

УДК 66.015.23

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ БАРБОТАЖНОЙ ТАРЕЛКИ

© *Н.А. Войнов**, *А.С. Фролов*, *А.В. Богаткова*, *Д.А. Земцов*, *О.П. Жукова*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, 660037 (Россия), e-mail: n.a.voinov@mail.ru

Представлены результаты исследования гидродинамики и массообмена на тарелках барботажного типа с клапанными, клапанно-вихревыми и вихревыми контактными устройствами. Путем экспериментальных исследований и численного моделирования определены поля скоростей жидкости и газа, а также структура газожидкостного слоя на тарелке. Получена зависимость относительной амплитуды колебаний уровня газожидкостного слоя на тарелке от расхода газа при размещении на ней различных типов контактных устройств. Определен среднеповерхностный диаметр пузырьков газа и предложен механизм их накопления в жидкости на тарелке. Подтверждена связь между скоростью циркуляции жидкости на тарелке и размерами пузырьков газа, увлекаемых циркуляционным потоком. Проведено измерение перепада давления исследуемых контактных устройств и определена величина коэффициента гидравлического сопротивления. Представлены экспериментальные данные интенсивности массоотдачи и эффективности на тарелке. Установлены удельные расходы жидкости, обеспечивающие высокую эффективность.

Показано, что наибольшей эффективностью, пропускной способностью по жидкости и газу обладают тарелки с вихревыми контактными устройствами, обладающие низкой амплитудой колебания газо-жидкостного слоя и большой межфазной поверхностью. Это обусловлено увеличением диссипации энергии газовых струй в жидкости на тарелке, равномерным распределением пузырьков газа и наличием вращательного движения среды.

Ключевые слова: клапанные устройства, вихревая тарелка, моделирование, поля скоростей, коэффициент сопротивления, диаметр пузырька, межфазная поверхность, коэффициент массоотдачи, эффективность.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» (Номер темы FEFE-2020-0016).

Введение

Массообменные газожидкостные аппараты широко используются в технологиях переработки биомассы растительного сырья в качестве абсорберов, ректификационных колонн, скрубберов, экстракторов. Поверхность контакта газа (пара) с жидкостью в аппаратах в основном обеспечивается контактными тарелками барботажного типа, такими как ситчатые, колпачковые, чешуйчатые, клапанные и вихревые. Ситчатые

Войнов Николай Александрович – профессор института химических технологий, доктор технических наук, e-mail: n.a.voinov@mail.ru

Фролов Александр Сергеевич – доцент кафедры электротехники и электроники, кандидат технических наук, e-mail: frolov-a84@mail.ru

Богаткова Анастасия Викторовна – аспирант, e-mail: sonchic.sveta@yandex.ru

Земцов Денис Андреевич – старший преподаватель, кандидат технических наук, e-mail: zemcovda@sibsau.ru

Жукова Ольга Петровна – доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, кандидат технических наук, e-mail: zhukovolga@yandex.ru

тарелки [1] в настоящее время не используются в производстве ввиду того, что они создают неравномерное распределение жидкости на полотне тарелки. Тарелки чешуйчатого типа [2] оказались недолговечными в эксплуатации вследствие износа чешуек при их чистке и сложности их восстановления. Тарелки с подвижными [3] и фиксированными клапанами [4] целесообразно использовать для разделения сред, не дающих отложений, и эффективны они только в области малых нагрузок по

* Автор, с которым следует вести переписку.

пару (газу). Наибольшее распространение, несмотря на высокую металлоемкость, получили тарелки колпачкового типа. Основным достоинством таких устройств является высокая надежность, возможность осуществления механической очистки от накипи и отложений. Однако ввиду низкой эффективности и производительности по газу и жидкости, такие установки отличают большие габариты и высокая металлоемкость. К основным недостаткам барботажных тарелок с вышеперечисленными устройствами можно отнести тот факт, что они не обеспечивают дробление струй газа, выходящих из контактных устройств, на отдельные пузырьки. Это порождает пульсации газожидкостного слоя на полотне тарелки, унос жидкости, образование застойных зон, низкую диссипацию потока газа в жидкость и низкую межфазную поверхность.

Нам представляется, что одним из перспективных путей совершенствования барботажных тарелок является создание вихревых высокоскоростных потоков газа (пара) на выходе из контактных устройств. В этом плане предложены клапанно-вихревые [5, 6], а также вихревые тарелки [7, 8].

Следует отметить, что моделирование барботажных тарелок [9–11] в основном направлено на исследование движения жидкости от переточного устройства до сливной планки без учета циркуляционных потоков жидкости, вызванных струями газа, выходящими из каналов контактных устройств. Это не позволяет получить реальную картину взаимодействия фаз на тарелке и требует дальнейших исследований с применением различных моделей численного расчета.

Цель данной работы – экспериментальное исследование и численное моделирование параметров газожидкостного потока на тарелке барботажного типа с контактными устройствами различной конструкции.

Экспериментальная часть

Исследованные контактные устройства, которые размещались на полотне тарелки, представлены на рисунке 1.

Схема стенда для исследования гидродинамики и массообмена представлена в работе [12]. Цилиндрический корпус тарелки диаметром 0.3 м был выполнен из прозрачного материала, в нем устанавливались исследуемые контактные устройства. Расход воздуха в интервале 10–100 м³/час создавался вентилятором и рассчитывался по показаниям диафрагмы. Струи газа, выходящие из каналов контактных устройств, внедрялись в жидкость, размещенную на полотне тарелки, образуя межфазную поверхность. Высота слоя жидкости на перегородке тарелки поддерживалась равной 100 мм.

Фиксированный клапан [4], представленный на рисунке 1а, имел профиль трапеции с размерами 0.021 на 0.040 м и высотой 0.015 м.

Клапанно-вихревое устройство (рис. 1б) включало съемную крышку с габаритными размерами 0.040×0.067 м, которая закреплялась на фиксированном клапане и была снабжена четырьмя тангенциальными профилированными каналами сечением 0.015×0.015 м.

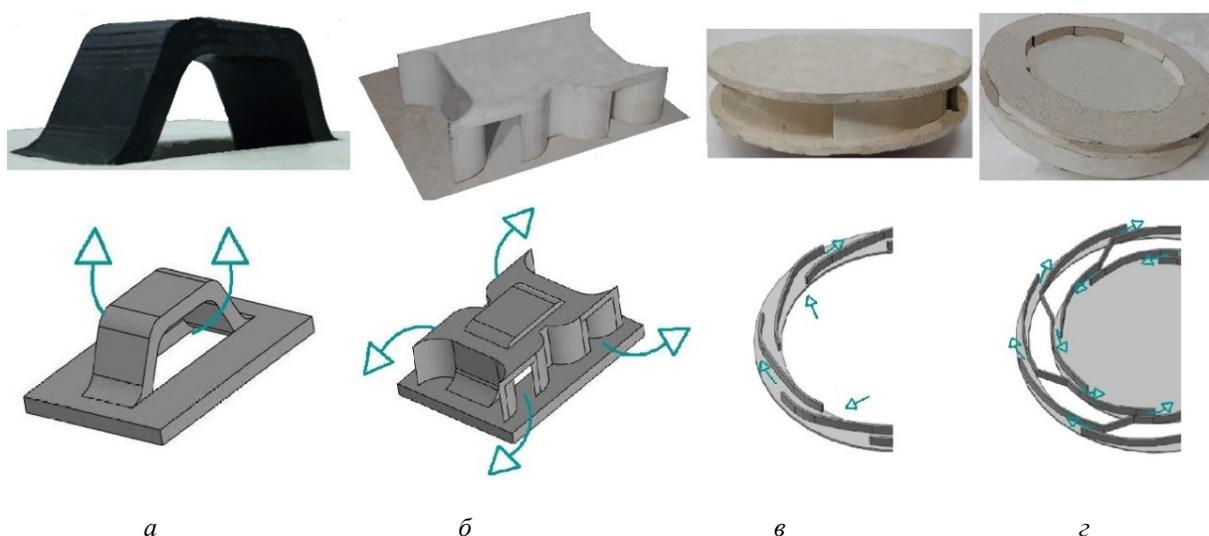


Рис. 1. Схемы контактных устройств и потоков пара (газа): (а) – клапанное, (б) – клапанно-вихревое, (в, г) – вихревые

Вихревое устройство с кольцевыми односторонними каналами [7] представлено на рисунке 1в. Наружный диаметр завихрителя составил 0.130 м, высота канала – 0.008 м; ширина канала – 0.004 м; число каналов – 8 шт. Вихревое устройство с двухсторонними кольцевыми каналами показано на рисунке 1г, диаметр завихрителя составил 0.184 м; высота канала – 0.008 м; ширина канала – 0.005 и 0.0015 м; число каналов – 16 шт.

Величина коэффициента гидравлического сопротивления сухой ступени определялась по зависимости

$$\xi = 2\Delta P / \rho_G \cdot u_G^2, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент сопротивления сухой ступени; u_G – среднерасходная скорость газа в канале завихрителя, м/с; ΔP – сопротивление сухой ступени, Па.

Величина газосодержания в слое жидкости определялась объемным методом [12].

Среднеповерхностный диаметр пузырька определялся при помощи фотосъемки согласно [13, 14]:

$$d_b = \sqrt{\frac{\sum(n_i d_{bi}^2)}{\sum n_i}}, \quad (2)$$

где n_i – количество пузырей определенного размера; d_{bi} – диаметр пузыря, м.

Относительная амплитуда колебаний уровня газожидкостного слоя на тарелке определялась согласно зависимости:

$$\Delta = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}}, \quad (3)$$

где H_{\max} , H_{\min} – максимальная и минимальная высота пульсирующего газожидкостного слоя на тарелке.

Массообмен на тарелке изучался на примере абсорбции водой кислорода воздуха. Расход воды с пониженным содержанием кислорода варьировался от 0.1 до 1.5 м³/ч. Начальная концентрация кислорода в воде составила 0.15 × 10⁻³ кг/м³. Концентрация кислорода в воде определялась датчиком полярографического типа. Величину коэффициента массоотдачи определяли экспериментально. Расчет вели по модели идеального смешения [15].

Для расчета величины коэффициента массоотдачи использовалась зависимость:

$$\beta_v = \frac{L \cdot (c_n - c_k)}{-V \cdot (c^* - c_k)}, \quad (4)$$

где c_n – концентрация кислорода в жидкости, поступающей на ступень, кг/м³; c_k – концентрация кислорода в жидкости на ступени, кг/м³; V – объем жидкости на ступени, м³; L – расход обескислороженной воды, поступающей на ступень, м³/с; c^* – равновесная концентрация кислорода в жидкости, кг/м³.

Эффективность ступени рассчитывалась по зависимости:

$$E_x = \frac{c_k - c_n}{c^* - c_n}, \quad (5)$$

Численное моделирование. Движение жидкости и газа на тарелке с контактными устройствами, представленными на рисунке 1, изучалось в программном обеспечении OpenFOAM [16], ориентированном на гидрогазодинамические расчеты, позволяющие проводить численное моделирование полей скоростей и газосодержания в жидкости.

После импортирования в программу геометрии модели были подвержены разбиению на элементы, то есть строилась расчетная сетка. Был применен турбулентный режим расчета моделей. Кроме этого, на различных этапах исследования использовались стационарный решатель и решатель, позволяющий исследовать временные процессы [17] в двухфазной среде.

Импортированная геометрия рассматриваемых контактных устройств в затопленном слое жидкости высотой 0.1 м соответствует натурным испытаниям с граничными условиями для процесса моделирования. Также обозначались границы на стенках расчетной области как No slip (не прилипающая) для жидкой фазы, то есть скорость жидкости относительно скорости стенки равна нулю. Также были обозначены границы

непроницаемости потока для газовой фазы. Количество элементов расчетной сетки в зависимости от выполненной геометрии устройства составило до 1000000 шт., а размер максимального элемента был равен 0.0001 м. В качестве рабочей среды в модели использовалась вода и воздух с параметрами, идентичными реальным условиям практических испытаний. Расход газовой фазы в каналах контактных устройств модели, показанных на рисунке 2, задавался как удельный массовый поток.

Обсуждение результатов

Распределение скорости жидкости на тарелке для различных контактных устройств представлено на рисунке 3. Согласно полученным данным можно представить следующую картину взаимодействия потоков на тарелке. Поток газа, выходящий из каналов устройства, внедряется в жидкость и в виде струй или отдельных пузырьков поднимается в жидкости, размещенной на полотне тарелки. За счет силы вязкого трения газ увлекает за собой прилегающие слои жидкости. Это создает циркуляционные контуры в жидкости, направление перемещения которых зависит от конструкции устройства. Например, на тарелке с фиксированным клапаном жидкость перемещается от стенки корпуса, рисунок 3а, а в клапанно-вихревой – в противоположную сторону, рисунок 3в. Циркуляционные потоки жидкости увлекают за собой пузырьки газа, у которых скорость подъема меньше скорости жидкости, что и формирует газосодержание на тарелке. С увеличением расхода газа через устройство скорость жидкости возрастает, а, следовательно, и диаметр увлекаемых пузырьков газа увеличивается, что согласуется с результатами работы [18].

При работе устройств наблюдаются колебания уровня газожидкостного слоя (рис. 4). Амплитуда колебаний зависит от конструкции устройства, количества каналов и расхода газа. Изменение относительной амплитуды, рассчитанной по формуле (3) путем отслеживания высот H_{\max} и H_{\min} при покадровой цифровой съемке, представлено на рисунке 4в.

Наибольшая относительная амплитуда наблюдается на клапанной тарелке с фиксированным клапаном (рис. 4в, точка 1). Наименьшие колебания уровня газожидкостного слоя происходят при размещении на тарелке вихревых устройств (рис. 4в, точки 3 и 4). Это обусловлено тем, что на вихревой тарелке происходит дробление струй газа в жидкости из-за сравнительно большой их скорости. Это позволяет погасить энергию струи, увеличить диссипацию энергии и уменьшить колебаний уровня газожидкостного слоя на тарелке.

Расчетные профили скорости жидкости и газа в слое жидкости на тарелке с разными контактными устройствами представлены на рисунке 5.

Структура и формирование профилей скорости жидкости и газа зависит как от места размещения каналов на тарелке, так и от расхода газа.

Обработка фотографий с использованием формулы (2) позволила рассчитать среднеповерхностный диаметр пузырьков газа на высоте слоя жидкости 50 и 100 мм от полотна тарелки для разных контактных устройств (рис. 6б).

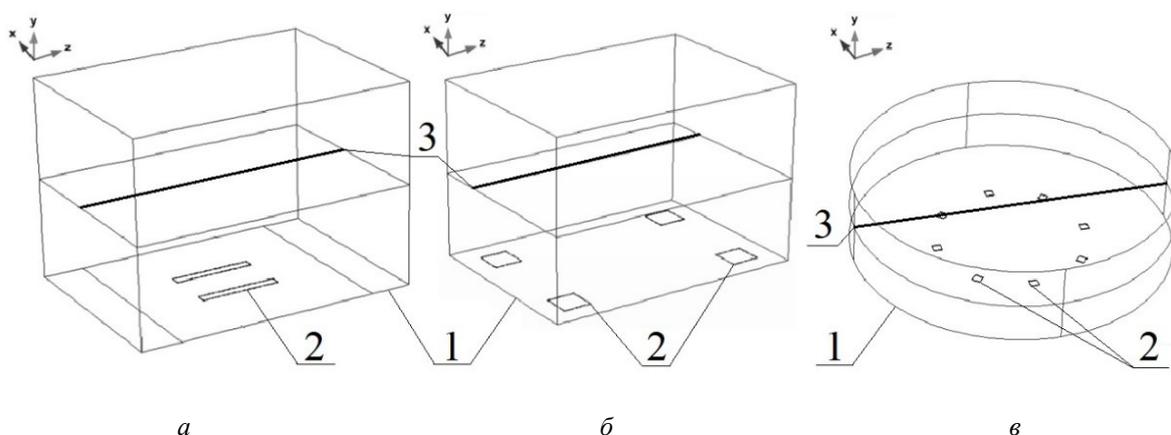


Рис. 2. Расчетные модели тарелок: с фиксированным клапаном (а), клапанно-вихревой (б), вихревой (в). 1 – корпус тарелки, 2 – каналы выхода газа, 3 – линия считывания результатов расчета

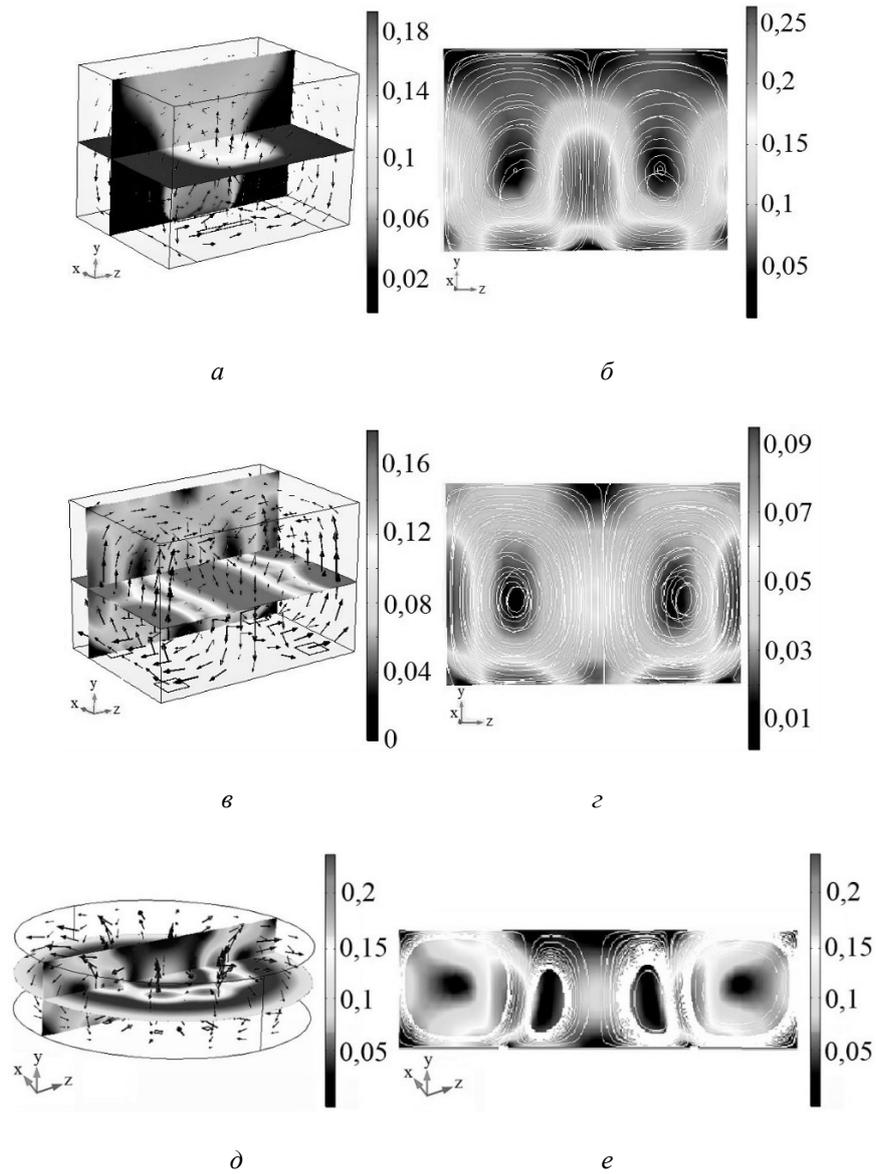


Рис. 3. Распределение полной скорости жидкости на клапанной тарелке (а, б), клапанно-вихревой (в, з) и вихревой (д, е) при удельном расходе газа для $0.96 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $0.24 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ для (в)

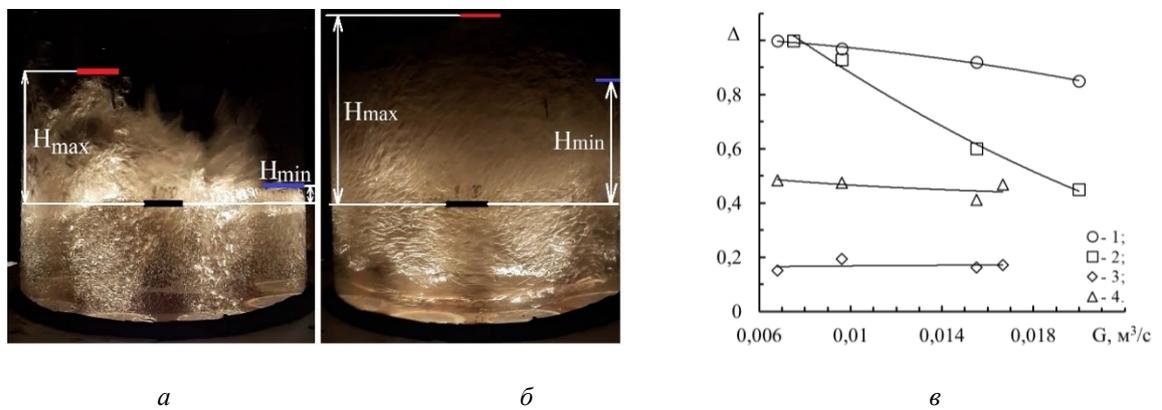


Рис. 4. Газожидкостный слой на клапанно-вихревой (а), вихревой (б) тарелках и зависимость относительной амплитуды от расхода газа (в). Экспериментальные точки: 1 – клапанная тарелка; 2 – клапанно-вихревая тарелка; 3 – вихревая тарелка с двухсторонними каналами, 4 – вихревая тарелка с односторонними каналами

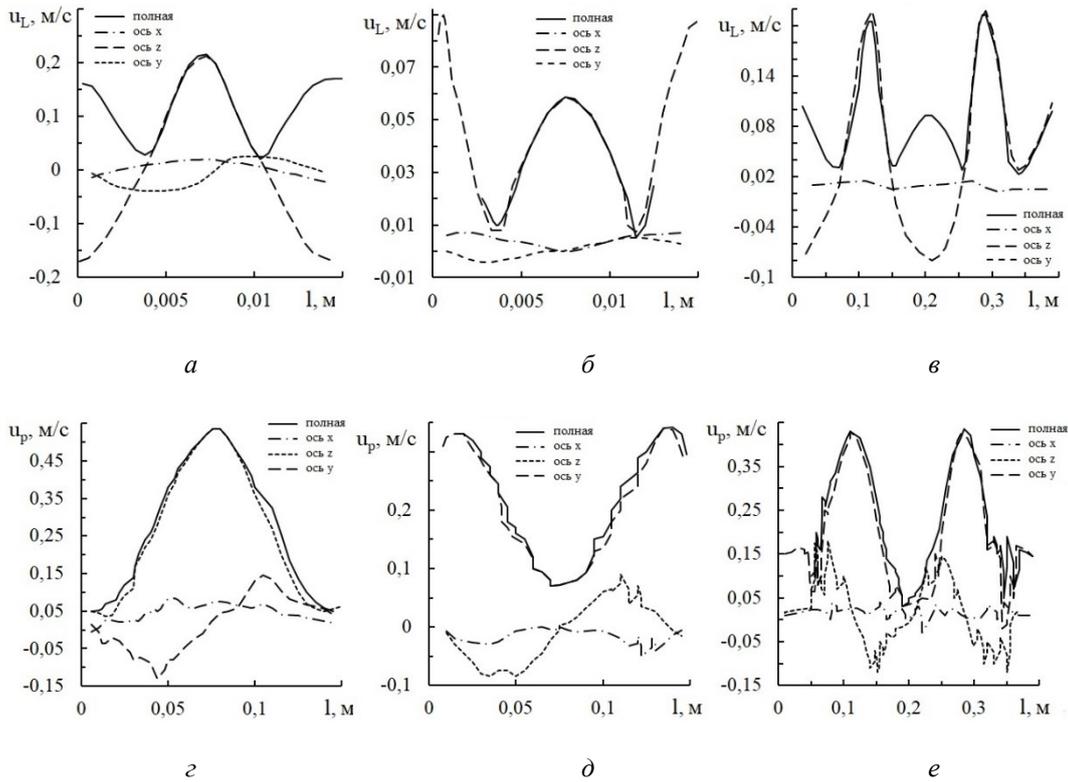


Рис. 5. Профили скорости жидкости (а–в) и газа (z–e) на линии считывания (см. рис. 2) на клапанной (а), клапанно-вихревой (б) и вихревой (в) тарелках

На тарелках с клапанными устройствами наблюдается два газожидкостных слоя. В верхней части образуется газожидкостная смесь с большим диаметром пузырьков (до 15 мм), а в нижнем слое на тарелке накапливаются пузырьки диаметром 2–3 мм (рис. 6б, точки 1 и 2). Пузырьки подводятся в этот слой циркуляционным потоком жидкости. Среднеповерхностный диаметр пузырьков на вихревых тарелках составил 4–7 мм (рис. 6б, точки 3 и 4), что согласуется с данными [12]. Причем пузырьки распределены равномерно по высоте слоя жидкости. Это обусловлено дроблением струй газа, вышедших из каналов вихревого устройства за счет высокой диссипации энергии и вращательного движения жидкости [7], что не наблюдается в клапанных и колпачковых устройствах.

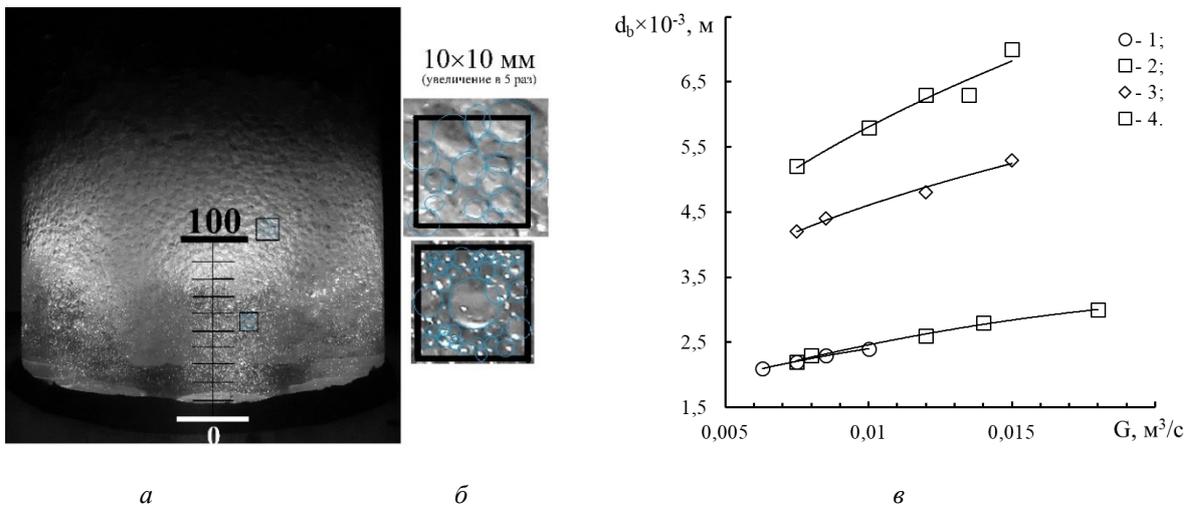


Рис. 6. Фотография газожидкостного слоя (а), участка слоя (б) и изменение среднеповерхностного диаметра пузырька от расхода газа (в). Экспериментальные точки: 1 – клапанная тарелка; 2 – клапанно-вихревая тарелка; 3 – вихревая тарелка с двухсторонними каналами, 4 – вихревая тарелка с односторонними каналами

Максимальное газосодержание на вихревой тарелке составило 0,18, что согласуется с расчетными данными при численном моделировании.

Как показали экспериментальные исследования, величина коэффициента гидравлического сопротивления тарелки с увеличением расхода газа в каналах контактных устройств снижается и составляет для клапанного устройства 6 – 8, клапанно-вихревого – 3,5 – 3 и вихревого – 1 – 0,5, что согласуется с данными [19].

Экспериментальные данные эффективности тарелки и интенсивности массоотдачи для разных контактных устройств представлены на рисунке 7. При сравнительно низком расходе жидкости, подаваемой на тарелку, наблюдается ее высокая эффективность, равная 0,85–0,9 для всех исследуемых контактных устройств. Однако с увеличением расхода жидкости эффективность клапанной и колпачковой тарелки резко снижается (точки 1 и 5, рис. 7а). Это обусловлено вымыванием пузырьков газа поступающей на тарелку жидкостью.

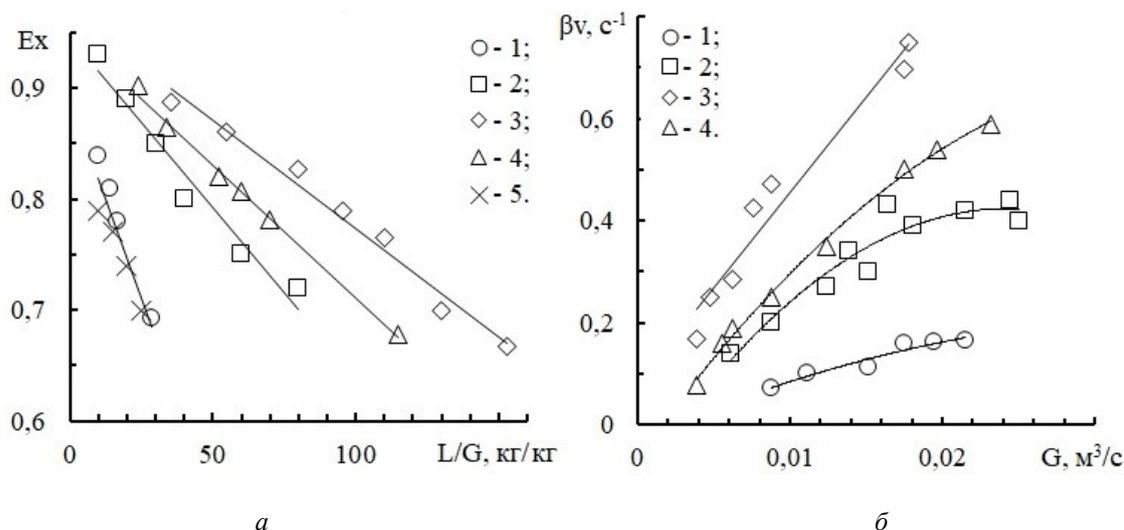


Рис. 7. Изменение эффективности тарелки от соотношения потоков (а) и величины коэффициента массоотдачи от расхода газа (б). Экспериментальные точки при $L=0.00025-0.006 \text{ м}^3/\text{с}$: а) 1 – клапанная тарелка, 2 – клапанно-вихревая, 3 – вихревая тарелка с двухсторонними каналами, 4 – вихревая тарелка с односторонними каналами; 5 – колпачковая, согласно [7]

Заключение

На тарелках барботажного типа потоки газа (пара), выходящие из каналов контактных устройств, увлекают жидкость за счет сил вязкого трения, что приводит к образованию циркуляционных контуров в газожидкостном слое, форма и направление движения которых зависит от конструкции устройств и их размещения.

На традиционных тарелках клапанного или колпачкового типа для предотвращения флуктуации жидкости приходится подавать сравнительно небольшое количество газа. При этом поток газа из-за низкой скорости практически не дробится, а на поверхности образуется газожидкостный слой крупночешуйистой пены. За счет циркуляционных контуров в нижних слоях жидкости на тарелке скапливаются пузырьки газа, увлекаемые потоком жидкости, размером до 3 мм. Таким образом, газосодержание на тарелке зависит от наличия циркуляции жидкости, что следует учитывать при расчете массообменных параметров тарелки барботажного типа.

На тарелке с вихревыми контактными устройствами за счет высокой скорости струй газа обеспечивается дробление потока газа, с образованием пузырьков диаметром 4–8 мм по всему объему жидкости. Формирование межфазной поверхности на вихревой тарелке определяется расходом газа. С увеличением расхода не только снижаются колебания газожидкостной среды, но и увеличивается рабочий диапазон нагрузки по жидкости и газу при сохранении высокой эффективности.

Совершенствование конструкций контактных устройств на барботажных тарелках привело к созданию высокоэффективных вихревых контактных устройств, которые рекомендуются к внедрению.

Следует отметить, что при прототипировании тарелок численными методами необходимо учитывать поля скоростей не только в направлении движения потока жидкости, от переточного устройства до сливной

планки, но и циркуляционные контуры жидкости по высоте слоя жидкости, которые формируют межфазную поверхность и обеспечивают массообмен.

Полученные данные будут востребованы как при конструировании барботажных тарелок, так и при совершенствовании контактных устройств.

Список литературы

1. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справочник. Калуга, 2002. Т. 1. 852 с.
2. Войнов Н.А., Жукова О.П., Воронин С.М. Результаты внедрения и исследования контактных ступеней бражных колонн // Известия ВУЗов: Лесной журнал. 2011. №4. С. 93–98.
3. Ахметов С. А., Сериков Т.П., Кузеев И.Р. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: уч. пособие. СПб., 2006. 868 с.
4. High performance trays – enhanced deck and downcomer technology. Sulzer Ltd., 2021. 16 p.
5. Патент №1012939 (СССР). Клапанная тарелка / Т.С. Нурунбетов, А.А. Агафонов, А.И. Родионов, Ш.М. Молдабеков, С.У. Жаркимбеков. – 1983.
6. Патент №812303 (СССР). Клапанная тарелка / В.В. Солодовников, Ю.Г. Шалахман. – 1981.
7. Войнов Н.А., Фролов А.С., Богаткова А.В., Земцов Д.А., Жукова О.П. Гидродинамика и массообмен на вихревой ступени при барботаже // Теоретические основы химической технологии. 2019. №6. С. 622–633.
8. Богаткова А.В., Фролов А.С., Земцов Д.А., Жукова О.П., Войнов Н.А. Вихревые ступени для тепломассообменных аппаратов // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 347–354.
9. Елизаров Д.В. Прототипирование массообменных аппаратов со ступенчатым контактом фаз: дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2016. 370 с.
10. Кафаров В.В., Шестопапалов И.И., Эльмурзаев А.Ш., Анисимов А.В. Комбинированная математическая модель структуры потока жидкости на тарелке с туннельными колпачками // Теоретические основы химических технологий. 1973. Т. 7. №6. С. 884–891.
11. Кафаров В.В., Шестопапалов И.И., Комиссаров Ю.А. Комбинированная математическая модель структуры потока жидкости на клапанной барботажной тарелке // Тр. Москов. хим.-технол. ин-та. 1975. №88. С. 127–129.
12. Войнов Н.А., Жукова О.П., Ледник С.А., Николаев Н.А. Массоотдача в газожидкостном слое на вихревых ступенях // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47. №1. С. 62–67.
13. Войнов Н.А., Жукова О.П., Николаев Н.А. Гидродинамика вихревой ступени с тангенциальными завихрителями // Теоретические основы химической технологии. 2010. Т. 44. №2. С. 225–232.
14. Shahbazi B., Rezaei B., Chelgani S. C., Koleini S.M.J., Noaparast M. Estimation of diameter and surface area flux of bubbles based on operational gas dispersion parameters by using regression and ANFIS // International journal of mining science and technology. 2013. N23. Pp. 343–348.
15. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1975. 665 с.
16. Цынаева А.А. Моделирование задач теплообмена и гидрогазодинамики с помощью свободного программного обеспечения // Вестник УлГТУ. 2014. №68. С. 42–45.
17. Vuorinen V., Keskinen J.-P., Duwig C., Boersma V.J. On the implementation of low-dissipative Runge–Kutta projection methods for time dependent flows using OpenFOAM // Computers & Fluids. 2014. Vol. 93. Pp. 153–163.
18. Кутепов А.М. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. Т. 2: Механические и гидромеханические процессы. М., 2002. 599 с.
19. Войнов Н.А., Богаткова А.В., Дерягина Н.В., Земцов Д.А., Кожухова Н.Ю. Сопроотивление тангенциальных завихрителей с кольцевыми каналами // Химия растительного сырья. 2022. №1. С. 335–342.

Поступила в редакцию 18 мая 2022 г.

Принята к публикации 25 октября 2022 г.

Для цитирования: Войнов Н.А., Фролов А.С., Богаткова А.В., Земцов Д.А., Жукова О.П. Совершенствование контактных устройств барботажной тарелки // Химия растительного сырья. 2022. №4. С. 343–351. DOI: 10.14258/jcprm.20220411381.

Voynov N.A.*, Frolov A.S., Bogatkova A.V., Zemtsov D.A., Zhukova O.P. IMPROVEMENT OF CONTACT DEVICES OF THE BUBBLING TRAY

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 31, Krasnoyarsk, 660037 (Russia), e-mail: n.a.voynov@mail.ru

The results of a study of hydrodynamics and mass transfer on bubbling-type trays with valve, valve-vortex and vortex contact devices are presented. By means of experimental studies and numerical modeling, the velocity fields of liquid and gas, as well as the structure of the gas-liquid layer on the tray are determined. The dependence of the relative amplitude of fluctuations in the level of the gas-liquid layer on the tray by the gas flow rate when placing various types of contact devices on it is obtained. The average surface diameter of gas bubbles is determined and the mechanism of their accumulation in the liquid on the tray is proposed. The relationship between the velocity of liquid circulation on the plate and the size of gas bubbles entrained by the circulation flow has been confirmed. The pressure drop of the investigated contact devices was measured and the value of the hydraulic resistance coefficient was determined. Experimental data on the intensity of mass transfer and efficiency on tray are presented. Specific fluid flow rates have been established to ensure high efficiency. It is shown that the most efficient, liquid- and gas-carrying capacity is possessed by trays with vortex cantate devices having a low amplitude of oscillation of the gas-liquid layer and a large interfacial surface. This is due to an increase in the energy dissipation of gas jets in the liquid on the tray, the uniform distribution of gas bubbles and the presence of rotational motion of the gas-liquid layer.

Keywords: valve devices, vortex plate, modeling, velocity fields, resistance coefficient, bubble diameter, interfacial surface, mass transfer coefficient, efficiency.

References

1. Timonin A.S. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimiko-tehnologicheskogo i prirodookhrannogo oborudovaniya. Spravochnik*. [Fundamentals of design and calculation of chemical-technological and environmental equipment. Directory]. Kaluga, 2002, vol. 1, 852 p. (in Russ.).
2. Voynov N.A., Zhukova O.P., Voronin S.M. *Izvestiya VUZov: Lesnoy zhurnal*, 2011, no. 4, pp. 93–98. (in Russ.).
3. Akhmetov S. A., Serikov T.P., Kuzeyev I.R. *Tekhnologiya i oborudovaniye protsessov pererabotki nefiti i gaza: uch. posobiye*. [Technology and equipment for oil and gas processing processes: textbook]. Saint Petersburg, 2006, 868 p. (in Russ.).
4. *High performance trays – enhanced deck and downcomer technology*. Sulzer Ltd., 2021. 16 p.
5. Patent 1012939 (USSR). 1983. (in Russ.).
6. Patent 812303 (USSR). 1981. (in Russ.).
7. Voynov N.A., Bogatkova A.V., Frolov A.S., Zemtsov D.A., Zhukova O.P. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 622–633. (in Russ.).
8. Bogatkova A.V., Frolov A.S., Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Voynov N.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 347–354. (in Russ.).
9. Yelizarov D.V. *Prototipirovaniye massoobmennyykh apparatov so stupenchatym kontaktom faz: dis. ... d-ra tekhn. nauk*. [Prototyping of mass transfer apparatuses with stepped phase contact: dis. ... Dr. tech. sciences.]. Kazan, 2016, 370 p. (in Russ.).
10. Kafarov V.V., Shestopalov I.I., El'murzayev A.Sh., Anisimov A.V. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 1973, vol. 7, no. 6, pp. 884–891. (in Russ.).
11. Kafarov V.V., Shestopalov I.I., Komissarov Yu.A. *Tr. Moskov. khim.-tekhrol. in-ta*, 1975, no. 88, pp. 127–129. (in Russ.).
12. Voynov N.A., Zhukova O.P., Lednik S.A., Nikolayev N.A. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2013, vol. 47, no. 1, pp. 62–67. (in Russ.).
13. Voynov N.A., Zhukova O.P., Nikolayev N.A. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2010, vol. 44, no. 2, pp. 225–232. (in Russ.).
14. Shahbazi B., Rezai B., Chelgani S. C., Koleini S.M.J., Noaparast M. *International journal of mining science and technology*, 2013, no. 23, pp. 343–348.
15. Ramm V.M. *Absorbtsiya gazov*. [Gas absorption]. Moscow, 1975, 665 p. (in Russ.).
16. Tsynayeva A.A. *Vestnik UGTU*, 2014, no. 68, pp. 42–45. (in Russ.).
17. Vuorinen V., Keskinen J.-P., Duwig C., Boersma B.J. *Computers & Fluids*, 2014. Vol. 93. Pp. 153–163.
18. Kutepov A.M. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Yavleniya perenosy, makrokinetika, podobiye, modelirovaniye, proyektirovaniye. T. 2: Mekhanicheskiye i gidromekhanicheskiye protsessy*. [Processes and apparatuses of chemical technology. Transfer phenomena, macrokinetics, similarity, modeling, design. Vol. 2: Mechanical and hydro-mechanical processes]. Moscow, 2002, 599 p. (in Russ.).
19. Voynov N.A., Bogatkova A.V., Deryagina N.V., Zemtsov D.A., Kozhukhova N.Yu. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 1, pp. 335–342. (in Russ.).

Received May 18, 2022

Accepted October 25, 2022

For citing: Voynov N.A., Frolov A.S., Bogatkova A.V., Zemtsov D.A., Zhukova O.P. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 4, pp. 343–351. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20220411381.

* Corresponding author.

