

**ДИНАМИЧЕСКАЯ УДЕРЖИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ  
РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКИ**  
DYNAMIC RETAINING CAPACITY OF THE REGULAR PACKING

**А. Ф. Хайруллин, В. А. Кузнецов**

A. F. Khairullin, V. A. Kuznetsov

*Башкирский государственный университет, г. Уфа*

*Ключевые слова: удерживающая способность; насадка; массообмен; гидродинамика; модернизация*  
*Key words: holding capacity; packing; mass-transfer; investigation; hydrodynamics; upgrade*

Определение удерживающей способности уголковых насадок по жидкой фазе проводилось на лабораторной установке. Эксперименты по исследованию удерживающей способности насадки проводились при различных объемных расходах газовой фазы  $G_v$  и фиксированных значениях объемного расхода жидкой фазы  $L_v$  (удельной объемной плотности орошения насадки  $U$ ). Рассчитывалась величина динамической удерживающей способности по уравнению

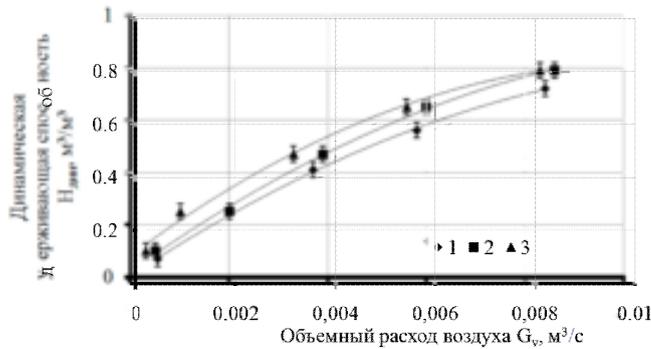
$$H_{\text{дин,эксп}} = \frac{V_{\text{ж}}}{V_{\text{нас}}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{нас}} = S_{\text{кол}} \cdot h_{\text{нас}}$  — объем насадочного слоя,  $\text{м}^3$ .

На рис.1 в графическом виде представлены опытные значения  $H_{\text{дин,эксп}}$  в зависимости от объемной подачи воздуха при фиксированных значениях объемного расхода воды на орошение насадки  $L_v$ .

Как следует из экспериментально полученных значений динамической удерживающей способности регулярной насадки, удерживающая способность возрастает с увеличением:

- объемного расхода воздуха  $G_v$  при постоянной удельной плотности орошения  $U$ , что свидетельствует о наличии заметного взаимодействия потоков жидкой и газовой фаз в насадочном слое;



*Рис. 1. Зависимость удерживающей способности новой насадки от объемного расхода воздуха при различной удельной плотности орошения:  
1 —  $U = 7,7 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  
2 —  $U = 16,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  
3 —  $U = 25,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$*

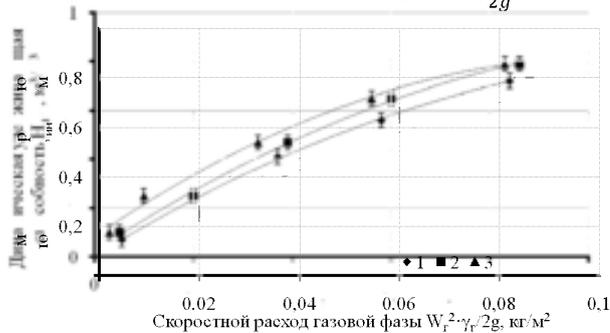
• удельной плотности орошения  $U$  при постоянном объемном расходе воздуха  $G_v$ , однако влияние расхода жидкой фазы на изменение  $H_{дин}$  незначительно по сравнению с влиянием расхода газовой фазы.

Таким образом, зависимость удерживающей способности уголковых насадок от расхода газовой фазы в диапазоне относительных нагрузок по воздуху от 0,0005 до 0,0085 м³/с отличается от наблюдаемой в регулярных насадках с пленочным режимом течения жидкой фазы, для которых зависимость  $H_{дин}$  от расхода газовой фазы появляется лишь в режиме подвисания, то есть незадолго до наступления режима захлебывания.

Зависимость удерживающей способности уголковых насадок от расхода газовой фазы свидетельствует о накоплении жидкости в насадочном слое меньше, чем в пленочных аппаратах и насадочных колоннах с нерегулярной насыпной насадкой и регулярной кольцевой и трубчатой насадками [1, 2, 3]. Удерживание жидкости в объеме уголковых насадок обусловлено не только поверхностным взаимодействием газового и жидкого потоков, но и накоплением жидкой фазы над щелевыми зазорами, в которых имеет место струйно-противоточное взаимодействие потоков фаз. С увеличением расхода газовой фазы струйно-противоточное взаимодействие интенсифицируется, что приводит к дополнительному накоплению жидкой фазы в насадочном слое.

При постоянном расходе газовой фазы увеличение удельной объемной плотности орошения  $U$  приводит к дополнительному накоплению жидкости в насадочном слое, но увеличение удерживающей способности не столь значительно, как при увеличении расхода газа.

Гидродинамическим обоснованием механизма накопления жидкой фазы в объеме уголковых насадок служит график зависимости  $H_{дин}$  от величины скоростного напора газовой фазы при тении сквозь щелевые зазоры  $\frac{W_g^2}{2g}$ , изображенный на рис. 2.



*Рис. 2. Зависимость удерживающей способности новой насадки от режима течения газовой фазы при различной удельной плотности орошения:  
1 —  $U = 7,7 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  
2 —  $U = 16,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  
3 —  $U = 25,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$*

При небольших расходах газа, когда в уголковой насадке с верхней щелью имеет место байпас газовых струй через верхние щелевые отверстия насадочных элементов, реальная величина скоростного напора газового потока в щелевых зазорах меньше, чем в уголковой насадке, что должно приводить при прочих равных условиях к меньшей удерживающей способности в уголковой насадке с верхней щелью по сравнению с новой насадкой, что и наблюдается в диапазоне значений скоростного напора газовой фазы меньше 0,02 кг/м². При дальнейшем увеличении расхода газовой фазы, когда в уголковой насадке с верхней щелью прекращается байпасирование части газового потока через верхние щелевые отверстия, условия струйно-противоточного взаимодействия фаз в щелевых зазорах уголковых насадок становятся идентичными. Тем самым приводит к практически одинаковой величине удерживающей способности при значениях скоростного напора

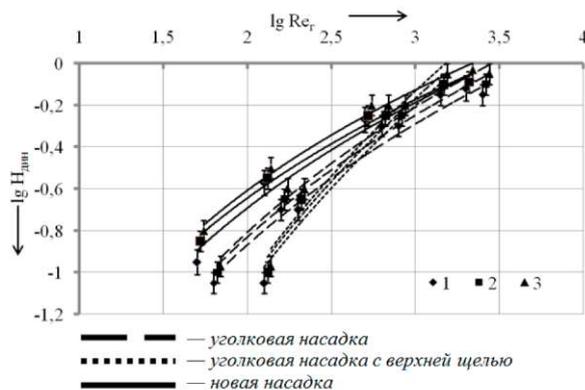
$$\frac{W_z^2 \gamma}{2g} = 0,025 - 0,035 \text{ кг/м}^2.$$

Обработка опытных данных удерживающей способности регулярной насадки проводилась на основании изложенного выше механизма накопления жидкой фазы в объеме насадочного слоя. В отличие от насадок с явно выраженным пленочным течением жидкой фазы (например, плоскопараллельная насадка), для которых в качестве характерного размера при корреляции данных по удерживающей способности используется приведенная толщина пленки жидкости  $q_{прив}$  [1, 2, 3], в качестве характерного размера при корреляции данных по удерживающей способности уголковых насадок был выбран эквивалентный диаметр щелевых зазоров  $d_{экв,угол}$ . Соответственно характеристики течения газовой фазы (скорость течения и значение числа Рейнольдса) рассчитывались для условий течения в щелевых зазорах.

Зависимость экспериментальных данных по удерживающей способности регулярной насадки от режима течения газовой фазы, построенной в логарифмических координатах  $\lg H_{дин} - \lg Re_r$  представлена на рис. 3. Как видно из графика, имеет место логарифмическая зависимость  $\lg H_{дин}$  от  $\lg Re_r$  (кроме значений  $H_{дин}$ , полученных для уголковой насадки при минимальном объеме расхода газовой фазы  $G_v = 1,28 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), что соответствует степенному виду зависимости  $H_{дин}$  от  $Re_r$ :  $H_{дин} \sim Re_r^n$ , где  $n$  — показатель степени. Из графика на рисунке 3 было получено: для уголковой насадки  $n = 0,52$  [4]; для уголковой насадки с верхней щелью  $n = 0,83$  [5]; для новой насадки  $n = 0,96$  [6].

Влияние расхода жидкой фазы на удерживающую способность уголковых насадок определялось через зависимость комплекса  $\frac{H_{дин}}{Re_r^n}$  от  $U^m$ , где  $U$  — удельная объемная плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $m$  — показатель степени. Величина удельной плотности орошения в качестве параметра была выбрана из-за простоты ее использования при проведении практических расчетов.

Рис. 3. Аппроксимация зависимости удерживающей способности регулярной насадки от режима течения газовой фазы:  
1 —  $U = 7,7 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  
2 —  $U = 16,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  
3 —  $U = 25,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$



Корреляция полученных экспериментальных значений  $H_{дин}$  позволила получить следующие уравнения, удовлетворительно описывающие зависимость опытных данных по удерживающей способности от режимов течения газовой и жидкой фаз в уголковых насадках:

а) для уголковой насадки [4]

$$H_{дин} = 0,0119 \cdot Re_r^{0,52} \cdot U^{0,06}; \quad (2)$$

б) для уголковой насадки с верхней щелью [5]

$$H_{дин} = 0,0013 \cdot Re_r^{0,83} \cdot U^{0,11}; \quad (3)$$

в) для новой насадки [6]

$$H_{дин} = 0,0007 \cdot Re_r^{0,96} \cdot U^{0,18}. \quad (4)$$

Используя уравнения (2), (3) и (4) для расчетного определения значений динамической удерживающей способности, по рассчитанным значениям  $W_z$  вычислялись соответствующие значения  $Re_r$ , а значения  $U$  брались из условий проведения экспериментов  $U = \frac{G_v}{S_{кол}}$ . Рассчитанные значения  $(H_{дин})_{расчет}$  сравнивались с соответствующими опытными значениями  $(H_{дин})_{эксп}$ . Проведенное сравнение показало:

а) наибольшее отклонение расчетных значений динамической удерживающей способности от опытных данных наблюдается для уголковых насадок при минимальном расходе газовой фазы  $G_v = 1,28 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что объясняется неустановившимся режимом взаимодействия фаз в щелевых зазорах;

б) при значениях объемного расхода газовой фазы  $G_v = 3,84 \text{ м}^3/\text{ч}$  и выше и значениях удельной объемной плотности орошения  $U = 7,7 - 25,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$  среднее отклонение расчетных значений  $(H_{\text{дин}})_{\text{расчет}}$  от опытных значений  $(H_{\text{дин}})_{\text{эксп}}$  составляет +3 % для уголковой насадки, +2 % для уголковой насадки с верхней целью и +1,5 % для новой насадки.

Можно заключить, что для расчета динамической удерживающей способности уголковых насадок для условий производственной эксплуатации можно использовать уравнение (4). Погрешность расчетного определения значений  $H_{\text{дин}}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  не превышает +1,5 % для новой насадки с наименьшей погрешностью среди исследованных насадок.

#### *Список литературы*

1. Рамм В. М. Абсорбция газов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 655 с.
2. Жаворонков Н. М. Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередача в скрубберах. – М.: Советская наука, 1944. – 155 с.
3. Жаворонков Н. М., Гильденблат И. А., Рамм В. Н. Исследование массопередачи к однофазному газовому потоку в насадочных колоннах // Журнал прикладной химии. – 1960. – № 10. – С. 1790-1800.
4. Патент 2094113 Россия, МПК6 В 01 J 19/32. Уголковая насадка для массообменных аппаратов / В. И. Фетисов, А. З. Абдуллин, А. К. Панов, А. В. Бакаев. – № 5067982/25; Заявлено 20.05.92; Опубликовано 27.10.97. бюл. № 30.
5. Патент РФ №2229928 Контактное устройство для массообменных аппаратов / В. И. Фетисов, Н. С. Шулаев, А. К. Панов, А. А. Тимофеев, М. Р. Флид, А. П. Тимашев, А. З. Абдуллин Заявлено 23.12.2002; Опубликовано: 10.06.2004.
6. Патент № 137480 Россия. Насадка для массообменной колонны / А. Ф. Хайруллин, В. А. Кузнецов – № 2013125352; Заявл. 31.05.2013; Опубл. 20.02.2014.

#### *Сведения об авторах*

*Хайруллин Альмир Фанисович, аспирант, Башкирский государственный университет, г. Уфа, e-mail: almirmig@mail.ru*

*Кузнецов Владимир Александрович, д. т. н., профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», Башкирский государственный университет, г. Уфа тел. 8(3472)286210*

#### *Information about the authors*

*Khairullin A. F., postgraduate of Bashkir State University, Ufa, e-mail: almirmig@mail.ru*

*Kuznetsov V. A., Doctor of Engineering, professor of the chair «Technological machines and equipment», Bashkir State University, Ufa, phone: 8(3472)286210*