгивания к горизонту, град;  $\varphi$  — угол полуоткрытия факела, град;  $\rho$  — плотность,  $kg/m^3$ ;  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;  $\mu^*$  — коэффициент расхода жидкости в

сопле по [1];  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ . Индексы: g — паровоздушная смесь (gas); ih — неоднородность орошения (inhomogeneity); s — факел разбрызгивания (spray); sw — ветер (sidewind); w — вода (water); 0 — начальное или граничное значение.

### Литература

1. Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И. *Градирни промышленных и энергетических предприятий*. Москва: Энергоатомиздат, 1998.
2. Hemmasian Kashani M. M., Dobrego K. V. Heat and mass transfer in natural draft cooling towers. *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т. 86, № 5. С. 1008–1018.
3. Власов А. В., Дашков Г. В., Солoduхин А. Д., Фисенко С. П. Исследование внутренней аэродинамики башенной испарительной градирни. *Инженерно-физический журнал*. 2002. Т. 75, № 5. С. 64–68.
4. Hemmasian Kashani M. M., Dobrego K. V. Heat and mass transfer in the over-shower zone of a cooling tower in condition of flow rotation. *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т. 86, № 6. С. 1402–1411.
5. Hemmasian Kashani M. M., Dobrego K. V. Influence of flow rotation within a cooling tower on the aerodynamic interaction with crosswind flow. *Инженерно-физический журнал*. 2014. Т. 87, № 2. С. 376–383.
6. РД 34.22.402–94. *Типовая инструкция по приемке и эксплуатации башенных градирен*. Москва: ОРГРЭС, 1997.
7. Иванов Е. Н. *Расчет и проектирование систем пожарной защиты*. Москва: Химия, 1977.
8. Блинов В. И. *О дисперсности механически распыленной воды*. Москва: ВТИ, 1933.
9. Новиков И. И. Закономерности дробления жидкости в центробежных форсунках. *Журнал технической физики*. 1948. Т. 18, № 3. С. 18–36.
10. Симаков Н. Н. Расчет обтекания и сопротивления шара в ламинарном и сильнотурбулентном потоках. *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83, № 4. С. 16–20.
11. Munson B. R., Young D. F., Okiishi T. H. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. New York: John Wiley & Sons Publ., 2006.
12. Страусс В. *Промышленная очистка газов*. Москва: Химия, 1981.