УДК 66.021

# ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЯ УДАРНО-РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ НАСАДКИ В РЕЖИМЕ ОРОШЕНИЯ

## Андреенко Матвей Викторович<sup>1</sup>,

nir@angtu.ru

### Бальчугов Алексей Валерьевич<sup>1</sup>,

balchug@mail.ru

### Бадеников Артем Викторович<sup>1</sup>,

rector@angtu.ru

### Коробочкин Валерий Васильевич<sup>2</sup>,

vkorobochkin@tpu.ru

<sup>1</sup> Ангарский государственный технический университет, Россия, 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60.

### <sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена отсутствием в научной литературе данных по гидродинамическим характеристикам новой высокоэффективной ударно-распылительной насадки, предназначенной для осуществления газожидкостных массообменных процессов.Гидродинамические характеристикинасадки необходимы для надежного проектирования такого массообменного оборудования нефтехимических производств, как абсорберы, десорберы, ректификационные колонны.

**Цель работы:** экспериментально определить гидравлическое сопротивление и величину брызгоуноса на новой ударно-распылительной насадке при различных приведенных скоростях газа и плотностях орошения, и на основе полученных данных выполнить сравнение гидродинамических характеристик ударно-распылительной насадки с известными контактными устройствами. **Методы исследования:** экспериментальное определение гидравлического сопротивления и величины брызгоуноса на орошаемой ударно-распылительной исследования: экспериментальное определение гидравлического сопротивления и величины брызгоуноса на орошаемой ударно-распылительной насадке, весовой метод определения брызгоуноса, инструментальное определение расходов газа и жидкости.

Результаты. Установлены экспериментальные зависимости гидравлического сопротивления и брызгоуноса в слое новой высокоэффективной ударно-распылительной насадкиот приведенной скорости газа и плотности орошения, позволившие сформировать базу данных в широком диапазоне указанных параметров для сравнения эффективности работы насадок различного типа. Установлено, что для ударно-распылительной насадки наблюдается закономерность увеличения гидравлического сопротивления при возрастании приведенной скорости газа. Показано, что гидравлическое сопротивление ударно-распылительной насадки ниже сопротивления регулярной структурно-кольцевой насадки PSI в 2,5-8,1 раза и ниже сопротивления регулярной листовой рифленой насадки в 5,0–8,6 раза в соответствующих диапазонах приведенных скоростей газа. При приведенных скоростях газа 0,7–1,0 м/с гидравлические сопротивления ударно-распылительной насадки и рулонированной сетки соизмеримы. Показано, что ударно-распылительная насадка стабильно работаетпри повышенных нагрузках по газу, превышающих в 2,06-4,67 раза нагрузки по газу на известных насадках. Установлено, что зависимость брызгоуноса от плотности орошения для ударно-распылительной насадки носит экстремальный характер, при этом кривые брызгоуноса имеют два максимума. Возникновение максимумов брызгоуноса объясняется сменой гидродинамических режимов, характеризующихся различной интенсивностью распыления струй жидкости при взаимодействии с газом. Показано, что приведенная скорость газа, при которой начинается брызгоунос, на ударно-распылительной насадке в 2,90 раза выше, чем в полом распыливающем абсорбере, и в 2,16 раза выше, чем в аппарате с прямоточными контактными устройствами. При скоростях газа 3,48-4,00 м/с брызгоунос на ударно-распылительной насадке ниже брызгоуноса в полом распыливающем абсорбере до 2,6 раза. Низкий брызгоунос обеспечивает высокую эффективность массообменных процессов на ударно-распылительной насадке, что делает ее перспективной для использования в нефтехимической промышленности.

#### Ключевые слова:

Гидродинамика газо-жидкостных систем, ударно-распылительная насадка, гидравлическое сопротивление, брызгоунос, плотность орошения, приведенная скорость газа.

#### Введение

Одним из направлений совершенствования массообменного оборудования на нефтехимических производствах является увеличение поверхности массообмена и объемных коэффициентов массопередачи за счет увеличения скорости движения газа в насадочном слое [1, 2]. Увеличение скорости газа позволяет обеспечить высокую степень диспергирования фаз и их интенсивное взаимодействие [3]. Данный метод интенсификации массообменных процессов используется в новой высокоэффективной ударно-распылительной насадке, предложенной в патенте [4]. Конструкция и принцип действия насадки подробно описана в работе [5]. Насадка реализует ударно-распылительный принцип взаимодействия газа и жидкости при приведенных скоростях газа до 5 м/с. Экспериментальные исследования подтвердили высокую массообменную эффективность новой насадки [5]. Для надежного проектирования массообменных аппаратов необходимо знать такие гидродинамические характеристики ударно-распылительной насадки, как гидравлическое сопротивление и брызгоунос [6], поскольку гидравлическое сопротивление оказывает влияние на эксплуатационные затраты по компремированию газа, подаваемого в колонну [7, 8], а брызгоунос влияет на массообменную эффективность насадки [9, 10]. Теоретически предсказать гидродинамические характеристики новой насадки не представляется возможным в связи с отсутствием надежных методов расчета [11, 12]. Для определения гидродинамических характеристик новой насадки требуется проведение экспериментальных гидродинамических исследований, что обусловливает актуальность данной работы.

#### Результаты и их обсуждение

Эксперименты по определению гидродинамических характеристик слоя ударно-распылительной насадки выполнены на лабораторной установке, изображенной на рис. 1. Стенки слоя ударнораспылительной насадки – 1 (рис. 1, 2) выполнены из оргстекла для визуализации процесса. Высота слоя насадки составляет 0,85 м. Ширина слоя насадки 0,195м, длина стороны ступени контакта составляет 0,055 м. Слой насадки состоит из 22 одинаковых последовательно соединенных ступеней контакта. Перфорированные перегородки между ступенями контакта выполнены из нержавеющей стали. Ширина щелей между двумя ступенями контакта для прохождения газа и жидкости составляет 0,006 м. Эквивалентный диаметр насадки составил 0,055 м, свободный объем – 0,82.

Гидравлическое сопротивление слоя насадки определяется с помощью микроманометра – 5 (рис. 1). Брызгоунос определяется весовым методом путем взвешивания жидкости, уловленной циклонами – 14, 15 на выходе газа из слоя насадки за определенный промежуток времени. Отвод газа в циклон – 14 осуществлялся непосредственно с верхней ступени контакта слоя насадки. В ходе экспериментов в качестве рабочих сред использовались воздух и вода. Эксперименты проводились при давлении в верхней части слоя насадки 1 ат и температуре 17 °C.

Проведена серия экспериментов, в ходе которой с заданным шагом изменялись расход воздуха и плотность орошения и определялось соответствующее значение перепада давления и брызгоуносна слое насадки. В экспериментах расход воздуха менялся от 29,83 до 200,12 м<sup>3</sup>/ч (при рабочих условиях), плотность орошения – от 0 до 159,39 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.

Методика проведения эксперимента на сухом слое насадки состоит в следующем. Включается газодувка – 2 (рис. 1). Регулирование расхода воздуха осуществляется с помощью встроенной в газодувку – 2 заслонки. Расход воздуха (м<sup>3</sup>/с) определяется на основании показаний микроманометра – 4, установленного на трубке Пито-Прандтля, по уравнению из работы [13]:

$$V_{\rm B} = S\alpha \left(\frac{20k_{\rho}\Delta p_{10}k_{\rm T}k_{\rm II}}{\rho_{\rm B}}\right)^{0.5}$$

где S – площадь поперечного сечения потока, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент поля скоростей;  $k_{\rho}$  – коэффициент учета плотности спирта в микроманометре;  $\Delta p_{10}$  – показания микроманометра на трубке Пито-Прандтля при расстоянии от оси трубы до точки измерения, равном 10 мм, мм. спирт. ст.;  $k_{\rm T}$  – поправочный коэффициент в формуле расчета расхода воздуха по показаниям микроманометра на трубке Пито-Прандтля;  $k_{\rm II}$  – коэффициент наклона трубки спиртового микроманометра;  $\rho_{\rm B}$  – плотность воздуха при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>.



Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – слой насадки; 2 – газодувка; 3 – труба с трубкой Пито-Прандтля; 4, 5 – микроманометр; 6 – ротаметр; 7–11 – вентили; 12, 13 – ёмкости; 14, 15 – циклоны

*Fig. 1.* Scheme of laboratory plant: 1 is the layer of the packing; 2 is the gas blower; 3 is the Pitot–Prandtl tube; 4, 5 is the micromanometer; 6 is the rotameter; 7–11 are the valves; 12, 13 are the capacities; 14, 15 are the cyclones

Проведена серия экспериментов, в ходе которой ступенчато меняется расход воздуха и фиксируется соответствующее значение перепада давления в слое насадки.

Методика проведения экспериментов по определению гидравлического сопротивления и брызгоуноса на орошаемом слое насадки состоит в следующем. С помощью газодувки – 2, микроманометра – 4 и вентиля – 9 (рис. 1) устанавливается заданный расход воздуха. Далее подается орошение на слой насадки – 1 (рис. 1, 2) с заданным начальным расходом. Фиксируются показания микроманометра – 5, установленного на слое насадки – 1. Величина брызгоуноса определяется весовым методом. Далее с заданным шагом меняется расход воды с помощью вентиля – 7 и фиксируются соответствующие значения перепада давления в слое насадки – 1 и значение брызгоуноса. После этого меняется расход газа, и серия экспериментов повторяется. В результате экспериментов получена база данных по гидравлическому сопротивлению и брызгоуносу на орошаемом слое новой ударно-распылительной насадки.



Рис. 2. Фотографии слоя ударно-распылительной насадки

Fig. 2. Photos of the shock-spray packing layer

Результаты экспериментального определения гидравлического сопротивления слоя ударно-распылительной насадки представлены на рис. 3, 4. Зависимость гидравлического сопротивления слоя насадки от плотности орошения при различных приведенных скоростях газа представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимость гидравлического сопротивления орошаемого слоя ударно-распылительной насадки от плотности орошения. Приведенная скорость газа (м/с): 1–0,70; 2–1,21; 3–1,56; 4–2,09; 5–2,70; 6– 3,48; 7–3,82; 8–4,12; 9–4,67

**Fig. 3.** Dependence of the hydraulic resistance of the irrigated layer of the shock-spray packing on irrigation density. Relative gas velocity (m/s): 1 -0,70; 2 - 1,21; 3 - 1,56; 4 - 2,09; 5 - 2,70; 6 - 3,48; 7 - 3,82; 8 - 4,12; 9 - 4,67

Из рис. З видно, что с увеличением плотности орошения гидравлическое сопротивление ударнораспылительной насадки возрастает.

На рис. 4 представлена экспериментально определенная зависимость гидравлического сопротивления ударно-распылительной насадки от приведенной скорости газа при различных плотностях орошения.



Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления сухой и орошаемой ударно-распылительной насадки от приведенной скорости газа. Плотность орошения ( $M^3/(M^2 \cdot 4)$ ): 1 –0; 2 – 29,09; 3 – 159,39

**Fig. 4.** Dependence of hydraulic resistance of dry and irrigated shock-spray packing on relative gas velocity. Irrigation density (m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)): 1 – 0; 2 – 29,09; 3 – 159,39

Как показывает анализ рис. 4, для ударно-распылительной насадки наблюдается закономерность увеличения гидравлического сопротивления ударно-распылительной насадки при возрастании приведенной скорости газа.

На рис. 5 приведено сравнение гидравлического сопротивления ударно-распылительной насадки с сопротивлением других насадок по литературным данным.

Анализ рис. 5 показывает, что гидравлическое сопротивление ударно-распылительной насадки ниже сопротивления регулярной структурнокольцевой насадки PSI в 2,5–8,1 раза и ниже сопротивления регулярной листовой рифленой насадки в 5,0–8,6 раза в соответствующих диапазонах приведенных скоростей газа. При приведенных скоростях газа 0,7–1,0 м/с гидравлические сопротивления ударно-распылительной насадки и рулонированной сетки соизмеримы. Таким образом, ударно-распылительная насадка обладает небольшим гидравлическим сопротивлением.

Ударно-распылительная насадка устойчиво работает в более широком диапазоне скоростей газа, чем другие насадки. Так, скорость газа в начале режима захлебывания регулярной листовой рифленой насадки составляет 1,0 м/с, рулонированной сетки – 2,27 м/с, регулярной структурно-кольцевой насадки PSI – 1,35 м/с, а ударно-распылительной – 4,67 м/с. Таким образом, ударно-распылительная насадка может стабильно работать при повышенных нагрузках по газу известных насадок.



Рис. 5. Гидравлическое сопротивление различных насадок: 1 – ударно-распылительная насадка, плотность орошения 29,09 м³/(м²·ч); 2 – регулярная листовая рифленая насадка, плотность орошения 10 м³/(м²·ч) по данным работы [14]; 3 – рулонированная сетка, плотность орошения 19,59 м³/(м²·ч), по данным работы [13]; 4 – регулярная структурно-кольцевая насадка PSI, плотность орошения 24,88 м³/(м²·ч), по данным работы [15]

**Fig. 5.** Hydraulic resistance of different packing: 1 is the shockspray packing, irrigation density 29,09 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 2 is the regular sheet corrugated packing, irrigation density 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) according to the data of [14]; 3 is the rollup mesh, irrigation density 19,59 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), according to the data of [13]; 4 is the regular structured ring-shaped packing PSI, irrigation density 24,88 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), according to the data of [15]

На рис. 6 представлены результаты экспериментального определения брызгоуноса в слое ударно-распылительной насадки при различных скоростях газа и плотностях орошения.



**Рис. 6.** Зависимость брызгоуноса от плотности орошения на ударно-распылительной насадке. Приведенная скорость газа (м/с): 1 – 3,48; 2 – 3,82; 3 – 4,12; 4 – 4,41; 5 – 4,67

**Fig. 6.** Dependence of splash carrying away on irrigation density on the shock-spray packing. Relative gas velocity (m/s): 1 – 3,48; 2 – 3,82; 3 – 4,12; 4 – 4,41; 5 – 4,67

Из рис. 6 видно, что зависимость брызгоуноса от плотности орошения носит экстремальный характер, кривые брызгоуноса имеют два максимума. Наличие первого максимума при плотности орошения  $44,9 \text{ м}^3/\text{m}^2$ ч объясняется тем, что, как показали визуальные наблюдения, в данных условиях в насадке при стекании жидкости с горизонтальной полки образуются относительно тонкие струи воды диаметром менее 2 мм, которые интенсивно распыляются газовым потоком с образованием множества брызг. Именно это явление приводит к увеличению брызгоуноса при плотности орошения 44,9 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч. Дальнейшее увеличение плотности орошения до 75,6 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч приводит к укрупнению и слиянию струй жидкости, стекающих с горизонтальной полки, с образованием одной плоской большой струи и, как следствие, к снижению брызгообразования. При плотности орошения выше 75,6 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч пространственное положение плоской струи приближается к горизонтальному. В этих условиях плоская струя интенсивно распыляется потоком газа с возникновением повышенного брызгоуноса. При плотностях орошения более 159,4 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч насадка работает в режиме захлебывания при различных приведенных скоростях газа.

На рис. 7 приведена зависимость брызгоуноса от приведенной скорости газа при различных плотностях орошения. Как видно из рис. 7, с увеличением приведенной скорости газа и плотности орошения брызгоунос возрастает.



**Рис. 7.** Зависимость брызгоуноса от приведенной скорости газа при различных плотностях орошения (м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч)): 1 – 91,80; 2 – 60,11; 3 – 29,08

**Fig. 7.** Dependence of the splash carrying away on relative gas velocity for different irrigation densities  $(m^3/(m^2 \cdot h)): 1 - 91,80; 2 - 60,11; 3 - 29,08$ 

На рис. 8 представлено сравнение брызгоуноса на ударно-распылительной насадке с брызгоуносом при других известных способах контакта газа и жидкости.

Как видно из рис. 8, брызгоунос на ударно-распылительной насадке появляется при значительно большей скорости газа, чем в аппаратах с другими способами контакта. На ударно-распылительной насадке брызгоунос начинается при скорости газа 3,48 м/с. В аппарате с прямоточными контактными устройствами брызгоунос начинается при приведенной скорости газа 1,61 м/с, а при скорости газа более 3,36 м/с возникает уже режим уноса. В полом распыливающем абсорбере брызгоунос начинается при скорости газа 1,2 м/с. Таким образом, скорость газа, при которой начинается брызгоунос, на ударно-распылительной насадке в 2,9 раза выше, чем в полом распыливающем абсорбере, и в 2,16 раза выше, чем в аппарате с прямоточными контактными устройствами. При скоростях газа 3,48-4,00 м/с брызгоунос на ударнораспылительной насадке ниже брызгоуноса в полом распыливающем абсорбере до 2,6 раза.



- Рис. 8. Зависимость брызгоуноса от приведенной скорости газа при различных способах контакта: 1 – ударнораспылительная насадка, плотность орошения 60,11 м³/(м²·ч); 2 – полый распыливающий абсорбер, плотность орошения 61 м³/(м²·ч), по данным работы [16]; 3 – аппарат с прямоточными контактными устройствами ударно-распылительного типа, по данным работы [17]
- **Fig. 8.** Dependence of splash carrying away on relative gas velocity for different methods of contact: 1 is the shock-spray packing, irrigation density 60,11 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 2 is the hollow spraying absorber, irrigation density 61 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), according to the data of [16]; 3 is the apparatus with direct-flow contact devices of shock-spray type, according to the data of [17]

Таким образом, выполненные экспериментальные гидродинамические исследования слоя ударно-распылительной насадки позволили установить, что в сравнении с другими типами насадок и контактных устройств ударно-распылительная насадка обладает достаточно хорошими гидродинамическими характеристиками и одновременно характеризуется относительной простотой конструкции [18]. Можно предположить, что ударнораспылительная насадка будет конкурентоспособной наряду с другими новыми высокоэффективными насадками, рекомендованными к применению в промышленности [19, 20].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гидравлические испытания двух модификаций элемента регулярной насадки / М.В. Андреенко, Д.Н. Игнатьев, Т.Н. Мусева, А.В. Бальчугов // Химия и химическая технология: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Ангарск, 2016. С. 3–6.
- Irani M., Ali KhodagholiM. Investigation of bubble column hydrodynamics using CFD simulation (2D and 3D) and experimental validation // Petroleum and Coal. 2011. V. 53. № 2. P. 146-147.
- Ali Khan A., Halder G.N., Saha A.K. Experimental investigation on efficient carbon dioxide capture using piperazine (PZ) activated aqueous methyldiethanolamine (MDEA) solution in a packed column // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2017. – V. 64. – P. 163–173.
- Регулярная насадка для тепло- и массообменных процессов: пат. РФ № 2602118. Заявл. 14.10.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31. – 32 с.
- Массообменная эффективность ударно-распылительной насадки / М.В. Андреенко, А.В. Бальчугов, Д.А. Дубровский,

### Выводы

- Сформирована база экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению и брызгоуносу в слое новой высокоэффективной ударнораспылительной насадки при расходе воздуха от 29,83 до 200,12 м<sup>3</sup>/ч (при рабочих условиях) и плотности орошения от 0 до 159,39 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.
- 2. Для ударно-распылительной насадки характерно увеличение гидравлического сопротивления при возрастании приведенной скорости газа. Вместе с тем гидравлическое сопротивление ударно-распылительной насадки ниже сопротивления регулярной структурно-кольцевой насадки PSI в 2,5–8,1 раза и ниже сопротивления регулярной листовой рифленой насадки в 5,0–8,6 раза. При приведенных скоростях газа 0,7–1,0 м/с гидравлические сопротивления ударно-распылительной насадки и рулонированной сетки соизмеримы.
- Ударно-распылительная насадка стабильно работает при высоких нагрузках по газу, превышающих в 2,06–4,67 раза нагрузки по газу на известных насадках, что обусловленоформированием высокоэффективного ударно-распылительного гидродинамического режима с развитой поверхностью контакта фаз.
- Для ударно-распылительной насадки зависимость брызгоуноса от плотности орошения носит экстремальный характер. Возникновение двух максимумов брызгоуноса объясняется сменой гидродинамических режимов, характеризующихся различной интенсивностью распыления струй жидкости.
- 5. Приведенная скорость газа, при которой начинается брызгоунос, на ударно-распылительной насадке в 2,16 раза выше, чем в аппарате с прямоточными контактными устройствами, и в 2,9 раза выше, чем в полом распыливающем абсорбере. При скоростях газа 3,48–4,00 м/с брызгоунос на ударно-распылительной насадке ниже брызгоуно са в полом распыливающем абсорбере до 2,6 раза.

В.В. Коробочкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 11. – С. 37–44.

- Iliuta I., Iliuta M.C. Enzymatic CO<sub>2</sub> capture in countercurrent packed-bed column reactors with high performance random packings // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2017. – V. 63. – P. 462–474.
- Arnaud R., Bouaifi M., Gamet L. Hydrodynamics of Gas-Liquid Flows in Bubble Columns of Different Scales // The 3<sup>rd</sup> OpenFOAM User Conference. – Stuttgart, Germany, 2015. – P. 15–16.
- Pushnov A., Berengarten M., Sevryukov A. Hydrodynamics of Packing Beds Made of Differently Structured Material for Thermal Utilization and Mass-Exchanged Processes in Columns of Environment Protection // Environmental engineering: the 9<sup>th</sup> International Conference. – Vilnius, Lithuania, 2014. – P. 1–6.
- Исследование гидродинамики регулярных насадок из сетчатых наклонных цилиндров для осуществления тепло- и массообменных процессов / М.В. Шилин, М.Г. Беренгартен, А.С. Пушнов, М.И. Клюшенкова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. № 10. С. 10–13.

- Barjaktarović B.G., Sovilj M.N., Popović S.S. Hydrodynamics and axial mixing in a packed gas-liquid column Journal // Acta Periodica Technologica. – 2003. – № 34. – P. 33–48.
- Расчет гидродинамических параметров регулярных структурированных насадок / Г.Б. Дмитриева, М.Г. Беренгартен, М.И. Клюшенкова, А.С. Пушнов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 12. – С. 5–9.
- 12. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: РГБ, 2009. 655 с.
- Рыжов С.О. Интенсификация десорбции диоксида углерода из водных растворов на высокоэффективной регулярной насадке: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2013. – 21 с.
- 14. Тимофеев А.В., Гурский М.М., Романченко Л.Я. Влияние структуры поверхности регулярной насадки на ее гидравлическое сопротивление и массообменную способность // Химическая промышленность. – 1980. – № 6. – С. 51–52.
- Высокоэффективные структурно-кольцевые насадки / Т. Коморович, Я. Магера, Д.А. Баранов, М.Г. Беренгартен // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2001. – № 8. – С. 8–11.
- Михайленко Г.Г., Миронов Д.В., Усатюк Е.И. Гидравлика ПРА при повышенных нагрузках по жидкости и газу // Труды

Одесского политехнического университета. – 2008. – Вып. 1. – С. 256–258.

- Артамонов Ю.Ф., Николаев А.М. Исследование гидродинамики и массопередачи в аппарате с прямоточными контактными устройствами // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 1967. – № 4. – С. 470–474.
- Pressure drop in slender packed beds with novel packing arrangement / Z. Guo, Z. Sun., N. Zhang, M. Ding, J. Liu // Powder Technology. – 2017. – V. 321. – P. 286–292.
- Шагарова А.А., Черикова К.В. Экспериментальные исследования гидродинамики аппаратов с насадкой переменной проницаемости // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 6. № 1 (104). С. 99–103.
- Hydrodynamics of pulsed columns: the effect of new parameters affecting the pressure drop / S. Chartona, M. Thebaulta, S. Winna, H. Roussela, F. Lamadiea, M.W. Hlawitschkab, C. Korbb, H.-J. Bartb // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – V. 125. – P. 483–493.

Поступила 10.10.2017 г.

### Информация об авторах

Андреенко М.В., аспирант кафедры машин и аппаратов химических производств Ангарского государственного технического университета.

*Бальчугов А.В.*, доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических производств Ангарского государственного технического университета.

Бадеников А.В., кандидат технических наук, профессор, ректор Ангарского государственного технического университета.

*Коробочкин В.В.*, доктор технических наук, профессор кафедры общей химии и химической технологии Национального исследовательского Томского политехнического университета.

#### UDC 66.021

## HYDRODYNAMIC RESEARCH OF SHOCK-SPRAY PACKING LAYER IN IRRIGATION MODE

Matvey V. Andreenko<sup>1</sup>,

nir@angtu.ru

**Alexey V. Balchugov**<sup>1</sup>, balchug@mail.ru

balenagemail.ra

Artem V. Badenikov<sup>1</sup>,

rector@angtu.ru

### Valeriy V. Korobochkin<sup>2</sup>,

vkorobochkin@tpu.ru

Angarsk State Technical University,
60, Tchaikovsky street, Angarsk, 665835, Russia.

 <sup>2</sup> Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is caused by the lack of data in scientific literature on hydrodynamic characteristics of the new high-efficiency shock-spray packing intended for gas-liquid mass-exchange processes. The hydrodynamic characteristics of the packing are necessary for the reliable design of such mass exchange equipment for petrochemical industries as absorbers, desorbers, rectification columns, etc. **The main aim** of the study is to determine experimentally the hydraulic resistance and the magnitude of the splash carrying away on a new shock-spray packing at various relative gas velocities and irrigation densities and on the basis of the data obtained, compare the hydrodynamic characteristics of the shock-spray packing with the known contact devices.

**The methods:** experimental determination of hydraulic resistance and the size of the splash carrying away on the irrigated shock-spray packing, the weight method for determining the splash carrying away, and the instrumental determination of gas and liquid flow rates. **The results.** The authors have obtained a database of experimental data on hydraulic resistance and splash carrying away in the layer of a new high-efficiency shock-spray packing in a wide range of relative gas velocities and irrigation densities. It is found that for the shock-spray packing the hydraulic resistance increase is observed with growth of relative gas velocity. It is shown that the hydraulic resistance of the regular structural-ring packing PSI in 2,5–8,1 times, and below the resistance of the regular sheet corrugated packing in 5,0–8,57 times in the corresponding ranges of relative gas velocities. With relative gas velocities of 0,7–1,0 m/s, the hydraulic resistances of the shock-spray packing and the roll-up grid are commensurable. It is shown that the shock-spray packing stably operates at high gas loads exceeding in 2,06–4,67 times the gas load on the known packings. It is found that the dependence of the splash carrying away on irrigation density for the shock-spray packing is of an extreme nature, with the splash carrying away on way, and the splash carrying away is explained by the change in hydrodynamic regimes characterized by a different intensity of spraying of the liquid jets during interaction with the gas. It is shown that the hollow spray packing than in the hollow spray packing is up to 2,61 times lower than that in the hollow spray packing than in the operatus with straight-through contact devices. At gas velocities of 3,48–4,00 m/s, the petrochemical industry.

#### Key words:

Hydrodynamics of gas-liquid systems, shock-spray packing, hydraulic resistance, splash carrying away, irrigation density, relative gas velocity.

#### REFERENCES

- Andreenko M.V., Ignatev D.N., Museva T.N., Balchugov A.V. Gidravlicheskie ispytaniya dvukh modifikatsiy elementa regulyarnoy nasadki [Hydraulic testing of two modifications of the regular packing element]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Chemistry and chemical technology. Proc. of the All-Russia scientific-technical conference]. Angarsk, 2016. pp. 3–6.
- Irani M., Ali Khodagholi M. Investigation of bubble column hydrodynamics using CFD simulation (2D and 3D) and experimental validation. *Petroleum and Coal*, 2011, vol. 53, no. 2, pp. 146–147.
- Ali Khan A., Halder G.N., Saha A.K. Experimental investigation on efficient carbon dioxide capture using piperazine (PZ) activated aqueous methyldiethanolamine (MDEA) solution in a packed column. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, vol. 64, pp. 163–173.
- 4. Balchugov A.V., Andreenko M.V., Badenikov A.V., Kuzora I.E. Regulyarnaya nasadka dlya teplo- i massoobmennykh protsessov [Regular packing for heat and mass transfer processes]. Patent RF no. 2602118, 2016.
- Andreenko M.V., Balchugov A.V., Dubrovsky D.A., Korobochkin V.V. Mass transfer efficiency of shock-spray packing. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 37–44. In Rus.
- Iliuta I., Iliuta M.C. Enzymatic CO<sub>2</sub> capture in countercurrent packed-bed column reactors with high performance random packings. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, vol. 63, pp. 462–474.
- Arnaud R., Bouaifi M., Gamet L. Hydrodynamics of Gas-Liquid Flows in Bubble Columns of Different Scales. Abstract format. *The 3<sup>rd</sup> Open FOAM User Conference*. Stuttgart, Germany, 2015. pp. 15–16.

- Pushnov A., Berengarten M., Sevryukov A. Hydrodynamics of Packing Beds Made of Differently Structured Material for Thermal Utilization and Mass-Exchanged Processes in Columns of Environment Protection. The 9<sup>th</sup> International Conference. Environmental engineering. Vilnius, Lithuania, 2014. pp. 1–6.
- Shilin M.V., Berengarten M.G., Pushnov A.S., Kljushenkova M.I. The study of the hydrodynamics of regular packing inclined mesh cylinders for heat and mass transfer processes. *Chemical and petroleum engineering*, 2012, no. 10, pp. 10–13. In Rus.
- Barjaktarović B.G., Sovilj M.N., Popović S.S. Hydrodynamics and axial mixing in a packed gas-liquid column. *Journal Acta Periodica Technologica*, 2003, no. 34, pp. 33–48.
- Dmitrieva G.B., Berengarten M.G., Klyushenkova M.I., Pushnov A.S. Calculation of hydrodynamic parameters of regular structured packing. *Chemical and petroleum engineering*, 2005, no. 12, pp. 5–9. In Rus.
- Ramm V.M. Absorbtsiya gazov [Absorption of gases]. Moscow, RGB Publ., 2009. 655 p.
- Ryzhov S.O. Intensifikatsiya desorbtsii dioksida ugleroda iz vodnykh rastvorov na vysokoeffektivnoy regulyarnoy nasadke. Avtoreferat Dis. κand. nauk [Intensification of carbon dioxide stripping from aqueous solutions for highly regular packing. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2013. 21 p.
- Timofeev A.V., Gurskij M.M., Romanchenko L.Ya. Influence of the surface structure of a regular packing on its hydraulic resistance and mass transfer capacity. *Chemical industry*, 1980, no. 6, pp. 51–52. In Rus.

- Komorovich T., Magera Ya., Baranov D.A., Berengarten M.G. Highly effective structural-ring packing. *Chemical and petroleum engineering*, 2001, no. 8, pp. 8–11. In Rus.
- Mihajlenko G.G., Mironov D.V., Usatyuk E.I. Hydraulics of PRA at high loads in liquid and gas. *Scientific Results of Odessa polytechnic university*, 2008, no. 1, pp. 256–258. In Rus.
- Artamonov Yu.F., Nikolaev A.M. Investigation of hydrodynamics and mass transfer in a device with direct contact devices. *Russian journal of chemistry and chemical technology*, 1967, no. 4, pp. 470-474. In Rus.
- Guo Z., Sun Z., Zhang N., Ding M., Liu J. Pressure drop in slender packed beds with novel packing arrangement. *Powder Technology*, 2017, vol. 321, pp. 286–292.
- Shagarova A.A., Cherikova K.V. Experimental studies of the hydrodynamics of apparatus with variable permeability packing. Bulletin of the Volgograd State Technical University, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 99–103. In Rus.
- Chartona S., Thebaulta M., WinnaS., Roussela H., Lamadiea F., Hlawitschkab M.W., Korbb C., Bartb H.-J. Hydrodynamics of pulsed columns: The effect of new parameters affecting the pressure drop. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, vol. 125, pp. 483-493.

Received: 10 October 2017.

#### Information about the authors

Matvey V. Andreenko, postgraduate student, Angarsk State Technical University.

Alexey V. Balchugov, Dr. Sc., professor, Angarsk State Technical University.

Artem V. Badenikov, Cand. Sc., professor, rector, Angarsk State Technical University.

Valeriy V. Korobochkin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.