

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ОПОРНО-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ РЕШЕТОК  
НА ГИДРОДИНАМИКУ В МАССООБМЕННОМ АППАРАТЕ  
С ПОДВИЖНОЙ ШАРОВОЙ НАСАДКОЙ**

**Р.И. ЛАНКИН, канд. техн. наук, доц. В.С. ФРАНЦКЕВИЧ**  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

*В химической, а также нефтехимической, строительной, металлургической, горно-химической и других промышленности используются насадочные и тарельчатые колонны для процесса массообмена. В статье дано краткое представление о насадочных колоннах и их применении. Изложен принцип работы подвижных насадок, а также указаны их основные недостатки. Описана экспериментальная абсорбционная колонна и методика проведения экспериментальных исследований. По результатам экспериментов построены графики зависимости гидравлического сопротивления опорно-распределительных решеток от скорости газа, подвижных шаровых насадок с использованием этих решеток как с орошением, так и без него.*

**Ключевые слова:** абсорбция, опорно-распределительная решетка, подвижная насадка, гидравлическое сопротивление.

**Введение.** Развитие промышленности с ростом объема производства сопровождается выбросами промышленных газов в атмосферу. Очистка отходящих газов должна обеспечить утилизацию ценных компонентов и охрану окружающей среды от загрязнения. Как правило, на очистку поступает большой объем газовой фазы, при этом требуется высокая степень извлечения компонентов [1; 2].

Абсорбция и десорбция являются основными областями применения колон с неупорядоченными элементами насадок, поскольку процессы разделения проходят в основном в умеренном диапазоне температур. Особое внимание должно быть уделено насадочным телам с произвольным заполнением, которые характеризуются низким перепадом давления, малым удельным весом, хорошей смачиваемостью жидкостью, что приводит к уменьшению размеров конструкции и снижению эксплуатационных расходов. Расхождение между неупорядоченными и структурированными насадками с точки зрения гидравлического и массообменного поведения за последние 10 лет уменьшилось [3].

Широкое применение получили абсорбционные аппараты с подвижной насадкой. Такие аппараты просты по конструкции и эффективны. Одним из существенных преимуществ является возможность эксплуатации с жидкостями, которые в контакте с газами выделяют твердую фазу и забивают тарелки, решетки и насадки обычных абсорберов [4]. Они отличаются от других классов массообменных аппаратов тем, что насадочные тела совершают хаотичные движения, а пройденный путь каждого элемента насадки отличается и по-своему уникален, что значительно усложняет их исследование [5; 6].

Подвижная насадка в абсорбционном аппарате действует как устройство для диспергирования жидкости, а также распределения газа по всему объему сечения слоя, что увеличивает степень использования кинетической энергии газа и позволяет работать с высоким КПД на распределительных устройствах с большим свободным сечением [4].

Недостатками таких аппаратов, отмеченными в процессе эксплуатации, можно считать неравномерное распределение газовой фазы в надрешеточном пространстве как по сечению, так и по высоте аппарата, а также образование застойных зон в слоях насадки [2].

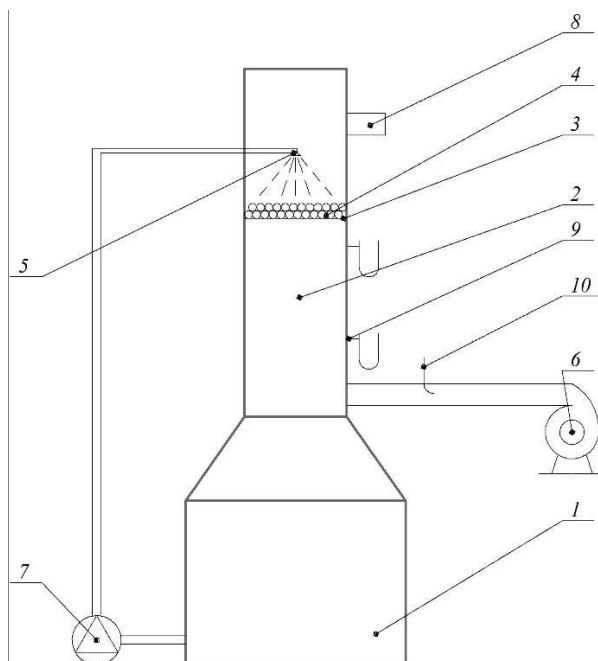
**Основная часть.** Один из наиболее эффективных способов очистки промышленного воздуха является мокрая очистка газов. Аппараты мокрого пылеулавливания отличаются простотой конструкции. Довольно часто используются аппараты с подвижной насадкой, несмотря на то что они появились сравнительно недавно<sup>1</sup>.

Насадка, находящаяся внутри абсорбера, удерживается в псевдооживленном состоянии газовым потоком. Жидкость, которая поступает в абсорбер, создает пленку, обтекающую поверхность насадочных элементов, или может находиться в виде струй или капель, распределенных в газе<sup>2</sup>. Течение потоков в подвижной насадке относится к одной из труднорешаемых задач газожидкостной механики.

<sup>1</sup> Ланкин Р.И., Францкевич В.С., Шаповалов Ю.П. Гидродинамика в аппаратах с подвижной насадкой // Нефтехимия-2021: материалы IV Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке / Минск (22–24 нояб. 2021 г.) – Минск: БГТУ, 2021. – С. 228–231.

<sup>2</sup> Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбционной колонны с подвижной насадкой // Химическая технология и техника: материалы 86-й науч.-техн. конф. професс.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов / Минск (31 янв. – 12 февр. 2022 г.) – Минск: БГТУ, 2022. – С. 148–151.

Объектом исследования является абсорбционная установка (рисунок 1). В колонне размещена одна сменная опорно-распределительная решетка провального типа. На решетке располагается насадка, насыпанная в 4 слоя. В качестве насадочных тел использовался вспученный полистирол шарообразной формы диаметром 29 мм.



1 – резервуар; 2 – корпус аппарата; 3 – опорно-распределительная решетка; 4 – насадка; 5 – форсунка; 6 – вентилятор; 7 – насос; 8 – выходной патрубок; 9 – клапан для измерения перепада давления с U-образными дифманометрами; 10 – трубка Пито

Рисунок 1. – Экспериментальный абсорбер

Экспериментальная абсорбционная колонна состоит из цилиндрического резервуара 1 с конической частью, на которой с помощью фланцевого соединения закреплен цилиндрический вертикальный корпус 2. Внутри установлена опорно-распределительная решетка 3 с насыпанной на нее шаровой насадкой 4.

Газ при работе абсорбера движется в пустотах между насадочными телами и внутри их противотоком по отношению к жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру.

Перед началом работы резервуар 1 заполнялся водой, из которого жидкость нагнеталась насосом 7 и поступала в колонну. Для равномерной подачи жидкости по сечению аппарата предусмотрена форсунка 5. Под действием силы тяжести она стекает обратно в резервуар. Воздух подавался с помощью вентилятора 6, проходил через колонну и покидал ее через выходной патрубок 8.

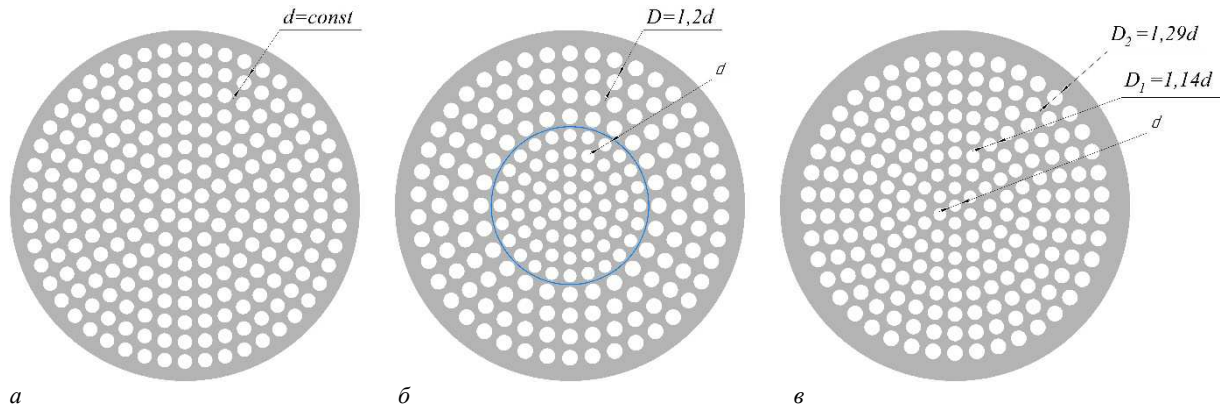
Расход воды измерялся расходомером. Регулировка расхода воздуха происходила изменением частоты вращения рабочего колеса частотным преобразователем. Расход воздуха определялся дифманометром, соединенным с трубкой Пито 10, перепад давления – через клапан для измерения перепада давления U-образным дифманометром 9. В ходе проведения эксперимента были изготовлены три типа опорно-распределительных решеток<sup>3</sup> (рисунок 2).

Изготовленные решетки можно классифицировать по конструкции:

- опорно-распределительная решетка типа 1 (рисунок 2, а) представляет собой решетку провального типа, в которой диаметры имеют один размер и расположены по концентрическим окружностям;
- опорно-распределительная решетка типа 2 (рисунок 2, б) – решетку провального типа, в которой центральные диаметры занимают 20% площади решетки. А отверстия, находящиеся на периферийной части, на 20% большего диаметра и занимают оставшуюся часть решетки. Отверстия расположены по концентрическим окружностям;
- опорно-распределительная решетка типа 3 (рисунок 2, в) – решетку провального типа, в которой диаметры отверстий постепенно увеличиваются от центра к периферии с постоянным шагом. Отверстия также расположены по концентрическим окружностям.

Площади свободного сечения решеток составляли 35% и 45%.

<sup>3</sup> Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Влияние конструкции опорной решетки на гидродинамику в массообменном аппарате // Химическая технология и техника: Химическая технология и техника: материалы 87-й науч.-техн. конф. професс.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов / Минск (31 янв. – 12 февр. 2023 г.) – Минск: БГТУ, 2023. – С. 85–87



*a* – тип 1; *б* – тип 2; *в* – тип 3

Рисунок 2. – Опорно-распределительные решетки

На первом этапе исследования экспериментальным способом были определены значения гидравлического сопротивления самих решеток, по результатам которых построены графики зависимости гидравлического сопротивления  $\Delta p$ , Па, в колонне от скорости газа  $\omega$ , м/с (рисунок 3).

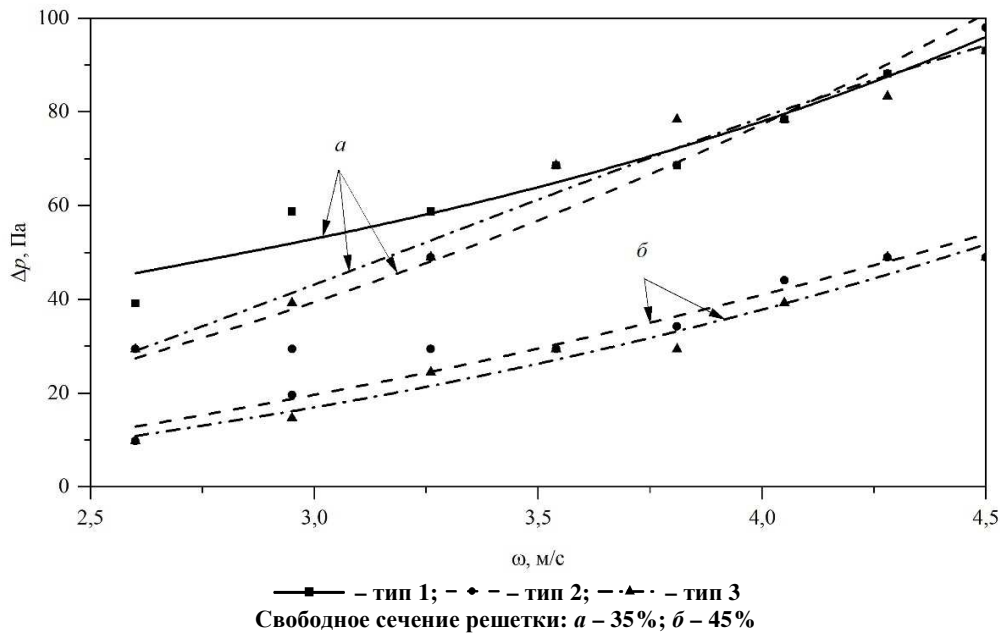


Рисунок 3. – Зависимость гидравлического сопротивления опорно-распределительной решетки от скорости газа

Согласно графику (см. рисунок 3), чем больше площадь свободного сечения решетки, тем меньше гидравлическое сопротивление. При одинаковом свободном сечении гидравлическое сопротивление при различных конструкциях решеток малого диаметра отличается незначительно. При скоростях газа до 3,5 м/с гидравлическое сопротивление меньше с решетками типа 2 и типа 3.

На следующем этапе эксперименты проводились со слоем шаровой насадки. Плотность орошения составляла 0 и 20 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч). По результатам этой части были построены графики зависимости гидравлического сопротивления сухой насадки  $\Delta p$ , Па, в колонне от скорости газа  $\omega$ , м/с (рисунок 4) и графики зависимости гидравлического сопротивления насадки  $\Delta p$ , Па, в колонне от скорости газа  $\omega$ , м/с при плотности орошения  $q = 20$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) (рисунок 5).

Из графика на рисунке 4 можно отметить, что гидравлическое сопротивление меньше с опорно-распределительной решеткой типа 3 со свободным сечением решетки как 35%, так и 45%. При скорости газа от 2,5 до 4 м/с разница гидравлического сопротивления этой решетки достигает наибольшего значения по сравнению с остальными видами при свободных сечениях решеток. Также следует добавить, что с решеткой типа 3 в процессе эксперимента наглядно было видно, что распределение насадки по сечению в аппарате более равномерно по сравнению с остальными.

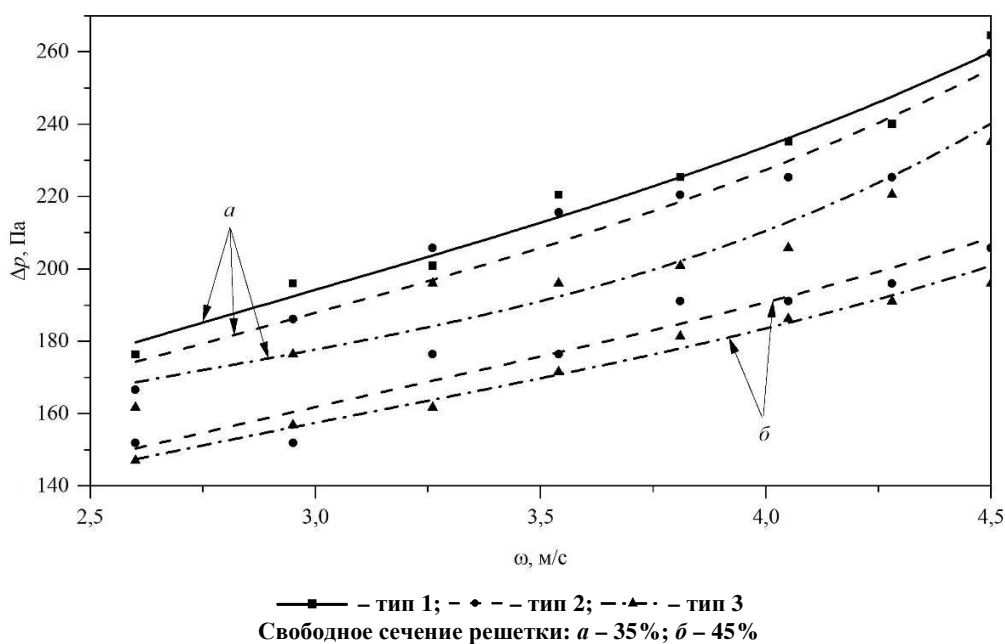


Рисунок 4. – Зависимость гидравлического сопротивления сухой насадки от скорости газа

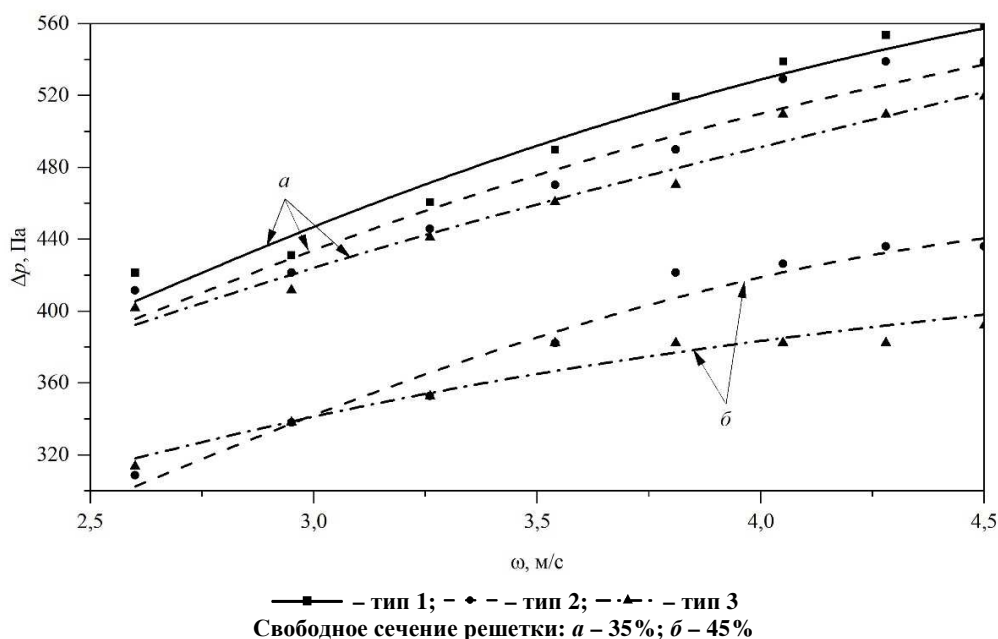


Рисунок 5. – Зависимость гидравлического сопротивления насадки от скорости газа при плотности орошения  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Согласно графику на рисунке 5, при орошении насадок жидкостью наибольшее гидравлическое сопротивление наблюдается при использовании опорно-распределительной решетки типа 1, а наименьшее – типа 3. Необходимо сказать, что при свободном сечении решеток 35% гидравлическое сопротивление с каждым следующим типом решетки незначительно меньше предыдущего. При свободном сечении 45% до скорости газа 3,2 м/с гидравлическое сопротивление насадок с разными типами решеток не отличается. А при увеличении скорости уже замечается значительный рост гидравлического сопротивления с опорно-распределительной решеткой типа 2, относительно типа 3. При скоростях газа свыше 3,8–4 м/с начинается активный брызгоунос.

Одна из предложенных опорно-распределительных решеток прошла промышленные испытания на абсорбционном аппарате в процессе производства кровельных материалов. В результате установлено, что гидравлическое сопротивление опорно-распределительной решетки уменьшилось, а также отмечено более равномерное распределение подвижной шаровой насадки по сечению аппарата во время его работы, которое наблюдалось через смотровое окно.

Использование этой решетки приводит к повышению эффективности массообмена вследствие увеличения турбулизации потока возле стенки аппарата или при той же производительности по газу к снижению удельных энергозатрат на процесс очистки воздуха.

**Заключение.** Проходя через насадку, газовый поток испытывает гидравлическое сопротивление, так что разность давлений газа до и после подвижной насадки равна гидравлическому сопротивлению, которое создается во время прохождения через насыпную насадку. Гидравлическое сопротивление насадки зависит от количества насыпаемой насадки, гидродинамического режима работы, связанного со скоростью газа. Наибольшее влияние на гидравлическое сопротивление оказывают скорость газа и плотность орошения.

Из приведенных графиков (см. рисунки 3–5) следует, что наименьшее гидравлическое сопротивление в насадке было замечено с использованием опорно-распределительной решетки типа 3. Также с этой решеткой было замечено более равномерное распределение подвижной шаровой насадки по сечению аппарата во время работы.

С увеличением скорости потока газа возрастает интенсивность брызгоуноса [7], который наиболее ярко выражался при скоростях газа свыше 3,8–4 м/с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заминян А.А., Рамм В.М. Абсорберы с подвижной насадкой. – М.: Химия, 1980. – 184 с.
2. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбера с подвижной шаровой насадкой / Труды БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2(259). – С. 107–114. DOI 10.52065/2520-2669-2022-259-2-107-114
3. Maćkowiak J. Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 355 p.
4. Левш И.П., Убайдуллаев А.К. Тарельчатые абсорберы и скрубберы с псевдооживленным (подвижным) слоем орошаемой насадки. – Ташкент: Узбекистан, 1981. – 236 с.
5. Балабеков О.С., Волненко А.А. Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой. – Шимкент: GOLDYES, 2015. – 184 с.
6. Рамм В.М. Абсорбция газов. – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
7. Котов В.М., Вальдберг А.Ю., Гельперин Н.И. Аппараты с псевдооживленным слоем орошаемой шаровой насадки и возможности их применения в процессах очистки газов и пылеулавливания. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1970. – 52 с.

#### REFERENCES

1. Zaminyan, A.A. & Ramm, V.M. (1980). *Absorbbery s podvizhnoi nasadkoi*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
2. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2022). Gidravlichesкое soprotivlenie absorbera s podvizhnoi sharovoi nasadkoi [Hydraulic resistance of the absorber with a movable ball nozzle]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya [Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoeology]*, 2(259), 107–114. DOI 10.52065/2520-2669-2022-259-2-107-114 (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Maćkowiak, J. (2010). *Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems*. Heidelberg: Springer-Verlag. (In Engl.)
4. Levsh, I.P. & Ubaidullaev, A.K. (1981). *Tarel'chatye absorbbery i skrubbery s psevdoozhivlennym (podvizhnym) sloem oroshaemoi nasadki*. Tashkent: Uzbekistan. (In Russ.)
5. Balabekov, O.S. & Volnenko, A.A. (2015). *Raschet i konstruirovaniye teplomassoobmennykh i pylaulavliyayushchikh apparatov s podvizhnoi i regulyarnoi nasadkoi*. Shimkent: GOLDYES. (In Russ.)
6. Ramm, V.M. (1976). *Absorbtsiya gazov*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
7. Kotov, V.M., Val'dberg, A.Yu. & Gel'perin, N.I. (1970). *Apparaty s psevdoozhivlennym sloem oroshaemoi sharovoi nasadki i vozmozhnosti ikh primeneniya v pro-tsessakh ochistki gazov i pylaulavlivaniya*. Moscow: TsNIITENeftekhim. (In Russ.)

Поступила 17.07.2023

### INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF SUPPORT-DISTRIBUTION GRIDES ON HYDRODYNAMICS IN A MASS EXCHANGER WITH A MOVABLE BALL NOZZLE

R. LANKIN, V. FRANTSKEVICH  
(Belarussian State Technological University)

*In the chemical industry, as well as in the petrochemical, construction, metallurgical, mining and chemical and other industries, packed and tray columns are used for the mass transfer process. This paper provides a brief introduction to packed columns and their applications. The principle of operation of movable nozzles is outlined, as well as their main disadvantages. An experimental absorption column is described and a technique for conducting experimental studies is described. Based on the results of the experiments, graphs of the dependence of the hydraulic resistance of the support-distribution grids on the gas velocity, as well as movable ball nozzles using these grids, both with and without irrigation, were plotted.*

**Keywords:** absorption, support-distribution grid, movable nozzle, hydraulic resistance.