

УДК 66.015+66.021

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ФАЗ И ТЕПЛОМАССОТДАЧИ В ПЛЕНОЧНЫХ БЛОКАХ ОРОСИТЕЛЕЙ ГРАДИРЕН С ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ

© 2021 г. А. Г. Лаптев<sup>а</sup>, Е. А. Лаптева<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

\*e-mail: grivka100@mail.ru

Поступила в редакцию 11.12.2020 г.

После доработки 30.03.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

Теоретическим путем с применением модели турбулентного пограничного слоя в газовой фазе для орошаемых блоков насадок решена научно-техническая задача расчета переноса импульса, тепла и массы водяного пара в градирнях. Рассмотрена диссипативная математическая модель для определения среднего касательного напряжения трения на поверхности раздела газ–жидкость в пленочных контактных устройствах (блоках оросителей) с интенсификаторами. На основе средней скорости диссипации энергии газового потока в блоках оросителей с заданным законом затухания турбулентных пульсаций в пограничном слое получены выражения для расчета средних значений на поверхности раздела фаз касательного напряжения и динамической скорости, необходимые для вычисления коэффициентов тепло- и массоотдачи в газовой фазе. Для расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи применяются полученные ранее авторами выражения, связанные с гидромеханическими характеристиками турбулентного пограничного слоя. Для определения характеристик пограничного слоя с интенсификаторами на контактных пленочных устройствах применяются свойства консервативности законов трения и теплообмена к возмущениям. Возмущения не изменяют форму математического описания переноса импульса и тепла, а возмущения учитываются параметрически. В результате получены выражения для чисел Нуссельта и Шервуда для контактных устройств различных конструкций. Показаны многочисленные сравнения результатов расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи для хаотичных и регулярных насадок (блоков оросителей) с известными экспериментальными данными. Полученные выражения могут использоваться в расчетах пленочных блоков оросителей с применением гидравлического сопротивления, что сокращает время и затраты при проектировании градирен.

*Ключевые слова:* тепломассообмен, пленки жидкости, градирни, гидравлическое сопротивление, касательное напряжение

**DOI:** 10.31857/S0040357121050067

### ВВЕДЕНИЕ

В пленочных градирнях применяются различные типы контактных устройств (блоки оросителей) – в основном регулярные насадки противоточного или перекрестного взаимодействия воды и воздуха [1–3]. В крупномасштабных градирнях на ТЭС и нефтегазохимических предприятиях объемы насадок составляют несколько сотен и даже тысяч кубических метров для одной градирни, поэтому блоки оросителей преимущественно изготавливаются из пластмассовых материалов. Например, решетчатая насадка фирмы “Бальке-Дюрр” из плоских и волнистых решеток размером  $0.45 \times 1.2$  м изготавливается из полиэтилена, а решетчатая насадка ПР50 из длинномерных пустотелых элементов с решетчатыми стенками, имеющих вид равностороннего треугольника,

изготавливается из полиэтилена низкого давления [1].

Разновидностью насадки ПР50 являются насадки из решетчатых трубок диаметром 60 мм, из которых собираются блоки рулонного типа и устанавливаются в градирне вертикально. Применяются также полиэтиленовые трубчатые насадки с винтовыми гофрами и многие другие типы. В мини-градирнях применяются как полимерные, так и металлические насадки более сложных конструкций и более дорогостоящие. Такие насадки могут иметь наклонные гофры, просечки, выступы и другие интенсификаторы тепломассообменных процессов в газожидкостных средах.

В связи с большим многообразием конструкций насадок и сложностью гидродинамической обстановки взаимодействия воды и воздуха в оро-

сителях определение эффективности охлаждения воды и теплообменных характеристик насадок преимущественно осуществляется на эмпирической основе. Известен ряд математических моделей [1, 4–6], где коэффициенты тепло- и массоотдачи также находятся экспериментально, что увеличивает сроки и затраты при проектировании градирни с новыми насадками.

Цель настоящей работы – получение в рамках подхода [7, 8] с применением моделей турбулентного пограничного слоя и баланса импульса расчетных выражений для средних значений касательного напряжения и коэффициентов тепло- и массоотдачи в блоках насадок градирен различных конструкций с интенсификаторами явлений переноса. Подход заключается в использовании консервативности математического описания турбулентного пограничного слоя, установленной С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьевым и др. Это дает возможность влияние интенсификаторов на теплообменные характеристики пограничного слоя учесть параметрически.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При испарительном охлаждении воды воздухом практически все сопротивление тепло- и массоотдаче сосредоточено в воздушной фазе, поэтому далее рассмотрена математическая модель явлений переноса импульса, массы водяного пара и тепла в воздушном турбулентном потоке при противотоке с пленкой воды. Известно, что турбулентный режим в хаотичных насадках начинается при  $Re_э > 40$ , а в регулярных зависит от конструктивных особенностей каналов, где  $Re_э = u_0 d_э / (\epsilon_{св} \nu_г)$  – число Рейнольдса в газовой фазе для насадок.

Так, например, в каналах с дискретно-шероховатыми стенками (выступы, проволочные вставки, накатки и др.) турбулизация потока начинается уже при  $Re_э > 200$  [9]. В градирнях движение воздуха в регулярных насадках с интенсификаторами происходит при  $Re_э > 500$ , поэтому можно считать, что режим практически всегда турбулентный.

Для определения средних коэффициентов тепло- и массоотдачи теоретическим путем используются различные варианты (модификации) гидродинамической аналогии или модели турбулентного пограничного слоя Прандтля, Кармана, Дайслера, Ландау–Левича и др. Практически все выражения для коэффициентов тепло- и массоотдачи, полученные с применением данных моделей, содержат в различных степенях касательное напряжение трения на стенке или межфазной поверхности. Так, например, наиболее простой вариант гидродинамической аналогии Чилтона–Кольборна имеет форму

$$\alpha = \frac{c_p \tau_{ст}}{Pr^{2/3} u_\infty}, \quad \beta = \frac{\tau_{ст}}{Sc^{2/3} \rho u_\infty^2}. \quad (1)$$

В представленных выражениях среднее касательное напряжение  $\tau_{ст}$  находится с применением коэффициента гидравлического сопротивления. Такая форма аналогии справедлива для плоского пограничного слоя без возмущений, т.е. для гладкой пластины. Например, для гладкой трубы касательное напряжение находится из уравнения баланса сил, что в итоге приводит к выражению [10]

$$\tau_{ст} = u_\infty^2 \xi / 8, \quad (2)$$

где коэффициент сопротивления  $\xi$  для однофазного потока вычисляется по формуле Блазиуса или Никурадзе, а для блоков оросителей в градирнях находится экспериментально для каждой конструкции насадок.

При наличии возмущений, вызванных кривизной поверхности, выступами, лунками, просечками и другими интенсификаторами, аналогия (1) нарушается и связь между переносом импульса и тепла (также и массы компонентов) приобретает более сложную форму, которая в основном устанавливается экспериментально.

Для определения среднего касательного напряжения и средних значений коэффициентов тепло- и массоотдачи в орошаемых насадках ниже рассмотрена диссипативная математическая модель в одномерной локальной форме.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ФАЗ

При противотоке воздуха со стекающей пленкой воды происходит трение на поверхности раздела фаз. Течение пленки в зависимости от расхода воды происходит в ламинарном волновом режиме или турбулентном режиме. Крупномасштабные градирни работают при плотности орошения 5–15 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> ч), а мини-градирни в 3–4 раза выше. Даже при повышенных плотностях орошения число Рейнольдса для пленки  $Re_ж < 1600$ , т.е. режим течения ламинарный волновой. Примем идею П. Капицы о том, что волны на межфазной поверхности можно представить в виде шероховатости при взаимодействии однофазного потока (воздуха) с поверхностью пленки воды.

На основе применения диссипативной модели трения получим выражение для среднего касательного напряжения на поверхности сухих насадок и на межфазной поверхности пленки воды, стекающей по насадочным блокам различной формы. Скорость диссипации кинетической энергии в несжимаемой жидкости, обусловленной вязкостью, при градиенте скорости  $du/dy$  записывают в виде [11]

$$\varepsilon = \frac{de}{dy} = \tau \frac{du}{dy}. \quad (3)$$

В выражении (3) производную запишем из выражения касательного напряжения трения в виде

$$\tau = -\rho(v + v_\tau(y)) \frac{du}{dy},$$

отсюда имеем

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau}{\rho(v + v_\tau(y))}.$$

Тогда скорость диссипации энергии (3) получит вид

$$\varepsilon = \frac{\tau^2}{\rho(v + v_\tau(y))}. \quad (4)$$

Отсюда запишем среднее значение скорости диссипации энергии в пограничном слое

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\delta_0} \int_0^{\delta} \frac{\tau^2 dy}{\rho(v + v_\tau(y))}. \quad (5)$$

Данное выражение можно проинтегрировать при известной функции  $v_\tau(y)$  в пограничном слое. Для функции  $v_\tau(y)$  известны различные формулы с использованием двух- и трехслойных моделей турбулентного пограничного слоя в виде различных степенных зависимостей и другие более сложные выражения. Используем функцию распределения турбулентной вязкости Дайслера и Ван-Дрифта с демпфирующим множителем, который позволяет получать гладкую зависимость (кривую)  $v_\tau(y)$  [12]:

$$\frac{v_\tau(y)}{v} = K_D (\chi y^+)^2 \frac{d}{dy} \left( \frac{u}{u_*} \right), \quad (6)$$

$$K_D = \left[ 1 - \exp(-\psi \chi^2 (y^+)^2)^{1/n} \right]^n, \quad (7)$$

где  $n = 2$ ;  $\psi = 0.0092$  – опытный коэффициент Дайслера;  $\chi = 0.4$  – константа турбулентности.

При численном интегрировании (5) с  $v_m(y)$  (6) использован логарифмический профиль скорости в турбулентной области пограничного слоя ( $\delta_1 < y \leq \delta$ ) и линейный в вязком подслое ( $0 \leq y \leq \delta_1$ ). В результате численного интегрирования получено среднее значение диссипируемой энергии ( $50 \leq R_\delta \leq 4000$ )

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\tau_{ct}^2 (R_1 + 2.5 \ln R_\delta)}{\rho v R_\delta}. \quad (8)$$

Согласно трехслойной модели турбулентного пограничного слоя  $R_1 = 5.31$ .

Из выражения (8) среднее касательное напряжение на стенке канала или межфазной поверхности пленки жидкости получит вид

$$\tau_{ct} = \sqrt{\frac{\bar{\varepsilon} \rho v R_\delta}{R_1 + 2.5 \ln R_\delta}}. \quad (9)$$

Так как в расчетах характеристик пограничного слоя часто используется средняя динамическая скорость  $u_* = \sqrt{\tau_{ct}/\rho}$ , из выражения (9) запишем

$$u_* = \left( \frac{\bar{\varepsilon} \delta}{\rho (R_1 + 2.5 \ln R_\delta)} \right)^{1/3}. \quad (10)$$

Среднюю скорость диссипации энергии в формулах (9), (10) можно вычислить с применением перепада давления газового потока в насадочном слое:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta P S u_0}{S H a_v \delta \psi}. \quad (11)$$

Для регулярных насадок  $\psi \approx 0.8-0.9$ ; для хаотичных  $\psi \approx 0.8-0.7$ . В знаменателе объем пограничного слоя в газовой фазе. При  $\psi = 1$  насадочные тела не соприкасаются и объем пограничного слоя максимальный для данного режима и конструкции насадки.

При записи диссипации энергии в форме (11) учитывается, что объем жидкой фазы значительно меньше объема газа в слое насадки. Поэтому полученные далее выражения можно использовать как для орошаемых насадок, так и для сухих при соответствующих определениях гидромеханических характеристик пограничного слоя.

С перепадом давления по формуле Дарси–Вейсбаха [13] для насадки из выражений (10) и (11) получим

$$\bar{\varepsilon} = \xi \frac{u_0^3}{\varepsilon_{cb}^2 2d_3 \delta a_v \psi}. \quad (12)$$

Тогда учитывая, что  $d_3 = 4\varepsilon_{cb}/a_v$ , из выражений (10) и (12) найдем среднюю динамическую скорость в пограничном слое на поверхности насадочных тел:

$$u_* = \frac{u_0}{\varepsilon_{cb}} \left[ \frac{\xi}{8\psi \left[ R_1' + 2.5 \ln R_\delta \right]} \right]^{1/3}, \quad (13)$$

где значение  $R_1'$  для хаотичных насадок и регулярных с интенсификаторами определяется путем применения отношения динамической скорости  $u_{*0}$  без возмущений к динамической скорости в пограничном слое с интенсификаторами [7, 8]:

$$R_1' = 5.31 \frac{u_{*0}}{u_*}, \quad (14)$$

где  $u_{*0} = u_0/\varepsilon_{cb} (\sqrt{\xi_0/8})$ ;  $\xi_0 = 0.316/\text{Re}_3^{0.25}$ .

Среднее значение безразмерной толщины пограничного слоя  $R_\delta$  в газовой фазе зависит от конструктивных характеристик насадок, скорости газа и физических свойств среды.

При полном развитии пограничного слоя (как в трубе за участком гидродинамической стабилизации) имеем [14]

$$R_\delta = 0.45 \text{Re}_g^{0.75} (\xi/2)^{0.25}. \quad (15)$$

Для насадок с интенсификаторами полностью развитый пограничный слой не успевает, так как постоянно разрушается и формируется вновь на каждом элементе. Для таких условий получено выражение [14]

$$R_\delta = 6.49 (\text{Re}_g \xi)^{0.25}. \quad (16)$$

Таким образом, выражение (13) решается итерационно с параметрами пограничного слоя (14) и (16), где влияние конструкции насадок с интенсификаторами учитывается за счет коэффициента гидравлического сопротивления.

### КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛО- И МАССООТДАЧИ

Для расчета средних коэффициентов тепло- и массоотдачи в газовой фазе блоков оросителей используем выражения, полученные с применением модели плоского пограничного слоя без возмущений, а шероховатость поверхности пленки и различные интенсификаторы насадок учтем параметрически. Такой подход основан на консервативности законов пограничного слоя к возмущениям, которую установили С.С. Кутателадзе и А.И. Леонтьев, т.е. умеренные возмущения не изменяют формы математического описания трения и теплообмена, что дает возможность учесть их влияние параметрически [15].

Выражения для расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи при турбулентном движении газа или жидкости имеют следующий вид [7, 8]:

$$\alpha = \frac{\rho c_p u_*}{\text{Pr}^{0.67} (R_l + 2.5 \ln R_\delta)}, \quad (17)$$

$$\beta = \frac{u_*}{\text{Sc}^{0.67} (R_l + 2.5 \ln R_\delta)}. \quad (18)$$

Выражение для коэффициента теплоотдачи в газовой фазе с параметром (14) запишется в форме

$$\alpha_r = \frac{\rho_r c_{pr} u_*}{\text{Pr}_r^{0.67} \left( 5.31 \frac{u_{*0}}{u_*} + 2.5 \ln R_\delta \right)}, \quad (19)$$

а коэффициент массоотдачи

$$\beta_r = \frac{u_*}{\text{Sc}_r^{0.67} \left( 5.31 \frac{u_{*0}}{u_*} + 2.5 \ln R_\delta \right)}, \quad (20)$$

где значение  $u_*$  вычисляется по формуле (13), которую запишем в безразмерном виде

$$R_* = \text{Re}_g \left[ \frac{\xi}{8\psi(5.31 R_{*0}/R_* + 2.5 \ln R_\delta)} \right]^{1/3}, \quad (21)$$

где  $R_* = u_* d_g / \nu_r$ ;  $R_{*0} = \text{Re}_g \sqrt{\xi_0/8}$ ;  $\xi_0 = 0.316 \text{Re}_g^{-0.25}$ .

Выражение (21) решается итерационно.

Результаты расчетов по формуле (21) показывают, что можно использовать следующую аппроксимирующую формулу ( $\pm 5-7\%$ ):

$$R_* = 1.56 \text{Re}_g^{0.75} \xi^{0.25}, \quad (22)$$

справедливую как для хаотичных насадок при  $\text{Re}_g > 40$ , так и регулярных с интенсификаторами при  $\text{Re}_g > 500$ .

Выражение (19) можно записать в безразмерной форме

$$\text{Nu}_g = \frac{R_* \text{Pr}^{0.33}}{5.31 R_{*0}/R_* + 2.5 \ln R_\delta}. \quad (23)$$

Аналогично получим безразмерный комплекс для массоотдачи:

$$\text{Sh}_g = \frac{R_* \text{Sc}_r^{0.33}}{5.31 R_{*0}/R_* + 2.5 \ln R_\delta}. \quad (24)$$

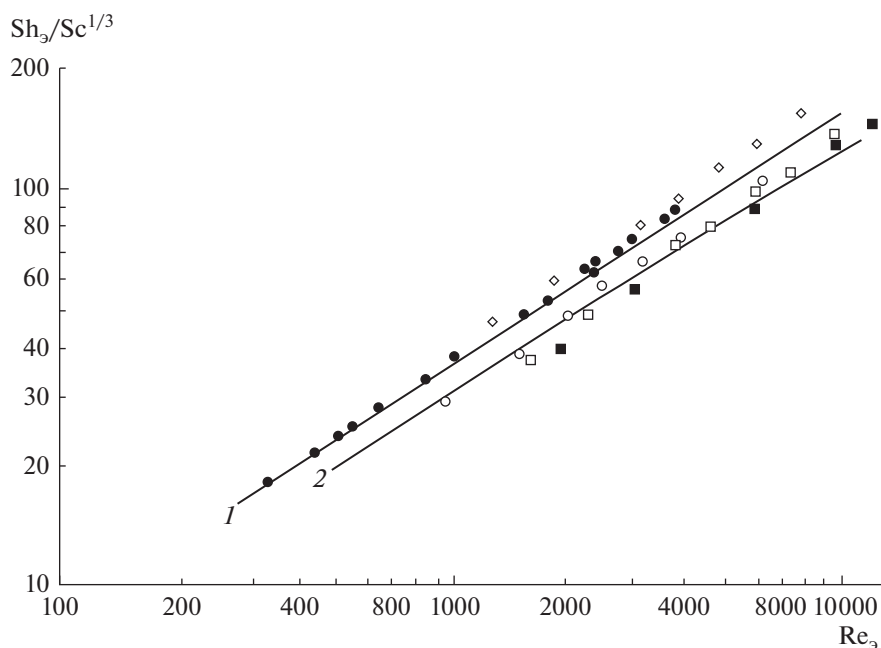
На рис. 1 приведены расчетные и экспериментальные результаты для массоотдачи в газовой фазе в колоннах с различными регулярными и хаотичными насадками, как для сухих (испарение нафталина), так и орошаемых. Из представленных расчетных зависимостей следует удовлетворительное соответствие с известными экспериментальными данными, обобщенными в монографии [13] при  $\text{Re}_g$  от 300 до  $10^4$ , где также представлены расчетные зависимости для коэффициентов гидравлического сопротивления данных насадок. Следовательно, подтверждена адекватность математической модели, и полученные выражения можно использовать в расчетах блоков орошения с насадками при пленочном режиме в градирнях.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПЛЕНОЧНЫХ ОРОСИТЕЛЕЙ

Рассмотрена регулярная рулонная металлическая насадка с лепестками в виде круговых сегментов ( $a_v = 480 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ;  $\epsilon_{св} = 0.95$ ;  $d_g = 0.0079 \text{ м}$ ) [16]. Данная насадка может применяться в мини-градирнях, а также в абсорбционных, ректификационных колоннах и в скрубберах охлаждения газов водой.

Коэффициент гидравлического сопротивления для этой насадки [16]

$$\xi = 0.105 \text{Re}_g^{0.108} + 0.0225 \text{Re}_{ж}^{\kappa}, \quad (25)$$



**Рис. 1.** Безразмерный комплекс массоотдачи в газовой фазе при возгонке нафталина и испарении воды с поверхности различных насадок. Точки — экспериментальные данные [13]:  $\diamond$  — кольца Рашига 25 мм;  $\circ$  — кольца Рашига 50 мм;  $\square$  — кольца Рашига 50 мм в укладку;  $\blacksquare$  — кольца Рашига 80 мм в укладку;  $\bullet$  — кольца Рашига 100 мм в укладку; 1 — расчет по формуле (24) для хаотичных насадок; 2 — расчет по формуле (24) для регулярных насадок.

где  $\kappa = 0.34 \times 10^{-3} Re_{ж}$ .

При скорости газа  $w_r = 2.5$  м/с,  $Re_3 = 1317$  и  $u_{ж} = 4.2 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>с),  $Re_{ж} = 33$  (для воды при температуре 20°C). Тогда  $\xi = 0.255$ . Расчет по формуле (2) дает величину  $\tau_{гр} = 0.239$  Па, а по формуле (10) —  $\tau_{гр} = 0.185$  Па, где  $R_1$  — по формуле (14);  $Re_\delta$  — по формуле (16).

Из расчетов следует, что уравнение баланса сил (2) дает завышенное значение  $\tau_{гр}$  по сравнению с расчетом по выражению (10) для насадки с интенсификаторами.

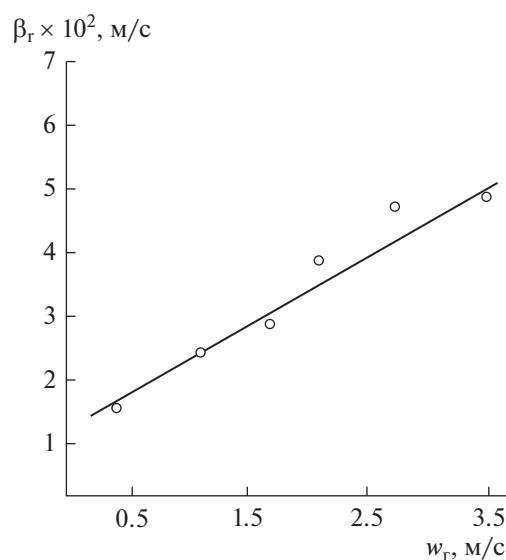
На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные данные по массоотдаче в рассмотренной выше насадке (процесс увлажнения воздуха водой), а в табл. 1 значения числа Шервуда и коэффициента гидравлического сопротивления при различных скоростях воздуха и плотности орошения водой при нормальных условиях [16].

Установлено удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными для насадки с интенсификаторами при плотности орошения  $u_{ж} = 5\text{--}20$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> ч) и скорости воздуха  $u_0 = 1\text{--}2$  м/с, т.е. для пленочного режима.

На рис. 3 даны результаты расчета числа Нуссельта (23) и сравнение с экспериментом для насадок из цилиндров и параллелепипедов при

теплоотдаче от воздуха в хаотичных насадках ( $Pr_r = 0.7$ ) [17].

На рис. 4 приведены экспериментальные [18] и расчетные значения объемного коэффициента массоотдачи от скорости воздуха на макете гра-



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента массоотдачи в газовой фазе от скорости газа при плотности орошения  $10$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> ч),  $d_3 = 0.0079$  м: точки — эксперимент [16], линия — расчет по формуле (24).

**Таблица 1.** Расчетные и экспериментальные числа Шервуда

$\frac{w_{\Gamma}}{u_{\text{ж}}}$	$Re_{\text{э}}$	$Re_{\text{ж}}$	$\xi$	$Sh_{\text{э}}$ расчет по (24)	$Sh_{\text{э}}$ эксперимент [16]
1/5	527	11	0.24	10.1	9.9
1/10	527	22	0.25	10.2	9.7
2/5	1054	11	0.28	17.4	17.4
2/10	1054	22	0.29	17.4	18.1
1/20	527	44	0.26	10.2	10.3

дирни с сетчатой полиэтиленовой насадкой ( $a_v \approx 140 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ;  $d_s = 0.0257 \text{ м}$ ). Объемный коэффициент массоотдачи вычисляется по выражению  $\beta_{\text{вх}} = \beta_{\text{г,г}} \psi_w$ , где  $\psi_w$  – коэффициент смачиваемости поверхности насадки водой [13] ( $\psi_w \leq 1$ ), а  $\beta_{\text{г,г}}$  определяется по формуле (24).

На рис. 5 даны результаты расчетов объемных коэффициентов массоотдачи  $\beta_{\text{вх}}$  для трех типов насадок от скорости воздуха при плотности орошения  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ . Первая насадка – регулярная рулонная металлическая насадка с лепестками (просечками) в виде круговых сегментов [16], рассмотренная выше при сравнении расчетов коэффициентов массоотдачи по формуле (24) с экспериментальными данными (рис. 2 и табл. 1). Вторая – металлическая регулярная рулонная насадка с интенсификаторами в виде шероховатости поверхности и с гофрами ( $a_v = 280 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ;  $d_s = 0.0125 \text{ м}$ ). Конструкции данных насадок разработаны в Инженерно-внедренческом центре “Инжехим” (Казань), а результаты исследования гидравлических характеристик представлены в монографии [19]. Третья насадка – трубчатая насадка из полиэтиленовой сетки, рассмотренная при

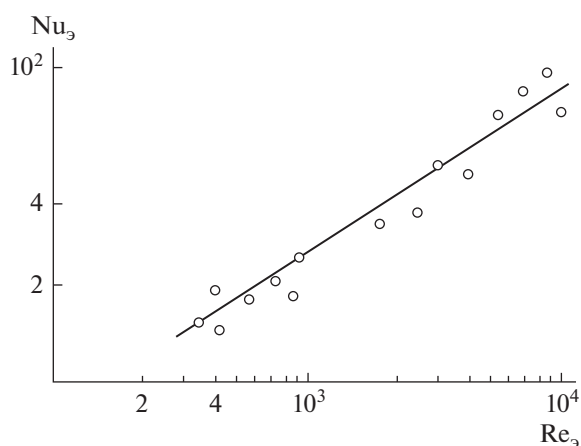
сравнении результатов расчетов  $\beta_{\text{вх}}$  с опытными данными на рис. 4.

Из представленных результатов на рис. 5 следует преимущество металлических рулонных насадок с интенсификаторами (кривые 1, 2) по сравнению с сетчатой насадкой из полиэтилена (кривая 3). Однако металлические насадки из нержавеющей стали значительно дороже, чем полиэтиленовые, поэтому они рекомендуются к применению в мини-градирнях.

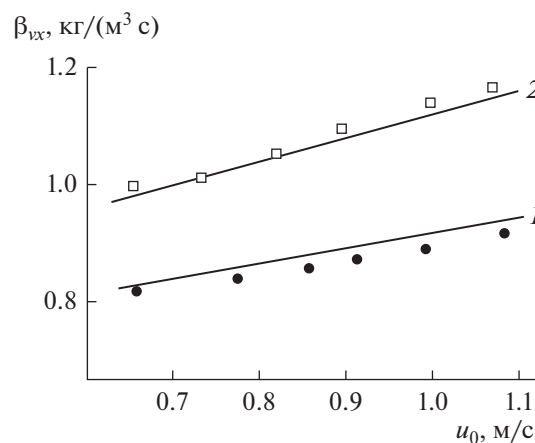
Следует отметить, что для расчета тепломассообменных процессов в градирнях чаще применяется представленный выше (рис. 4, 5) коэффициент массоотдачи  $\beta_x$ , который следует из уравнения теплового баланса и аналогии Льюиса [3, 18]. Тогда тепловой поток записывают в упрощенной форме, где в качестве движущей силы используется средняя разность энтальпий влажного воздуха  $\Delta I_{\text{ср}}$ :

$$Q = \beta_x F \Delta I_{\text{ср}},$$

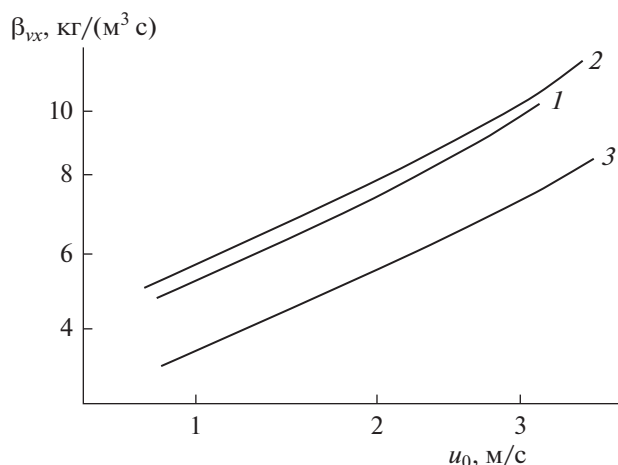
где для пленочных блоков оросителей  $F = S H a_v \psi_w$ ,



**Рис. 3.** Теплоотдача в слоях насадочных элементов: точки – эксперимент [17], линия – расчет по уравнению (23).



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента массоотдачи от скорости воздуха при плотности орошения 4.9 (1) и 7 (2)  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ : точки – эксперимент [18], линии – расчет по формуле (24).



**Рис. 5.** Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от скорости воздуха в градирне при плотности орошения  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ , начальной температуре воды  $40^\circ\text{C}$  и температуре воздуха  $20^\circ\text{C}$ : 1 – рулонная насадка с лепестками в виде круговых сегментов [16]; 2 – рулонная насадка с шероховатой поверхностью и гофрами [19]; 3 – трубчатая насадка из полиэтиленовой сетки [18].

Коэффициент  $\beta_x$  вычисляется по формуле (24):  $\beta_x = \text{Sh}_r \rho_r D_r / d_3$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ . При известном коэффициенте  $\beta_x$  расчет поверхности теплообмена в градирне может выполняться с применением моделей структуры потоков (идеального вытеснения, ячеечной, диффузионной) или численно из решения системы дифференциальных уравнений теплообмена с межфазными источниками тепла и массы [3, 7, 18].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе применения диссипативной модели показан расчет среднего касательного напряжения трения на межфазной поверхности пленки воды при противотоке с воздухом и средних коэффициентов тепло- и массоотдачи. Отличительной особенностью разработанной математической модели является применение выражений, справедливых для плоского турбулентного пограничного слоя, к расчету более сложных гидродинамических условий, т.е. тел с кривизной поверхности и интенсификаторами. Влияние возмущений в пограничном слое учитывается параметрически. В результате получены относительно простые расчетные выражения, где основной эмпирической информацией о контактных устройствах градирен является гидравлическое сопротивление.

Развитие представленной математической модели возможно для новых контактных устройств с поверхностными и объемными интенсификато-

рами теплообмена в одно- и двухфазных средах.

Исследование выполнено в рамках научного проекта Российского научного фонда № 18-79-101-36.

### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$a_v$	удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$
$c_p$	удельная теплоемкость среды, $\text{Дж}/(\text{кг К})$
$D_r$	коэффициент молекулярной диффузии паров воды в газовой фазе, $\text{м}^2/\text{с}$
$d_3$	эквивалентный диаметр насадки, м
$e$	плотность потока энергии, $(\text{Па м})/\text{с}$
$F$	площадь поверхности контакта воздуха и воды, $\text{м}^2$
$H$	высота слоя насадки, м
$R_1 = u_* \delta_1 / \nu$	безразмерная толщина вязкого подслоя
$R_\delta = u_* \delta / \nu$	безразмерная толщина пограничного слоя
$S$	площадь поперечного сечения аппарата (градирни) без насадки, $\text{м}^2$
$u$	скорость среды, $\text{м}/\text{с}$
$u_0$	средняя скорость газа в полном сечении аппарата, $\text{м}/\text{с}$
$u_{ж}$	плотность орошения (фиктивная скорость жидкости), $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ с})$
$u_\infty$	средняя скорость среды, $\text{м}/\text{с}$
$u_*$	средняя динамическая скорость в пограничном слое, $\text{м}/\text{с}$
$y$	поперечная координата к стенке канала, м
$y^+ = u_* y / \nu$	безразмерная координата
$\alpha$	коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$
$\beta_r$	коэффициент массоотдачи в газовой фазе, $\text{м}/\text{с}$
$\beta_{vx}$	объемный коэффициент массоотдачи в газовой фазе, $\text{кг}/(\text{м}^3 \text{ с})$
$\beta_x$	коэффициент массоотдачи в газовой фазе, отнесенный к разности влажностей, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$
$\delta$	толщина пограничного слоя, м
$\delta_1$	толщина вязкого подслоя, м
$\epsilon_{св}$	удельный свободный объем насадки, $\text{м}^3/\text{м}^3$
$k$	высота выступов шероховатости, м

$\lambda_r$	коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м К)
$\nu, \nu_T$	кинематические коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости, м <sup>2</sup> /с
$\rho$	плотность среды, кг/м <sup>3</sup>
$\tau$	касательное напряжение, Па
$\tau_{ст}$	касательное напряжение на стенке или поверхности раздела фаз, Па
$\psi$	коэффициент, учитывающий соприкосновение насадочных тел
$\psi_w$	коэффициент смачиваемой поверхности насадки
$Nu_3 = \alpha_r d_3 / \lambda_r$	число Нуссельта для насадки
$Pr$	число Прандтля
$Re_{ж} = u_{ж} d_3 / \nu_{ж}$	число Рейнольдса в жидкой фазе
$Sc$	число Шмидта
$Sh_3 = \beta_r d_3 / D_r$	число Шервуда в газовой фазе

## ИНДЕКСЫ

г	газовая фаза
ж	жидкая фаза
св	свободный объем
ст	стенка
э	эквивалентный
$\infty$	параметры в ядре потока

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совершенствование конструкций контактных устройств для градилен / Под общ. ред. Пушнова А.С., Сакалаускаса А. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020.
2. Жаворонков Н.М. Теоретические основы химической технологии: избранные труды. М.: Наука, 2007.
3. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1998.
4. Витковская Р.Ф., Пушнов А.С., Шинкунас С. Аэрогидродинамика и тепломассообмен насадочных аппаратов. СПб.: Лань, 2019.
5. Городилов А.А., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в регулярных насадках // Энергосбережение водоподгот. 2014. № 3(89). С. 45.
6. Войнов Н.А., Николаев Н.А. Теплообмен при пленочном течении жидкости. Казань: Отечество, 2011.
7. Лантев А.Г., Башаров М.М., Лантева Е.А., Фарахов Т.М. Модели и эффективность процессов межфазного переноса. Часть 2. Тепломассообменные процессы. Казань: Центр инновационных технологий, 2020.
8. Laptev A.G., Farakhov T.M., Basharov M.M. A mathematical model of local and average heat transfer in channels with heat transfer intensifiers // Therm. Eng. 2019. V. 66. № 8. P. 580.
9. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. М.: Энергоатомиздат, 1998.
10. Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И., Леонтьев А.И., Миронов Б.М., Никитин В.М., Петражицкий Г.Б., Хвостов В.И., Чукаев А.Г., Шишов Е.В., Школа В.В. Теория тепломассообмена. Учебник для вузов. Серия "Техническая физика и энергомашиностроение". М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учебное пособие в 10 т. Т. 6. М.: Наука, 2017.
12. Репик Е.У., Соседко Ю.П. Турбулентный пограничный слой. Методика и результаты экспериментов исследований. М.: Физматлит, 2007.
13. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976.
14. Laptev A.G., Farakhov T.M., Lapteva E.A. Model of transport phenomena in random packed and granular beds // Theor. Found. Chem. Eng. 2015. V. 49. № 4. P. 407.
15. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в пограничном слое. М.: Энергия, 1985.
16. Дьяконов С.Г., Елизаров В.В., Елизаров В.И. Теоретические основы проектирования промышленных аппаратов химической технологии на базе сопряженного физического и математического моделирования. Казань: КГТУ, 2009.
17. Блиничев В.Н., Комлев В.Г., Захаров В.М. и др. Исследование коэффициентов сопротивления и теплоотдачи слоя насадки // Изв. высш. учебн. завед. Хим. хим. технол. 1987. Т. 30. № 2. С. 124.
18. Лантев А.Г., Ведьгаева И.А. Устройство и расчет промышленных градилен. Казань: КГЭУ, 2004.
19. Каган А.М., Лантев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов. Казань: Отечество, 2013.