

УДК 66.048.3

**СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ МАССООБМЕННЫХ ТАРЕЛОК****Молоканова Л.С., Шибитова Н.В., Колоскова В.В.***ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград,  
e-mail: natanik@vstu.ru, natanik40@mail.ru*

В работе приведен анализ развития направления по конструированию контактных устройств массообменных процессов, связанных с разделением и переработкой сред с различными свойствами. Отмечено, что, несмотря на многообразие конструкций массообменных тарелок, они, прежде всего, должны обеспечивать высокую эффективность разделения различных сред, т.е. получение качественных продуктов, учитывая при этом величину гидравлического сопротивления на одну теоретическую ступень контакта фаз, а также большой диапазон рабочих нагрузок. Установлено, что при высоких нагрузках по пару и жидкости рекомендуется применять прямооточные тарелки (клапанные, клапано-ситчатые, струйные, чешуйчатые). Скорость пара (газа) в отверстиях этих тарелок достигает 12–14 м/с. Поток жидкости, смешанный с парожидкостным потоком, попадая в переливное устройство, уносит часть пузырьков газа (пара) на нижерасположенную тарелку. В прямооточных тарелках возникают проблемы с сепарацией газа и распределением потоков. В рассмотренных работах часть вопросов решается путем комбинирования типов тарелок, например ситчатых и клапанных, или распределением потоков за счет дополнительной установки контактных элементов. Большой интерес представляют конструкции прямооточных тарелок, в которых гидрозатвор перенесен в межтарельчатое пространство, что позволяет увеличить рабочую площадь тарелок, а также изменить характер потоков на контактном устройстве. В данных конструкциях тарелок увеличена высота передней стенки переливного устройства, что исключает заброс парожидкостного потока непосредственно в переливное устройство, а осветленный поток жидкости отводится через стенку переливного устройства и сливные отверстия. Результаты подтверждены экспериментальными исследованиями.

**Ключевые слова:** массообменные процессы, коэффициент полезного действия, барботаж, ситчато-клапанная тарелка, застойная зона, струйная тарелка, поверхность контакта фаз, гидрозатвор

**MODERN DESIGN MASS TRANSFER PLATES****Molokanova L.S., Shibitova N.V., Koloskova V.V.***Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education State  
«Volgograd State Technical University», Volgograd, e-mail: natanik@vstu.ru, natanik40@mail.ru*

The paper presents an analysis of the development direction for the design of contact devices of mass transfer processes associated with the separation and processing of media with different properties. It is noted that, despite the variety of designs of mass transfer plates, they, first of all, should provide high efficiency of separation of different media, i.e. obtaining high-quality products, taking into account the value of hydraulic resistance at one theoretical stage of contact phases, as well as a large range of workloads. It is established that at high loads of vapor and liquid, it is recommended to use flow plates (valve, valve-strainer, jet, scaly). The rate of vapor (gas) in the holes of these plates reaches 12-14 m/s. The flow of liquid, mixed liquid-vapor stream entering the overflow device, takes some of the gas bubbles (vapor) on the downstream plate. In straight-flow plates there are problems with gas separation and flow distribution. In the considered works, some of the issues are solved by combining the types of plates, for example, sieve and valve or the distribution of flows due to the additional installation of contact elements. Of great interest are the designs of straight-flow plates, in which the hydraulic lock is transferred to the inter-belt space, which allows to increase the working area of the plates, as well as to change the nature of the flows on the contact device. In these structures plates increased height of the front wall of the overflow device, which eliminates the casting of vapor-liquid flow directly into the overflow device, and clarified the flow of liquid is removed through the wall of the overflow device and drain holes. The results are confirmed by experimental studies.

**Keywords:** mass transfer processes, coefficient of efficiency, bubbling, sieve-valve plate, stagnant zone, the jet plate, the surface of contact of phases, hydraulic lock

В последнее время перед разработчиками и производителями оборудования химической, нефтехимической, пищевой отраслей промышленности для проведения массообменных процессов ставится задача, наряду с повышением эффективности тарельчатых колонных аппаратов, также и снижения энергозатрат, особенно в процессах ректификации и других теплообменных процессах.

В колонных аппаратах применяются тарелки различных конструкций [1, 2], которые отличаются не только конструк-

тивными особенностями, но и технико-экономическими характеристиками. Тарелки широко используются в процессах ректификации, абсорбции, экстракции, при очистке сточных вод и мокрой очистки газов от пыли при разных рабочих условиях и изготавливаются в соответствии с ГОСТ Р 53684-2009 [3].

В большинстве случаев новые конструкции массообменных тарелок появились за последние 50 лет. Раньше на предприятиях химической и нефтехимической промышленности применялись тарелки толь-

ко колпачковые и ситчатые. Многообразие конструкций тарелок обусловлено требованиями повышения качества получаемых продуктов и разнообразием свойств перерабатываемых сред, от их высокой вязкости до наличия твердых примесей при обработке, например, нефтешламов и очистке сточных вод. Особые требования к конструкциям тарелок необходимы при работе с пенящимися растворами. Оценка конструкций тарелок осуществляется в первую очередь по эффективности разделения, производительности и гидравлическому сопротивлению.

Цель исследования: анализ новых конструкций массообменных тарелок колонных аппаратов.

### Материалы и методы исследования

Для решения поставленной цели исследования была использована учебная и техническая литература по массообменным процессам, монографии, научные статьи, материалы кандидатской диссертации и патенты.

### Результаты исследования и их обсуждение

В монографии Х.Н. Ясафеева, А.Г. Лаптева и М.И. Фарахова [4] рассмотрены наиболее распространенные конструкции тарелок, а также приведены конкретные методики расчета аппаратов при модернизации промышленных установок разделения и переработки углеводородного сырья. Разработаны математические модели расчета эффективности разделения смесей.

В монографии А.Г. Лаптева [5] приведен сравнительный анализ различных контактных устройств в тепло- и массообменных аппаратах, даны рекомендации по методике их расчета на основании результатов опытных исследований, подтверждающих математические модели, позволивших получить уравнения для расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи с целью оценки эффективности массообменных процессов в промышленных аппаратах.

В теоретической части монографии [6] рассмотрены методики расчета массообменных колонн применительно к процессам ректификации с учетом продольного перемешивания. На основании обзора конструкций контактных устройств, разработанных авторами, а также проведенных гидродинамических экспериментальных исследований для некоторых из них выполнено моделирование реальных процессов химической технологии, позволивших значительно снизить энергозатраты за счет повышения эффективности работы массообменных аппаратов и снижения гидравлического сопротивления контактных устройств.

Важнейшей проблемой проведения экспериментальных исследований массообменных процессов является так называемый масштабный переход, так как трудно определить структуру потоков в реальных аппаратах на основании результатов экспериментальных исследований. Например, в зарубежных фирмах (Кох-Глитч) распределение жидкого потока на входе в колонну исследуется на стенде, диаметр которого составляет до 10 м. Известно, что при увеличении размеров колонны структура потоков значительно меняется, образуются застойные зоны, возникает циркуляция потоков, снижающая движущую силу процесса, а следовательно, и эффективность массообмена.

В статье [7] изучены причины появления неравномерности распределения газовой (паровой) фазы при входе на тарелку и жидкой фазы по полотну массообменной тарелки. Для учета влияния неравномерностей распределения фаз на контактном устройстве предложен алгоритм расчета КПД тарелки по Мерффи.

ЗАО «ПЕТРОХИМ ИНЖИНИРИНГ» совместно с Российским государственным университетом нефти и газа им. И.М. Губкина разработали [8] прямоточную клапанно-ситчатую тарелку для массообменных аппаратов, в которой установлены клапаны с односторонним открытием в виде пластин с отверстиями, под которыми размещены козырьки. Козырьки, имеющие переменную высоту, в сторону открытия пластин, а направлены в противоположную открытию пластин сторону. При использовании такой тарелки обеспечивается интенсивная турбулизация контактирующих фаз и увеличивается поверхность контакта фаз.

А.В. Ларькин в своей диссертации [9] исследовал гидродинамику и массопередачу прямоточных клапанно-ситчатых тарелок [8], определил минимальную и максимальную допустимые нагрузки по газу. На основании проведенных экспериментальных исследований разработана методика расчета гидравлического сопротивления конкретных контактных устройств, построены графические зависимости, позволяющие определить величину гидравлического сопротивления при различных нагрузках по газу и жидкости.

Для увеличения КПД тарелок путем исключения застойных зон на боковых сегментах полотна контактного устройства в ОАО «НИПИГазпереработка» С.И. Бойко с соавторами разработана конструкция ситчато-клапанной тарелки [10], в которой на горизонтальном перфорированном полотне этой тарелки установлены клапаны с различной длиной ножек. Ситчато-клапанная тарелка массообменного аппарата [10] содержит

распределительную и переливную планки, приемный и сливной карманы. Причем часть клапанов, расположенных на концах распределительной планки, выполнены развернутыми относительно остальных клапанов в центральную часть полотна тарелки. Также между клапанами установлены направляющие пластины. По мнению разработчиков, данная конструкция тарелки обеспечивает увеличение скорости течения жидкой фазы и создает ее равномерное распределение по всей поверхности тарелки, что увеличивает эффективность работы тарелки.

Проблемой работы массообменных тарелок при больших нагрузках по паровой фазе является унос жидкости с нижерасположенной на вышерасположенную тарелку. В патенте [11] предлагается конструкция клапанной тарелки для массообменных колонн, на полотне которой устанавливается дефлектор, представляющий собой пару проходящих в продольном направлении пластин под углом друг к другу, чтобы жидкая фаза легко стекала по тарелке к переливному устройству.

Профессор А.Б. Голованчиков с сотрудниками Волгоградского государственного технического университета рекомендуют клапанную тарелку [12], в которой опорный элемент выполнен в виде винтовой пружины с закрепленным грузом, состоящим из стержня с гайкой и шайбами. Масса клапана с грузом определяется по формуле

$$M = \left( \frac{2l}{\pi c} \right)^2 \cdot a, \quad (1)$$

где  $M$  – масса клапана с грузом, кг;  
 $l$  – длина винтовой пружины, м;  
 $c$  – скорость звука в газовой (паровой) фазе, м/с;  
 $a$  – жесткость пружины, Н/м.

Такая конструкция клапана позволяет вести процесс массопереноса между пузырьками газа (пара) и неньютоновской жидкостью в режиме резонансных автоколебаний. Резонансные колебания винтовой пружины идут с высокой амплитудой, что приводит к разрушению структуры высоковязкой структурированной неньютоновской жидкости, а эффективная вязкость снижается. Поэтому скорость массообмена на границе поверхности газовых пузырьков с жидкостью значительно возрастает.

Целью изобретения [13], предложенного И.В. Сахаровым, является дальнейшее совершенствование конструкции чешуйчато-клапанной тарелки путем изменения расположения чешуек и клапанов на тарелке без применения дополнительных опорных элементов.

Клапан выполнен с отгибами, и между крышкой клапана и основанием тарелки остается сечение для прохода пара (газа), выходящих из-под клапана струи пара (газа), снижают образование слоя отложений на тарелке. На основании тарелки установлены устройства из жалюзийного полотна, предотвращающие унос жидкости паром (газом) на вышележащую тарелку, что повышает эффективность массообмена за счет создания дополнительной поверхности контакта.

В работе [14] представлена интересная конструкция чешуйчато-клапанной тарелки (рис. 1), включающая карман 1 для жидкости, сливную перегородку 2, основание 3 с отверстиями 4, в которых жестко прикреплены с помощью горизонтальной пластины 6 плоские клапаны 5 к основанию 3, а над каждой прорезью 7 установлена чешуйка 8. Причем плоские клапаны 5, чешуйки 8 и опоры 9 выполнены из упругого материала с возможностью колебаний под действием потока газа (пара), выходящих из отверстий 4 и прорезей 7, что позволяет дробить этот поток на большое число мелких пузырьков, способствуя увеличению производительности.

В рассмотренных выше конструкциях рабочая площадь тарелки используется нерационально, так как значительная её часть занята стандартными сливными и переливными устройствами и, таким образом, исключается из процесса активного массообмена, что в конечном счете влияет на производительность колонны.

В разработанной авторами конструкции массообменной тарелки [15] за счет перенесения гидрозатвора с рабочей площади полотна в межтарельчатое пространство увеличивается производительность колонны на 14%. В статье [16] приведена конструктивная разработка колонного аппарата с массообменными тарелками данного типа.

Проведение исследований по гидродинамике ситчатой тарелки с переливным устройством подвешенного типа показало [17], что такое техническое решение обеспечивает повышенную пропускную способность по жидкости и хорошее газоотделение.

В технической литературе практически отсутствуют сведения о конструкциях массообменных тарелок, предназначенных для разделения растворов, склонных к пенообразованию. В работе [18] разработана конструкция прямооточной массообменной тарелки для процессов разделения газовых (паровых) и жидких сред, состоящая из горизонтального полотна 1 с барботажными элементами 2 (рис. 2), переливного устройства 3, выполненного в виде статического гидрозатвора 4 подвешенного типа обтекаемой формы.

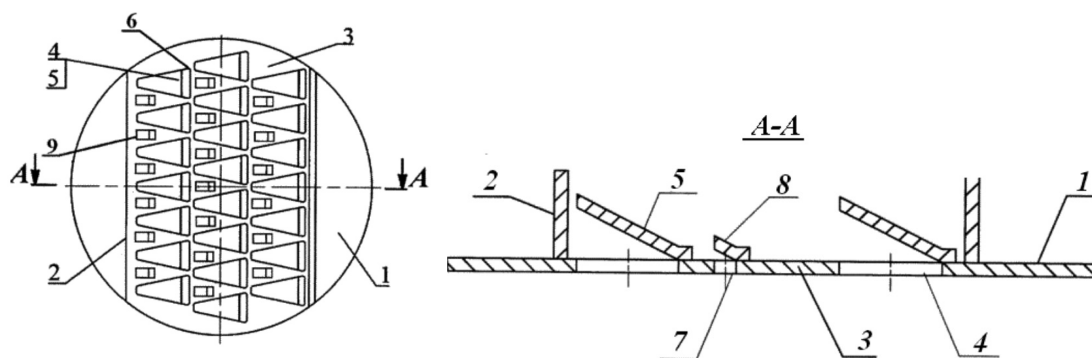


Рис. 1. Чешуйчато-клапанная тарелка [14]: 1 – карман; 2 – сливная перегородка; 3 – основание; 4 – отверстия; 5 – клапаны; 6 – пластины; 7 – прорезы; 8 – чешуйки; 9 – горизонтальная опора

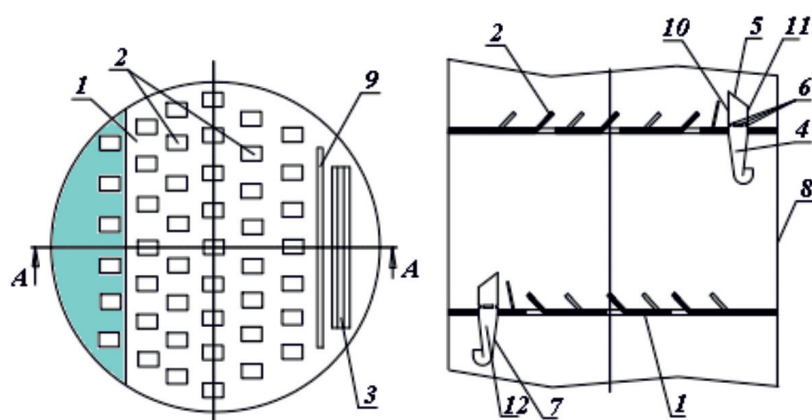


Рис. 2. Массообменная тарелка с переливным устройством [17]: 1 – горизонтальное полотно; 2 – барботажные элементы; 3 – переливное устройство; 4 – статический гидрозатвор; 5 – переливной порог; 6 – отверстия; 7 – передняя стенка; 8 – стенка корпуса колонны; 9 – форпланка; 10 – передняя стенка; 11 – задняя стенка; 12 – боковая стенка

Перед переливным порогом 5 установлена форпланка 9, создающая условия для инерционной сепарации газа и перекрывающая возврат осветленной жидкости в отверстия контактных элементов. Передняя стенка 10 выступающего переливного порога 5 выполнена значительно выше его задней стенки 11, что исключает попадание парожидкостного потока непосредственно в карман переливного устройства, а так как переливное устройство занимает не всю площадь сегментной части тарелки, то создаются совершенно новые условия для перелива жидкости и сепарации газа. Паровой поток из отверстий контактных элементов смешивается с жидким потоком на тарелке и попадает сначала на форпланку, затем ударяется о переднюю стенку переливного устройства, осветленная часть жидкости стекает в сливные отверстия, другая часть обтекает переливное устройство с двух сторон и переливается через заднюю жалюзийную планку.

Паровой поток попадает на стенку колонны, при этом под действием сил тяжести и центробежных сил из парового потока выделяется жидкость и пленкой стекает по стенке, что обеспечивает хорошую сепарацию газа.

### Выводы

На основании анализа развития направления по конструированию контактных устройств массообменных процессов для разделения и переработки сред с различными свойствами можно сделать вывод, что, несмотря на многообразие конструкций массообменных тарелок, они, прежде всего, должны обеспечивать высокую эффективность разделения различных сред при минимальных энергозатратах.

Показано, что при высоких нагрузках по пару и жидкости рекомендуется применять прямоточные тарелки (клапанные, клапано-ситчатые, струйные, чешуйчатые), даже ценой некоторого снижения эффективности.

В прямоточных тарелках возникают проблемы с сепарацией газа и распределением потоков. В рассмотренных работах часть вопросов решается путем комбинирования типов тарелок, например ситчатых и клапанных, или распределением потоков за счет дополнительной установки контактных элементов. Большой интерес представляют конструкции прямоточных тарелок, в которых гидрозатвор перенесен в межтарельчатое пространство, что позволяет увеличить рабочую площадь тарелок, а также изменить характер потоков на контактном устройстве. В некоторых конструкциях тарелок увеличена высота передней стенки переливного устройства, что исключает заброс парожидкостного потока непосредственно в переливное устройство. Результаты подтверждены экспериментальными исследованиями.

### Список литературы

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. изд. 14-е, стереотип. М.: ООО ИД «Альянс», 2008. 753 с.
2. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю.И. Дытнерского. 4-е изд., стер. М.: Альянс, 2008. 494 с.
3. ГОСТ Р 53684-2009. Аппараты колонные. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2011. 15 с.
4. Ясавеев Х.Н., Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Модернизация установок переработки углеводородных смесей. Казань: Изд-во ФЭН, 2004. 307 с.
5. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет теплообменных процессов. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. 500 с.
6. Шибитов Н.С., Шибитова Н.В., Голованчиков А.Б. Моделирование гидродинамических и массообменных процессов и применение современных контактных устройств в колонных аппаратах: монография. Волгоград: ВолгГТУ. 2016. 159 с.
7. Долгова А.Н., Лаптева Е.А. Определение эффективности массообменных тарелок колонных аппаратов с учетом неравномерности распределения фаз // Нефтегазовое дело. 2013. № 6. С. 283–309.
8. Пат. 2276617 Российская Федерация, МПК В 01 D 3/30, В 01 D 3/16. Прямоточная клапанно-ситчатая тарелка для массообменных аппаратов / Вихман А.Г., Щелкунов В.А., Ксенофонтов К.Е.; патентообладатели ЗАО «ПЕТРОХИМ ИНЖИНИРИНГ», Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина. № 2004135058/15; заявл. 01.12.2004 ; опубл.20.05.2006, Бюл. № 14.
9. Ларькин А.В. Исследование гидродинамики и массопередачи на прямоточной клапанной-ситчатой тарелке новой конструкции: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014. 165 с.
10. П.м. 88981 Российская Федерация, МПК В01D 3/22. Ситчато-клапанная тарелка теплообменного аппарата / Бойко С.И., Тютюник Г.Г., Аджиев А.Ю., Литвиненко А.В., Прусаченко С.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИПИГазпереработка». № 2009124561/22; заявл. 26.06.2009; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33.
11. Пат. 2572961 Российская Федерация, МПК В01D 3/20, В01D 3/30. Контактная тарелка для массообменной колонны / Пиллинг М.В., Хирш Ш.Т., Фишер М.Ф.; заявитель и патентообладатель Зульцер Хемтех Аг. № 2012153249/05; заявл. 29.04.2011; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.
12. П.м. 145045 Российская Федерация, МПК В01D 3/22. Клапанная тарелка / Голованчиков А.Б., Дулькина Н.А., Воротнева С.Б., Шишляников В.В., Пудиков И.А., Чёрникова К.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ «Волгоградский государственный технический университет». № 2014116296/05; заявл. 22.04.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.
13. П.м. 164525 Российская Федерация, МПК В01D 3/22. Модифицированная чешуйчато-клапанная тарелка / Сахаров И.В.; заявитель и патентообладатель Сахаров И.В. № 2015155106/05; заявл. 22.12.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25.
14. П.м. 176701 Российская Федерация, МПК В01D 3/22. Чешуйчато-клапанная тарелка / Голованчиков А.Б., Прохоренко Н.А., Шибитова Н.В., Шибитов Н.С., Черикова К.В., Кинякина Ж.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». № 2017119938; заявл. 06.06.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 3.
15. Пат. 2438748 Российская Федерация, МПК В 01 D3/16. Массообменная тарелка / Шибитов Н.С., Шибитова Н.В.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью ЭкоЦентрИнжиниринг научно-производственная фирма ООО НПФ ЭкоЦентрИнжиниринг. № 2010111613/05; заявл. 25.03.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
16. 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.
17. Шибитова Н.В., Марченко П.В., Максименков В.Н. Исследование гидродинамики эффективного переливного устройства подвешенного типа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 10–1. С. 176–177.
18. П.м. 172835 Российская Федерация, МПК В01D 3/16. Прямоточная массообменная тарелка для процессов разделения газовых и жидких сред / Шибитова Н.В., Шибитов Н.С., Голованчиков А.Б., Новиков А.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». № 2017114735; заявл. 26.04.2017; опубл. 27.07.2017, Бюл. № 21.