

УДК 66.015.23

ВИХРЕВЫЕ КОНТАКТНЫЕ СТУПЕНИ ДЛЯ РЕКТИФИКАЦИИ

© *Н.А. Войнов^{1,2,4*}, Н.А. Николаев³, А.В. Кустов^{1,4}, А.Н. Николаев³, Д.В. Тароватый⁴*

¹*Институт биофизики СО РАН, Академгородок, 50, Красноярск, 660036, (Россия)*

²*Институт естественных и гуманитарных наук Сибирского федерального университета, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041 (Россия)*

³*Казанский государственный технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, 420015 (Россия)*

⁴*Сибирский государственный технологический университет, пр. Мира, 82, Красноярск, 660049 (Россия) E-mail: Voynov@Siberianet.ru*

Представлены результаты исследования гидродинамики вихревых тарелок с тангенциальными и осевыми завихрителями. Определены режимы течения газожидкостной смеси, получены зависимости для расчета критической скорости газа, характеризующей смену гидродинамического режима, гидравлического сопротивления, газосодержания, диаметра пузырьков газа и межфазной поверхности. Проведена сравнительная оценка вихревой контактной ступени и насадочной и показано преимущество первой.

Ключевые слова: тарелка, тангенциальный завихритель, осевой завихритель, газосодержание, межфазная поверхность, диаметр пузырьков, гидравлическое сопротивление.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) (грант №P1MO002) и программы интеграционных исследований СО РАН (проект № 24), а также Российского фонда фундаментальных наук, проект №07-08-96800-р_енисей_а.

Введение

В настоящее время наметилась тенденция использования вихревых контактных тепло-массообменных ступеней для проведения процессов абсорбции и ректификации в технологических линиях различных процессов, в том числе и при переработке растительного сырья [1]. Вихревые колонны не уступают по своим массообменным параметрам самым эффективным аппаратам насадочного типа, однако более производительны, менее металлоемки и масштабируемы. Имеют сравнительно невысокое гидравлическое сопротивление, что позволяет использовать их для ведения процесса под вакуумом. Однако информация по исследованию и конструированию ректификационных колонн с вихревыми контактными ступенями носит в большей степени рекламный характер, что не позволяет подойти к научно обоснованному методу их расчета, выбору наиболее оптимальных вариантов конструкций, технологических режимов и требует комплексных исследований.

Основными требованиями, предъявляемыми при конструировании вихревой контактной ступени ректификационных колонн, является: обеспечение развитой межфазной поверхности, достижение высокой турбулентности потоков и удерживающей способности по жидкости при сравнительно низком гидравлическом сопротивлении и большой нагрузке по газу, что может быть достигнуто путем равномерного диспергирования газа в жидкость и создания условий для вращательного движения газожидкостной смеси на ступени.

* Автор, с которым следует вести переписку.

Из всего многообразия вихревых контактных ступеней [2], представленных на рисунке 1, для ректификационных аппаратов наиболее перспективными являются контактные ступени с тангенциальными и многолопастными осевыми завихрителями (рис. 1в-ж).

Фотографии исследуемых тарелок с многолопастными осевыми и тангенциальными завихрителями представлены на рисунке 2.

В вихревых тарелках газ (пар) проходит через щели (каналы), приобретает высокую тангенциальную скорость, за счет чего интенсивно дробится на мелкие пузырьки, которые равномерно распределяются в слое жидкости, образуя вращающуюся газо-жидкостную смесь.

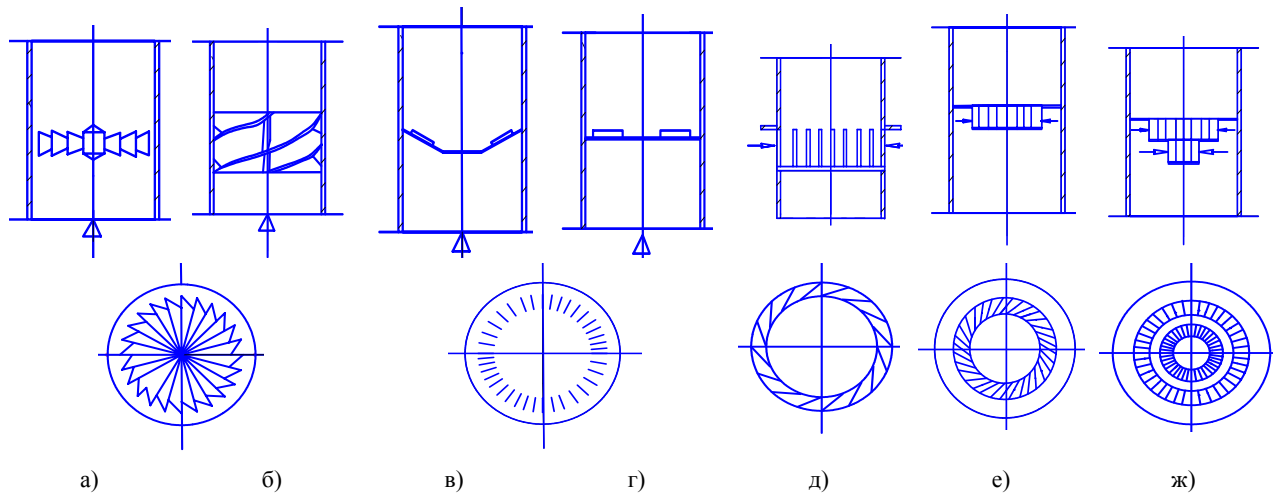


Рис. 1. Схемы вихревых контактных ступеней с различными типами завихрителей: а – лопаточный; б – ленточный; в, г – осевые многолопастные; д-ж – тангенциальные



Рис. 2. Фотографии тарелок: а, б – с осевым многолопастным завихрителем; в, г – с тангенциальным завихрителем

Обсуждение результатов

Гидродинамика контактных ступеней исследовалась на системе «воздух – жидкость». Расход газа изменялся от 1 до 40 м³/час и измерялся нормальной диафрагмой. В качестве модельной жидкости использовались: вода; этиловый спирт 96% об.; вода с добавкой глицерина. Температура жидкости и газа варьировалась в пределах 10–60 °С. Внутренний диаметр колонны – $D = 50\text{--}190$ мм. Размеры щели завихрителя: величина зазора 0,7–2 мм; ширина 5–36 мм; количество 4–36 шт. Перепад давления на ступени измерялся дифференциальным манометром.

Режимы течения. В зависимости от расхода газа наблюдается три основных режима течения газожидкостной смеси на ступени (рис. 3): барботажный; кольцевой; пленочный.

Для контактных ступеней ректификационных колонн с целью получения развитой межфазной поверхности при сравнительно низком гидравлическом сопротивлении наибольший интерес представляет кольцевой режим течения, который наблюдается при достижении критической скорости газа u_k на выходе из щели.

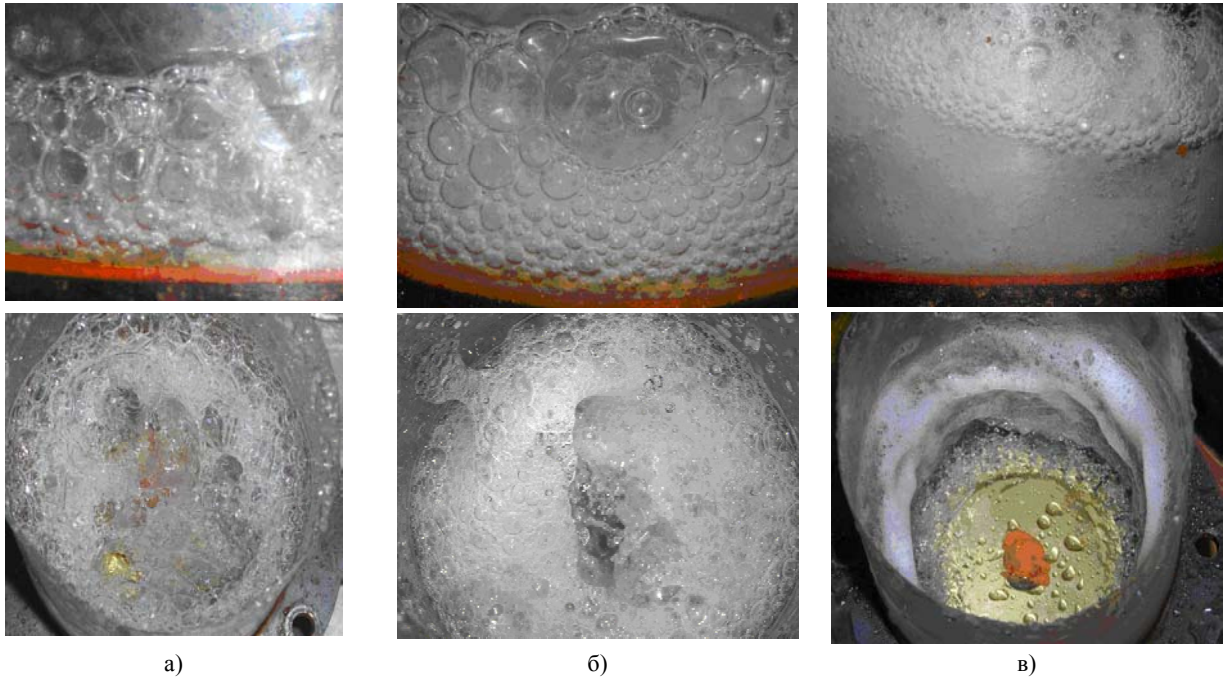


Рис. 3. Фотографии газожидкостной смеси на ступени при $D = 114$ мм. Режимы: а – барботажный; б – кольцевой; в – пленочный

При кольцевом режиме течения жидкость из центральной части колонны за счет силы инерции выдавливается к периферии с образованием вращающегося газожидкостного слоя в виде цилиндра с начальным внутренним диаметром 15–20 мм. По мере роста скорости газа происходит уменьшение толщины слоя и увеличение его высоты. При достижении скорости газа равной u_{cr} (которая также характеризует начало оголения щелей для прохода газа) наблюдается пленочный режим течения с разделением течения газа и жидкости. При этом режиме наблюдается отток газовых пузырьков из вращающегося жидкостного слоя и не происходит их обновления.

При допущениях, что вращающийся газожидкостный слой представляет собой твердое цилиндрическое тело, а силы инерции и давления равномерно распределены по высоте потока, условие равновесия сил в момент образования кольцевого режима можно представить в виде:

$$m \omega^2 R = \rho g H (1 - \varphi) S, \tag{1}$$

где m – масса жидкости; ω – угловая скорость вращения; R – радиус вращения; H – высота столба газожидкостной смеси; S – внутренняя поверхность вращающегося газожидкостного слоя; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости; φ – газосодержание.

Тогда из (1) несложно получить

$$\omega = \sqrt{\frac{gH(1 - \varphi)}{\delta R}}, \tag{2}$$

где δ – толщина газожидкостного слоя.

Согласно (2), скорость газа, при которой наступает кольцевой режим течения, зависит от объема жидкости на ступени, газосодержания и величины радиуса окружности, на которой размещены щели. Увеличение R и φ приводит к снижению критической скорости газа u_{cr} , а рост объема жидкости на ступени к ее повышению.

При предположении, что начальное вращение жидкости обеспечивается касательными напряжениями газа о жидкость, соприкасающуюся с поверхностью щелей, для прохода газа можно записать общеизвестную зависимость:

$$F_T R \omega = N, \quad (3)$$

где F_T – сила, обусловленная трением газа о жидкость; N – мощность.

Исходя из (3), выражение для угловой скорости газа, которая обеспечивает переход в кольцевой режим, примет вид:

$$\omega = \frac{N}{\tau_i \times f \times R}, \quad (4)$$

где τ_i – касательное напряжение; R – радиус размещения щелей на тарелке; $f = \delta_0 \times l \times n$ – площадь щелей для выхода газа; δ_0 – зазор; l – длина; n – количество щелей.

Согласно (4) критическая скорость газа зависит от радиуса R , размеров и количества щелей. Как видно, с увеличением площади сечения каналов для прохода газа (коэффициента крутки f/F) переход в кольцевой режим течения осуществляется при меньшей скорости газа. Экспериментальные значения критической скорости газа от конструктивных параметров тарелки с многолопастным осевым завихрителем, представленные на рисунке 4, подтверждают теоретическое описание (1)–(4). Аналогичные результаты получены и для тарелок с тангенциальным завихрителем.

Данные, представленные на рисунке 4, с относительной погрешностью 15% обобщаются в системе координат $u_k = f(f/F; V)$, что показано на рисунке 5.

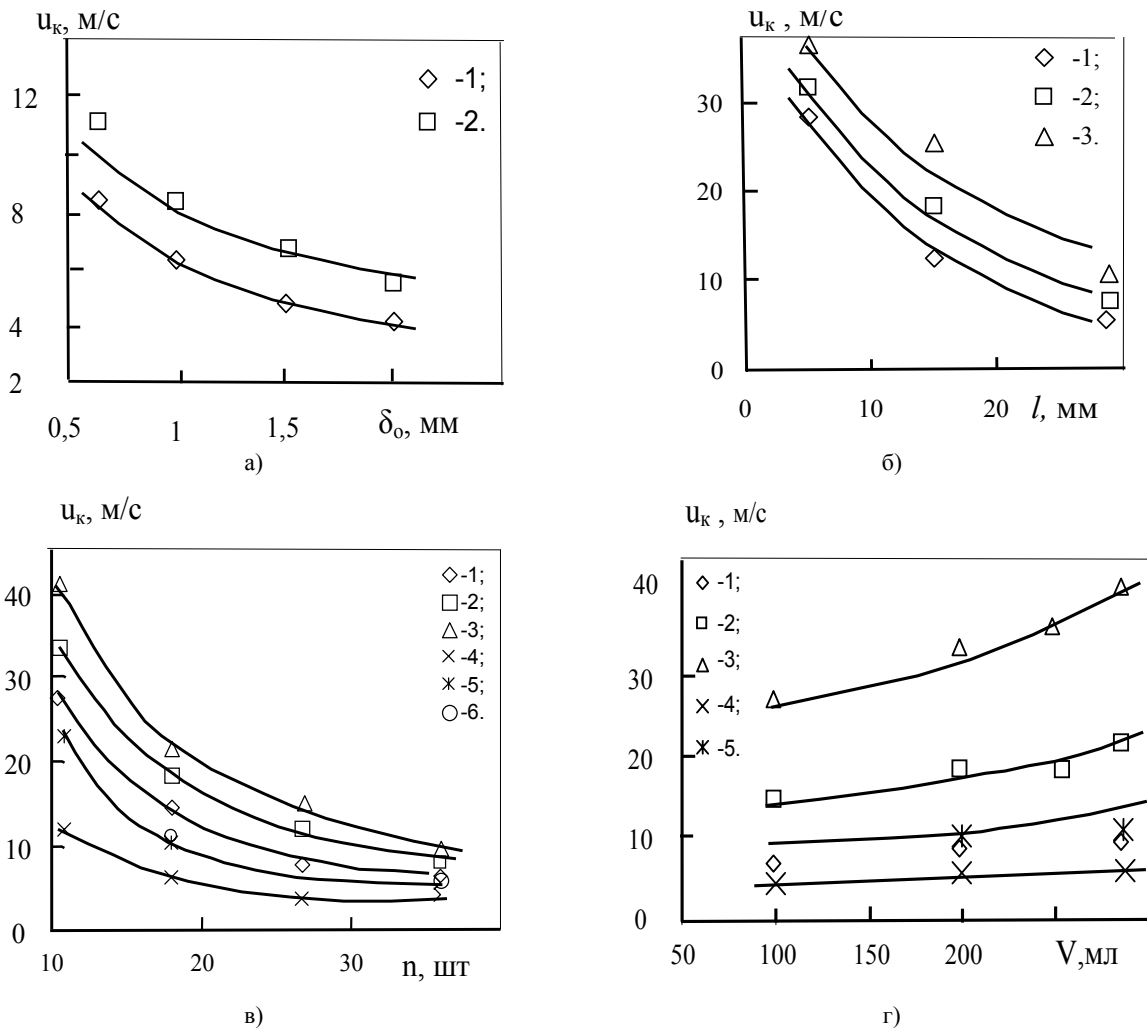


Рис. 4. Зависимость критической скорости газа от технологических и конструктивных параметров плоской тарелки с осевым многолопастным завихрителем. Экспериментальные точки: а) 1 – $n = 36$ шт.; 2 – 18; б) 1 – $V = 100$ мл, 2 – 200, 3 – 300 при $n = 36$ шт., $\delta_0 = 1$ мм.; в) 1 – $\delta_0 = 1$ мм, $V = 100$ мл, 2 – 1, 200, 3 – 1, 300, 4 – 2, 100, 5 – 2, 200 мл, 6 – 2, 300; г) 1 – $\delta_0 = 1$ мм, $n = 36$ шт., 2 – 1, 18, 3 – 1, 9, 4 – 2, 36, 5 – 2

Для исследуемых тарелок с повышением коэффициента крутки происходит снижение критической скорости газа, что обусловлено увеличением поверхности контакта газа с жидкостью. С ростом объема жидкости на ступени начало кольцевого режима достигается при большей скорости газа в каналах при этом $u_k \sim (H/D)^{0,7}$. На тарелке с тангенциальным завихрителем переход в кольцевой режим происходит при существенно меньшей скорости газа, чем на плоской тарелке с осевым многолопастным завихрителем, что обусловлено влиянием радиуса R , который для тангенциального завихрителя имеет большую величину.

Зависимость критической скорости газа от плотности жидкости составляет $u_k \sim (\rho_{ж} (1-\phi)/\rho_{г})$. Влияние вязкости жидкости на смену режима показано на рисунке 6.

Как установлено с увеличением коэффициента динамической вязкости жидкости ($\mu_{ж}/\mu_{г} > 78$) переход в кольцевой режим течения происходит при большей скорости газа, что вызвано высокими касательными напряжениями как между слоями вращающегося газожидкостного потока, так и на стенке контактной ступени.

Согласно данным, представленным на рисунке 7а, с увеличением радиуса окружности, на которой размещены щели, переход в кольцевой режим течения наблюдается при меньшей скорости газа, что согласуется с результатами расчета по уравнениям (1) и (4).

Выполнение тарелки на конус (рис. 1в) приводит к существенному снижению величины критической скорости, что обусловлено дополнительным влиянием проекции силы инерции на образующую конуса, которая способствует перемещению жидкости к периферии.

Следует отметить, что размещение на внутренней цилиндрической поверхности ступени ребер или установка в верхней части ограничителей приводит к гашению крутки потока и резко изменяет значение u_k в сторону ее увеличения.

Использование плоской осевой тарелки при нерадиальном размещении щелей (рис. 2а) не целесообразно из-за наличия большого уноса и низкой крутки потока.

Для расчета критической скорости газа получена зависимость в виде:

$$u_k = C (f/F)^{-0,8} (H/D)^{0,7} (\rho_{ж} (1-\phi)/\rho_{г}), \quad (5)$$

где коэффициент $C = 0,007$ для плоского осевого завихрителя и $C = 0,006$ для тангенциального завихрителя; F – площадь сечения контактной ступени; H – уровень газожидкостной смеси на ступени; D – диаметр ступени; $\rho_{ж}$ и $\rho_{г}$ – плотность газа и жидкости.

Уравнение (5) применимо при $R = (60-80)$ мм, угле наклона каналов $30-40^\circ$ к касательной окружности и величине параметра $(\mu_{ж}/\mu_{г}) = 55-78$.

Как установлено (рис. 7б) переход из кольцевого режима в пленочный для ступени с осевым многолопастным завихрителем осуществляется при $u_k/u_{п} \approx 0,6-0,7$ и тангенциальным при $u_k/u_{п} \approx 0,5$.

Рис. 5. Зависимость критической скорости газа от фактора крутки на системе «воздух – вода» при $D = 100$ мм, $V = 200$ мл; $t = 15$ °С. Экспериментальные точки (1–5): 1 – плоская тарелка с осевым многолопастным завихрителем при $n = 9-36$ шт., $\delta_0 = 1$ мм, $l = 10$ мм; 2 – тангенциальный завихритель при $n = 18$ шт., $\delta_0 = 1$ мм, $l = 10$ мм; 3 – коническая тарелка с осевым многолопастным завихрителем при $n = 16$, $\delta_0 = 1$ мм, $l = 26$ мм, $V = 200$ мл; 4 – плоская тарелка с осевым многолопастным завихрителем на системе «этанол – воздух» при $n = 18$ шт., $\delta_0 = 2$ мм, $l = 16$ мм; 5 – плоская тарелка с осевым многолопастным завихрителем при $n = 9-36$ шт., $\delta_0 = 1$ мм, $l = 10$ мм, $V = 300$ мл

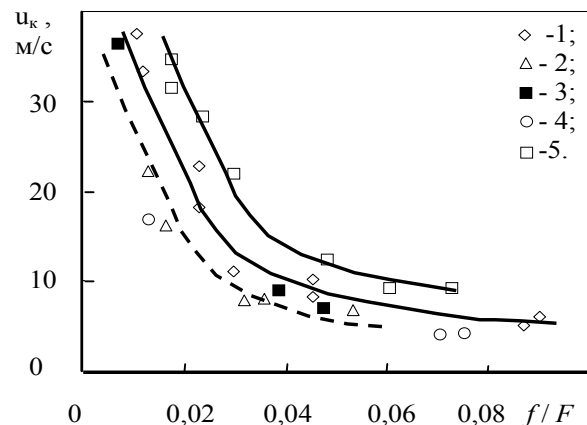


Рис. 6. Зависимость критической скорости воздуха от вязкости жидкости на тарелке с тангенциальным завихрителем при $n = 18$ шт., $l = 10$ мм, $\delta_0 = 0,7$ мм, $f/F = 0,012$. Экспериментальные точки (1–2): 1 – вода при температуре 10–60 °С; 2 – смесь «вода – глицерин»

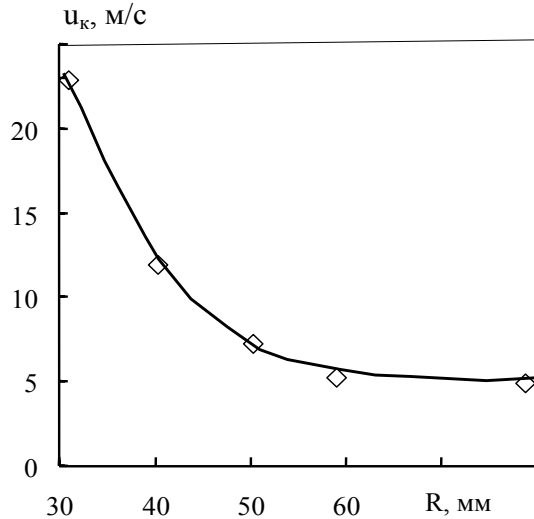
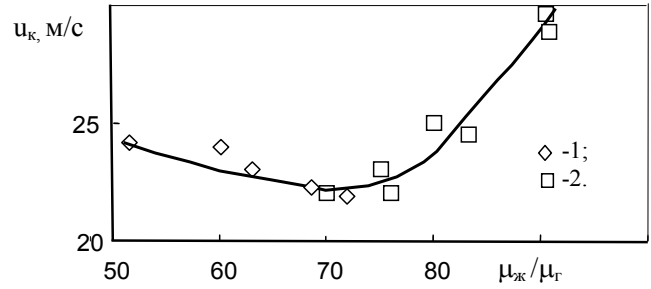


Рис. 7а. Зависимость критической скорости газа от радиуса тангенциального завихрителя при $t = 15$ °С, $V = 200$ мм, $f/F = 0,051$

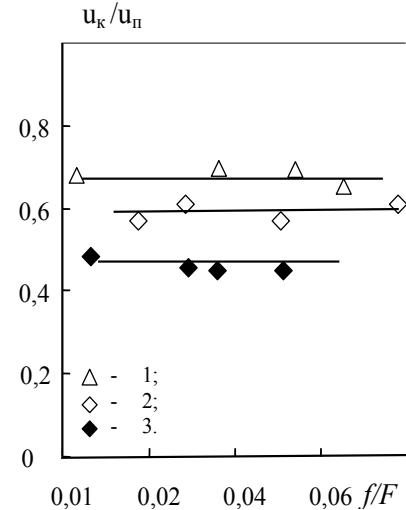


Рис. 7б. Зависимость отношения скоростей газа от фактора крутки на системе «воздух – вода» при $D=100$ мм; $V = 100-300$ мл, $t = 15$ °С.

Экспериментальные точки (1–3): 1 – коническая тарелка с осевым многолопастным завихрителем при $n = 16$ шт., $l = 5-30$ мм; 2 – плоская тарелка с осевым многолопастным завихрителем при $n = 36$ шт., $l = 30$ мм; 3 – тарелка с тангенциальным завихрителем при $n = 18$ шт., $l = 10$ мм

Сопротивление ступени. Общее сопротивление ΔP контактной ступени без учета влияния крутки газа ниже расположенной тарелки можно представить в виде:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m \quad (6)$$

Сопротивление сухой ступени обычно записывают в виде:

$$\Delta P_c = \xi \frac{\rho_z u^2}{2}, \quad (7)$$

и орошаемой

$$\Delta P_m = \rho g H (1 - \varphi) + \Delta P_\lambda, \quad (8)$$

где ξ – коэффициент сопротивления сухой ступени; u – среднерасходная скорость газа на выходе из каналов; ρ_z – плотность газа; ΔP_λ – потери напора, вызванные касательными напряжениями на межфазной поверхности; H – высота газожидкостного слоя; φ – газосодержание.

Экспериментальные значения коэффициента сопротивления для разных типов сухой тарелки и ее конструктивных размеров представлены на рисунках 8 и 9.

Коэффициент сопротивления ξ возрастает с увеличением количества щелей на тарелке (местные сопротивления) и зазора щели δ_0 , что вызвано увеличением масштаба турбулентных вихрей газа. Коэффициент сопротивления сухой тарелки не зависит от длины щели l и при $Re > 1500$ представлен в виде:

– тарелка с осевым многолопастным завихрителем:

$$\xi = 2 \times 10^2 n^{0.5} \delta_0^{0.8}; \tag{9}$$

– тарелка с тангенциальным завихрителем

$$\xi = 3,7 \times 10^2 n^{1.3} \delta_0^{1.3}, \tag{10}$$

где δ_0 – величина зазора щели, м.

Уравнения применимы при угле наклона каналов $30\text{--}40^\circ$ и величине $(\mu_{\text{ж}}/\mu_{\text{г}}) = 55\text{--}78$.

Неодинаковые показатели степени при n и δ_0 в уравнениях (9) и (10) вызваны разными условиями ввода и вывода газа на тарелках. Разница в величине ξ для тарелок с тангенциальным и осевым завихрителями при равных условиях не превышает 20%.

Значения гидравлического сопротивления сухой тарелки от скорости газа на выходе из щели показаны на рисунке 10.

Общее сопротивление контактной ступени для тарелок с тангенциальным и осевым завихрителем представлено на рисунке 11. Как показал анализ, вклад сухой тарелки в общее сопротивление контактной ступени составляет 55–70%, вклад столба жидкости не превышает 20%. Влияние трения газа о вращающийся слой газожидкостной смеси на общее сопротивление тарелки не превышает 15%.

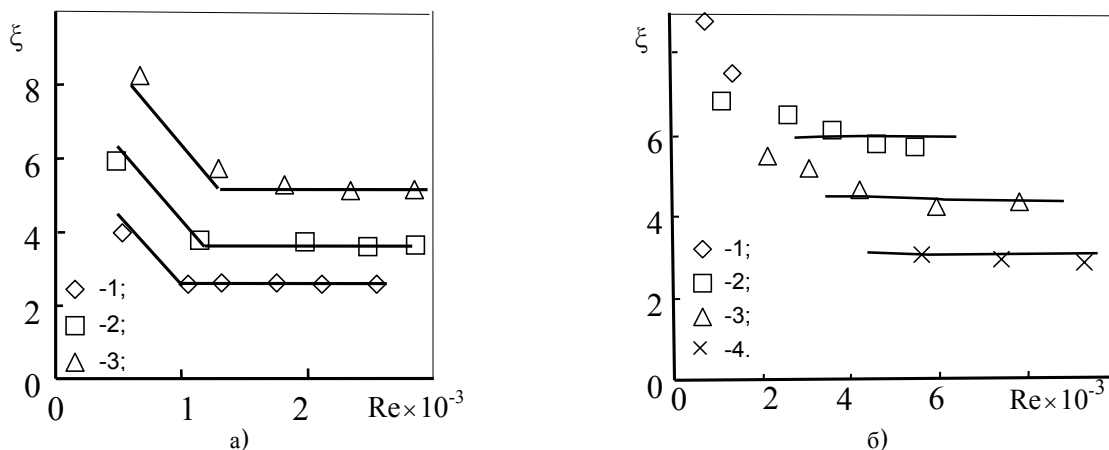


Рис. 8. Зависимость коэффициента сопротивления сухой тарелки с осевым многолопастным завихрителем ($l=10$ мм) от критерия Рейнольдса газа: а) точки при $n = 36$ шт.: 1 – $\delta_0 = 0,7$ мм; 2 – 1; 3 – 2; б) точки при $\delta_0=2$ мм: 1 – $n = 36$ шт.; 2 – 18; 3 – 9; 4 – 4

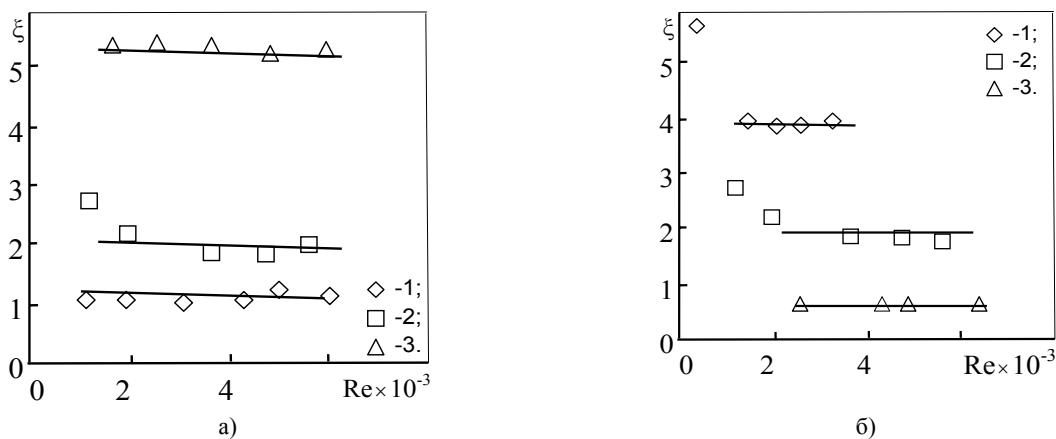


Рис. 9. Зависимость коэффициента сопротивления сухой тарелки с тангенциальным завихрителем ($D = 114$ мм, $l = 10$ мм) от критерия Рейнольдса газа: а) точки (1–3) при $n = 18$ шт.: 1 – $\delta_0 = 0,7$ мм; 2 – 1; 3 – 2; б) точки (1–3) при $\delta_0 = 1$ мм: 1 – $n = 36$ шт; 2 – 18; 3 – 9

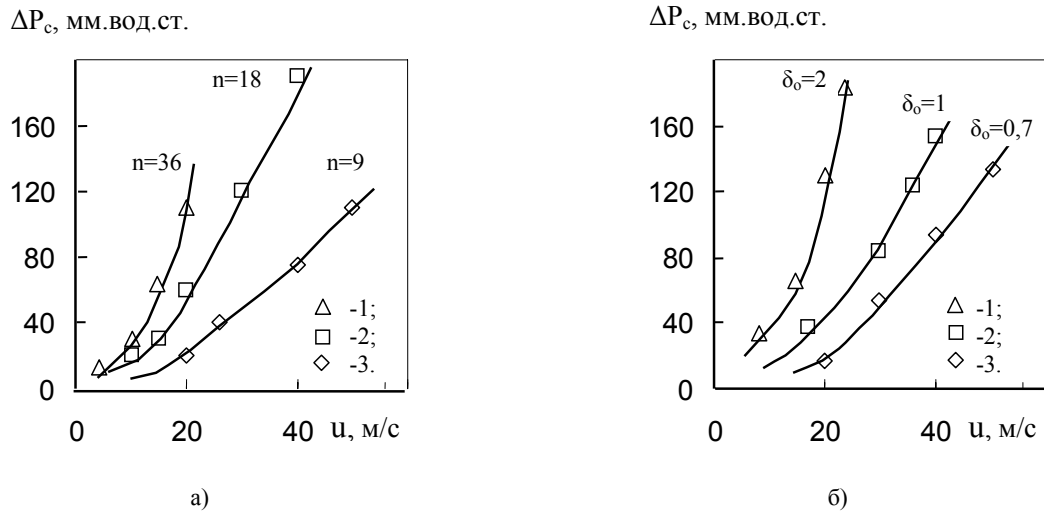


Рис. 10. Зависимость гидравлического сопротивления сухой тарелки с тангенциальным завихрителем при $D = 110$ мм, $l = 10$ мм. а) $\delta_0 = 1$ мм. Точки (1–3): 1 – $n=36$ шт.; 2 – 18; 3 – 9. б), $n = 18$ шт. Точки (1–3): 1 – $\delta_0 = 2$ мм; 2 – 1; 3 – 0,7. Линии – расчет по уравнениям (9) и (10)

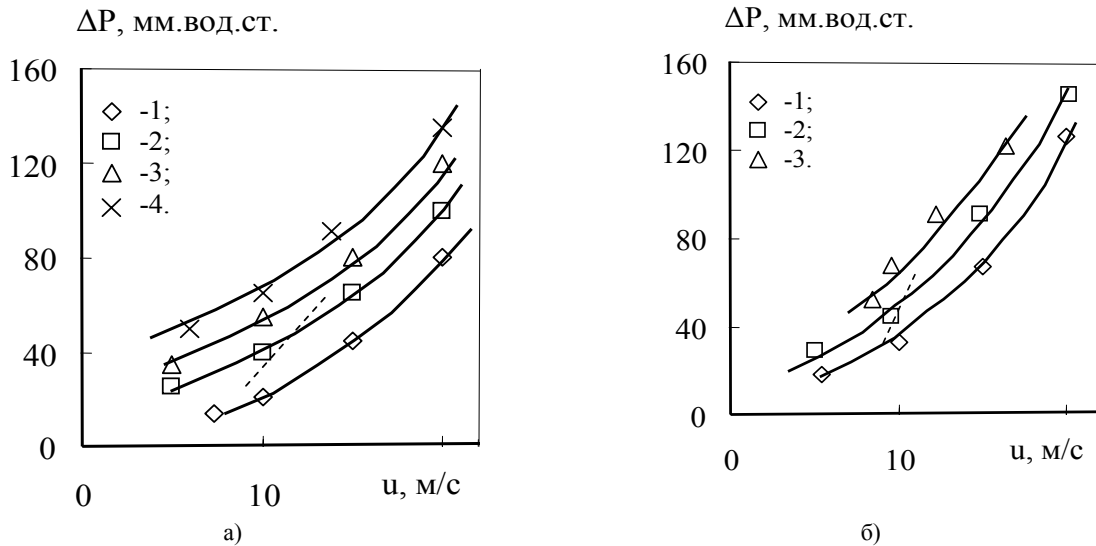


Рис. 11. Зависимость сопротивления орошаемой тарелки от скорости газа при $D = 100$ мм, $t = 15$ °С:

а) коническая тарелка с осевым многолопастным завихрителем при $n=16$ шт., $\delta_0=1$ мм, $l = 26$ мм.

Точки (1–4): 1 – сухая, 2 – $V=200$ мл, 3 – 400, 4 – 600; б) тарелка с тангенциальным завихрителем при $n = 18$ шт., $\delta_0 = 2$ мм, $l = 10$ мм. Точки (1–3): 1 – сухая тарелка, 2 – $V = 200$ мл, 3 – 300. Пунктирные линии – начало кольцевого режима при $V = 200$ мл

Для обеспечения минимального гидравлического сопротивления ступени необходимо увеличивать фактор крутки f/F (что снижает скорость газа u_k), уменьшать величину зазора δ_0 и снижать количество щелей n , например путем увеличения их длины.

Толщина и высота вращающего слоя газожидкостной смеси. Указанные параметры необходимы для расчета основных гидродинамических характеристик ступени. Характерные значения H и δ от скорости газа в щели при разных факторах крутки представлены на рисунке 12.

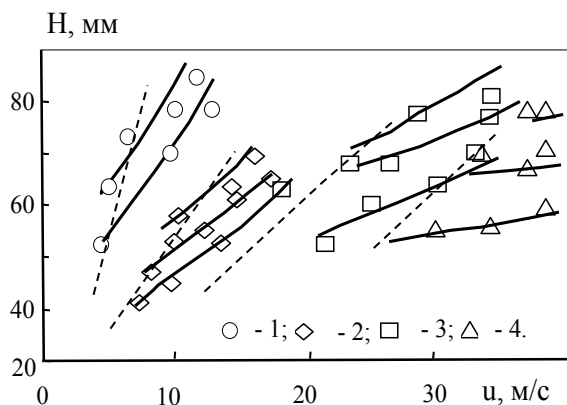


Рис. 12а. Зависимость высоты вращающегося газожидкостного слоя от скорости газа в щели для плоской тарелки с осевым завихрителем при $D = 110$ мм и $V = 100; 200; 300$ мм. Точки (1–4): $1 - f/F = 0,09; 2 - 0,045; 3 - 0,022; 4 - 0,011$. Пунктирная линия – начало кольцевого режима

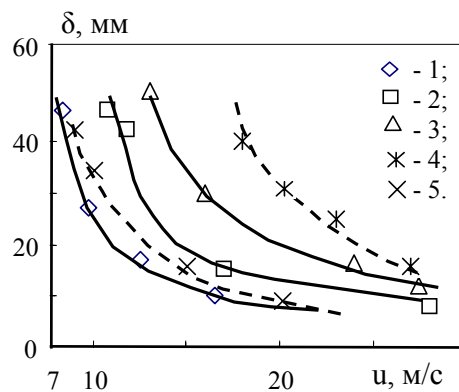


Рис. 12б. Зависимость толщины газожидкостного слоя на ступени от скорости газа в канале для плоской тарелки с осевым завихрителем при $D = 110$ мм, $t = 10$ °С, $V = 200$ мл. Точки (1–3) – тарелка с тангенциальным завихрителем: $1 - f/F = 0,031; 2 - 0,021; 3 - 0,015$. Точки (4–5) – плоская тарелка с осевым многолопастным завихрителем: $4 - f/F = 0,031; 5 - 0,011$

Высота слоя жидкости в начале кольцевого режима практически одинакова для тарелок с разным фактором крутки и зависит от объема жидкости на тарелке. С увеличением скорости газа в щелях происходит рост H и снижение δ .

Для оценки высоты вращающегося газожидкостного слоя получено уравнение в виде:

$$H = C \cdot u^{0,46}, \tag{11}$$

где константа C в уравнении (11) определяется из начальных условий при $u = u_k; H = H_0/(1-\varphi); H_0 = V/0,785 \cdot D^2$ – высота столба жидкости на тарелке.

Для системы «воздух–вода» начало кольцевого режима визуально наблюдается при диаметре внутренней полости газожидкостного слоя 15–20 мм. Толщину газожидкостного слоя несложно рассчитать при наличии величин H и газосодержания φ .

Газосодержание. Доля газа в объеме жидкости определялась согласно [3]:

$$\varphi = (V_{гж} - V_{ж})/V_{гж}, \tag{12}$$

где $V_{гж}$ – объем газожидкостной смеси на тарелке; $V_{ж}$ – объем жидкости на тарелке.

Как установлено и показано на рисунке 13а, в начале кольцевого режима газосодержание на тарелке для осевого и тангенциального завихрителя практически одинаково и не зависит от фактора крутки.

С увеличением объема жидкости на контактной ступени величина газосодержания снижается (рис. 13б). Как показали локальные измерения φ , при увеличении объема жидкости на тарелке доля не аэрируемой жидкости в периферийной зоне ступени возрастает. Газосодержание $\varphi \approx (\sigma/\sigma_0)^{0,2}$ и практически не изменяется при увеличении коэффициента динамической вязкости. С увеличением скорости газа в каналах для прохода газа наблюдается снижение газосодержания на тарелках (рис. 14а) вследствие уменьшения среднего диаметра пузырьков газа (рис. 14б).

Для расчета величины газосодержания можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\varphi = C u^{-n} (\sigma/\sigma_0)^{0,2}, \tag{13}$$

где σ и σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения соответственно для рабочей жидкости и воды; $n = 0,8$ для тарелки с тангенциальным завихрителем и $n = 1,2$ для многолопастного осевого завихрителя. Значение константы C определяется из начальных условий при $u = u_k$ и φ по данным рисунка 13б.

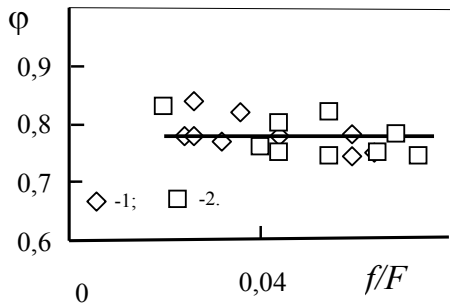


Рис. 13а. Зависимость газосодержания на тарелке от фактора крутки в начале кольцевого режима при $V = 200$ мл и $u = u_k$. Точки (1–2): 1 – тарелка с тангенциальным завихрителем при $\delta_0 = 0,7\text{--}2$ мм, $n = 9\text{--}36$ шт.; 2 – тарелка с многолопастным осевым завихрителем при $\delta_0 = 0,7\text{--}2$ мм, $n = 18\text{--}36$ шт.

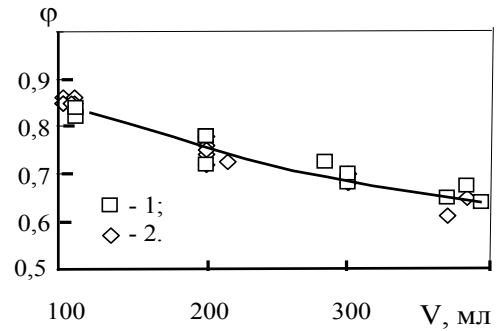


Рис. 13б. Зависимость газосодержания на тарелке от величины объема жидкости при $u = u_k$. Точки (1–2): 1 – тангенциальный завихритель при $\delta_0 = 0,7\text{--}2$ мм, $n = 18\text{--}36$ шт., $D = 101$ мм; 2 – многолопастной осевой завихритель при $\delta_0 = 0,7\text{--}2$ мм, $n = 9\text{--}36$ шт.

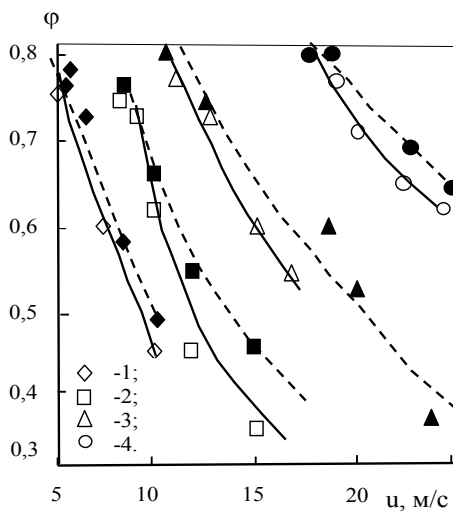


Рис. 14а. Зависимость газосодержания от скорости газа в каналах при $V = 200$ мл. Точки (1–4): 1 – $f/F = 0,089$; 2 – $0,04$; 3 – $0,032$; 4 – $0,022$. Сплошные линии и прозрачные точки для конической тарелки с многолопастным осевым завихрителем при $n = 16$ шт., $l = 26$ мм, $\delta_0 = 1$ мм. Пунктирные линии – тангенциальная тарелка

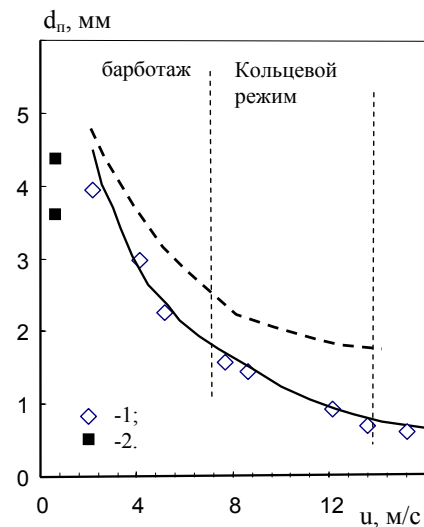


Рис. 14б. Зависимость среднеповерхностного диаметра пузырьков от скорости газа на выходе из щели тарелки с осевым многолопастным завихрителем при $f/F = 0,045$, $\delta_0 = 1\text{--}2$ мм. Пунктирная линия – расчет по уравнению (16). Точки (1–2): 1 – эксперимент; 2 – расчет по уравнению (15) при $\delta_0 = 1\text{--}2$ мм

Диаметр пузырьков газа. Характерные фотографии пузырьков газа в газожидкостном слое, представленные на рисунке 15, позволили рассчитать их среднеповерхностный диаметр по формуле

$$d_n = \sqrt{\frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i}}, \quad (14)$$

где n – количество пузырьков; d – диаметр пузырька.

Диаметр пузырьков газа d_n зависит от величины зазора щели, скоростей газа и газожидкостной смеси, величины центробежной силы и практически не зависит от длины щели и их количества (рис. 16а). Изменение d_n от скорости газа в щели при разном факторе крутки представлено на рисунке 16б.

Расчет диаметра пузырька газа по известному уравнению [4], полученному из баланса сил при медленном истечении газа из отверстия с острыми кромками в неподвижную среду согласно

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \delta_0 \cdot \sigma}{g \cdot (\rho - \rho_2)}} \tag{15}$$

показывает (точки 2 на рис. 14б) удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными в начале барботажного режима.

Расчет d_n по уравнению [5], рекомендованному для пузырьков газа в турбулентном потоке сплошной среды (пунктирная линия на рис.14б), дает завышенные значения диаметра.

$$d_n = 3,48 \cdot \left(\frac{\sigma^3}{\xi^3 \cdot \rho^3 \cdot \varepsilon^2} \right)^{\frac{1}{5}} \tag{16}$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; ξ – коэффициент местного сопротивления сухой тарелки; ε – диссипация энергии, Вт/кг. Диссипация энергии рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon = N/m = [(\rho g H(1-\phi) + \rho_2 u^2/2)Q]/m, \tag{17}$$

где N – мощность, вводимая в аппарат; Q – расход газа; m – масса жидкости на тарелке.

Различие между экспериментальными данными и расчетными показывает, что дробление пузырьков газа в жидкости на вихревой тарелке вызвано также силой инерции и касательными напряжениями между слоями газожидкостной смеси, что не учитывает зависимость (17).

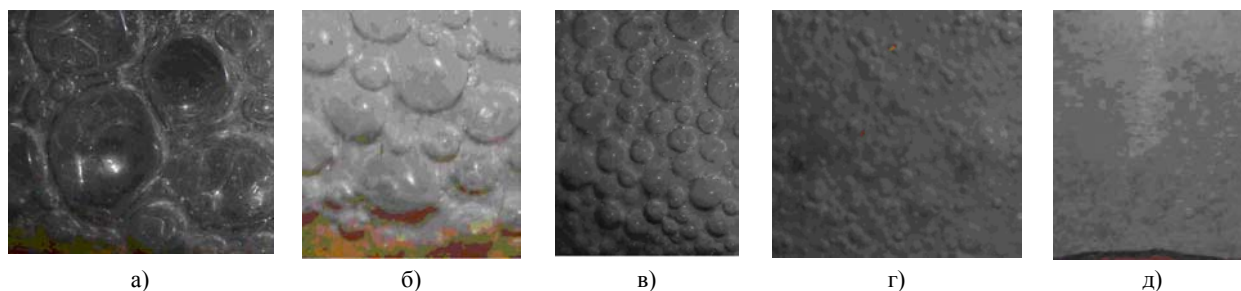


Рис. 15. Фотографии пузырьков газа в газожидкостном слое вихревой тарелки: а – барботажный режим, $u = 7$ м/с; б-г – кольцевой, 12–24; д – пленочный, 35

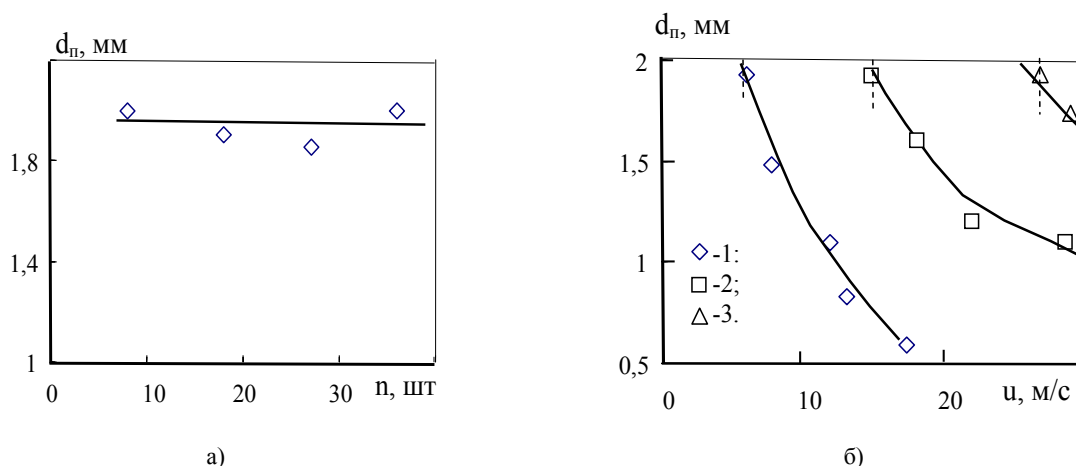


Рис. 16. Изменение среднеповерхностного диаметра пузырьков газа от количества щелей (а) и скорости газа (б) на тарелке с многолопастным осевым завихрителем при $\delta_0 = 1-2$ мм: а) $u = u_k$; б) – точки (1–3): 1 – $f/F = 0,045$; 2 – 0,02; 3 – 0,01. Пунктирная линия – начало кольцевого режима

Межфазная поверхность. Полученные данные позволили рассчитать межфазную поверхность $a = 6\phi/d_n$, величина которой в зависимости от скорости газа в щели и фактора крутки представлена на рисунке 17а.

Согласно проведенному анализу (см. табл.) межфазная поверхность на ступени с вихревой тарелкой существенно выше по сравнению с насадочной колонной. Аналогично удерживающая способность вихревой тарелки (рис. 17б), так же как и среднерасходная скорость газа по сечению ступени в вихревой тарелке, имеет большие значения.

В связи с высокой эффективностью, производительностью и достаточно низким гидравлическим сопротивлением вихревые тарелки можно рекомендовать для их широкого использования в промышленности, в частности для получения абсолютного этанола под вакуумом и разделения растворителей после экстракции продуктов растительного сырья.

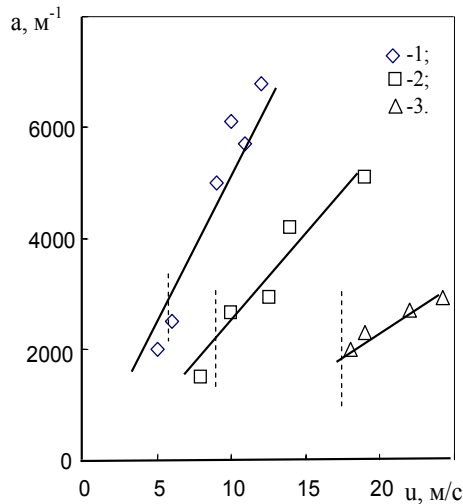


Рис. 17а. Зависимость межфазной поверхности от скорости газа в щели при разном факторе крутки на плоской конической тарелке с осевым многолопастным завихрителем при $\delta_0 = 1-2$ мм. Точки (1–3): 1 – $f/F = 0,045$; 2 – 0,03; 3 – 0,02. Пунктирная линия – начало кольцевого режима

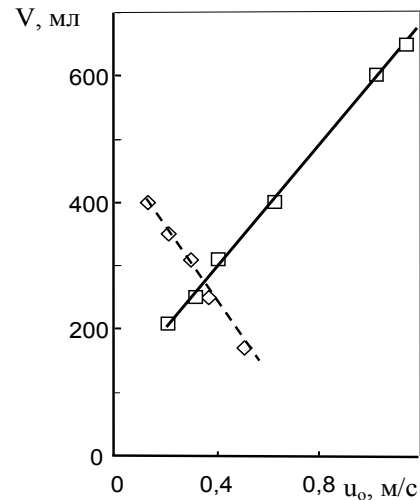


Рис. 17б. Зависимость удерживающей способности контактной ступени в вихревой и насадочной колонне в зависимости от скорости газа по сечению колонны. Пунктирная линия – насадочная колонна при $D = 100$ мм, $H_{ст} = 100$ мм. Сплошная линия тарелка – с тангенциальным завихрителем при $f/F = 0,045$

Характеристики насадочных и вихревых тарелок

Название	u_0 , м/с	u_H/u_K	ΔP , мм вод.ст./м	a , м ² /м ³	Источник
Кольца Рашига 10×10×1,5	0,4–0,6	0,67	25–200	500–800	[4, 6]
Спиральи с сомкнутыми витками 2×2×0,3	0,2–0,5	0,6	80–260	750–1200	[1]
Ступени с тангенциальным и многолопастным осевым завихрителем (кольцевой режим)	0,2–1,8	0,5–0,6	80–800	1500–6000	Данные авторов

Список литературы

1. Войнов Н.А., Кустов А.В. Ректификация смеси этанол–вода под вакуумом // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: мат. Всерос. конф. Барнаул, 2007. Кн. 3. С. 163–166.
2. Овчинников А.А. Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах. Казань, 2005. 288 с.
3. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. Л., 1976. 216 с.
4. Рамм В.М. Абсорбция газов. М., 1975. 665 с.
5. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб., 2000. 359 с.
6. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. М., 1978. 278 с.

Поступило в редакцию 14 января 2008 г.