

УДК 62-631.2

Ульянов Борис Александрович,  
д.т.н., профессор кафедры «Химическая технология топлива»  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
тел. 8(3955)51-29-03, e-mail: xtt-agta@yandex.ru

Фереферов Михаил Юрьевич,  
к.т.н., доцент кафедры «Химическая технология топлива»  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
тел. 8(3955)51-29-03, e-mail: chht@angtu.ru

## ГИДРОДИНАМИКА РАБОТЫ ПРОВАЛЬНОЙ ТАРЕЛКИ С ПОДВИЖНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ НАСАДКОЙ

Ulyanov B.A., Fereferov M.Y.

## HYDRODYNAMICS OF OPERATION OF A FALLING PLATE WITH A MOBILE SPHERICAL NOZZLE

**Аннотация.** Тарельчатые колонны получили широкое распространение в химической, нефтехимической и смежных отраслях промышленности. Они являются основным оборудованием для проведения процессов абсорбции газов и ректификации жидких смесей. Размеры и металлоемкость этих аппаратов в большой мере зависят от эффективности тарелок, которая в свою очередь определяется структурой газо- и парожидкостных слоёв. При интенсивных режимах работы аппаратов, которые обычно реализуются на практике, возникают неоднородные двухфазные слои, включающие в себя крупные образования. Они переносят с собой большие объёмы газа (пара) при недостаточном контакте с жидкостью. Это отрицательно сказывается на эффективности тарелок. Предложен способ улучшения структуры газожидкостных слоёв путём размещения на плоскости тарелки подвижной шаровой насадки.

**Ключевые слова:** тарельчатые колонны, структура двухфазных слоёв, подвижная шаровая насадка.

**Abstract.** Poppet columns are widely used in chemical, petrochemical and related industries. They are the main equipment for the processes of gas absorption and rectification of liquid mixtures. The size and metal content of these devices largely depends on the efficiency of the plates, which in turn is determined by the structure of the gas and vapor-liquid layers. At intensive modes of operation of devices which are usually realized in practice, there are inhomogeneous two-phase layers including large formations. They carry with them large volumes of gas (steam) with insufficient contact with the liquid. This negatively affects the efficiency of the plates. A method for improving the structure of gas-liquid layers by placing a movable ball nozzle on the plate plane is proposed.

**Keywords:** poppet columns, structure of two-phase layers, movable ball nozzle.

Тарельчатые колонные аппараты широко распространены в химической, нефтехимической и смежных отраслях промышленности. Они являются основным оборудованием для проведения процессов абсорбции и ректификации.

Преимуществом тарельчатых аппаратов по сравнению с другими, такими как барботажные или насадочные, является малое продольное перемешивание жидкой фазы. Благодаря многократному ступенчатому контакту газа (пара) и жидкости тарельчатые колонны по структуре потоков приближаются к наиболее эффективной модели идеального вытеснения. В то же время, наличие

большого числа ступеней контакта обуславливает сравнительно малые запасы жидкости на тарелках. При повышенных давлениях в аппарате запас жидкости на тарелках  $h_0$  не превышает 100 мм, а в атмосферных и вакуумных колонах он ещё меньше.

Необходимое количество тарелок в колонне зависит от физико-химических свойств системы, степени разделения смеси, а также эффективности тарелок, характеризующей степень приближения потоков газа (пара) и жидкости к состоянию равновесия. Если система определена и степень разделения задана, то эффективность становится единственным фактором, влияющим на количество та-

релок, а, следовательно, высоту колонны и связанные с этим капитальные затраты на её сооружение. Опыт показывает, что эффективность тарелок в большей мере определяется структурой двухфазного слоя и величиной поверхности контакта фаз.

Равномерная структура слоя наблюдается в случае «ячеистой пены», существующей при малых скоростях газа, близких к скорости всплывания пузырьков в жидкости [1]. При интенсивных режимах барботажа образуются неоднородные двухфазные слои, включающие в себя крупные газовые образования в виде факелов и глобул. Скорость движения таких крупных образований значительно отличается от скорости мелких пузырьков газа. Это приводит к отклонению течения газового потока от модели идеального вытеснения, что в известной степени отрицательно влияет на эффективность процессов разделения на тарелке. При этом в непосредственной близости от плоскости тарелки сохраняется тонкий слой жидкости, пронизанный струями газа, выходящими из отверстия тарелки.

Возможен следующий механизм возникновения крупных газовых образований. В момент барботажа происходит дробление газа в жидкости и формирование двухфазного слоя. После этого истечение газа происходит уже не в жидкость, а в газожидкостный слой, отличающийся меньшей плотностью.

Крупные образования, наблюдаемые в газожидкостном слое, приносят с собой большие объёмы газа. В то же время они имеют недостаточный контакт с жидкостью вследствие малой удельной поверхности. Это отрицательно сказывается на эффективности тарелок.

В работе [2] было выполнено исследование гидродинамики двухфазных слоёв, возникающих на ситчатых тарелках. Оно проводилось на укрупненном стенде с колонной диаметром 800 мм, выполненной из органического стекла, а также на небольших моделях с линейными размерами порядка 300 мм. Опыты проводились в системах «вода-воздух» и «изопропиловый спирт-воздух» с использованием видеосъёмки.

Для определения линейных размеров крупных газовых образований была установлена масштабная линейка, которая отобра-

жалась на видеозаписи. Это давало возможность производить измерения геометрических параметров объектов на экране монитора.

При обработке видеозаписей отслеживались изменения в структуре слоя за временные промежутки с точностью 0,04 с. Это позволяло рассчитать продолжительность существования крупных образований и их размеры.

Обработка результатов многочисленных измерений гидродинамических характеристик газожидкостного потока на изучаемых моделях позволила вывести формулу для определения среднего значения диаметра газовых глобул:

$$d_{\text{гл}} = 6,1 \cdot \left( \frac{\sigma^{0,6}}{w_{\text{к}}^{0,4} \cdot g^{0,4} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,6} \cdot (1 - \varphi_{\text{г}})} \right) + 0,006,$$

где  $w_{\text{к}}$  – скорость газа в колонне, м/с;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $g$  – ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с;  $\varphi_{\text{г}}$  – газосодержание двухфазного слоя.

Для подтверждения достоверности формулы была проведена статистическая обработка экспериментальных данных и получено значение коэффициента корреляции, равное  $R = 0,801$ .

Достаточно высокое значение коэффициента корреляции указывает на тесную связь гидродинамических параметров в приведенной формуле. Следует также отметить, что свободный член уравнения, равный 6 мм, оказался близким к диаметру пузырьков, образующихся при дроблении газа в сплошной жидкости.

Анализ результатов видеосъёмки на основе представлений о параллельности течений газа сквозь газожидкостный слой и обнажённые участки тарелки позволили оценить долю газа, проходящего в виде факелов и глобул. Было установлено, что она, в основном зависит от высоты пенного слоя и для низких слоёв с большим газосодержанием и малой плотностью может превышать 50 %.

С целью формирования более однородных газожидкостных слоёв и снижения доли газа, проходящего в виде факелов и глобул на плоскости тарелки, размещались пластмассовые шары диаметром 40 мм. Свободный объём шаровой насадки в неподвиж-

ном состоянии составлял  $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , а удельная объёмная поверхность  $80 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Были испытаны шары плотностью 120 и  $650 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Опыты выполнялись на пилотной установке, включающей в себя колонну диаметром 460 мм, выполненную из оргстекла, вентилятора высокого давления для нагнетания воздуха, систему коммуникаций и измерительные приборы, позволяющие фиксиро-

вать параметры процесса [3]. В качестве контактного элемента была использована решетчатая тарелка со щелями длиной  $l = 60$  мм и шириной  $b = 6$  мм. Доля свободного сечения тарелки составляла 16 %. На тарелке размещались пластмассовые шары в один или два слоя. Общий вид установки и тарелки с шаровой насадкой показан на рисунке 1.



а)



б)

Рисунок 1 – Общий вид установки (а) и тарелки с шаровой насадкой в два слоя (б)

На решетчатых провальных тарелках газ и жидкость проходят через одни и те же отверстия в полотне тарелки. При малых скоростях газа жидкость не удерживается на тарелке, стекает через отверстия и имеет место так называемый режим смоченной тарелки. При некотором значении скорости газа происходит задержка жидкости. Количество её на тарелке быстро увеличивается, что сопровождается ростом высоты газожидкостного слоя и резким увеличением гидравлического сопротивления тарелки.

При этом места стока жидкости и барботажа газа меняются в плоскости тарелки и распределяются обычно равномерно по сечению колонны. Верхняя предельная нагрузка колонны по газу сопровождается усилением

брызгоуноса и ростом высоты двухфазного слоя, что приводит к захлёбыванию аппарата.

Диапазон скорости между началом формирования двухфазного слоя и захлёбыванием аппарата соответствует рабочему режиму тарелки. Его можно установить, фиксируя гидравлическое сопротивление тарелки.

Известно [4], что общее сопротивление тарелки  $\Delta P$  складывается из трех составляющих: сопротивления сухой тарелки  $\Delta P_{\text{сух}}$ , сопротивления, оказываемого слоем жидкости на тарелке  $\Delta P_{\text{ГЖ}}$  и сопротивления, обусловленного силами поверхностного натяжения жидкости  $\Delta P_{\sigma}$ :

$$\Delta P = \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\text{ГЖ}} + \Delta P_{\sigma}$$

Это уравнение справедливо и для комбинированных устройств, исследованных в

настоящей работе.

Сопротивление  $\Delta P_{\sigma}$  в большой мере зависит от размера отверстий и в нашем случае представляет сравнительно малую величину:

$$\Delta P_{\sigma} = 2\sigma/b = 2 \cdot 0,072/0,06 = 24 \text{ Па}$$

Сопротивление сухих и орошаемых контактных устройств было измерено в опытах наклонным микроманометром типа ММТ-240 (рисунок 2).

Из рисунка следует, что гидравлическое сопротивление сухой решетчатой тарелки и комбинированных контактных устройств с шарами разной плотности практически одинаково. Это объясняется тем, что до-

ля свободного объема шаровой насадки почти вдвое превышает свободное сечение отверстий в полотне решетчатой тарелки.

При наличии орошения наблюдалось существенное различие в сопротивлении контактных устройств и в поведении газожидкостных слоев. Из рисунка следует, что присутствие на тарелке легких шаров плотностью  $120 \text{ кг/м}^3$  не вносило существенных изменений в характер изменения гидравлического сопротивления тарелки. Причина заключалась в том, что легкие шары отбрасывались газом к стенкам колонны, освобождая полотно тарелки.

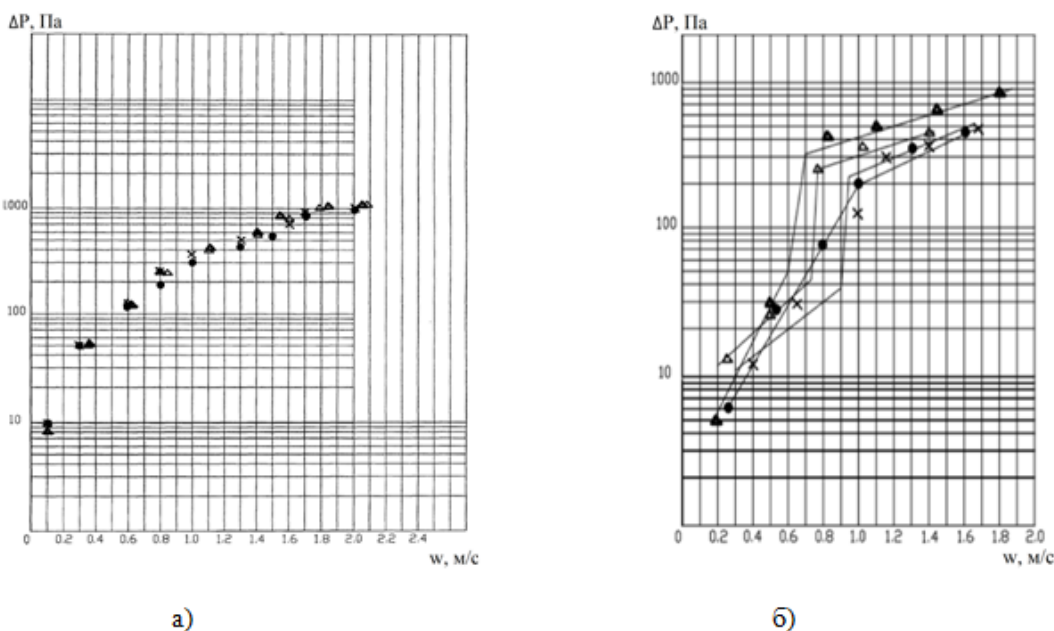


Рисунок 2 – Гидравлическое сопротивление сухих (а) и орошаемых (б) контактных устройств: ● – тарелка без насадки; × – тарелка с шарами плотностью  $120 \text{ кг/м}^3$  в один слой; Δ – тарелка с шарами плотностью  $650 \text{ кг/м}^3$  в один слой; ▲ – тарелка с шарами плотностью  $650 \text{ кг/м}^3$  в два слоя

Из этого можно было сделать вывод о том, что плотность шаров должна быть близкой к плотности двухфазного слоя. Действительно, при плотности шаров равной  $650 \text{ кг/м}^3$  на тарелке наблюдалось равномерное псевдооживление шаровой насадки.

Визуальные наблюдения показали отсутствие крупных газовых образований в слое и снижение брызгоуноса. В то же время гидравлическое сопротивление комбинированных контактных устройств возросло ~ на 50 % при расположении шаров в один слой и почти вдвое при двух слоях шаров. Это сви-

детельствует о том, что газожидкостные слои стали более плотными и для преодоления их газу необходимо затратить больше энергии. Исходя из аналогии процессов переноса и гидравлического сопротивления можно утверждать, что увеличение гидравлического сопротивления газожидкостного слоя будет способствовать ускорению процессов тепло- и массообмена между газом и жидкостью.

Из рисунка также следует, что исследованные комбинированные устройства имеют более широкий диапазон рабочих нагрузок по газу. В слоях с псевдооживленной

шаровой насадкой быстрее накапливается необходимый объем жидкости и устройство раньше переходит в рабочий режим, чем простая решетчатая тарелка.

Отмеченные обстоятельства характеризуют исследованные тарелки с шаровой насадкой как эффективные контактные устройства для проведения процессов теплообмена между газом и жидкостью, абсорбции

хорошо растворимых компонентов смеси, а также для очистки газов от пыли. Их не следует рекомендовать для аппаратов с многоступенчатым контактом вследствие значительного гидравлического сопротивления и определенной сложности в аппаратном оформлении. Но для аппаратов с одной-двумя ступенями контакта они могут оказаться наиболее предпочтительными.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов Б.А. Гидравлика и массообмен в тарельчатых ректификационных колоннах / Ульянов Б.А., Щелкунов Б.И. – Иркутск: Изд. ИрГТУ, 1997. – 244 с.

2. Муссакаев О.П. Структура потока газа на контактных тарелках абсорбционных колонн: дисс. ... канд. техн. наук. – Ангарск: АГТА, 2001. – 141 с.

3. Фереферов М.Ю., Ульянов Б.А.,

Муссакаев О.П., Лымарь А.А. Современные технологии и научно-технический прогресс: тез. докл. Междунар. научно-техн. конференции. – Ангарск, 2018. – С. 52-53.

4. Б.А.Ульянов. Процессы и аппараты химической технологии /Ульянов Б.А., Бадеников В.Я., Ликучев В.Г. – Ангарск: Изд. АГТА, 2006. – 741 с.