

УДК 621.8:532.5:66.021.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКОВ НА МАССООБМЕННОЙ ПРЯМОТОЧНОЙ СТРУЙНОЙ ТАРЕЛКЕ

Шибитова Н.В., Ву Минь Тханг, Гущина Л.В.

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград,  
e-mail: natanik@vstu.ru

В статье приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики прямооточной струйной массообменной тарелки с переливным устройством подвешенного типа, которая может быть применена при переработке попутных природных газов и других, склонных к пенообразованию растворов. Разработчикам трудно оценить влияние пены на размеры массообменных аппаратов, поэтому они вынуждены увеличивать число тарелок и диаметр аппаратов, а расстояние между тарелками выбирают более 500 мм. Применение отбойных элементов на тарелках уменьшает унос жидкости на вышерасположенную тарелку, но увеличивает циркуляцию газа через переливное устройство, что снижает движущую силу массообмена. Разработанная авторами конструкция струйной массообменной тарелки позволяет увеличить производительность за счет увеличения рабочей площади тарелки, поскольку гидрозатвор расположен в межтарельчатом пространстве. Кроме того, переливное устройство занимает не всю площадь сегмента для перелива, а остается проход для жидкости, причем сливная перегородка находится с задней стороны выступающей части перелива. Передняя стенка переливного устройства имеет высоту 100–150 мм, что значительно снижает переброс жидкости непосредственно в переливной карман, причем за счет сил инерции парожидкостного потока на передней стенке происходит сепарация, жидкая фаза стекает вниз и обтекает вокруг переливного устройства, а газовая (паровая) фаза направляется в контактные элементы. В результате проведенных исследований получены графические зависимости гидравлического сопротивления тарелок при различных расходах газа и жидкости для разных высот передней стенки переливного устройства, а также исследовано движение потоков на прямооточной тарелке. Показано, что путем конструктивных изменений можно влиять на распределение потоков по полотну тарелки.

**Ключевые слова:** гидродинамика, струйная тарелка, массообмен, гидрозатвор, гидравлическое сопротивление

## STUDY OF FLOW HYDRODYNAMICS ON MASS EXCHANGE STRAIGHT-FLOW JET PLATE

Shibitova N.V., Vu Min Tkhang, Guschina L.V.

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education State  
«Volgograd State Technical University», Volgograd, e-mail: natanik@vstu.ru

The article presents the results of experimental studies of hydrodynamics of straight-flow jet mass exchange tray with overflow device of suspended type, which can be used in processing of associated natural gases and other solutions prone to foaming. It is difficult for developers to assess the influence of foam on the dimensions of mass exchange apparatuses, so they have to increase the number of trays and the diameter of the apparatuses, and the distance between the trays is chosen more than 500 mm. The use of fenders on trays reduces fluid entrainment to an upstream tray, but increases gas circulation through an overflow device, which reduces the driving force of mass transfer. The design of the jet mass exchange tray developed by the authors allows to increase productivity due to increase of the working area of the tray, as the hydraulic lock is located in the inter-tray space. In addition, the overflow device does not occupy the entire area of the overflow segment, but remains a liquid passage, the drain partition being on the rear side of the overflow projection. The front wall of the overflow device has a height of 100-150 mm, which significantly reduces the transfer of liquid directly into the overflow pocket, wherein due to the inertia forces of the vapor-liquid flow on the front wall there is separation, the liquid phase flows down and flows around the overflow device, and the gas (vapor) phase is directed to the contact elements. As a result of carried out investigations there obtained are graphical dependencies of hydraulic resistance of trays at different flow rates of gas and liquid for different heights of front wall of overflow device, as well as motion of flows on straight-flow tray is investigated. It is shown that by means of design changes it is possible to influence the distribution of flows over the tray web.

**Keywords:** hydrodynamics, jet plate, mass transfer, hydraulic seal, hydraulic resistance

В химической, нефтехимической и пищевой промышленности широко применяются для проведения массообменных процессов тарельчатые массообменные аппараты. Несмотря на то, что в настоящее время разработаны сотни конструкций массообменных тарелок, появляются новые конструктивные разработки, направленные на решения конкретных задач, связанных с повышением эффективности массообменных процессов, снижением энергозатрат. Однако практически отсутствуют разработки, связанные с разделением пенящихся

растворов, хотя они встречаются во многих процессах переработки попутных углеводородных газов [1, 2].

Образующаяся пена при проведении массообменного процесса, с одной стороны, увеличивает взаимодействие между фазами, с другой стороны, заполняя межтарельчатое пространство, нарушает гидродинамику процесса, что снижает эффективность массообмена. При этом происходит циркуляция фаз, на вышерасположенную тарелку уносится жидкость, а через переливное устройство пузырьки

пара. Ввод пенообразующих добавок полностью не решает проблему [1].

Не зная степень пенообразования сред, трудно учесть влияние свойств системы на размеры контактных элементов тарелки, на размеры переливных устройств и в конечном счете на производительность колонны. Поэтому проектировщики тарельчатых массообменных аппаратов просто занижают производительность колонны и увеличивают расстояние между тарелками до 500 мм и более. Установка отбойников на массообменных тарелках снижает унос жидкости, но значительно увеличивает перенос газовых пузырьков через переливное устройство [3]. В данной работе описаны особенности конструкции прямоточной струйной массообменной тарелки с переливным устройством подвешенного типа, позволяющие улучшить сепарацию газа за счет изменения потоков парожидкостной среды по полотну тарелки [4].

Цель работы: проведение экспериментальных исследований гидродинамики прямоточной струйной тарелки.

#### Материалы и методы исследования

Для решения поставленной цели разработана экспериментальная установка [5], состоящая из прозрачной колонны диаметром 500 мм со струйными прямоточными тарелками с разными наклонами пластин контактных элементов и оборудованная приборами КИП. Исследования проводились по стандартной методике [3].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Исследования гидродинамики прямоточных струйных массообменных тарелок

с переливными устройствами подвешенного типа проводились на экспериментальной установке, состоящей из прозрачной колонны диаметром 0,5 м, в которой установлены две струйные тарелки с контактными элементами, представляющими собой отогнутые П-образные пластины, вырезанные непосредственно в полотне тарелки. Угол наклона пластин в экспериментальных исследованиях составлял 16 и 18°. В технической литературе рекомендуется принимать угол наклона пластин 10–30° [3]. Гидродинамические исследования проводились на системе «воздух – вода». Конструктивные особенности прямоточных струйных тарелок с переливными устройствами подвешенного типа проработаны и описаны в работе [6, 7].

В настоящее время не удается сформулировать обоснованные рекомендации по методике расчета и выбору конструктивных характеристик массообменных тарелок, применяющихся в реальных процессах и условиях разделения. Поэтому проектировщики химического оборудования вынуждены увеличивать диаметр и высоту колонных тарельчатых аппаратов. Так, в [8] отмечается, что при очистке углеводородных газов «для абсорбера тарельчатого типа она (высота) зависит от числа тарелок, необходимых для обеспечения требуемой степени очистки газа. Учитывая, что коэффициент полезного действия тарелок не превышает 25–40%, число их обычно принимается равным 25–30 шт. Из-за возможного вспенивания раствора обычно расстояние между тарелками принимается равным 500 мм».

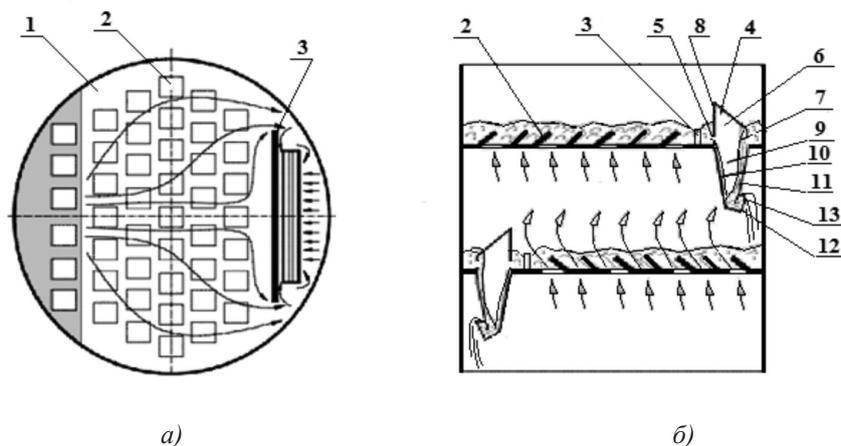


Рис. 1. Прямоточная массообменная тарелка с переливным устройством подвешенного типа: а – направление потоков на тарелке; б – схема работы массообменной тарелки. 1 – полотно тарелки; 2 – контактные элементы; 3 – форпланка; 4 – переливное устройство; 5 – сливные щели; 6 – выступающая часть; 7 – переливная планка; 8 – передняя стенка выступающей части; 9 – переливной карман; 10 – передняя грань переливного кармана; 11 – отбойник; 12 – дно; 13 – сливная планка

Следовательно, эффективность массообмена зависит в большей степени от гидродинамических условий на тарелке, особенно для прямоточных струйных тарелок, применяемых для растворов, склонных к пенообразованию.

Исследуемая конструкция прямоточной массообменной тарелки с переливным устройством подвешеного типа повышает эффективность работы за счет увеличения высоты передней стенки переливного устройства до 100–150 мм, что позволяет значительно улучшить сепарацию газожидкостного потока, а также практически полностью исключить переброс вспененной жидкости непосредственно в переливной карман.

На рис. 1 изображена прямоточная массообменная тарелка с переливным устройством подвешеного типа и направлением движения потоков по полотну тарелки и обтеканием жидкостью периметра перелива (затемненная область – увеличение рабочей поверхности).

С целью увеличения пропускной способности переливного устройства по жидкости в его выступающей части выполнены щели на уровне полотна тарелки. Форпланка, установленная перед переливным устройством, направляет газожидкостный поток на его переднюю стенку, а также исключает возврат осветленной жидкости в прорези контактных элементов [5].

При работе прямоточной тарелки жидкость из переливного устройства стекает по сливной планке и направляющей пластине на полотно тарелки, образуя определенный уровень в начальной зоне тарелки, затем жидкость захватывается потоком газа, смешивается с ним и перемещается в виде газожидкостного потока к переливному устройству. В зависимости от расхода газа, расхода жидкости, угла наклона пластин контактных элементов на тарелке создается определенный гидродинамический режим. Результаты экспериментальных исследований подтверждают выводы [3] об увеличении угла вылета струи под действием подъемной силы. При величине наклона пластины  $16^\circ$  угол разбрызгивания составлял  $22^\circ$ , а при наклоне пластин  $18^\circ$  угол достигал  $32\text{--}34^\circ$ . Следует отметить, что визуально при меньшем наклоне пластин максимум подъема струи наблюдался на большем расстоянии от прорези в тарелке, но при этом распыление жидкости было хуже.

При стабильной работе массообменной тарелки газожидкостный поток попадал на наклоненную в сторону перелива форпланку, которая направляла этот поток на переднюю стенку выступающей части переливного устройства. При ударе струи в стенку

газожидкостный поток под действием сил инерции разделялся на газовую фазу, которая смешалась к стенке колонны, а затем в контактные элементы вышерасположенной тарелки. Жидкость стекала по передней стенке на полотно тарелки, часть осветленной жидкости попадала в сливные отверстия, другая часть огибала переливное устройство с обеих сторон и через переливной порог задней стенки перелива стекала в переливной карман, представляющий собой закрытый объем, разделенный отбойником на две полости, образующие сообщающиеся сосуды.

На рис. 2 приведена расчетная схема действия сил: верхняя часть переливного устройства находится в межтарельчатом пространстве над тарелкой, где действует давление  $P_{\text{верх}}$ , а нижняя часть находится в межтарельчатом пространстве под тарелкой, где давление  $P_{\text{ниж}}$ , эти пространства сообщаются через переливное устройство. При отсутствии дренажных отверстий в дне переливного устройства уровень жидкости устанавливается по верхнему краю сливной планки. На работающей установке в переливном кармане устанавливается определенный уровень жидкости в соответствии с давлениями в надтарельчатом и подтарельчатом пространствах.

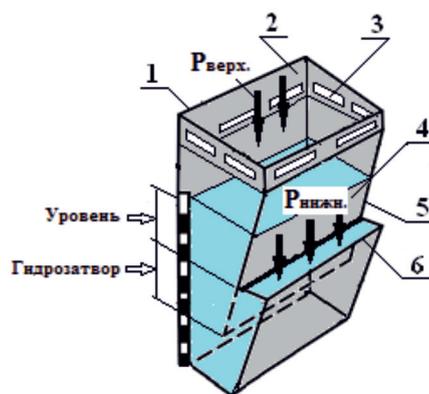


Рис. 2. Расчетная схема действия сил в переливном устройстве: 1 – передняя планка; 2 – выступающая часть перелива; 3 – сливные отверстия; 4 – переливной карман; 5 – отбойник; 6 – сливная планка

Так как давление  $P_{\text{ниж}}$  определяется гидравлическим сопротивлением орошаемой тарелки  $P_{\text{ор.т}}$  и сопротивлением переливного устройства  $P_{\text{пер.уст.}}$ , то

$$P_{\text{ниж}} = P_{\text{ор.т.}} + P_{\text{пер.уст.}} \quad (1)$$

Сопротивление переливного устройства определялось экспериментально. Зная производительность и размеры выходного сечения переливного устройства, рассчиты-

влась скорость течения жидкости в переливном устройстве  $v_{жi}$  из уравнения неразрывности [9]

$$v_{жi} = \frac{q_{vi}}{F_{\text{вых}}}, \quad (2)$$

где  $q_{vi}$  – объемный расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $F_{\text{вых}}$  – площадь выходного сечения,  $\text{м}^2$ .

Уровень жидкости в переливном кармане соответствовал сопротивлению переливного устройства при данном расходе жидкости, тогда сопротивление переливного устройства [10]

$$\Delta p_{\text{пер},i} = \zeta_{\text{об},i} \cdot \rho_{ж} \frac{v_{жi}^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\zeta_{\text{об},i}$  – коэффициент сопротивления переливного устройства;

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Из уравнения (3) рассчитывался коэффициент сопротивления  $\zeta_{\text{об},i}$

$$\zeta_{\text{об},i} = \frac{2\Delta p_{\text{пер},i}}{\rho_{ж} \cdot v_{жi}^2}.$$

При подаче жидкости и воздуха уровень жидкости в переливном устройстве поднимался, так как в подтарельчатом пространстве в соответствии с уравнением (1) действует сопротивление тарелки, которое больше давления в надтарельчатом пространстве.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований влияния расхода жидкости и расхода воздуха на разность уровня (превышение уровня жидкости над высотой сливной планки) для тарелки с углом наклона пластин  $16^\circ$  (верхние кривые) и тарелки с углом наклона пластин  $18^\circ$  (нижние кривые).

Очевидно, что уровень жидкости выше для тарелки с большим гидравлическим сопротивлением, т.е. у тарелки с углом наклона пластин  $16^\circ$ . Важной характеристикой переливного устройства является его пропускная способность [11, 12]. В экспериментальных исследованиях предельная скорость по жидкости достигала  $0,427 \text{ м}/\text{с}$ .

На рис. 4 приведены результаты исследований гидравлического сопротивления разработанной конструкции тарелки при высоте передней стенки переливного устройства  $50 \text{ мм}$ .

С увеличением расхода жидкости и воздуха сопротивление тарелки увеличивалось, причем, для различных диапазонов расхода жидкости рост сопротивления изменялся, что связано с переходом на другие режимы работы тарелки. Для тарелок с высотой передней стенки  $100$  и  $150 \text{ мм}$  сопротивление увеличивалось в среднем на  $2\text{--}3 \text{ мм вод. ст.}$  Разработанная конструкция может быть рекомендована для работы со слабепянящимися средами.

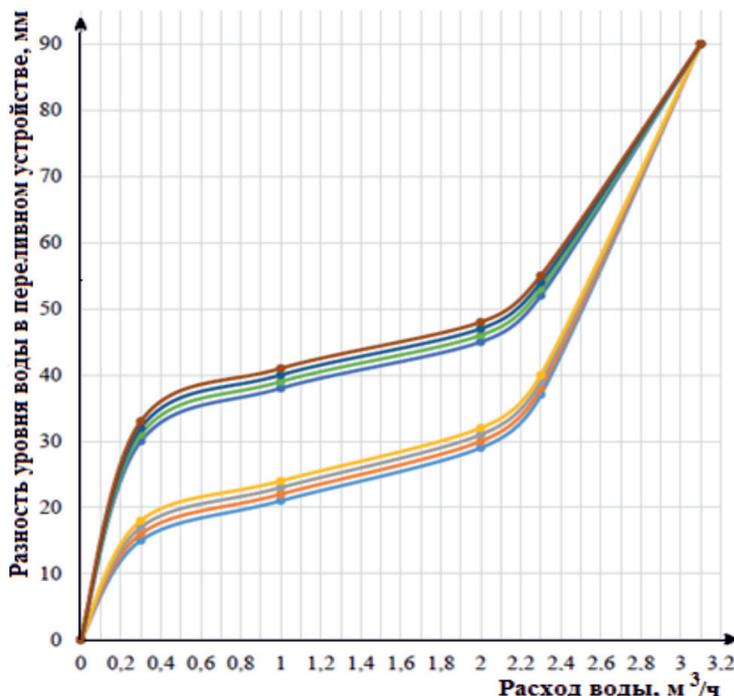


Рис. 3. График зависимости разности уровня жидкости в переливном устройстве на верхней и нижней тарелках в зависимости от расхода воды (при расходе воздуха  $600\text{--}710 \text{ м}^3/\text{ч}$ )

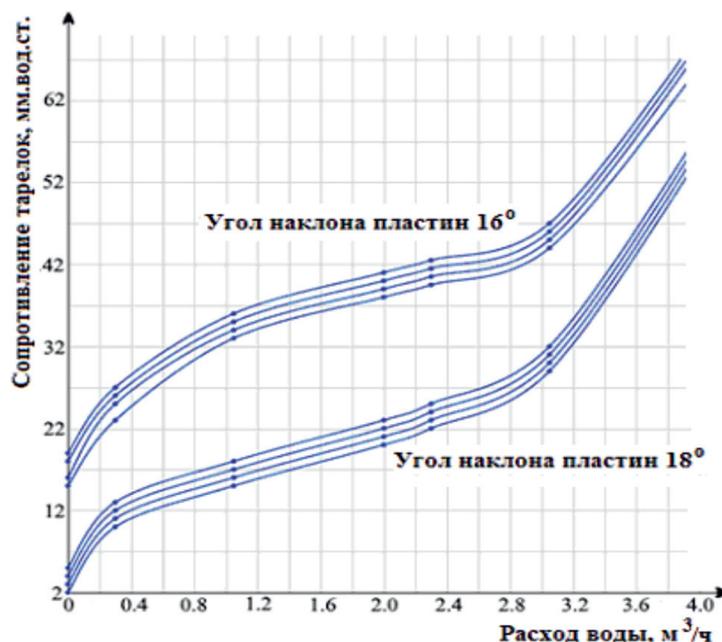


Рис. 4. Гидравлическое сопротивление тарелок в зависимости от расхода воды (при расходе воздуха 600–710 м<sup>3</sup>/ч)

### Заключение

В данной работе разработана конструкция прямоточной тарелки с переливным устройством подвешенного типа, позволяющая изменить движение потоков по полотну тарелки, что значительно улучшает сепарацию газовой фазы, а также снизить до минимума циркуляцию пузырьков газа через переливное устройство.

В результате экспериментальных исследований установлены зависимости гидравлического сопротивления струйных тарелок, угла разбрызгивания жидкости в контактных элементах от расхода жидкой фазы и газового потока с углами наклона пластин с трехсторонним вырезом в 16 и 18° и высотой передней стенки переливного устройства 50 мм, 100 мм и 150 мм.

В работе определены режимы захлебывания переливного устройства при следующих расходах жидкости: для высоты передней стенки 50 мм – 3,05 м<sup>3</sup>/ч, для высоты передней стенки 100 мм – 3,3 м<sup>3</sup>/ч, для высоты передней стенки 150 мм – 3,62 м<sup>3</sup>/ч.

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют оценить влияние отдельных конструктивных параметров на гидродинамику разработанной конструкции массообменной тарелки.

### Список литературы

1. Берлин М.А., Гореченков В.Г., Капралов В.П. Квалифицированная первичная переработка нефтяных и природ-

ных углеводородных газов. Краснодар: Советская Кубань, 2012. 517 с.

2. Кузнецов А.А., Кагерманов С.М., Судаков Е.Н. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности. Изд. 2-е пер. и доп. Л.: Химия, 1974. 344 с.

3. Стабников В.Н. Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных и абсорбционных аппаратов. Киев: Техника, 1970. 208 с.

4. Шибитова Н.В., Шибитов Н.С., Голованчиков А.Б., Новиков А.Е. Прямоточная массообменная тарелка для процессов разделения газовых и жидких сред // П. м. РФ № 172835. Патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». 2017. Бюл. № 21. С. 6.

5. Михалев Д.О. Разработка конструкции и экспериментальные исследования прямоточной струйной тарелки // Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета (Волгоград, 16–19 мая 2017 г.): тез. докл. В 2 ч. Ч. 1 (направления 1–9) / редкол.: А.В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.]. Волгоград: ВолгГТУ, 2017. С. 112.

6. Шибитова Н.В., Шибитов Н.С., Голованчиков А.Б., Полупан И.В. Новая конструкция массообменной тарелки с переливным устройством подвешенного типа // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 10. С. 18–21.

7. Шибитова Н.В., Михалев Д.О., Попова А.Д. Новые конструкции переливных устройств для массообменных тарелок колонных аппаратов // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 9. С. 145–149.

8. Абсорберы тарельчатого типа. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chem21.info/info/1505117> (дата обращения: 14.08.2019).

9. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. Учебник: в 2 кн. 5-е изд. (эл.). М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 1758 с.

10. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. М.: Химия, 1978. 280 с.

11. Ларькин А.В. Исследование гидродинамики и массопередачи на прямоточной клапанной-ситчатой тарелке новой конструкции: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014. 165 с.

12. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособие. М.: Химия, 2011. 1229 с.