

Научная статья

УДК 532.54

doi: 10.17223/19988621/97/9

Улавливание капель при охлаждении оборотной воды в испарительных градирнях

Ирина Вениаминовна Моренко¹, Владимир Леонидович Федяев²

*^{1, 2} Институт механики и машиностроения Казанского научного центра
Российской академии наук, Казань, Россия*

¹ i.v.morenko@yandex.ru

² vlfed2020@gmail.com

Аннотация. Рассматривается инерционное улавливание капель воды в жалюзийных водоуловителях градирен с использованием методов математического моделирования. Движение газовзвеси в свободном пространстве описывается с применением эйлерово-лагранжева подхода. Турбулентное течение несущей среды (воздуха) моделируется осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье–Стокса. В уравнении движения капель учитываются силы тяжести и аэродинамического сопротивления. На основе анализа результатов расчетов формулируются требования по повышению эффективности каплеуловителей. Предлагается новая V-образная форма лопаток.

Ключевые слова: каплеуловитель, математическое моделирование, эйлерово-лагранжев подход, инерционное улавливание капель

Для цитирования: Моренко И.В., Федяев В.Л. Улавливание капель при охлаждении оборотной воды в испарительных градирнях // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 97. С. 130–142. doi: 10.17223/19988621/97/9

Original article

Droplet capture during cooling of recirculated water in evaporative cooling towers

Irina V. Morenko¹, Vladimir L. Fedyaev²

*^{1, 2} Institute of Mechanics and Engineering of the Kazan Scientific Center
of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation*

¹ i.v.morenko@yandex.ru

² vlfed2020@gmail.com

Abstract. The inertial capture of water droplets in the louvered drift eliminators of industrial cooling towers is studied using mathematical modeling methods. The motion of the air carrying water droplets within a periodic cell of the drift eliminator formed by two adjacent blades is described based on the Euler–Lagrange approach. The droplet capture efficiency is assessed for common corner-like and trapezoidal blade shapes.

From the analysis of the airflow patterns and droplet trajectories within the periodic cell, the requirements are formulated to improve the blade efficiency. In particular, to ensure high droplet capture efficiency, it is desirable to minimize the number of airflow turns within the periodic cell while simultaneously increasing the air velocity magnitude. For a general assessment of the performance of the drift eliminator design, a complex criterion is proposed that incorporates weighting factors accounting for the significance of the amount of droplet capture, aerodynamic drag coefficient, and manufacturing cost of the grates.

Keywords: drift eliminator, mathematical modeling, Euler-Lagrange approach, inertial droplet trapping

For citation: Morenko, I.V., Fedyaev, V.L. (2025) Droplet capture during cooling of recirculated water in evaporative cooling towers. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 97. pp. 130–142. doi: 10.17223/19988621/97/9

Введение

Для охлаждения оборотной воды в теплоэнергетике, химической, нефтехимической, других отраслях промышленности широко применяются башенные, вентиляторные, а также эжекционные градирни. При эксплуатации испарительных градирен охлаждение воды происходит при непосредственном контакте ее с атмосферным воздухом, вследствие чего в рабочих областях этих градирен находится воздушно-капельная смесь. Для предотвращения капельного выброса воды в окружающую среду на пути восходящих воздушных потоков, содержащих капли воды диаметром около 30–300 мкм, над водораспределительной системой градирен размещаются водоулавливающие устройства [1].

Инерционные каплеуловители жалюзийного типа представляют собой решетки профилей с поперечным сечением в форме волны, уголка, трапеции и др. Лопатки профилей крепятся между собой соединительными элементами. При движении между лопатками воздушные потоки отклоняются от первоначального направления, огибают их. Под влиянием сил инерции капли сталкиваются с поверхностью и оседают на лопатках. Осевшие на лопатках каплеуловителя капли формируют пленку жидкости, которая под действием силы тяжести стекает вниз.

При разработке, эксплуатации каплеуловителей возникает ряд проблем, в частности необходимость повышения коэффициента улавливания, уменьшение добавочного сопротивления движению воздушных потоков. Кроме того, следует увеличить ресурс этих устройств при минимальных затратах материалов. Один из вариантов решения этих проблем – математическое моделирование движения воздушных потоков, капель воды с целью отыскания рациональных технических решений.

В начале прошлого века первые образцы каплеуловителей изготавливались из дерева. Для предотвращения разрушения деревянные конструкции приходилось постоянно обрабатывать специальными растворами. Замена деревянных конструкций на полимерные позволила снизить затраты на их изготовление. Пластмассовые конструкции менее требовательны при эксплуатации, их ресурс значительно больше, чем у деревянных аналогов.

В градирнях охлаждаемая вода разбрызгивается форсунками. Холодный воздух и капли воды двигаются в противоположных направлениях. Основная масса воды под действием силы тяжести стекает вниз. Тем не менее 5–7% от всей массы

воды в виде капель уносится вместе с восходящими воздушными потоками [2] и достигает решеток каплеуловителей. Чем выше скорость воздуха, тем больше доля увлекаемых воздухом капель. При эксплуатации градирен скорость воздуха обычно не превосходит 2,5–3 м/с. Следует отметить, что допустимый предел выноса воды составляет 0,05–0,2% от общего объема подаваемой воды.

Поскольку жалюзийный каплеуловитель представляет собой решетку профилей лопаток, для оценки эффективности их работы достаточно рассмотреть движение двухфазной среды в ячейке периодичности, образованной двумя смежными лопатками. Определим число Рейнольдса по формуле $Re = H_{vod} u_0 / \nu$ (H_{vod} – шаг решетки, u_0 – скорость набегающего потока, ν – кинематическая вязкость воздуха). При характерных значениях параметров Re составляет порядка $10^3 \div 10^4$, что соответствует турбулентному характеру движения несущей среды. Для разработки новых форм лопаток каплеуловителей требуется знание аэродинамических характеристик течения сред. Важные теоретические аспекты эксплуатации водоуловителей, а также результаты технологических испытаний приводятся в работе [1]. В частности, найдены отношение капельного уноса к расходу воды, сопротивление каплеуловителей, максимально допустимая скорость их эксплуатации. Экспериментальные исследования показателей каплеуловителей, в основном сетчатого и сотового типов, приведены в [3]. В работе [4] подчеркивается, что потоки двухфазной среды между лопатками жалюзийного каплеуловителя являются турбулентными. Поэтому авторы достаточно подробно анализируют эффективность и вычислительные затраты различных подходов к моделированию турбулентности. В [5] оценка потерь воды в градириях за счет испарения капель получена с использованием результатов численного исследования, базирующегося на эйлерово-лагранжевом подходе.

Цель данной работы – численное исследование работы каплеуловителей с известной конфигурацией поперечного сечения лопаток, выработка рекомендаций по их проектированию, предложение новой формы лопаток инерционного каплеуловителя.

Математическая модель движения воздуха и капель в ячейке периодичности каплеуловителя

Схемы ячеек периодичности широко применяемых уголкового, трапециевидного каплеуловителей, а также предложенного каплеуловителя с V-образной формой лопаток представлены на рис. 1. В ячейке периодичности снизу вверх движется поток воздуха с каплями воды. При моделировании движения двухфазных потоков необходимо знать закономерности процессов динамического взаимодействия частиц дисперсной фазы с несущей [6]. Данным проблемам посвящены экспериментальные и теоретические исследования [7–10]. Достаточно низкая концентрация капель в несущем потоке воздуха и необходимость отслеживания траекторий движущихся капель делают предпочтительным выбор эйлерово-лагранжева подхода для моделирования движения сред, когда в рамках эйлерова описания характеристики несущей среды рассматриваются как функции пространственных координат и времени, а траектории отдельных капель рассчитываются в переменных Лагранжа. Тестирование данного подхода было выполнено авторами ранее для случая обтекания цилиндрического тела неоднородной средой [11].

Поскольку профиль скорости воздуха в нижнем сечении решетки неизвестен, чтобы избежать неопределенности при постановке граничных условий в этом сечении, исходная расчетная область Ω дополняется подобластью непосредственно перед решеткой с границами Γ_{sym} и Γ_{in} . Данная процедура позволит точнее рассчитать картину течения сред.

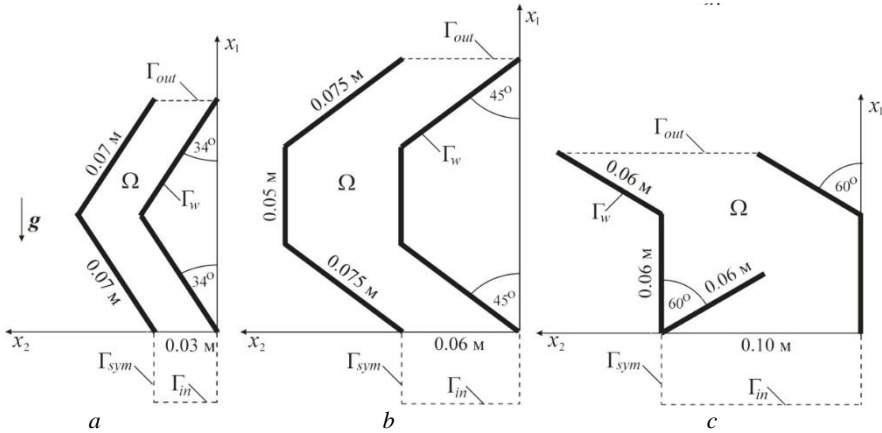


Рис. 1. Схемы ячеек периодичности каплеуловителей:

a – уголкового, *b* – трапециевидного, *c* – предложенного

Fig. 1. Patterns of periodicity cells of drift eliminators:

(*a*) corner-like, (*b*) trapezoid, and (*c*) proposed shape

Предположим, что потоки воздуха двумерны, сжимаемость его не учитывается. Течение считается изотермическим. В работе [4] показано, что при моделировании турбулентного режима движения воздуха в каплеуловителях, основанном на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) и на описании течения с помощью метода крупных вихрей (LES), когда большие вихри рассчитываются, а мелкие моделируются, вычислительные затраты для подхода LES в 7–10 раз выше, чем для RANS. Учитывая это обстоятельство, в данной работе при описании турбулентного движения воздуха (несжимаемой жидкости) в области Ω относительно локальной системы координат x_1Ox_2 воспользуемся осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье–Стокса

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] - \bar{f}_{pi}. \quad (2)$$

Здесь t – время; u_i, u_j – компоненты осредненного вектора скорости \mathbf{u} ; p – осредненное давление; ρ – плотность жидкости; $\mu_{eff} = \mu + \mu_T$ – эффективная вязкость; $\mu = \rho \nu$ – коэффициент динамической вязкости жидкости; μ_T – турбулентная, или вихревая, вязкость; δ_{ij} – символ Кронекера; k – кинетическая энергия турбулентности; g_i – компоненты ускорения свободного падения; \bar{f}_{pi} – источниковый член, учитывающий влияние капель на движение воздуха. Уравнения (1)–(2) за-

мыкаются моделью турбулентности Ментера SST [12], и задаются следующие начальные и граничные условия.

В начальный момент времени $t = 0$: среда покоится, $u_i = 0$, $p = p_0$.

На входе в расчетную область Γ_{in} : $u_1 = u_0$, $u_2 = 0$, $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$. При этом интенсивность турбулентности $Tu_0 = 5\%$, масштаб турбулентности $L_f = 0.07H_{vod}$, H_{vod} – расстояние между пластинами. Соответствующие значения кинетической энергии турбулентности $k = \frac{3Tu_0^2 u_0^2}{2}$, удельной турбулентной диссипации $\omega = \frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4} L_f}$ рассчитываются по заданным на входной границе Tu_0 , L_f ; здесь C_μ – эмпирическая постоянная ($C_\mu = 0.09$).

На поверхностях лопаток Γ_w задаются условия прилипания: $u_1 = 0$, $u_2 = 0$, $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$, $k = 0$, $\omega = 10 \frac{6\nu}{\beta_1 d_1^2}$. Здесь $\beta_1 = 0.075$ – константа, d_1 – расстояние от центра пристеночной ячейки до границы расчетной области.

В выходном сечении Γ_{out} : $\frac{\partial u_1}{\partial n} = \frac{\partial u_2}{\partial n} = 0$, $p = p_0$, $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$.

На участках границы Γ_{sym} ставятся условия симметрии: $\frac{\partial u_1}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial u_2}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$.

Считается [2], что объемная концентрация дисперсной фазы при реальных гидравлических нагрузках градиент не превышает $2 \cdot 10^{-3}$. Следовательно, можно пренебречь взаимным влиянием отдельных капель в математической модели. Для простоты будем считать, что капли имеют сферическую форму с диаметром d_p , их дробление, слияние, вращение не учитываются.

Пусть $\mathbf{u}_p = (u_{px}, u_{py})$ – вектор скорости центра масс капли. Траектория его движения в прямоугольной декартовой системе координат xOy , совпадающей с x_1Ox_2 , описывается соотношениями

$$\frac{dx}{dt} = u_{px}, \quad \frac{dy}{dt} = u_{py}. \quad (3)$$

Здесь $x = x(t)$, $y = y(t)$ – уравнения движения капли.

Согласно второму закону Ньютона уравнение движения центра масс капли имеет вид:

$$m \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_g, \quad (4)$$

где сила гидродинамического сопротивления капли \mathbf{F}_D и сила тяжести \mathbf{F}_g определяются соотношениями

$$\mathbf{F}_D = C_D \rho_f \frac{\pi d_p^2}{8} |\mathbf{u} - \mathbf{u}_p| (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p), \quad \mathbf{F}_g = m_p \mathbf{g}.$$

Коэффициент сопротивления C_D зависит от числа Рейнольдса $Re_p = \frac{d_p |\mathbf{u} - \mathbf{u}_p|}{\nu_f}$,

рассчитанного по диаметру капли и модулю вектора относительной скорости. Если принять во внимание, что относительная скорость капель может варьировать от 0 до некоторого максимального значения, равного модулю скорости воздуха в сечении решетки каплеуловителя (около 3 м/с), и ограничиться расчетом движения капель диаметром не больше 10^{-3} м, то получим, что числа Рейнольдса Re_p не превышают 250. В данном случае для расчета коэффициента сопротивления

можно воспользоваться выражением $C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687})$, справедливым

при $Re_p \leq 1000$. Обратное влияние капель на поток несущей среды учитывается в уравнениях (2) на каждом временном шаге с использованием источникового

члена $\mathbf{f}_p = - \sum_{k=1}^{N_p} \mathbf{F}_{D,k} / \rho V_{cell}$, где N_p – число капель в объеме ячейки сетки V_{cell} . Далее

ради простоты считается, что капли на границе Γ_{in} распределены равномерно, компоненты векторов скоростей воздуха и капель совпадают: $u_{px} = u_0$, $u_{py} = 0$.

Капля считается уловленной, если ее траектория достигает поверхности лопатки.

Система уравнений решается методом контрольных объемов в открытом программном комплексе OpenFOAM. Привлекается решатель DPMFoam. Дискретизация по времени осуществляется при помощи схемы Эйлера, центральная разностная схема используется для градиентов, диффузионного и конвективного слагаемых. Для согласования поля давления с полем скорости применяется алгоритм PIMPLE. Расчетные области покрываются сеткой со сгущением у поверхности лопаток. Для проверки сеточной сходимости задача о движении среды в ячейке периодичности уголкового каплеуловителя решается на трех сетках M_1 , M_2 , M_3 с количеством элементов $3.2 \cdot 10^4$, $5.8 \cdot 10^4$, $1.0 \cdot 10^5$ соответственно. Оценивается перепад давления Δp на входной и выходной границах расчетной области. Показано, что Δp , полученный на сетках M_1 и M_3 , отличается на 3.26%, а разница в перепаде давления, рассчитанном на сетках M_2 и M_3 , составляет 0.55%. Полагается, что при проведении вычислительных экспериментов количество элементов сетки $5.8 \cdot 10^4$ достаточно для получения сеточно-независимого решения.

Результаты расчетов и их обсуждение

В расчетах задаются свойства воздуха $\rho = 1.2$ кг/м³, $\nu = 1.48 \cdot 10^{-5}$ м²/с и воды $\rho_p = 10^3$ кг/м³, $\nu_p = 10^{-6}$ м²/с. Скорость воздуха перед решеткой каплеуловителя u_0 равняется 1.25 и 2.5 м/с. Поля модулей скорости его в ячейках периодичности в случае $u_0 = 2.5$ м/с показаны на рис. 2.

При движении через решетку уголкового каплеуловителя поток воздуха меняет свое направление дважды. При этом в ячейке периодичности наблюдаются области с пониженными скоростями слева в углу вогнутой стенки профиля и за поворотом выпуклой стенки (см. рис. 2, а). Отмечается неравномерный профиль скорости на выходе.

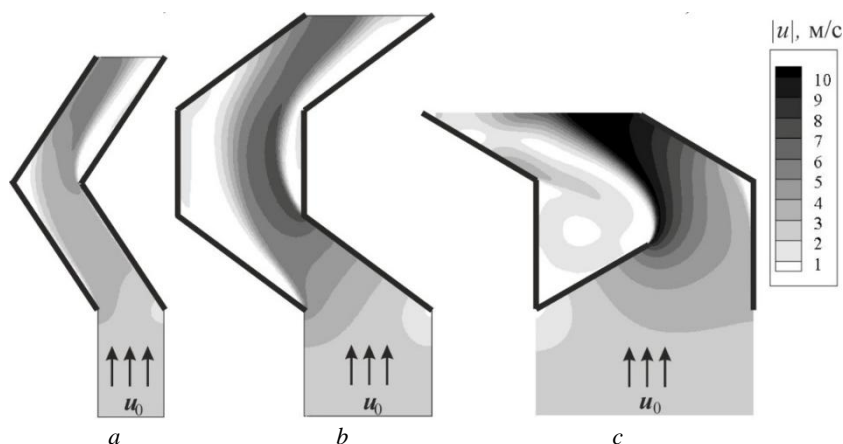


Рис. 2. Поля модуля скорости в ячейках периодичности каплеуловителей с различными профилями лопаток: *a* – уголкового, *b* – трапециевидного, *c* – предложенного
Fig. 2. Velocity module fields in periodicity cells of drift eliminators with various blade profiles: (*a*) corner-like, (*b*) trapezoid, and (*c*) proposed shape

Поток воздуха при прохождении через канал с трапециевидными лопатками меняет направление движения три раза: сначала отклоняется влево от вертикального направления движения, а затем прямо и направо (см. рис. 2, *b*). Вдоль левой стенки поток замедляется, ускоряясь лишь ближе к выходному сечению. За углами правой стенки наблюдается отрыв потока.

Максимальный перепад модуля скорости в ячейке каплеуловителя достигается при V-образной конфигурации лопаток за счет сужения канала (см. рис. 2, *c*), при этом поток дважды меняет направление движения. За выступом формируется вторичное течение. Отметим, что все конфигурации рассматриваемых решеток не имеют вертикального «просвета».

Поскольку в инерционных улавливающих устройствах осаждение капель реализуется за счет изменения направления воздушного потока и его скорости, эффективность их работы во многом зависит от размера капель. В численных расчетах диаметр капель d_p варьирует от 10^{-5} до 10^{-4} м. Показано, что мелкие капли ($d_p < 2 \cdot 10^{-5}$ м) увлекаются потоком воздуха, двигаясь вдоль линий тока. Они практически не оседают на лопатках каплеуловителей. Достаточно крупные капли жидкости ($d_p > 6 \cdot 10^{-5}$ м), двигаясь по первоначальным траекториям, не успевают изменить направление движения, лишь незначительно отклоняясь вблизи поворотов решетки. В результате они осаждаются на поверхности лопаток и считаются уловленными.

Для иллюстрации на рис. 3 представлены траектории движения капель диаметром $d_p = 4 \cdot 10^{-5}$ м в ячейках периодичности каплеуловителей с различными конфигурациями лопаток.

Из результатов расчетов следует, что широко применяемый уголкового каплеуловитель достаточно эффективен. Отмечается осаждение капель на нижней части правой стенки и верхней части левой (см. рис. 3, *a*). Однако данная конструкция обладает недостатком: малый шаг решетки создает высокое аэродинамическое сопротивление.

Траектории капель в ячейке периодичности трапециевидного каплеуловителя показаны на рис. 3, *b*. В области пониженных скоростей воздуха, где модуль скорости меньше u_0 , капли под действием гравитационной силы отклоняются от первоначального направления влево. Осаждение происходит в основном на нижней части правой стенки и верхней части левой. Шаг и высота решетки этой конфигурации больше, чем у уголкового каплеуловителя. На практике отмечаются случаи, когда при возрастании расхода воздуха жесткость данной конструкции оказывается недостаточной и происходит нежелательное «схлопывание» решетки, приводящее к перекрытию восходящих потоков воздуха и нарушению производственного процесса.

Более высокие показатели улавливания можно достичь путем уменьшения шага решетки, однако это повлечет за собой нежелательный рост аэродинамического сопротивления конструкции. Если увеличить расстояние между пластинами, то сопротивление решетки уменьшится, а капли будут свободно выдуваться воздухом в появившийся «просвет» между лопатками.

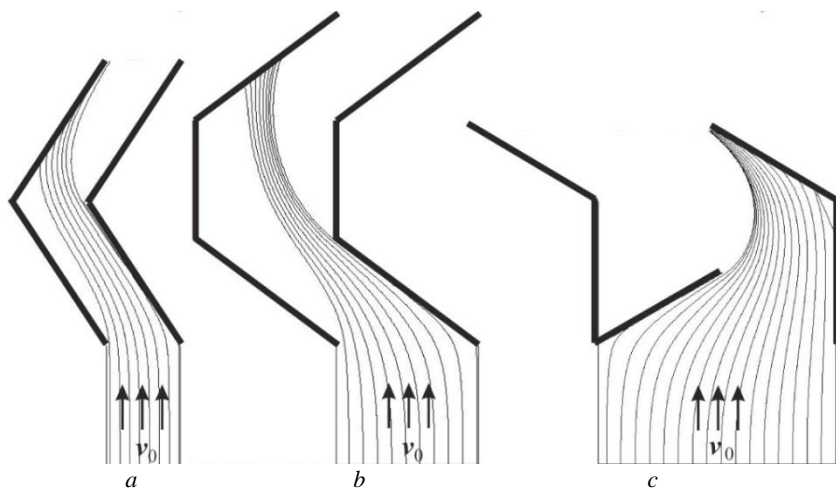


Рис. 3. Траектории капель диаметром $d_p = 40$ мкм в ячейках периодичности каплеуловителей: *a* – уголкового, *b* – трапециевидного, *c* – предложенного при скорости воздуха перед решеткой $u_0 = 2.5$ м/с

Fig. 3. Trajectories of droplets with a diameter of $d_p = 40$ μm in periodicity cells of drift eliminators: (a) corner-like, (b) trapezoid, and (c) proposed shape at a gas velocity in front of the grate of $u_0 = 2.5$ m/s

Таким образом, на основе результатов расчетов полей скорости воздуха и траекторий капель показано, что для обеспечения высокой эффективности улавливающих устройств необходимо, чтобы количество поворотов потока воздуха в ячейке периодичности было бы минимальным, а интенсивность движения воздуха в канале менялась бы по возможности максимально. Данным требованиям соответствует предложенная V-образная конфигурация лопаток (см. рис. 1, *c*). Отметим, что у этого каплеуловителя шаг решетки $H_{vod} = 0.1$ м и сравнительно малая высота. Высота решетки трапециевидного каплеуловителя составляет $L_{vod} = 0.14$ м, уголкового – 0.08 м, V-образного – 0.09 м. Как видно из приведенных результатов,

в данном каплеуловителе за счет выступа поток воздуха с каплями разворачивается, далее под действием силы инерции капли оседают на наклонной части правой стенки.

В общем случае эффективность конструкции каплеуловителя определяется тремя показателями: степенью улавливания капель, величиной аэродинамического сопротивления и затратами на производство решеток.

На практике для оценки коэффициента уноса, определяемого как отношение массы жидкости, уносимой за пределы каплеуловителя, к общей массе жидкости, разбрызгиваемой форсунками, необходимо знать объемную долю оборотной воды, которая в виде капель выбрасывается вверх и долетает до решетки, а также долю капель, задержанную вследствие инерционного осаждения. Эффективность каплеуловителя в целом зависит от многих факторов: формы профиля лопаток, шага решетки, скорости воздушного потока, распределения капель по размерам, от угла, под которым капли пересекают сечение решетки и ряда других.

В данной работе акцентируется внимание на оценке эффективности улавливания η , определяемой как доля уловленных капель от общего количества капель на входе в ячейку периодичности, в зависимости от диаметра капель d_p . Результаты расчетов коэффициента эффективности η названных выше конструкций каплеуловителей для двух значений скорости набегающего потока u_0 приводятся на рис. 4. Видно, что в целом все конструкции демонстрируют приемлемую эффективность работы, однако наиболее высокие показатели улавливания наблюдаются у каплеуловителя трапецевидной формы.

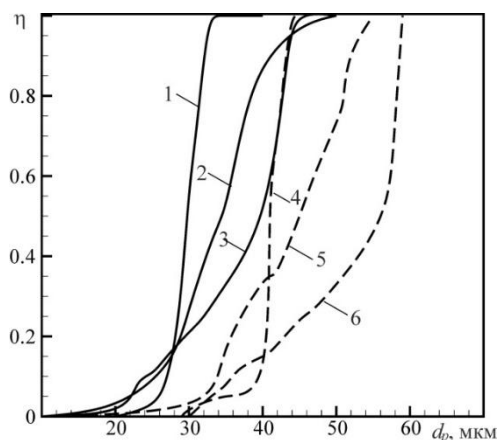


Рис. 4. Эффективность улавливания трапецевидного (1, 4), углового (2, 5), V-образного (3, 6) каплеуловителей в зависимости от диаметра капель при скоростях набегающего потока воздуха 1.25 м/с (4, 5, 6) и 2.5 м/с (1, 2, 3)

Fig. 4. Droplet capture efficiency of the (1, 4) trapezoidal, (2, 5) corner-like, and (3, 6) V-shaped drift eliminators depending on the droplet diameter at an incoming air flow velocity of (4, 5, 6) 1.25 and (1, 2, 3) 2.5 m/s

Вместе с тем у этого каплеуловителя малый шаг решетки, при его изготовлении велики затраты материалов. Показано, что V-образный каплеуловитель предпочтительнее использовать для сравнительно крупных капель $d_p > 55$ мкм при скорости воздуха $u_0 = 1.25$ м/с и для $d_p > 40$ мкм при $u_0 = 2.5$ м/с (рис. 4, кривые 3, 6).

Установлено, что увеличение скорости воздуха в два раза приводит к некоторому «выпрямлению» траекторий капель. При этом эффективность улавливания во всех случаях возрастает с увеличением скорости газа с $u_0 = 1.25$ м/с (рис. 4, кривые 4, 5, 6) до $u_0 = 2.5$ м/с (рис. 4, кривые 1, 2, 3), но при этом может иметь место вторичный унос, не учитываемый при моделировании.

Что касается аэродинамического сопротивления рассматриваемых каплеуловителей, рассчитаем коэффициент аэродинамического сопротивления решеток каплеуловителей по формуле $C_k = \Delta p / 0.5 \rho u_0^2$, где Δp – перепад давления воздуха до решетки и после нее. В таблице показано, что наименьший коэффициент сопротивления имеет угловой каплеуловитель, наибольший – V-образный.

Коэффициент аэродинамического сопротивления решеток каплеуловителей

Форма лопаток	Трапецевидная		Угловая		V-образная	
u_0 , м/с	1.25	2.5	1.25	2.5	1.25	2.5
C_k	6.94	6.24	3.44	3.06	15.77	15.71

Известно [1], что коэффициент аэродинамического сопротивления каплеуловителей жалюзийного типа варьирует от 3.0 до 16.0, а коэффициент сопротивления градирни может достигать 50.0 и выше. В результате внедрения и эксплуатации новой формы лопаток в градирнях вентиляторного типа показано, что мощности вентилятора достаточно для эффективной сепарации капель данным типом решетки.

Полагая, что основными затратами на производство решеток каплеуловителей являются затраты, связанные с приобретением материалов, оценим материалоемкость конструкций. Решетки каплеуловителей состоят из лопаток и соединительных элементов, однако основной расход материалов обусловлен производством лопаток. Рассчитаем материалоемкость конструкций с учетом шага решетки и длины лопаток при фиксированной толщине профиля лопаток. Выделим контрольный объем решетки $V_0 = 1 \text{ м} \times 1 \text{ м} \times L_{\text{вод}}$. При заданных параметрах на изготовление такой решетки углового каплеуловителя расходуются лопатки площадью $S = 4.67 \text{ м}^2$, трапецевидного – 3.33 м^2 , V-образного – 1.80 м^2 . Следовательно, при изготовлении решетки V-образного каплеуловителя показатель расхода материалов минимален, собранные блоки имеют меньшую массу.

Кроме того, наличие острого угла в сечении этой лопатки (см. рис. 1, с) способствует повышению ее жесткости, предотвращает так называемое «схлопывание», когда под действием высокого напора воздуха пластины смещаются, перекрывая существующие просветы.

Таким образом, для общей оценки эффективности конструкции каплеуловителя можно воспользоваться комплексным показателем, учитывающим эффективность улавливания капель, коэффициент аэродинамического сопротивления, затраты на производство лопаток решеток:

$$K = c_1 (\eta / \eta_0) + c_2 (C_k / C_{k,0}) + c_3 (S / S_0),$$

где $\eta_0, C_{k,0}, S_0$ – характерные значения соответствующих показателей; c_1, c_2, c_3 – весовые коэффициенты, назначаемые экспертно в зависимости от их значимости при условии, что $\sum_{i=1}^3 c_i = 1$. Названный показатель по форме аналогичен так назы-

ваемому обобщенному критерию оптимальности, широко применяемому, в частности, при оптимизации производственных объектов и процессов [13, 14]. Он в полной мере характеризует эффективность конструкции каплеуловителя, поскольку содержит все основные параметры, а весовые коэффициенты позволяют гибко учитывать приоритеты заказчиков в каждом конкретном случае.

Заключение

Полученные результаты численных расчетов потоков воздуха, траекторий капель, а также показателей эффективности позволили провести анализ работы инерционных каплеуловителей градирен, сформулировать требования, которым должна удовлетворять форма их лопаток. В частности, для обеспечения высокой эффективности улавливания капель лопатками желательнее минимизировать количество поворотов потока воздуха в ячейке периодичности с одновременным увеличением модуля скорости воздуха в градирне. Для общей оценки эффективности конструкции каплеуловителя целесообразно воспользоваться комплексным показателем с весовыми коэффициентами, учитывающими величину улавливания капель, коэффициент аэродинамического сопротивления, затраты на производство решеток. Предложенную V-образную конфигурацию поперечного сечения лопаток можно взять за основу при разработке новых систем улавливания, а также перспективных устройств конденсации паров воды, когда острый угол перекрывается стенкой, в лопатке образуется полость.

Список источников

1. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: справ. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1998. 376 с.
2. Боровков В.С., Майрановский Ф.Г. Аэрогидродинамика систем вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1978. 116 с.
3. Ruiz J., Cutillas C.G., Kaiser A.S., Zamora B., Sadafi H., Lucas M. Experimental study on pressure loss and collection efficiency of drift Eliminators // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 149. P. 94–104. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.023
4. Ruiz J., Kaiser A.S., Zamora B., Cutillas C.G., Lucas M. CFD analysis of drift eliminators using RANS and LES turbulent Models // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 105. P. 979–987. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.108
5. Pedraza O.J.G., Ibarra J.J.P., Rubio-Maya C., González S.R.G., Arista J.A.R. Numerical study of the drift and evaporation of water droplets cooled down by a forced stream of air // Applied Thermal Engineering. 2018. V. 142. P. 292–302. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.011
6. Архипов В.А., Васенин И.М., Усанина А.С., Шрагер Г.Р. Динамическое взаимодействие частиц дисперсной фазы в гетерогенных потоках. Томск: Изд. Дом Том. гос. ун-та, 2019. 328 с.
7. Архипов В.А., Басалаев С.А., Перфильева К.Г., Романдин В.И., Усанина А.С. Анализ режимов гравитационного осаждения капли // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 86. С. 21–34. doi: 10.17223/19988621/86/2
8. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения газа с частицами. М.: Физматлит, 2008. 600 с.
9. Бушланов В.П., Бутов В.Г., Глазунов А.А. Численное исследование полидисперсных двухфазных течений в осесимметричном сопле Лавалья с учетом силы Магнуса, действующей на вращающиеся капли // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 88. С. 66–78. doi: 10.17223/19988621/88/6

10. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, вып. 4. С. 646–669. doi: 10.31857/S004036442004016X
11. Моренко И.В., Федяев В.Л. Ламинарное неизотермическое обтекание вращающегося кругового цилиндра вязкой жидкостью с твердыми частицами // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 3. С. 549–555. doi: 10.1007/s10891-014-1046-9
12. Menter F.R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. V. 32 (8). P. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149
13. Ахмадиев Ф.Г., Гиззятов Р.Ф., Гильфанов Р.М. Математическое моделирование. Методы оптимизации. Вычислительный эксперимент: учеб. пособие. Казань: Изд-во Акад. наук РТ, 2021. 492 с.
14. Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Беляев А.В. Математическое моделирование процессов термической обработки рабочих поверхностей деталей и изделий. Казань: Изд-во Акад. наук РТ, 2019. 240 с.

References

1. Ponomarenko V.S., Aref'ev Yu.I. (1998) *Gradirni promyshlennykh i energeticheskikh predpriyatiy: Spravochnoe posobie* [Cooling towers of industrial and energy enterprises: Reference manual]. Moscow: Energoatomizdat.
2. Borovkov V.S., Mayranovskiy F.G. (1978) *Aerogidrodinamika sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha* [Aerohydrodynamics of ventilation and air conditioning systems]. Moscow: Stroyizdat.
3. Ruiz J., Cutillas C.G., Kaiser A.S., Zamora B., Sadafi H., Lucas M. (2019) Experimental study on pressure loss and collection efficiency of drift eliminators. *Applied Thermal Engineering*. 149. pp. 94–104. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.023
4. Ruiz J., Kaiser A.S., Zamora B., Cutillas C.G., Lucas M. (2016) CFD analysis of drift eliminators using RANS and LES turbulent models. *Applied Thermal Engineering*. 105. pp. 979–987. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.108
5. Pedraza O.J.G., Ibarra J.J.P., Rubio-Maya C., González S.R.G., Arista J.A.R. (2018) Numerical study of the drift and evaporation of water droplets cooled down by a forced stream of air. *Applied Thermal Engineering*. 142. pp. 292–302. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.011
6. Arkhipov V.A., Vasenin V.A., Usanina A.S., Shrager G.R. (2019) *Dinamicheskoe vzaimodeystvie chastits dispersnoy fazy v geterogennykh potokakh* [Dynamic interaction of particles of the dispersed phase in heterogeneous flows]. Tomsk: Izdatel'skiy dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta.
7. Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Perfilieva K.G., Romandin V.I., Usanina A.S. (2023) Analiz rezhimov gravitatsionnogo osazhdeniya kapli [Analysis of gravitational settling regimes for a drop]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 86. pp. 21–34. doi: 10.17223/19988621/86/2
8. Volkov K.N., Emel'yanov V.N. (2008) *Techenie gaza s chastitsami* [Gas flow with particles]. Moscow: Fizmatlit.
9. Bushlanov V.P., Butov V.G., Glazunov A.A. (2024) Chislennoe issledovanie polidispersnykh dvukhfaznykh techeniy v osesimmetrichnom sople Lavalya s uchetom sily Magnusa, deystvuyushchey na vrashchayushchiesya kapli [Numerical modeling of polydisperse two-phase flows in an axisymmetric de Laval nozzle with account for the Magnus force acting on rotating droplets]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 88. pp. 66–78. doi: 10.17223/19988621/88/6
10. Varaksin A.Y. (2020) Two-phase boundary layer of gas with solid particles. *High Temperature*. 58. pp. 716–732. doi: 10.1134/S0018151X20050107

11. Morenko I.V., Fedyaev V.L. (2014) Laminar nonisothermal flow of a viscous fluid with solid particles past a rotating circular cylinder. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 87(3). pp. 566–572. doi: 10.1007/s10891-014-1046-9
12. Menter F.R. (1994) Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 32(8). pp. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149
13. Akhmadiev F.G., Gizzatov R.F., Gil'fanov R.M. (2021) *Matematicheskoe modelirovanie. Metody optimizatsii. Vychislitel'nyy eksperiment: Uchebnoe posobie* [Mathematical modeling. Optimization methods. Computational experiment: A textbook]. Kazan: Academy of Sciences of RT.
14. Fedyaev V.L., Galimov E.R., Belyaev A.V. (2019) *Matematicheskoe modelirovanie protsessov termicheskoy obrabotki rabochnykh poverkhnostey detaley i izdeliy* [Mathematical modeling of heat treatment processes of working surfaces of parts and products]. Kazan: Academy of Sciences of RT.

Сведения об авторах:

Моренко Ирина Вениаминовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования технологических процессов Института механики и машиностроения – структурного подразделения Казанского научного центра Российской академии наук (Казань, Россия). E-mail: i.v.morenko@yandex.ru

Федяев Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории моделирования технологических процессов Института механики и машиностроения – структурного подразделения Казанского научного центра Российской академии наук (Казань, Россия). E-mail: vlfed2020@gmail.com

Information about the authors:

Morenko Irina V. (Candidate of Technical Sciences, Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation). E-mail: i.v.morenko@yandex.ru

Fedyaev Vladimir L. (Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation). E-mail: vlfed2020@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.10.2024; принята к публикации 06.09.2025

The article was submitted 17.10.2024; accepted for publication 06.09.2025