

А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, С. У. Аласгарли

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И МАССООБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛОННЫ С РУЛОННОЙ СЕТЧАТОЙ НАСАДКОЙ ДЛЯ СКРУББЕРОВ И ГРАДИРЕН

Ключевые слова: тепломассообмен, регулярная насадка, охлаждение газов, гидравлическое сопротивление.

Для решения научно-технических задач повышения эффективности тепло- и массообменных аппаратов выполнены экспериментальные исследования гидравлических и массообменных характеристик полимерной сетчатой насадки с размером ячеек 8x8 мм на стенде с колонной диаметра 200 мм и высотой слоя один метр. Получены экспериментальные данные и выполнены обобщения гидравлических и массообменных характеристик при пленочном режиме в колонне с регулярной сетчатой насадкой и сравнили с другой насадкой. Исследовался процесс увлажнения воздуха водой при нормальных условиях в режиме противотока фаз. В ходе эксперимента измерялись: температуры и влагосодержание воздуха на входе и выходе, расходы фаз, перепад давления воздуха. Рулонная насадка из полимерной сетки имеет удельную поверхность 240 м²/м³ и свободный объем 90%. В ходе экспериментов и обработки результатов получены: коэффициент гидравлического сопротивления и установлено, что насадка имеет небольшой удельный перепад давления газа по сравнению с другими насадками, объемный коэффициент массоотдачи - повышается за счет турбулизации воздуха на границе раздела фаз и получена эффективность массообмена (увлажнения воздуха). Установлена высокая эффективность массообмена 80-87% при скорости газа от 0,5 до 2,5 м/с и плотность орошения от 4,9 до 15,9 м³/(м² ч). В результате выполненных исследований. Получены эмпирические выражения для коэффициента сопротивления и объемного коэффициента массоотдачи. Данные результаты могут применяться при проектировании или модернизации градирен и скрубберов-охлаждателей газов водой. Исследованная насадка является хорошим аналогом для большинства несовременных контактных устройств в пленочных аппаратах колонного типа.

A. G. Laptev, E. A. Lapteva, S. U. Alasgarli

EXPERIMENTAL HYDRAULIC AND MASS-EXCHANGE CHARACTERISTICS OF A COLUMN WITH ROLL-ON MESH PACKING FOR SCRUBBERS AND COOLING TOWERS

Keywords: heat and mass transfer, regular packing, gas cooling, hydraulic resistance.

To solve scientific and technical problems of increasing the efficiency of heat and mass exchange devices, experimental studies of hydraulic and mass exchange characteristics of polymer mesh packing with a cell size of 8x8 mm were performed on a stand with a column of 200 mm in diameter and a layer height of one meter. Experimental data were obtained and generalizations of hydraulic and mass exchange characteristics were made in a film mode in a column with regular mesh packing and compared with another packing. The process of air humidification with water under normal conditions in the phase counterflow mode was studied. During the experiment, the following were measured: temperature and moisture content of air at the inlet and outlet, phase flow rates, air pressure drop. Roll packing made of polymer mesh has a specific surface area of 240 m²/m³ and a free volume of 90%. During the experiments and processing of the results the following were obtained: the coefficient of hydraulic resistance and it was established that the packing has a small specific pressure drop of gas in comparison with other packings, the volumetric coefficient of mass transfer is increased due to air turbulization at the interface and the efficiency of mass transfer (air humidification) was obtained. High efficiency of mass transfer of 80-87% at a gas velocity of 0.5 to 2.5 m/s and irrigation density of 4.9 to 15.9 m³/(m² h) was established. As a result of the studies. Empirical expressions for the coefficient of resistance and the volumetric coefficient of mass transfer were obtained. These results can be used in the design or modernization of cooling towers and scrubbers-coolers of gases with water. The investigated packing is a good analogue for most of the outdated contact devices in film apparatuses of the column type.

Введение

Начиная с 90-х годов прошлого столетия и по настоящее время ведутся интенсивные разработки и исследования новых типов контактных устройств для ректификационных, абсорбционных аппаратов, градирен и скрубберов-охлаждателей газов при непосредственном контакте с жидкой фазой. Это связано с модернизацией промышленного оборудования для повышения эффективности нефтегазохимического комплекса и энергетики. В монографиях [1-3] представлено несколько сотен конструкций регулярных и нерегулярных (хаотичных) насадок, а также их технические, гидравлические и массообменные характеристики. В скрубберах конденсационного охлаждения газа в

основном применяются, как нерегулярные насадки (Рашига, Палля, ГИАП, Инжехим и др.), так и регулярные при пленочном режиме. В пленочных градирнях регулярные насадки или комбинированные.

Далее дан краткий обзор некоторых работ в направлении исследования контактных устройств.

Физическое и математическое моделирование процесса абсорбции аммиака и метиламинов водой в колонне с кольцами Рашига и регулярной ленточной насадки, рассмотрено в работе [4]. Даны расчетные выражения для чисел Нуссельта в газовой и жидкой фазах, а также для высоты единиц переноса (ВЕП) и объемных коэффициентов массопередачи. Получены профили концентраций аммиака и триметиламина в газовой фазе по высоте ленточной

насадки. Установлено, что объемный коэффициент массоотдачи в колонне с ленточной насадкой на 20% больше, чем с кольцами Рашига и на 70% больше, чем с хордовой насадкой.

Аналогичные результаты по эффективности абсорбции многокомпонентной смеси на кольцевой и регулярной ленточной насадке представлены в работе [5]. Удельная поверхность насадки $a_v = 121 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и свободный объем 0,96. Даны профили концентраций аммиака и аминов в газовой фазе по высоте исследованных насадок. Установлено значительное падение (практически до нуля) концентраций при высоте 0,3 – 0,5 м при общей высоте слоя 1,6 м.

В работе [6] представлены результаты моделирования процесса десорбции сероводорода из воды на ленточной регулярной насадке. Дан расчетный профиль концентрации сероводорода по высоте слоя насадки 10 метров в колонне. Установлено, что для процесса десорбции ленточная насадка имеет меньшую эффективность массопередачи, чем кольца Рашига. В отмеченных работах [4-6] нет данных по гидравлическому сопротивлению ленточной насадки. Таким образом, представленные авторами экспериментальные и расчетные данные недостаточны для проектирования массообменных колонн с ленточной насадкой.

Математическая модель для расчета гидравлического сопротивления нерегулярной металлической насадки «Инжехим» с номинальными размерами элемента от 16 до 60 мм представлена в работе [7]. Также выполнено экспериментальное исследование перепада давления с указанной насадкой при движении в колонне воды или воздуха. Гидродинамика двухфазных газожидкостных сред не рассматривалась.

Исследования гидравлического сопротивления орошаемого контактного устройства с наклонными пластинами при пленочной режиме представлены в работе [8]. В отверстиях контактных элементов были установлены металлические трубки для циркуляции охлаждения и конденсации парового потока в ректификационной колонне. В результате экспериментальных исследований и обобщения результатов получены эмпирическая зависимость отношения перепада давления орошаемых наклонных пластин к перепаду давления без орошения. Дана графическая зависимость этого отношения, где показано, что перепад давления орошаемых пластин возрастает от 2 до 6 раз относительно сухих в зависимости от режимных параметров.

Успешное применение регулярной пакетной насадки IRG «Инжехим» для разделения тяжелого вакуумного газойля представлены в работе [9]. Насадка IRG с волнистой поверхностью и элементами шероховатости (микрорельефом) характеризуется небольшим гидравлическим сопротивлением [3], и что особенно важно для вакуумных колонн ректификации и может применяться в мини градириях и скрубберах.

Результаты экспериментальных исследований регулярной насадки даны в работе [10]. Насадка рулонная из зигзагообразных лент. Показаны результаты по перепаду давления (от 20 до 200 Па/м, при скорости газа от 1,0 до 3,0 м/с) и эффективности массопередачи (от 65 до 90%). Процесс десорбции CO_2 из воды воздухом. Однако при декарбонизации CO_2 в водоподготовке ТЭС требуется эффективность не менее 98-99%.

Сравнительные гидравлические и массообменные характеристики различных насадок рассмотрены в работах [11,12]. Например, экспериментальные исследования эффективности массопередачи в жидкой и газовой фазах показаны в работе [12], однако без данных по гидравлическому сопротивлению. Исследовались волнообразная, зигзагообразная, сотообразная и кольца Рашига. Высокая эффективность наблюдается, как по жидкой фазе (87-93%), так и по газовой (75-88%). Причем в отличие от других насадок отмеченная эффективность получена в интервале скорости газа от 1,2 до 4,0 м/с и плотности орошения 10,8-15,48 $\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$.

Рассмотрена гидродинамика нерегулярной насадки с шероховатостью и перспективы ее использования [13]. Математическая модель эффективности и процессы тепло – и массообмена и гидравлическое сопротивление контактного устройства рассмотрены в работах [14 -16].

Однако недостаточно внимания в отмеченных работах уделяется исследованию и математическому моделированию регулярных универсальных контактных устройств для градирен, скрубберов и абсорберов.

Целью данной работы является представление экспериментальных гидравлических и массообменных характеристик при противоточном движении воды и воздуха в колонне с регулярной сетчатой насадкой и пример расчета скруббера-охладителя.

Экспериментальная часть

В расчетах пленочных градирен охлаждения воды и скрубберов охлаждения газов водой применяется подход записи теплового потока с применением коэффициента массоотдачи, отнесенного к разности влагосодержащий и удельных энтальпий газа в виде [17] (например, для скруббера-охладителя)

$$Q = G(I_n - I_k) + Q_n = \beta_x F \Delta t_{cp} \quad (1)$$

Данное выражение получено в результате использования аналогии Льюиса и известной зависимости энтальпии газа с влагосодержанием и температурой. Это дает возможность упростить методики инженерных расчетов аппаратов охладителей.

Исследования гидравлического сопротивления и массообменных характеристик при противоточном пленочном режиме взаимодействия фаз в колонне с насадками выполнялись на стенде, подробно описанному в работах [18,19]. Стенд состоит из колонны диаметром 200 мм и высотой два метра, выполненной из оргстекла, а также

вспомогательного оборудования – насос, газодувка, буферная емкость для воды, датчики давления, температуры, влагосодержания и расхода фаз. Исследовался процесс увлажнения воздуха водой при нормальных условиях, то есть при атмосферном давлении и с температурами фаз 20 °С. Эксперименты выполнялись при скорости воздуха в сводном сечении колонны (то есть без насадки) от 0,5 до 2,5 м/с и плотности орошения от 4,5 до 20 м³/(м²ч). Интервал исследованных режимных параметров примерно соответствует режимам работы пленочных градилен и насадочных скрубберов-охладителей газов.

Исследовалась рулонная сетчатая полимерная насадка с условной удельной поверхностью $a_v = 240$ м²/м³, то есть как выполненная из сплошного листового материала, свёрнутого в рулон. Длина полотна сетки составляет 3,5 м с высотой $H=1,0$ м. Внутренний диаметр колонны 190 мм. Отсюда следует объем насадочного слоя, равный 0,028 м³. Удельная поверхность $a_v = 2 \cdot 3,5 / 0,0283 = 240$ м²/м³. Удельный свободный объем $\epsilon_{св} = 0,90$ м³/м³. Эквивалентный диаметр насадки $d_3 = 4\epsilon_{св} / a_v = 0,015$ м. Оценка погрешности экспериментальных исследований показала $\pm 8-12\%$ в зависимости от измеряемых величин. Каждое измерение параметров выполнялось не менее 3-4 раз и брались средние значения.

Схема экспериментальной установки дана в работах [18,19]. На рис. 1,2 представлено фото рулонной сетчатой насадки.

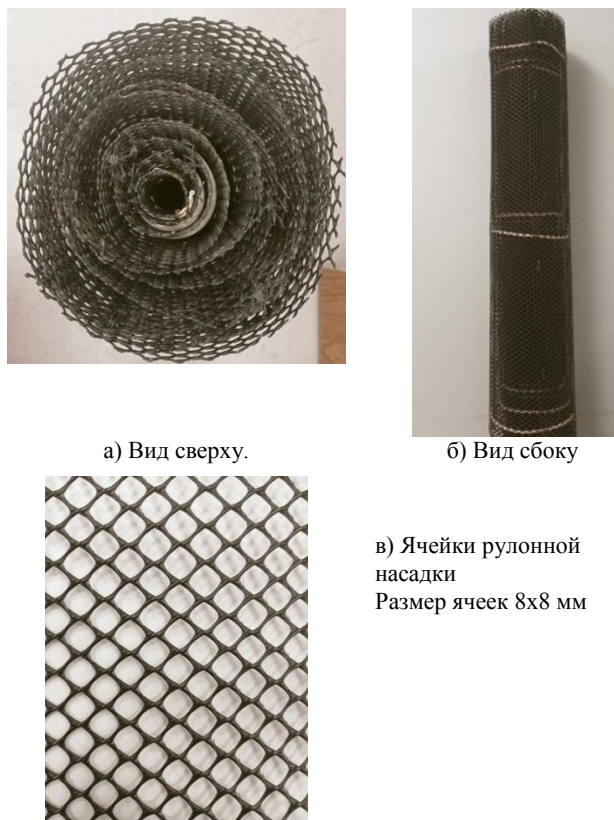


Рис. 1 – Фото рулонной регулярной насадки

Fig. 1 – Photo of the roll-on regular nozzle

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 2 представлены экспериментальные данные по перепаду давления воздуха для орошаемой насадки.

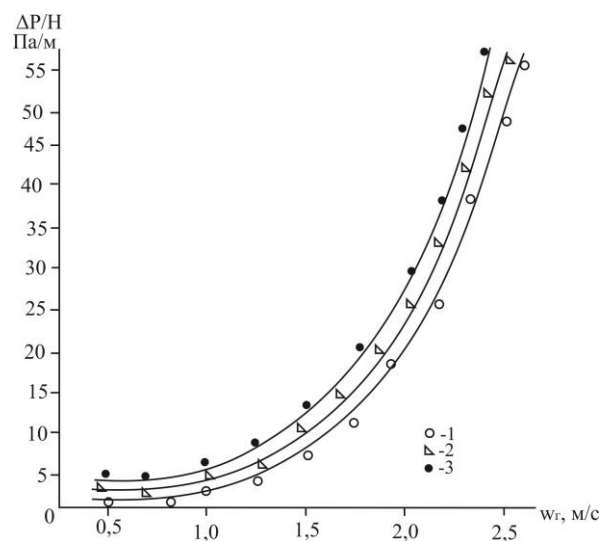


Рис. 2 – Зависимость удельного перепада давления орошаемой рулонной насадки от скорости воздуха в колонне. Плотность орошения: 1 - $q_{ж}=4,9$ м³/(м² ч); 2 - $q_{ж}=8,8$ м³/(м² ч); 3 - $q_{ж}=15,9$ м³/(м² ч)

Fig. 2 – Dependence of the specific pressure drop of the irrigated coiled nozzle on the air velocity in the column. Irrigation density: 1 - $q_w=4,9$ м³/(м² h); 2 - $q_w=8,8$ м³/(м² h); 3 - $q_w=15,9$ м³/(м² h)

Из представленных результатов следует, что перепад давления увеличивается как при повышении скорости воздуха, так и плотности орошения. Причем от скорости воздуха зависимость более сильная, что соответствует характеру изменения $\Delta P/H$ известным опытным данным для различных типов насадок [1-3]. На рис.3. показано сравнение $\Delta P/H$ для различных насадок.

Из графических зависимостей следует (рис.3), что рулонная сетчатая насадка имеет небольшой удельный перепад давления газа по сравнению с другими регулярными насадками.

Результаты экспериментальных данных для сухой и орошаемой насадки обобщены эмпирическими выражениями ($\pm 12-15\%$)

$$\xi_{сух} = 0,015 Re_\Gamma^{0,15} + 7,1 \cdot 10^{-7} Re_\Gamma^{3/2}, \quad (2)$$

$$\Delta P_{сух} = \xi_{сух} \frac{H}{d_3} \frac{\rho_\Gamma w_\Gamma^2}{2\epsilon_{св}^2}, \quad (3)$$

$$\Delta P_{ор} = \Delta P_{сух} \left(1 + 0,13 q_{ж}^{0,18} \right). \quad (4)$$

Процесс массообмена изучался при увлажнении воздуха водой. В таком случае основное сопротивление массопередаче сосредоточено в газовой фазе и коэффициент массопередачи практически равен коэффициенту массоотдачи

$K_{\Gamma} = \beta_{\Gamma}$. На основе измеренных влагосодержаний воздуха (x_H, x_K) и объемного расхода воздуха V_{Γ} находилось количество переданной влаги (поток массы)

$$M = V_{\Gamma} (x_K - x_H) \rho_{\Gamma} \quad (5)$$

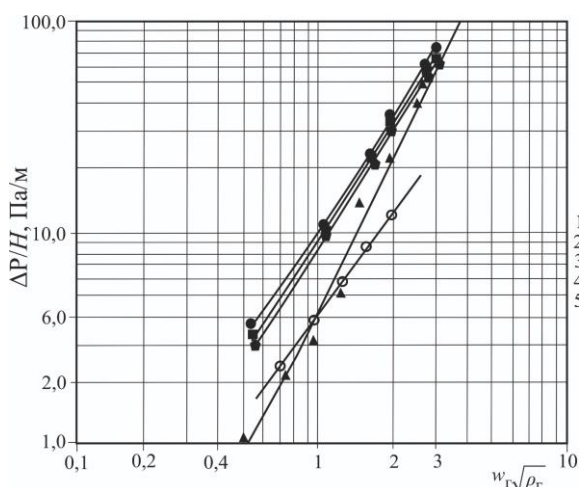


Рис. 3 – Зависимость гидравлического сопротивления орошаемой комбинированной насадки 2КР от фактора скорости газа при различных плотностях орошения ($5, 10, 15 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$): 1 – $q_{ж}=5 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 2 – $q_{ж}=10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 3 – $q_{ж}=15 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 4 – насадка из труб с шероховатой поверхностью $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 5 – рулонная сетчатая насадка $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$

Fig. 3 – Dependence of hydraulic resistance of irrigated combined nozzle 2KR from the factor of gas velocity at different densities of irrigation ($5, 10, 15 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$): 1 – $q_{ж}=5 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 2 – $q_{ж}=10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 3 – $q_{ж}=15 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 4 – nozzle from pipes with rough surface $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 5 – roll mesh nozzle $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$

Определялась средняя движущая сила массообмена

$$\overline{\Delta x} = \frac{\Delta x_{\bar{6}} - \Delta x_M}{\ln \frac{\Delta x_{\bar{6}}}{\Delta x_M}}, \quad (6)$$

где $\Delta x_{\bar{6}} = x_H^* - x_H$ – большая движущая сила на входе воздуха; $\Delta x_M = x_K^* - x_K$ – меньшая движущая сила, кг/кг.

При постоянной температуре воздуха и воды имеем $x_H^* = x_K^*$. Например, при $T_{\Gamma} = T_{ж} = 20^\circ\text{C}$ и $\phi = 100\%$ значение по справочным данным $x^* = 0,0147 \text{ кг/кг}$.

Объемный коэффициент массоотдачи вычисляется по выражению

$$\beta_{xv} = \frac{M}{V_{\text{нас}} \Delta x}, \quad (7)$$

Зависимости объемного коэффициента массоотдачи от скорости воздуха при различных

расходах воды и сравнения с кототкоствольной регулярной насадкой КСН [20]. Из представленных результатов следует преимущество рулонной сетчатой насадки (рис. 4).

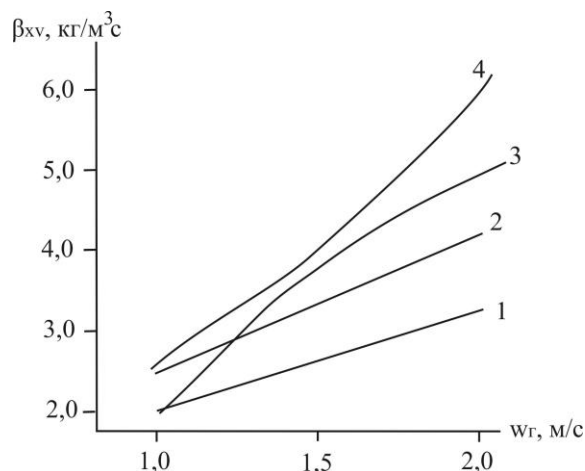


Рис. 4 – Зависимость объемного коэффициента от скорости воздуха 1,2 – насадка КСН [16]; 3,4 – рулонная сетчатая насадка: 1 – $q_{ж}=7,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 2 – $q_{ж}=11,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 3 – $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 4 – $q_{ж} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$

Fig. 4 – Dependence of volume coefficient on air velocity 1,2 – nozzle of KCN [16]; 3,4 – roll mesh nozzle: 1 – $q_w=7.0 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 2 – $q_w=11.0 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 3 – $q_w=8.8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; 4 – $q_w = 15.9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$

Из полученных экспериментальных данных (кривые 3,4) следует, что при увеличении скорости воздуха объемный коэффициент массоотдачи значительно повышается, что связано как с турбулизацией воздуха, так и снижении толщины пограничного слоя на границе раздела фаз. Зависимость от плотности орошения более слабая, так как основное сопротивление переносу сосредоточено в газовой фазе. Повышение коэффициента массоотдачи в зависимости от плотности орошения связано с увеличением смоченной поверхности насадки и перепада давления.

Получено эмпирическое выражение ($\pm 12\%$) для рулонной сетчатой насадки

$$\beta_{xv} = 1,43 q_{ж}^{0,18} w_{\Gamma}^{0,97}. \quad (8)$$

Выражение (8) справедливо для системы воздух-вода при температуре 20°C в исследованном интервале нагрузок по фазам. При охлаждении воды в градирнях обычно температура воды, подаваемая на охлаждение, составляет $T_{жн} = 38 - 42^\circ\text{C}$, а температура и влажность воздуха зависит от метеорологических условий. В скрубберах-охладителях температура газа может составлять до $200 - 300^\circ\text{C}$, а воды $10 - 50^\circ\text{C}$. Следует отметить, что применение полимерных насадок ограничивается температурами до $100 - 130^\circ\text{C}$. Для расчета коэффициентов массоотдачи при указанных температурах газа и жидкости на основе выражения (8) ниже установлено критериальное выражение.

Известно, что для расчетов тепло- и массообменных процессов теория подобия площадь сечения колонны, м; получила самое широкое применение. Для насадочных колонн известны зависимости $Sh_T = f(Re_T, Re_{ж}, Sc_T)$ [21,22], где коэффициент массоотдачи в критерии Шервуда отнесен к смоченной или активной площади контакта фаз (к площади межфазной поверхности пленки).

Этим обусловлена трудность применения данной критериальной зависимости, так как коэффициент активной поверхности для многих насадок не известен. При обобщении экспериментальных данных для барботажных тарелок, когда площадь контакта фаз также не известна, применяется подход записи коэффициентов массоотдачи отнесенных к рабочей площади тарелок, то есть $\beta_{Tf} = \beta_{TF} / S_{тар}$, м/с. Следует отметить, что экспериментально находится объемный коэффициент (7), а затем имеем $\beta_{Tf} = \beta_{xv} S_K H / (S_K \rho_T) = \beta_{xv} H / \rho_T$, м/с. Используем этот подход для обобщения полученных экспериментальных данных для рулонной насадки. В результате на основе выражения (8) получена критериальная зависимость при $H=1,0$ м

$$Sh_{Tf} = 0,88 Re_T^{0,97} Re_{ж}^{0,18} Sc_T^{1/3}, \quad (9)$$

где показатель степени при числе Шмидта взят на основе многочисленных экспериментальных данных различных авторов [3,21,22] по массоотдаче в газовой фазе для насадочных колонн.

На основе измеренных влагосодержаний воздуха на входе x_H , выходе x_K и равновесного значения x^* записана массообменная эффективность процесса, как отношение достигнутых величин к максимально возможным (аналог эффективности по Мерфи)

$$E_T = \frac{x_H - x_K}{x_H - x^*}. \quad (10)$$

На рис. 5 представлены зависимости эффективности массообмена (10) в газовой фазе от скорости воздуха при различных плотностях орошения водой. Эффективность E_T при скорости воздуха от 0,5 до 2,5 м/с и плотности орошения от 4,9 до 15,9 м³/(м²ч) находится в интервале от 0,8 до 0,87 и при повышении скорости воздуха, незначительно снижается, а при увеличении плотности орошения увеличивается.

Для расчета эффективности E_T теоретическим путем следует сделать оценку гидродинамической структуры потока воздуха в слое насадки с применением модифицированного числа Пекле (критерия Боденштейна) [23]

$$Pe_T = 0,52 \frac{H}{d_3} (Re_T / \xi_{op}). \quad (11)$$

Известно, что при $Pe_T > 40-50$ газ движется практически в режиме идеального вытеснения. Тогда для расчета локальной эффективности E_T можно использовать известные выражение при условии $x_H^* \approx x_K^* (T_T \approx const)$

$$E_T = 1 - \exp(-N_T), \quad (12)$$

где $N_T = \beta_{xv} H / (w_T \rho_T)$ - число единиц переноса в газовой фазе, записанные при условии, что основное сопротивление переносу массы влаги в газовой фазе.

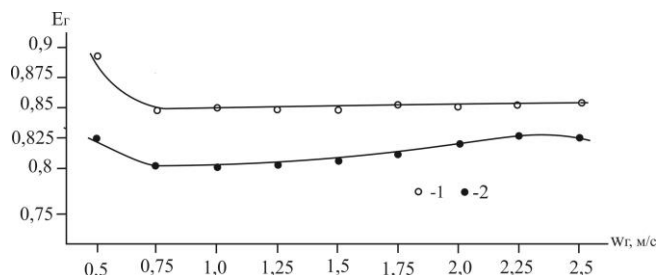


Рис. 5 – Зависимость эффективности увлажнения воздуха водой от скорости воздуха в колонне с рулонной сетчатой насадкой: 1 - $q_{ж}=15,9$ м³/(м² ч); 2- $q_{ж}=4,9$ м³/(м² ч)

Fig. 5 – Dependence of air humidification efficiency with water on air velocity in the column with a roll mesh nozzle: 1 - $q_w=15.9$ м³/(м² h); 2- $q_w=4.9$ м³/(м² h)

Расчет E_T (12) с экспериментальными значениями β_{xv} (рис. 3) в N_T показывает хорошее согласование с опытными значениями эффективности E_T с расхождениями не более $\pm 3-5\%$ относительных (рис.5). Причем выражение (12) дает большие значения эффективности E_T , чем экспериментальные. Это связано с гидродинамической структурой потока газовой фазы. Известно, что при идеальном вытеснении потока достигается максимальная движущая сила процесса, и отсюда максимальная эффективность. Однако применение выражения (12) ограничено, когда термодинамические характеристики второй фазы по высоте колонны постоянные, например, как для исследованного процесса увлажнения воздуха водой. В градирнях и скрубберах-охладителях термодинамические параметры значительно изменяются по высоте слоя насадки, поэтому при расчёте общей эффективности необходимо учитывать и гидродинамическую структуру потока жидкой фазы (пленки).

Пример расчета насадочного скруббера с рулонной насадкой

Рассмотрим модельный пример расчета конденсационного охлаждения влажного воздуха при контакте с водой в колонне с исследованной рулонной сетчатой насадкой.

На вход в скруббер диаметром $D_K = 1,6$ м (площадь сечения $S_K = 2,0$ м²) со скоростью $w_T = 1,0$ м/с поступает воздух с температурой $T_{TH} = 95$ °С и относительной влажностью $\phi = 40\%$.

Температура поступающей охлаждающей воды $T_{жн} = 15$ °С, плотность орошения $q_{ж} = 25$ м³/(м²ч).

Требуемая температура воздуха на выходе $T_{ГК} = 25^{\circ}\text{C}$. Отсюда требуемая тепловая эффективность при противотоке $E_{Г} = (T_{ГН} - T_{ГК}) / (T_{ГН} - T_{ЖН}) = 0,875$. Задача заключается в определении высоты насадки, обеспечивающий заданный температурный режим.

Имеем при средней температуре воздуха $T_{Гср} = 0,5(T_{ГН} + T_{ГК}) = 60^{\circ}\text{C}$ теплофизические свойства: $\rho_{Г} = 1,06, \text{ кг/м}^3$; $\nu_{Г} = 1,9 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2/\text{с}$; $Sc_{Г} = 0,7$. При $T_{ГН} = 95^{\circ}\text{C}$ и $\phi = 40\%$ по справочным данным имеем на выходе: $I_{Н} = 929,2 \text{ кДж/кг}$; $x_{Н} = 0,332 \text{ кг/кг}$.

Тепловую эффективность запишем используя отношение энтальпии газа $E_{Г} = (I_{Н} - I_{К}) / (I_{Н} - I_{К}^*)$, где $I_{К}^*$ на линии насыщения на выходе газа, то есть при $T_{ЖН} = 15^{\circ}\text{C}$, имеем при $\phi = 100\%$ $I_{К}^* = 42 \text{ кДж/кг}$, $x_{К}^* = 0,011 \text{ кг/кг}$.

Энтальпия газа на выходе $I_{К} = I_{Н} - E_{Г} (I_{Н} - I_{К}^*) = 289 \text{ кДж/кг}$.

Из уравнения теплового баланса $Q = G(I_{Н} - I_{К}) = Lc_{рж}(T_{ЖН} - T_{ЖК})$ запишем $T_{ЖК} = T_{ЖН} + G(I_{Н} - I_{К}) / Lc_{рж}$, где $G = w_{Г}\rho_{Г}S_{К} = 2,12 \text{ кг/с}$; $L = q_{ж}S_{К}\rho_{ж}/3600 = 13,9 \text{ кг/с}$, $c_{рж} = 4,18 \text{ кДж/(кгК)}$.

Получаем температуру воды на выходе $T_{ЖК} = 38,3^{\circ}\text{C}$. Средняя температура воды $T_{жср} = 27^{\circ}\text{C}$, $\rho_{ж} = 996,6, \text{ кг/м}^3$; $\nu_{ж} = 0,85 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$.

Числа Рейнольдса $Re_{Г} = 877,2$; $Re_{ж} = 136,2$. Число Шервуда (9) $Sh_{Гф} = 1355,5$ при $H = 1,0 \text{ м}$, коэффициент массоотдачи $\beta_{Гф} = Sh_{Гф} D_{Г} / d_{э} = 2,0 \text{ м/с}$ или $\beta_{жф} = \beta_{Гф} \rho_{Г} = 2,13 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$. Число единиц переноса $N_{Г} = H\beta_{жф} \cdot S_{К} / (\rho_{Г} S_{К} w_{Г}) = 2,0$.

Локальная эффективность (12) $E_{Г} = 0,864$. Даже при идеальном вытеснении газа и без учета структуры потока жидкой фазы тепловая эффективность меньше требуемой $E_{Г} = 0,875$.

При высоте насадочного слоя $H = 1,1 \text{ м}$ число единиц переноса $N_{Г} = 2,2$ и эффективность (12) имеет значение $E_{Г} = 0,889$, то есть немного выше требуемой.

Для расчета тепловой эффективности с учетом структуры потоков газовой и жидкой фаз используем аналитические выражения, полученные из решения уравнений ячеечной модели при противотоке фаз, которые дают удовлетворительное согласование с экспериментальными данными для пленочных градиент [24] и насадочных скрубберов-охладителей [25]. Эти выражения имеют вид: при $n > m$

$$E_{Г} = 1 - \left(1 + \frac{N_{Г}m}{n} \right)^{-\frac{n}{m}}, \quad (13)$$

при $m > n$

$$E_{Г} = 1 - \left(1 + \frac{N_{Г}n}{m} \right)^{-\frac{m}{n}}, \quad (14)$$

Число ячеек связано с модифицированными числами Пекле гидродинамической структуры потоков [21,22] при $Pe_{Г} \leq 10$ и $Pe_{ж} \leq 10$

$$n = (Pe_{Г} + 1, 25) / 2, 5; \quad m = (Pe_{ж} + 1, 25) / 2, 5; \quad (15)$$

- при $Pe_{Г} > 10, Pe_{ж} > 10$

$$n = Pe_{Г} / 2; \quad m = Pe_{ж} / 2. \quad (16)$$

В газовой фазе выражения для расчета $Pe_{Г}$ имеет вид (11), а в жидкой фазе можно применять приближенную зависимость, рекомендованную для различных насадок [21]

$$Pe_{ж} = 0,068 Re_{ж}^{0,78} Ga^{-0,33} H. \quad (17)$$

Расчет для рассмотренного примера показывает $Pe_{Г} = 667$, $Pe_{ж} = 8$, тогда $n = 333$ и $m = 3,7$. При $N_{Г} = 2,15$ ($H = 1,06 \text{ м}$) из выражения (13) получаем $E_{Г} = 0,876$, что соответствует заданной.

Таким образом, установлено, что при данных в примере условий охлаждения воздуха водой высота сетчатой рулонной насадки должна быть $H = 1,06 \text{ м}$. Следует отметить, что при повышении начального влагосодержания газа и, следовательно, энтальпии $I_{Н}$ повышается расход охлажденной воды при фиксированном расходе значение температуры воды на выходе $T_{ЖК}$. Необходимо учитывать при применении математической модели конденсационного охлаждения газа должно быть значение $T_{ЖК} < (45 - 50^{\circ}\text{C})$ [26].

Заключение

В результате выполненных экспериментальных исследований при противотоке воздуха и воды в рулонной сетчатой насадке получены гидравлические и массообменные характеристики, которые обобщены в виде эмпирических выражений. Установлено низкое гидравлическое сопротивление насадки и довольно большая (80-90%) массообменная эффективность в широком интервале нагрузок по фазам. Показано применение выражений ячеечной модели для расчета тепловой эффективности охлаждения воздуха водой. Данная насадка является альтернативой для многих устаревших контактных устройств в пленочных градиентах и скрубберах – охладителей газов.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00129, <https://rscf.ru/project/25-29-00129/>

Acknowledgments: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 25-29-00129, <https://rscf.ru/project/25-29-00129/>

Литература

1. Б.А. Сокол, А.К. Чернышев, Д.А. Баранов, М.Г. Беренгартен, Б.В. Левин, *Насадки массообменных колонн*. М., 2009. 358с.
2. Р.Ф. Витковская, А.С.Пушнов, С. Шинкунас, *Аэрогидродинамика и теплообмен насадочных аппаратов*: Лань-Пресс. 2019. 288с.
3. А.М. Каган, А.Г. Лаптев, А.С. Пушнов, М.И. Фарахов. *Контактные насадки промышленных теплообменников аппаратов*. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
4. М.В. Андреев, И.В. Скачков, А.В. Бальчугов, В.В. Коробкин Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, **326**, 5. 69-76. (2015)
5. И.В. Скачков, А.В. Бальчугов, Т.Н. Мусева Современные технологии. Системный анализ. Моделирование **1(45)**. 63-68. (2015)
6. И.В. Скачков, А.В. Бальчугов Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутский государственный университет путей сообщений. **3(31)** 102-104. (2011).
7. С.В. Карпеев, Н.Н. Маряхин Вестник технологического университета, **25**, 5. 44-49. (2022)
8. И.Н. Мадышев, М.Г. Гарипов, Д.Н. Латыпов и др. Вестник технологического университета, **25**, 1. 41-44. 2022.
9. K.A. Alekseev, S.M. Kirichenko, A.V. Rakov, R.A. Gaifutdinov, M.I. Farakhov, A.G. Laptev, A.N. Volkov, I.E. Sennikov, N.V. Ledneva, A.A. Shchepalov, Chemistry and Technology of Fuels and Oils.. **58**, 2. С 263-270. (2022) DOI: 10.1007/s10553-022-01377-5.
10. Д.И. Мисюля, С.К.Протасов Химическая техника, теплотехника энергосбережения. Труды БГТУ. **3**. 117-120. (2014).
11. М.Г. Беренгартен, М.Г. Пушнов, Промышленные процессы и технологии. **3. 2 (9)**, 51-67. (2023).
12. П.Е. Вайтехович, Д.Ю. Мытько Труды БГТУ. **2. 2**. 44-49. (2020).
13. Н.Н. Маряхин, В.А. Кузнецов, В.В. Бронская Вестник Технологического университета. **25. 5**. 85-88. (2022).
14. В.А. Кузьмин, А.М. Цирлин Вестник Технологического университета. **22. 4**. 134-139.г. (2019).
15. И.Н. Мадышев, М.Г. Гарипов, Д.Н. Латыпов, В.В. Харьков, А.В. Дмитриев. Вестник Технологического университета. **25**, 1. 41-44. 2022.
16. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинулов, О.С. Дмитриева, В.В. Харько в Вестник Технологического университета. **23. 3**. 89-92. (2020).
17. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. *Градири промышленных и энергетических предприятий*. Энергоатомиздат, М.: 1998. 376 с.
18. Лаптев А.Г., Лаптева Е.А. Теплофизика и аэромеханика. **31. 3**. 503-513. (2024).
19. Е.Ю. Столярова, Е.А. Лаптева, А.Г. Лаптев Вестник Казанского государственного энергетического университета. **15. 1 (57)**. 37-47. (2023).
20. М.Г. Беренгартен, М.Г. Лагуткин. *Контактные устройства для градирен*: М: Московский Политех, 2023.с. 132.
21. В.М. Рамм *Абсорбция газов*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: РГБ, 2009 г. 655 с.
22. И.А. Александров, *Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей*. Л.: Химия. Ленингр. отд-ние, 1975. 319 с.
23. A.G. Laptev, E.A. Lapteva, T.M. Farakhov Theoretical Foundations of Chemical Engineering. **49.4**. 388-395. (2015). DOI: 10.1134/S0040579515040296.
24. E.A. Lapteva, A.G. Laptev, Teoretičeskie osnovy himičeskoj tehnologii. **57.4**. 399-407. (2023) DOI: 10.1134/S004057952304036X.
25. A.G. Laptev, E.A. Lapteva, Journal of Engineering Physics and Thermophysics. **95. 1**. 257-265. 2022. DOI: 10.1007/s10891-022-02473-3.
26. Э.Я. Тарат, И.П. Мухленов, А.Ф. Туболкин, Е.С. Тумаркина *Пенный режим и пенные аппараты*. Химия, Л., 1977. 303 с.

References

1. B. A. Sokol, A. K. Chernyshev, D. A. Baranov, M. G. Berengarten, B. V. Levin, *Mass Transfer Column Packings*. M., 2009. 358 p.
2. R. F. Vitkovskaya, A. S. Pushnov, S. Shinkunas, *Aerohydrodynamics and Heat and Mass Transfer of Packed Apparatus*: Lan-Press. 2019. 288 p.
3. A. M. Kagan, A. G. Laptev, A. S. Pushnov, M. I. Farakhov. *Contact Packings of Industrial Heat and Mass Transfer Apparatus*. Kazan: Otechestvo, 2013. 454 p.
4. M. V. Andreenko, I. V. Skachkov, A. V. Balchugov, V. V. Korobkin Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering, **326**, 5. 69-76. (2015).
5. I.V. Skachkov, A.V. Balchugov, T.N. Museva Modern Technologies. System Analysis. Modeling **1(45)**. 63-68. (2015).
6. I.V. Skachkov, A.V. Balchugov Modern technologies. System analysis. Modeling. Irkutsk State Transport University. **3(31)** 102-104. (2011).
7. S.V. Karpeev, N.N. Maryakhin Herald of Technological University, **25**, 5. 44-49. (2022).
8. I.N. Madyshv, M.G. Garipov, D.N. Latypov et al. Herald of Technological University, **25**, 1. 41-44. 2022.
9. K.A. Alekseev, S.M. Kirichenko, A.V. Rakov, R.A. Gaifutdinov, M.I. Farakhov, A.G. Laptev, A.N. Volkov, I.E. Sennikov, N.V. Ledneva, A.A. Shchepalov, Chemistry and Technology of Fuels and Oils.. **58**, 2. pp. 263-270. (2022) DOI: 10.1007/s10553-022-01377-5.
10. D.I. Misulya, S.K. Protasov Chemical engineering, heat engineering, energy saving. Proceedings of BSTU. **3**. 117-120. (2014).
11. M.G. Berengarten, M.G. Pushnov, Industrial processes and technologies. **3. 2 (9)**, 51-67. (2023).
12. P.E. Vaitekhovich, D.Yu. Mytko Proceedings of BSTU. **2. 2**. 44-49. (2020).
13. N.N. Maryakhin, V.A. Kuznetsov, V.V. Bronskaya Herald of Technological University. **25.5**.85-88. (2022).
14. V.A. Kuzmin, A.M. Tsirlin Herald of Technological University. **22. 4**. 134-139. (2019).
15. I.N. Madyshv, M.G. Garipov, D.N. Latypov, V.V. Kharkov, A.V. Dmitriev. Herald of Technological University. **25**, 1. 41-44. 2022.
16. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, V.V. Kharko in the Herald of Technological University. **23.3**.89-92. (2020).
17. Ponomarenko V.S., Arefyev Yu.I. Cooling towers of industrial and energy enterprises. Energoatomizdat, Moscow: 1998. 376 p.
18. Laptev A.G., Lapteva E.A. Thermal physics and aeromechanics. **31. 3**. 503-513. (2024).
19. E.Yu. Stolyarova, E.A. Lapteva, A.G. Laptev Bulletin of Kazan State Power Engineering University. **15. 1 (57)**. 37-47. (2023).
20. M.G. Berengarten, M.G. Lagutkin. *Contact devices for cooling towers*: M: Moscow Polytechnic University, 2023.p. 132.
21. V.M. Ramm *Gas absorption*. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: RGB, 2009, 655 p.

22. I. A. Aleksandrov, *Mass Transfer during Rectification and Absorption of Multicomponent Mixtures*. Leningrad: Chemistry. Leningrad Branch, 1975, 319 p.
23. A. G. Laptev, E. A. Lapteva, T. M. Farakhov *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. **49.4**. 388-395. (2015). DOI: 10.1134/S0040579515040296.
24. E. A. Lapteva, A. G. Laptev, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. **57.4**. 399-407. (2023) DOI: 10.1134/S004057952304036X.
25. A.G. Laptev, E.A. Lapteva, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. **95. 1**. 257-265. 2022. DOI: 10.1007/s10891-022-02473-3.
26. E.Ya. Tarat, I.P. Mukhlenov, A.F. Tubolkin, E.S. *Tumarkin Foam mode and foam devices*. *Chemistry, L.*, 1977. 303 p.

© **А. Г. Лаптев** – док-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭБТ), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Россия, tvt_kgeu@mail.ru; **Е. А. Лаптева** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», КГЭУ), grivka100@mail.ru; **У. О. А. Сеймур** – аспирант кафедры ИЭБТ, КГЭУ, sem_aleskerli@mail.ru.

© **A. G. Laptev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department of Engineering Ecology and Occupational Safety (EEOS), Kazan State Energy University (KSEU), Kazan, Russia, tvt_kgeu@mail.ru; **E. A. Lapteva** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, KSEU), grivka100@mail.ru; **U. O. A. Seymour**– PhD-student of the EEOS department, KSPEU, sem_aleskerli@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 03.02.25.

Дата принятия рукописи в печать – 09.04.25.