

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПАКЕТНЫХ НАСАДОК С ПЛЕНОЧНЫМ И КАПЕЛЬНЫМ ТЕЧЕНИЕМ ЖИДКОСТИ

Э.К. Алиев¹

7298425@gmail.com

В.В. Володин²

vlad@ihed.ras.ru

В.В. Голуб²

golub@ihed.ras.ru

А.Ю. Микушкин^{2, 3}

mikushkin-anton@yandex.ru

Г.Г. Тимербаев¹

timerbaev.g@yandex.ru

О.В. Чагин⁴

chagin@isuct.ru

¹ ООО «ЛИТ - Капитал», Москва, территория Сколково,
Российская Федерация

² ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

⁴ ИГХТУ, Иваново, Российская Федерация

Аннотация

Проведены сравнительные исследования тепломассообменных и гидравлических характеристик двух пакетных насадок, обеспечивающих тепломассообмен контактирующих сред при пленочном течении жидкости и при использовании диспергирования жидкости в объеме газа. Эксперименты проведены в тепломассообменной колонне диаметром 400 мм и высотой насадочного слоя 1 м. Методика расчета аппаратов испарительного охлаждения воды в потоке воздуха адаптирована для получения тепломассообменных характеристик насадочных контактных устройств. Обнаружены особенности влияния плотности орошения и потока газа на тепломассообменные и гидравлические характеристики пакетных насадок, обеспечивающих тепломассообмен контактирующих сред при пленочном и капельном течении жидкости. Предложен критерий оценки эффективности контактных устройств

Ключевые слова

Тепломассообмен, контактное устройство, структурированная насадка, пленочное течение жидкости, капельное течение жидкости

Поступила 18.06.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. Одно из направлений развития современного приборостроения — создание высоко- и энергоэффективных, компактных установок, которые должны отличаться простотой конструкции, высокой технологичностью, широким диапазоном параметров устойчивой работы и надежностью в эксплуатации [1]. Использование более высокой скорости

газовой фазы позволяет уменьшить размер поперечного сечения аппарата, а применение контактных устройств (КУ) с малыми высотами единицы переноса (ВЕП) — и вертикальный размер аппарата. Применение КУ с меньшим гидравлическим сопротивлением при сохранении высокой эффективности работы позволяет снизить гидравлические потери на аппарате, а следовательно, мощность насосов и компрессоров [2].

Наиболее полно этим требованиям отвечают структурированные пакетные насадки, характеризующиеся развитой поверхностью контакта фаз, более высокой скоростью движения газовой фазы и более устойчивым противоточным режимом работы, по сравнению с другими видами насадок. Такие насадки разнообразны по конструкции и применяемому материалу, имеют высокую эффективность, хорошие массовые характеристики, однако с увеличением диаметра колонны их эффективность обычно резко снижается. Кроме того, их стоимость выше стоимости тарельчатых насадок [3].

В большинстве современных пакетных насадок процесс теплообмена осуществляется за счет большой площади поверхности насадки, на которой происходит пленочное течение жидкости. Для этого используются пористые, сетчатые, текстурированные и подобные материалы с большой удельной поверхностью. Например, у пакетных насадок фирмы «Зульцер» в объеме 1 м^3 площадь контакта (общая поверхность насадки) может достигать 750 м^2 и более.

При огромном разнообразии контактных устройств необходимо определить те критерии сравнения, по которым будет проводиться выбор. При выборе того или иного типа КУ учитывают такие показатели, как:

- производительность — пропускная способность, ограничиваемая режимом «захлебывания» КУ, характеризующимся высоким перепадом давления и каплеуносом;
- ВЕП для насадочных КУ;
- эффективность при разных рабочих нагрузках;
- диапазон рабочих нагрузок при высокой эффективности;
- гидравлическое сопротивление КУ (перепад давления на КУ) в диапазоне рабочих нагрузок;
- склонность КУ к засорению и к отложениям из жидкой и газовой фаз;
- распределение или контракция жидкостных и газовых потоков на насадке;
- простота конструкции, проявляющаяся в технологичности изготовления, монтажа и ремонта;
- металлоемкость.

Комплекс этих показателей определяет массогабаритные, энергетические, экономические характеристики насадочных колонн и в итоге инвестиционные и эксплуатационные затраты всего производственного цикла, например, процесса ректификации.

В работе проведено сравнение тепломассообменных и гидравлических характеристик двух пакетных насадок, обеспечивающих тепломассообмен контактирующих сред при пленочном течении жидкости (*Mel-lapak 250.X*) и при диспергировании жидкости в объеме газа (ПВН.22).

Экспериментальная установка. Для определения гидравлических и тепломассообменных характеристик насадок в лабораторных условиях создана экспериментальная установка (рис. 1), в которой использованы неагрессивные, неядовитые и негорючие газы и жидкости.

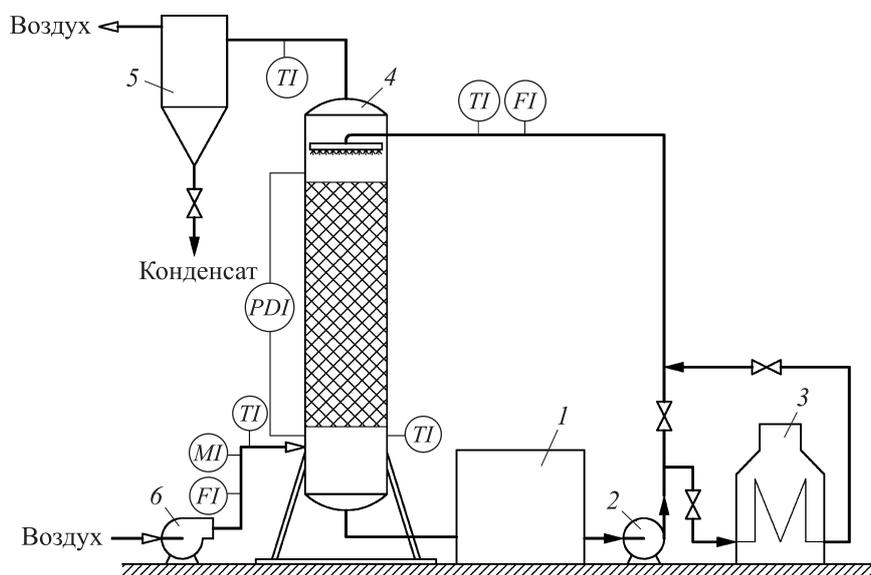


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из колонного аппарата с насадкой, емкости для жидкости, электрического нагревателя жидкости, жидкостного насоса, распределителя жидкости, нагнетателя воздуха, каплеотбойника, комплекса контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА). В целях визуального контроля процессов колонна выполнена из прозрачного стекла. Диапазон значений температуры жидкости и газа 20...60 °С, давление в колонне атмосферное, перепад давления на насадке до 4 кПа.

Вода из емкости 1 насосом 2 подается в электронагреватель 3, а затем на орошение в абсорбционную колонну 4, вниз колонны вентилятором 6 пода-

ется воздух. Вода самотеком проходит сквозь объем насадки и попадает в емкость 1, воздух проходит сквозь объем насадки противотоком и через каплеотбойник 5 сбрасывается в атмосферу. В результате контакта воды и воздуха в исследуемой насадке происходит процесс тепломассообмена, параметры которого регистрируются измерительными приборами.

В процессе экспериментов измеряются необходимые для расчета параметры: расход воды на входе в колонну (G_{L1}); расход воздуха на входе в колонну (G_{G1}); температура воды на входе и выходе из колонны (t_1, t_2); температура воздуха на входе и выходе из колонны (θ_1, θ_2); относительная влажность воздуха на входе в колонну (φ_1).

Методика обработки экспериментальных данных. Методики расчета аппаратов испарительного охлаждения приведены в работе [4]. В рассматриваемом случае задача обратная — исходя из измеренных значений расходов фаз и температуры, необходимо получить тепломассообменные характеристики КУ.

На входе — воздух с объемным расходом G_{G1}^V при температуре θ_1 влажностью φ_1 . Плотность влажного воздуха определяется из соотношения удельных объемов сухого воздуха и водяного пара:

$$\rho_G = \frac{M_B (p_n - \varphi p_{\theta}^{\prime\prime})}{\mathcal{R} (\theta + 273, 2)} + \frac{M_{H_2O} \varphi p_{\theta}^{\prime\prime}}{\mathcal{R} (\theta + 273, 2)},$$

где M_B, M_{H_2O} — молярная масса воздуха и воды; p_n — давление при нормальных условиях; φ — относительная влажность газа; $p_{\theta}^{\prime\prime}$ — давление насыщенного пара; \mathcal{R} — универсальная газовая постоянная, $\mathcal{R} = 8,31$ Дж/(моль·К); θ — температура газа.

Массовый расход влажного воздуха — произведение объемного расхода и плотности:

$$G_{G1} = G_{G1}^V \left(\frac{M_B (p_b - \varphi p_{\theta}^{\prime\prime})}{\mathcal{R} (\theta + 273, 2)} + \frac{M_{H_2O} \varphi p_{\theta}^{\prime\prime}}{\mathcal{R} (\theta + 273, 2)} \right),$$

где p_b — давление в нижней части колонны.

Влагосодержание рассчитывается по формуле [5]:

$$x = \frac{M_{H_2O}}{M_B} \frac{\varphi p_{\theta}^{\prime\prime}}{p_b - \varphi p_{\theta}^{\prime\prime}}.$$

Давление насыщенного водяного пара определяется по формуле Бака [6]:

$$p_0'' = p_0'' \exp\left(\frac{\theta}{257,14 + \theta} \left(18,678 - \frac{\theta}{234,5}\right)\right), \quad p_0'' = 611 \text{ Па.}$$

В $1 + x$ килограммах влажного воздуха содержится 1 кг сухого воздуха и x кг водяного пара. Массовый расход сухого воздуха на входе

$$G_{G1}^c = \frac{G_{G1}}{1 + x_1}.$$

Поскольку абсорбция/десорбция воздуха в воде пренебрежимо мала в условиях эксперимента, значения расхода сухого воздуха на входе и выходе слоя равны, тогда

$$G_{G2}^c = \frac{G_{G2}}{1 + x_2} = G_{G1}^c; \quad G_{G2} = G_{G1} \frac{1 + x_2}{1 + x_1}.$$

Разность массовых расходов газа на выходе и входе — пары воды, испарившейся из жидкой фазы, соответственно массовый расход жидкости уменьшается на эту разность: $G_{L2} = G_{L1} + G_{G1} - G_{G2}$.

Подставляя уравнение массового расхода влажного воздуха на выходе, получаем

$$G_{L2} = G_{L1} + G_{G1} \frac{x_1 - x_2}{1 + x_1}.$$

Передача энергии от воды воздуху происходит за счет теплоотдачи и испарения воды. На входе имеем G_{L1} воды при температуре t_1 , на выходе — G_{L2} воды при температуре t_2 .

Энергия, отданная водой за единицу времени:

$$\frac{dQ}{d\tau} = G_{L1}c_L t_1 - G_{L2}c_L t_2.$$

Здесь Q — энергия; τ — время; c_L — удельная теплоемкость жидкости.

Энергия, принятая воздухом за единицу времени:

$$\frac{dQ}{d\tau} = G_{G2}i_2 - G_{G1}i_1,$$

где i — удельная энтальпия.

Энтальпия влажного воздуха рассчитывается по формуле $i = 1007\theta + (2493000 + 1970\theta)x$ [5].

Испарение происходит с поверхности воды, таким образом, сопротивлением среды теплопереносу со стороны жидкости можно пренебречь, теплоперенос определяется сопротивлением в газовой фазе. Обь-

емный коэффициент теплоотдачи равен отношению передаваемой мощности к значению движущей силы и объему насадки V :

$$\alpha = \frac{dQ}{dt} \frac{c_G}{\Delta i_{cp} V}.$$

Движущие силы процесса — разность значений температур и разность влагосодержаний воздуха вблизи поверхности жидкости и в объеме газа, которые учитываются как средняя разность энтальпий влажного воздуха по высоте насадочного слоя [4].

В верхней части колонны вода имеет температуру t_1 , воздух — влажность φ_2 и температуру θ_2 , в нижней части колонны температура воды t_2 , температура воздуха θ_1 , влажность φ_1 . В верхней части колонны разность энтальпий $\Delta i_t = i_1'' - i_2$, где $i_2 = 1007\theta_2 + (2493000 + 1970\theta_2)x_2$; $i_1'' = 1007t_1 + (2493000 + 1970t_1)x_1''$.

В нижней части колонны разность энтальпий $\Delta i_b = i_2'' - i_1$, где $i_1 = 1007\theta_1 + (2493000 + 1970\theta_1)x_1$; $i_2'' = 1007t_2 + (2493000 + 1970t_2)x_2''$.

Для получения среднего значения движущей силы при встречном движении сред в теплотехнике применяется среднее логарифмическое [4]:

$$\Delta i_{cp} = \frac{(i_1'' - i_2) - (i_2'' - i_1)}{\ln((i_1'' - i_2)/(i_2'' - i_1))}.$$

Коэффициенты тепло- и массоотдачи можно связать в соответствии с аналогией Льюиса [7]:

$$\frac{\alpha_{GV}}{\beta_{GV}} = c_G; \quad \beta = \frac{\alpha}{c_G}.$$

Высота единицы переноса связана с объемным коэффициентом массопередачи формулой

$$\text{ВЕП} = \frac{G_{G1}}{\beta \rho S},$$

где ρ — плотность; S — площадь поперечного сечения колонны.

Высота единицы переноса соответствует высоте аппарата, эквивалентного одной единице переноса, эта величина обратно пропорциональна объемному коэффициенту массопередачи. Следовательно, чем выше интенсивность массопередачи в аппарате, тем меньше в нем значение ВЕП.

В описании тепломассообменных аппаратов поток жидкой фазы принято указывать в виде плотности орошения: $U_L = G_{L1}/(\rho_L S)$, ρ_L —

плотность жидкости. Поток газа представляется в виде F -фактора: $F = U_G \sqrt{\rho_G}$, где U_G — скорость газа; ρ_G — плотность газа.

Высота единицы переноса характеризует эффективность тепломассообмена контактного устройства и соответствует высоте участка, на котором изменение контролируемого параметра равно движущей силе процесса.

Критерий эффективности контактного устройства. При выборе контактного устройства и параметров конкретного аппарата требуется обеспечение заданного числа единиц переноса при известных потоках сырья через аппарат. Поэтому целесообразно ввести критерий (удельную силу разделения), связывающий высоту аппарата, площадь его поперечного сечения и материалоемкость КУ [8]:

$$SP_{уд} = \frac{F}{\text{ВЕПа}} = \frac{\beta S U_{G1} \sqrt{\rho_G}}{a G_{G1}},$$

где a — удельная площадь насадки. В представленном критерии скорость газового потока через колонну тем выше, чем меньше площадь поперечного сечения колонны, чем ниже ВЕП, тем меньше высота слоя КУ, чем меньше удельная площадь используемого КУ, тем меньше масса металла в единице объема. Таким образом, величина $SP_{уд}$ обратно пропорциональна массе КУ, необходимой для проведения процесса с заданной глубиной при заданном потоке газа.

Погрешность рассчитываемых величин складывается из погрешностей измерения перепада давления, температуры, объемного расхода и влажности. Перепад давления измеряется дифференциальным манометром ПД-150 0,25 класса точности. Относительная погрешность в диапазоне измеряемых перепадов давления составляет 2,5 %. Для измерения влажности воздуха применяется преобразователь ПВТ-100, обеспечивающий измерение с относительной погрешностью 2,5 %. Для измерения температуры используются термосопротивления ДТС-1455 с абсолютной погрешностью измерения 0,15 °С, что при измеряемых перепадах значений температуры соответствует относительной погрешности 3 %. Расход воды измеряется турбинным расходомером ВСХНД-65 с относительной погрешностью 2 % на рабочих режимах. Расход воздуха измеряется датчиком объемного расхода *DPT-FLOW-1000-AZ-D* с относительной погрешностью 1,5 %. Таким образом, относительные погрешности составляют: плотность орошения 2 %, F -фактор 1,6 %, погонный перепад давления 2,5 %, ВЕП 4,7 %.

Тестируемые насадки. В качестве образцовой насадки с пленочным течением жидкости выбрана пакетная насадка *Mellapak 250.X* фирмы «Зульцер» (рис. 2, *a*) [9]. Такие насадки достаточно широко применяются в современной промышленности для массообменных процессов. Тепло-массообменные процессы происходят между газовым потоком, движущимся по наклонным каналам, и пленкой жидкости, стекающей по стенкам данных каналов. Для увеличения межфазной поверхности и перераспределения пленки жидкости по поверхности эта насадка имеет текстурированную поверхность. Как правило, скорость газового потока не превышает 3 м/с, плотность орошения изменяется в пределах 5...200 м³/(м²·ч), а удельная площадь данной насадки составляет 250 м²/м³. В рабочем диапазоне расходов фаз насадка работает в пленочном режиме. Это приводит к тому, что межфазная поверхность взаимодействия близка к физической поверхности насадки. При малых плотностях орошения насадка требует применения оросителя сложной конструкции и не менее сложного перераспределителя жидкости. Высота насадочного слоя пакетной насадки *Mellapak 250.X* при экспериментальных исследованиях составляла 1000 мм.

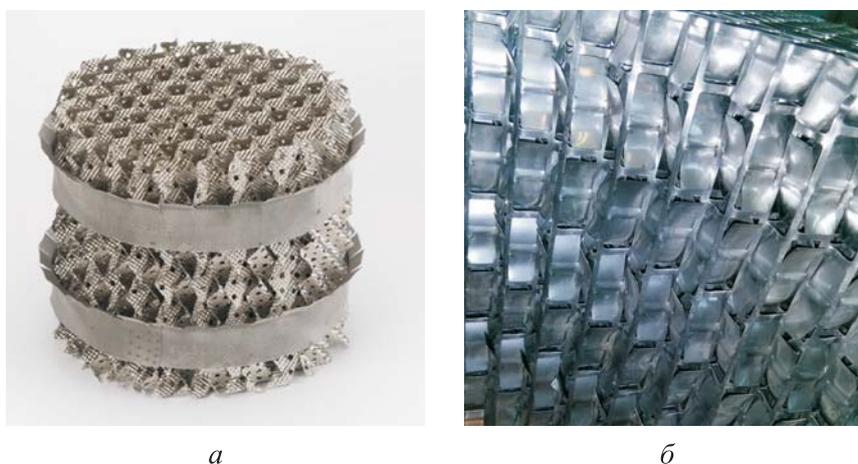


Рис. 2. Тестируемые насадки *Mellapak 250.X* (*a*) и ПВН.22 (*б*)

В качестве насадки с капельным течением жидкости выбрана насадка ПВН.22 (рис. 2, *б*) с удельной площадью 182 м²/м³. В отличие от пакетных насадок с пленочным течением жидкости эта насадка состоит из каналов, снабженных криволинейными отклоняющими поверхностями, способствующими развитию крупных вихревых структур в потоке газа, и окнами для перетекания, распределяющими потоки жидкости и газа между

соседними каналами. Течение газа вдоль криволинейных отклоняющих элементов приводит к образованию крупных вихрей и характеризуется значительными сдвиговыми скоростями, которые приводят к развитию неустойчивости волн Толлмина — Шлихтинга [10] на поверхности пленки жидкости, что вызывает переход к турбулентности в пограничном слое и последующее диспергирование жидкости в объеме газа. Высокие значения площади межфазной поверхности и скорости обтекания поверхности капель характеризуются интенсивным тепломассообменом. Таким образом, эффективная межфазная поверхность взаимодействия превышает физическую поверхность этой насадки. На выходе из ячейки жидкость, диспергированная в потоке газа, при тангенциальном обтекании вогнутой поверхности отклоняющего элемента осаждается на стенке. Происходит «циклонирование» жидкости из газового потока. При переходе в следующий слой ячеек (для газа — верхний, для жидкости — нижний) потоки жидкости и газа разделяются на входе и выходе из исходной ячейки на равные части, тем самым достигается равномерность потоков жидкости и газа по диаметру аппарата. Поскольку гидравлические сопротивления ячеек в пакете равны, газовая среда также распределяется по ячейкам одинаково и явления, которые протекают в одной ячейке, характерны для всех других ячеек в пакете.

Экспериментальные результаты. Эксперименты проводились при значениях плотности орошения $25 \dots 175 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Диапазон расходов газа выбирался из расчета F -фактора от $0,5 \text{ Па}^{0,5}$ до предельного значения, соответствующего режиму «захлебывания» насадки. Из измеренных величин рассчитывались погонный перепад давления и ВЕП.

Зависимости, представленные на рис. 3, демонстрируют плавный рост перепада давления на насадках *Mellapak 250.X* и ПВН.22 при плотности орошения $25 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ с увеличением потока газа до $3 \text{ Па}^{0,5}$. При этом значение погонного перепада давления достигает $0,2 \text{ кПа/м}$. При дальнейшем увеличении потока газа насадка *Mellapak 250.X* демонстрирует резкое повышение перепада давления до значений, превышающих 1 кПа/м , что соответствует режиму «захлебывания» в то время, как насадка ПВН.22 показывает перепад давления $0,3 \text{ кПа/м}$ при потоке газа $3,75 \text{ Па}^{0,5}$, т. е. режим течения остается рабочим. С повышением плотности орошения значение погонного перепада давления монотонно увеличивается на обеих насадках. При плотности орошения $125 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и более рабочий диапазон потоков газа для насадки ПВН.22 в 2 раза превышает таковой для насадки *Mellapak 250.X*.

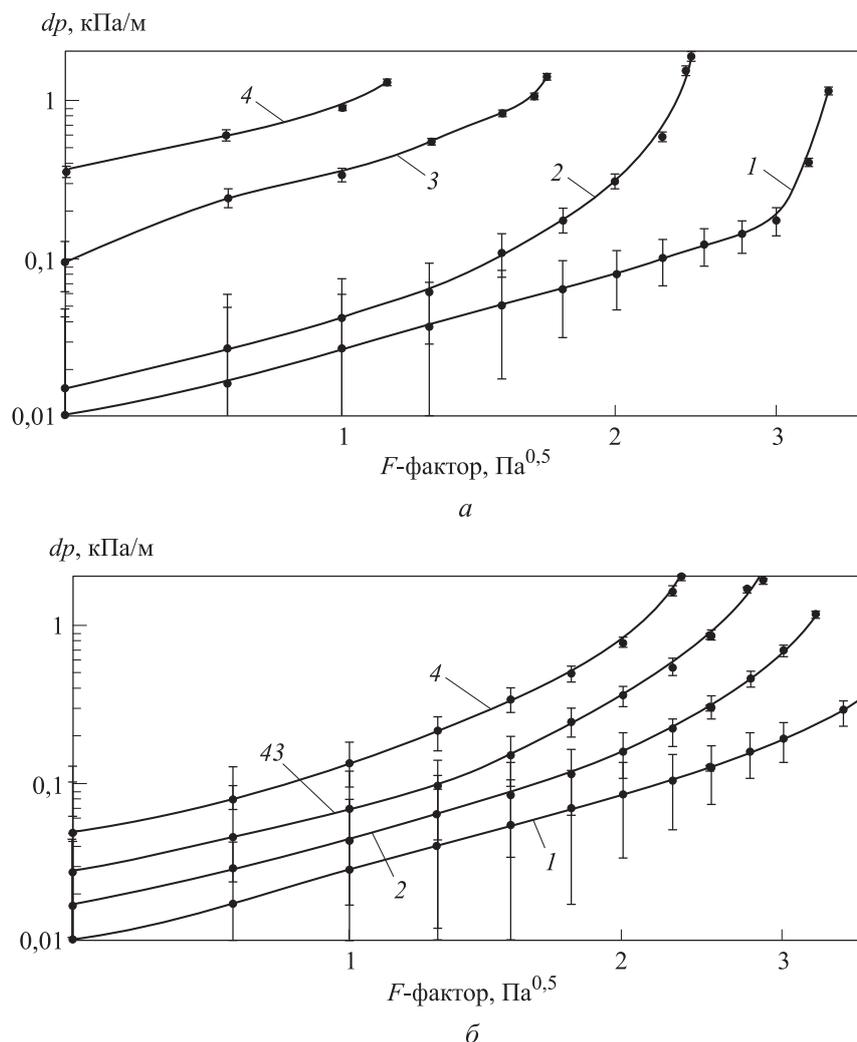


Рис. 3. Зависимости погонного перепада давления от потока газа насадок *Mellapak 250.X* (а) и ПВН.22 (б) при значениях плотности орошения 25 (1), 75 (2), 125 (3) и 175 м³/(м²·ч) (4)

Тепломассообменные характеристики КУ можно определить параметром ВЕП. При малых значениях плотности орошения обе насадки демонстрируют удовлетворительные характеристики при потоках газа до 2 Па^{0,5} (рис. 4). При дальнейшем увеличении потока газа значения ВЕП возрастают до 1 м и более. При повышении плотности орошения до значений 75...175 м³/(м²·ч) значения ВЕП насадки *Mellapak 250.X* монотонно снижаются с 0,6 м до менее чем 0,4 м с повышением расхода газа вплоть до «захлебывания». Режимы вблизи «захлебывания» характеризуются повышенным каплеуносом с насадки *Mellapak 250.X*, поэтому практического интереса такие режимы не представляют.

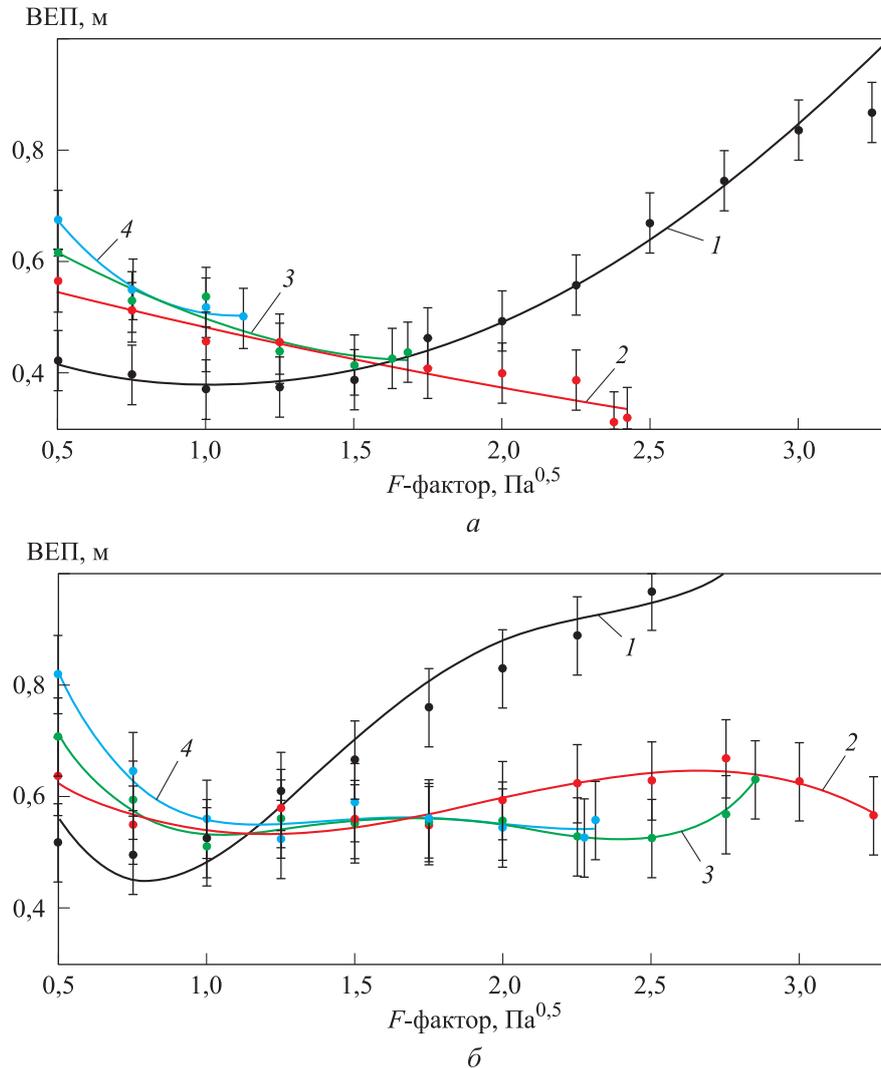


Рис. 4. Зависимости ВЕП от потока газа через насадки *Mellapak 250.X* (а) и ПВН.22 (б) при значениях плотности орошения 25 (1), 75 (2), 125 (3) и 175 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{ч})$ (4)

Повышение плотности орошения на насадке ПВН.22 при малых потоках газа приводит к ухудшению тепломассообменных характеристик и увеличению значения ВЕП до 0,8 м. С повышением потока газа ВЕП снижается и держится в пределах 0,5...0,6 м до предельных нагрузок по газу.

При малых значениях F -фактора (до $1 \text{ Pa}^{0.5}$) поверхность насадки орошается жидкостью, которая проходит весь насадочный пакет в виде смачивающей пленки, так как напор газа недостаточен для срыва капель жидкости с поверхности насадки. Число Рейнольдса не превышает 1500, течение газовой фазы в элементах насадки ламинарное. По мере увеличе-

ния скорости газа поток газа турбулизуется и диспергирует жидкость. Эффективная поверхность взаимодействия фаз и конвективный перенос в газовой фазе интенсифицируются.

В общем случае диспергирование жидкости газом определяется соотношением чисел Вебера и Рейнольдса. Число Вебера

$$We = \frac{\rho_L L U_G^2}{\sigma}$$

рассчитывается для объема жидкости на стенке ячейки насадки, обдуваемого потоком влажного воздуха в ячейке. Здесь L — характерный размер ячейки; σ — коэффициент поверхностного натяжения. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho_G L U_G}{\eta_G}$$

вычисляется для потока газа (влажного воздуха) в ячейке насадки, обдувающего объем жидкости на стенке ячейки. Здесь η_G — динамическая вязкость среды.

Различают три режима диспергирования:

- 1) капельный $We < 1,74 \cdot 10^4 / Re^{0,5}$;
- 2) волновой $1,74 \cdot 10^4 / Re^{0,5} < We < 4 \cdot 10^4 / Re^{0,5}$;
- 3) распылительный $4 \cdot 10^4 / Re^{0,5} < We$ [11].

Граничные значения чисел Вебера и Рейнольдса, при которых диспергирования не происходит, в литературе не представлены. В общем случае значения чисел Вебера и Рейнольдса меняются по высоте насадочного слоя вследствие изменения температуры, плотности, вязкости, поверхностного натяжения, массовых и объемных расходов сред. Соответственно меняются режимы диспергирования жидкости.

Изложенное выше справедливо и для насадки с пленочным течением жидкости, но интенсификация обменных процессов в ней достигается за счет значительного перепада давления. Для определения баланса между затратами на прокачку газа через насадку и получаемых значений обменных характеристик имеет смысл сравнивать значения удельной силы разделения от погонного перепада давления исследуемых насадок.

Зависимости удельной силы разделения от погонного перепада давления (рис. 5) характеризуют соотношение гидравлического сопротивления и удельной эффективности КУ. При плотности орошения $25 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ удельная сила разделения насадок *Mellapak 250.X* и ПВН.22 различается в пределах погрешности при погонных перепадах давления до 0,15 кПа/м.

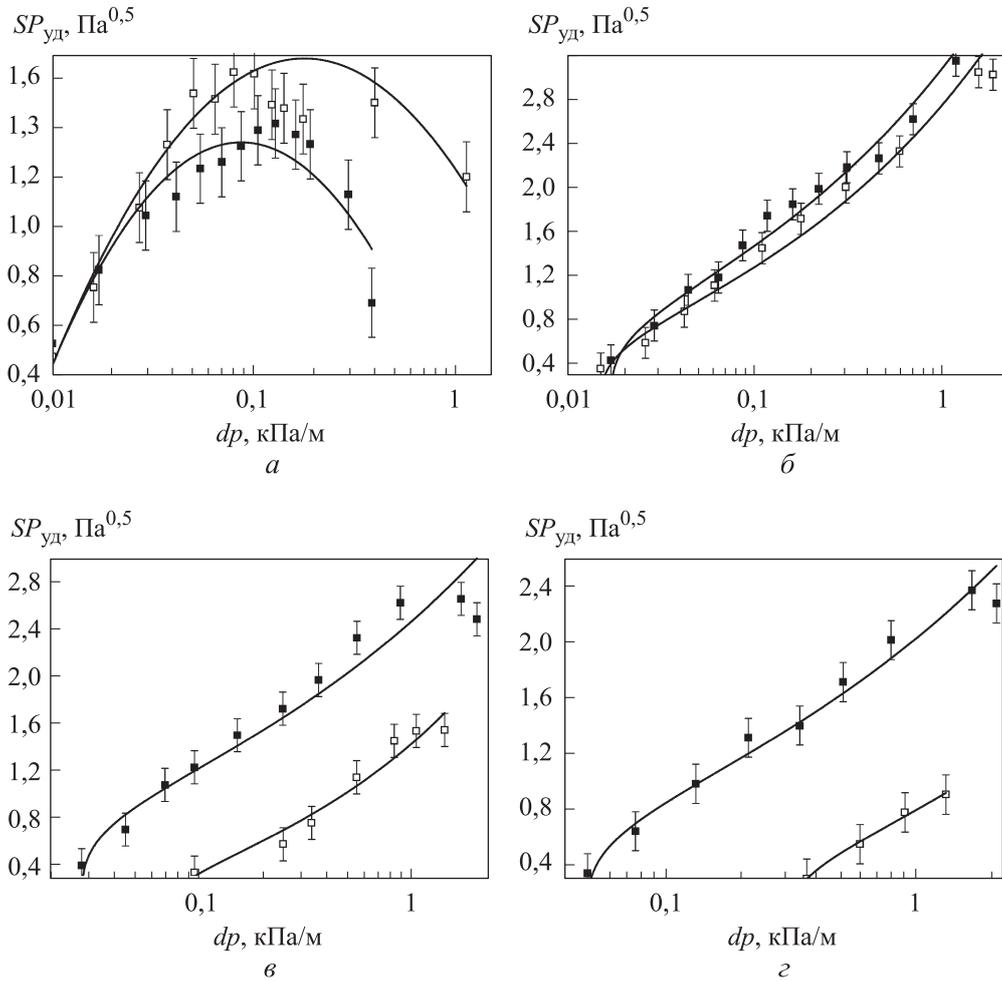


Рис. 5. Зависимости удельной силы разделения от погонного перепада давления насадок *Mellapak 250.X* (1) и ПВН.22 (2) при значениях плотности орошения 25 (а), 75 (б), 125 (в) и 175 $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (г)

При повышении скорости газового потока обе насадки показывают ухудшение теплообменных характеристик, при этом насадка ПВН.22 имеет более низкие характеристики, чем насадка *Mellapak 250.X* на данном «перекошенном» режиме.

На режимах с плотностью орошения 75 $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ удельная сила разделения насадок *Mellapak 250.X* и ПВН.22 при одинаковых значениях погонного перепада давления становится близка во всем диапазоне значений потока газа. При значениях плотности орошения 125 и 175 $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ насадка ПВН.22 обладает удельной силой разделения, в 2 раза превышающей удельную силу разделения насадки *Mellapak 250.X* при том же значении погонного перепада давления.

Заключение. Отработана и реализована на экспериментальной колонне диаметром 400 мм методика измерения гидравлических и тепло-массообменных характеристик насадочных КУ, основанная на испарительном охлаждении воды воздухом. Методика расчета характеристик аппаратов испарительного охлаждения адаптирована для получения тепло-массообменных характеристик КУ по измеренным значениям расходов фаз и температуры.

Экспериментально определены значения потоков газа и жидкости через КУ с пленочным и капельным течением жидкости, при которых происходит «захлебывание» насадки. При минимальном значении плотности орошения $25 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ КУ с капельным течением жидкости «захлебываются» при потоке воздуха $3,5 \text{ Па}^{0,5}$. Контактные устройства с пленочным течением жидкости при том же значении плотности орошения «захлебываются» при потоке воздуха $3 \text{ Па}^{0,5}$. С увеличением плотности орошения до $175 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ порог «захлебывания» составляет $2,31 \text{ Па}^{0,5}$ для КУ с капельным течением жидкости и $1,125 \text{ Па}^{0,5}$ с пленочным течением жидкости.

Предложен критерий эффективности КУ, сочетающий зависимость тепло-массообменных характеристик от скорости потока газа, перепад давления и металлоемкость КУ. Величина критерия обратно пропорциональна массе КУ, необходимой для проведения процесса с заданной глубиной при заданном потоке газа.

При значениях плотности орошения $25 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и высоких значениях потока газа в исследованных КУ снижается удельная сила разделения с повышением погонного перепада давления более $0,15 \text{ кПа/м}$, причем значение удельной силы разделения у КУ с капельным течением жидкости уменьшается быстрее, чем у КУ с пленочным течением жидкости.

При значениях плотности орошения $75 \dots 175 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и различных значениях потока газа КУ с капельным течением жидкости по комплексным массообменным характеристикам превосходит КУ с пленочным течением жидкости в 2 раза при лучших гидравлических характеристиках.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Леонтьев В.С. Инновации в области разработки высокоинтенсивных массообменных устройств для модернизации ректификационных комплексов. *Нефтегазовое дело*, 2012, № 1, с. 178–186.
- [2] Фарахов Т.М., Башаров М.М., Шигапов И.М. Гидравлические характеристики новых высокоэффективных нерегулярных тепло-массообменных насадок. *Нефтегазовое дело*, 2011, № 2, с. 192–207.

- [3] Музафарова А.Р., Емельянычева Е.А. Классификация, основные требования и конструктивные особенности современных насадочных контактных устройств. *Вестник технологического университета*, 2016, т. 19, № 2, с. 63–67.
- [4] Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. М., Госэнергоиздат, 1949.
- [5] Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. М., Химия, 1966.
- [6] Buck A.L. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *AMS*, 1981, vol. 20, pp. 1527–1532.
DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1981\)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2)
- [7] Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцев Б.Т. и др. Тепло- и массообмен. Тепло-технический эксперимент. М., Энергоиздат, 1982.
- [8] Spiegel L., Meier W. Distillation columns with structured packings in the next decade. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2003, vol. 81, iss. 1, pp. 39–47.
DOI: <https://doi.org/10.1205/026387603321158177>
- [9] Structured packings for distillation, absorption and reactive distillation. Sulzer, 2012.
URL: http://web.ist.utl.pt/ist11061/de/Equipamento/Structured_Packings.pdf
- [10] Бойко А.В., Довгаль А.В., Козлов В.В. Неустойчивость отрывного течения за двумерными элементами неровности поверхности в низкоскоростном воздушном потоке (обзор). *Теплофизика и аэромеханика*, 2017, № 2, с. 171–178.
- [11] Шалай В.В., Корнеев С.А., Дубонос А.П. и др. Математическое описание тепломассообменных процессов в системе термического обезвреживания остатков ракетного топлива. *ОНВ*, 2000, т. 13, с. 101–106.

Алиев Эльдар Курбанович — генеральный директор ООО «ЛИТ - Капитал» (Российская Федерация, 143026, Москва, территория Сколково, ул. Нобеля, д. 7, оф. 47).

Володин Владислав Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории нестационарных газодинамических процессов ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).

Голуб Виктор Владимирович — д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории нестационарных газодинамических процессов ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).

Микушкин Антон Юрьевич — научный сотрудник лаборатории нестационарных газодинамических процессов ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2), ассистент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Тимербаев Газизьян Гальмьянович — руководитель проектов ООО «ЛИТ - Капитал» (Российская Федерация, 143026, Москва, территория Сколково, ул. Нобеля, д. 7, оф. 47).

Чагин Олег Вячеславович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» ИГХТУ (Российская Федерация, 153000, Иваново, Шереметевский пр-т, д. 7).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алиев Э.К., Володин В.В., Голуб В.В. и др. Сравнительные тепло- и массообменные испытания пакетных насадок с пленочным и капельным течением жидкости. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 4, с. 4–21. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-4-4-21

**COMPARATIVE HEAT AND MASS TRANSFER TESTS
OF STRUCTURED PACKINGS WITH FILM
AND DROPLET FLOW**

E.K. Aliev¹

7298425@gmail.com

V.V. Volodin²

vlad@ihed.ras.ru

V.V. Golub²

golub@ihed.ras.ru

A.Yu. Mikushkin^{2,3}

mikushkin-anton@yandex.ru

G.G. Timerbaev¹

timerbaev.g@yandex.ru

O.V. Chagin⁴

chagin@isuct.ru

¹ LLC “Laboratory of Innovative Technologies - Capital”,
Moscow, Russian Federation

² Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

⁴ Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation

Abstract

The paper focuses on comparative studies of heat and mass transfer and hydraulic characteristics of two structured packings which provide heat and mass transfer of contacting media in the film flow of liquid Mellapak 250.X and with fluid dispersion in the gas volume PVN.22. The experiments were carried out in a heat-mass exchange column of 400 mm in diameter and of 1 m in height of a packed bed. The method of evaporative cooling of water in the air flow was adapted to obtain heat and mass exchange characteristics of packed contact devices. Findings of research show the effect of irrigation density and gas flow on heat and mass transfer and hydraulic characteristics of packings which provide heat and mass transfer of contacting media in film and droplet flows. A criterion for estimating the efficiency of contact devices is proposed

Keywords

Heat-mass exchange, contact device, structured packing, film flow, droplet flow

Received 18.06.2018

© Author(s), 2019

Golub V.V. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Leading Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Mikushkin A.Yu. — Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation); Assist. Lecturer, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Timerbaev G.G. — Project Manager, LLC “Laboratory of Innovative Technologies - Capital” (Nobel ul. 7, office 47, Moscow, Skolkovo Innovation Center Territory, 143026 Russian Federation).

Chagin O.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assist. Professor, Department of Machines and Apparatuses of Chemical Production, Ivanovo State University of Chemistry and Technology (Sheremetevskii prospekt 7, Ivanovo, 153000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aliev E.K., Volodin V.V., Golub V.V., et al. Comparative heat and mass transfer tests of structured packings with film and droplet flow. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 4, pp. 4–21 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2019-4-4-21