

## МАССООБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКИ С ВНЕДРЕННЫМИ ТЕПЛООБМЕННЫМИ МОДУЛЯМИ

**А. В. Степыкин, А. А. Сидягин, В. М. Ульянов**

*Кафедра «Машины и аппараты химических и пищевых производств»,  
Дзержинский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Нижегородский  
государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Дзержинск;  
cngh@yandex.ru*

**Ключевые слова:** абсорбция; контактные устройства; массообмен; регулярная насадка; теплообмен; ректификация.

**Аннотация:** Представлены результаты исследования массообменных характеристик контактного устройства, состоящего из регулярной насадки и теплообменных пластинчатых элементов. Эксперименты проводились на системе «вода–воздух» с использованием модели испарения на специально разработанном лабораторном стенде с колонной диаметром 200 мм.

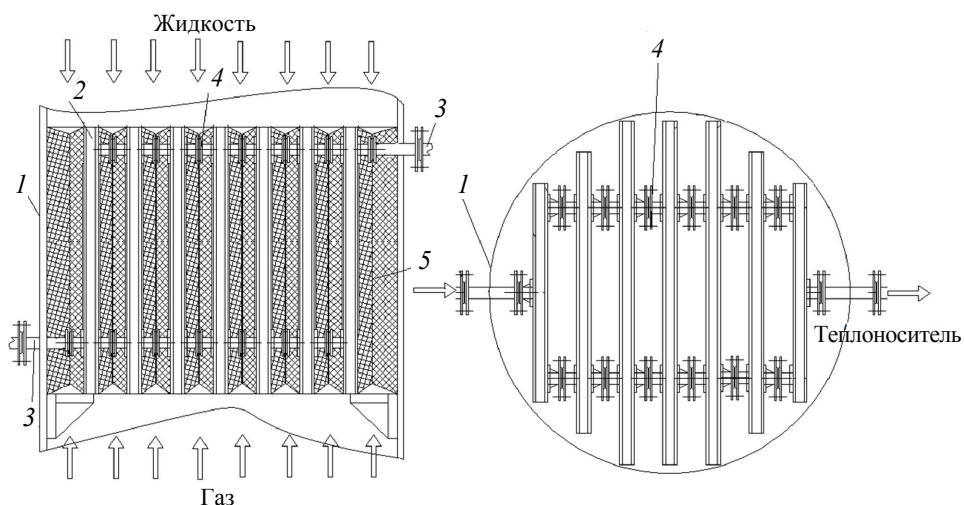
Получены коэффициенты эмпирических уравнений для определения коэффициентов массоотдачи. Показано, что их значения зависят от числа теплообменных модулей и числа элементов сетчатой насадки в блоке. Определены объемный и поверхностный коэффициенты массоотдачи в газовой фазе и высота единицы переноса. Массообменные характеристики предложенного устройства сопоставимы с известными структурированными насадками, однако, в последних отсутствует возможность организации теплообмена.

---

Массообменные аппараты колонного типа получили широкое распространение в промышленности. В них проводят процессы абсорбции, десорбции, ректификации, экстракции и др. Ряд массообменных процессов в некоторых случаях сопровождается значительными тепловыми эффектами, при этом теплообмен может существенно влиять на ход основного процесса или являться лимитирующей стадией.

Примеры таких процессов: поглощение нитрозных или сернистых газов водой, поглощение аммиака водно-аммиачным раствором, десорбция газов из жидкостей, холодильные циклы, построенные на водных растворах LiBr, LiI, и др.

Наиболее эффективным методом влияния на температурные условия в оборудовании является использование специальных контактных устройств с внедренными теплообменными элементами. Разработано устройство [1], позволяющее поддерживать требуемую температуру в аппарате и обладающее рядом преимуществ перед аналогами [2]. К таким преимуществам относится сравнительно большая пропускная способность по рабочим средам и теплоносителю, низкое гидравлическое сопротивление, возможность подбора конфигурации устройства в зависимости от требуемой поверхности тепло- и массообмена и др.



**Рис. 1. Схема контактного устройства:**

1 – корпус аппарата; 2 – теплообменный модуль;  
3 – патрубки ввода и вывода теплоносителя; 4 – штуцер; 5 – сетчатая насадка

Контактное устройство (рис. 1) устанавливается в корпус аппарата 1 и состоит из отдельных пластинчатых теплообменных модулей 2. Стенки модуля гофрируются для увеличения поверхности тепло- и массообмена и турбулизации потока жидкости. Теплоноситель подается и отводится через патрубки 3. Для обеспечения разборности конструкции всего блока, облегчения работ по ремонту обслуживанию и монтажу, модули имеют штуцера 4, число которых определяется необходимыми расходными характеристиками. Между пластинчатыми модулями установлена гофрированная сетчатая насадка 5 со специальным способом образования гофр [1]. Непостоянная высота гофр на сетке способствует турбулизации потока жидкости на ней. Изменение числа теплообменных модулей и листов сетчатой насадки дает возможность влиять на тепло- и массообменные характеристики устройства.

В рассматриваемой серии экспериментов, посвященной изучению массообмена изучение характеристик проводилось без подачи теплоносителя. Большинство целевых процессов, таких как поглощение аммиака, нитрозных сернистых и других кислых газов, лимитируются массоотдачей в газовой фазе. В связи с этим, в качестве базовой выбрана методика испарения воды в воздух, как наиболее безопасная, простая и недорогая [3].

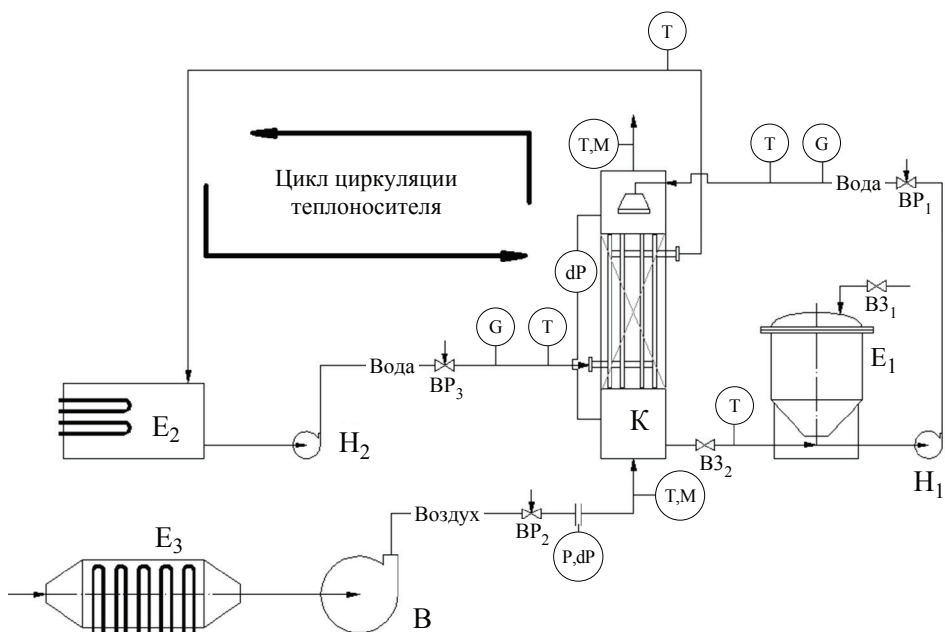
Характеристики устройств определялись расчетным и экспериментальным путем. Конфигурации устройств, на которых проводился эксперимент, приведены в табл. 1.

Для проведения исследований использована лабораторная установка с колонной, диаметром 200 мм. Общая схема установки представлена на рис. 2. Основным рабочим аппаратом являлась колонна К. Для транспортирования рабочих сред использовались центробежный вентилятор В, вихревые насосы Н<sub>1,2</sub>.

Таблица 1

**Параметры исследуемых контактных устройств**

Модификация устройства	Число теплообменных модулей	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>		Объемная доля теплообменных модулей
		теплообменных модулей	массообмена	
1	4	62	240	0,45
2	2	28	288	0,20
3	–	0	325	0



**Рис. 2. Схема лабораторной установки:**

К – насадочная колонна; В – вентилятор; E<sub>1,2,3</sub> – емкости; Кр – калорифер; Н<sub>1,2</sub> – насосы; G – ротаметры; Т – термометры; М – психрометры; Р – манометр избыточного давления на диафрагме; dP – дифманометры на диафрагме газового трубопровода и на слое насадки; ВР<sub>1,2,3</sub> – вентили регулировочные; ВЗ<sub>1,2</sub> – вентили запорные

В ходе экспериментов определяли коэффициенты массоотдачи (объемный и поверхностный), а также высоту единицы переноса (**ВЕП**). При определении объемного коэффициента массоотдачи по методике испарения использовали зависимость

$$\beta_V = \frac{M}{\Delta C V}, \quad (1)$$

где  $M$  – расход испаренной влаги, кг/с;  $\Delta C$  – средняя движущая сила массообменного процесса, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем насадки, м<sup>3</sup>.

Изменение парциального давления воды в потоке воздуха определяли психрометрическим методом по [4]. Концентрацию паров воды пересчитывали из парциального давления по формуле

$$C = \frac{P M_{H_2O}}{R(t + 273)}, \quad (2)$$

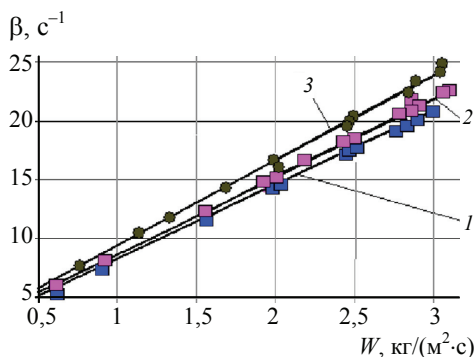
где  $M_{H_2O}$  – мольная масса воды;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Массу переданного компонента (воды) и среднюю движущую силу процесса определяли по формулам:

$$M = wS(C_{\text{вых}} - C_{\text{вх}}); \quad (3)$$

$$\Delta C_{\text{ср}} = \frac{C_{\text{вых}} - C_{\text{вх}}}{\ln \left( \frac{C_{\text{вх}}^* - C_{\text{вх}}}{C_{\text{вых}}^* - C_{\text{вых}}} \right)}, \quad (4)$$

где  $w$  – фиктивная скорость газового потока, отнесенная к сечению колонны, м/с;  $S$  – площадь сечения колонны, м<sup>2</sup>;  $C_{\text{вх}}$ ,  $C_{\text{вых}}$  – концентрация паров воды в воздухе на входе и выходе аппарата кг/м<sup>3</sup>;  $C^*$  – равновесная концентрация паров воды при температуре жидкости, кг/м<sup>3</sup>.



**Рис. 3. Зависимость коэффициента массоотдачи от массовой скорости газа для модификации устройства 1.**

Плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ :  
 1 – 0,0044; 2 – 0,0054; 3 – 0,0081

Коэффициент  $A_{MV}$  в самом общем виде можно определить по формуле

$$A_{MV} = A_{MVn}x_n + A_{MVc}(1 - x_n), \quad (6)$$

где  $x_n$  – объемная доля пластинчатых теплообменных модулей;  $A_{MVn}$ ,  $A_{MVc}$  – эмпирические коэффициенты, характерные для пластинчатых модулей и сетчатой насадки соответственно. Значения параметров приведены в табл. 2.

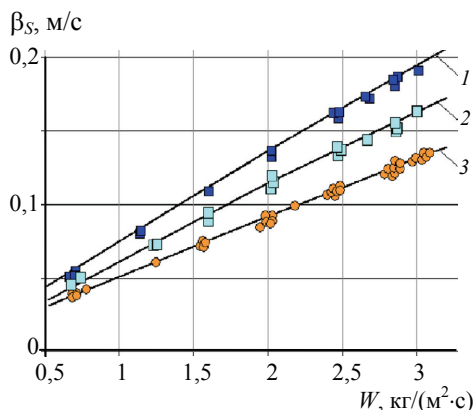
Для определения поверхностного коэффициента массоотдачи использовали зависимость

$$\beta_S = \frac{M}{\Delta C \psi_a F}, \quad (7)$$

где  $\psi_a$  – активная поверхность устройства;  $F$  – геометрическая поверхность насадки,  $\text{м}^2$ .

Обработка данных по поверхностному коэффициенту массоотдачи в зависимости от массовой скорости газа в  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  приведена на рис. 4.

Особенностью полученных результатов является тот факт, что в исследованном диапазоне практически отсутствует влияние расхода жидкости. Это связано с тем, что при использовании методики испарения полученный коэффициент будет близок к коэффициенту массопередачи, а значит, практически все диффузионное сопротивление сосредоточено в газовой фазе и характер движения



**Рис. 4. Зависимость поверхностного коэффициента массоотдачи от массовой скорости газа.**

Модификации блока: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3

Таблица 2

**Значения параметров для определения объемного коэффициента массоотдачи,  $\text{с}^{-1}$**

Параметр	Теплообменный блок	Сетчатая насадка
$A_{MVn}, A_{MVc}$	2,40	8,40
$n$	0,88	0,88
$m$	0,22	0,22

жения жидкости практически не оказывает влияния на процесс массопередачи. По итогам обработки данных получена зависимость поверхностного коэффициента массоотдачи от массовой скорости газа

$$\beta_{GS} = A_{MS} W_{\Gamma}^{n'}, \quad (8)$$

где коэффициенты  $A_{MS}$  и  $n'$  приведены в табл. 3.

Анализируя полученные значения, можно заключить, что коэффициент массоотдачи с увеличением объемной доли сетчатой насадки растет.

Наиболее распространенной из используемых массообменных характеристик является высота единиц переноса, которую можно выразить, преобразовав уравнение массоотдачи [3]:

$$H_{\text{н}} = \frac{wS}{\beta_{VS}} \frac{C_{\text{вых}} - C_{\text{вх}}}{\Delta C_{\text{ср}}} = \text{ВЕП} \cdot \text{ЧЕП}, \quad (9)$$

где  $H_{\text{н}}$  – высота блока насадки; ЧЕП – число единиц переноса.

Таким образом, величину ВЕП можно выразить через объемный коэффициент массоотдачи:

$$\text{ВЕП} = \frac{w}{A_{MV} W_{\Gamma}^n W_{\text{ж}}^m}, \quad (10)$$

и окончательно, после преобразований имеем:

$$\text{ВЕП} = \frac{1}{A_{MV} \rho_{\Gamma}} W_{\Gamma}^{0,12} W_{\text{ж}}^{-0,22}, \quad (11)$$

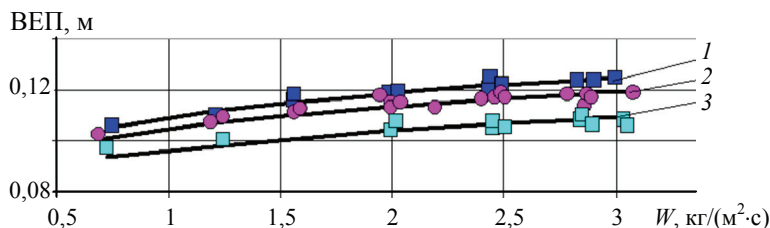
где  $\rho_{\Gamma}$  – плотность газовой фазы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

На рисунке 5 представлены результаты эксперимента по определению зависимости ВЕП от массовой скорости газа (F-фактора).

Диапазон нагрузок по фазам проводимого эксперимента  $W_{\Gamma} = 0,7 \dots 3,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,  $W_{\text{ж}} = 4,4 \dots 8,2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , температура газа  $15 \dots 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , давление атмосферное.

Отклонение экспериментальных значений от полученных эмпирических зависимостей не превышает 15 %.

По эффективности работы предложенное контактное устройство сопоставимо с другими регулярными насадками, например фирмы Sulzer [6] модификация СУ, Вакупак [7]. Однако, массообменные показатели у изучаемого устройства выше в среднем на 20 – 30 %, а при высоких значениях нагрузок по газу ( $W_{\Gamma} > 2,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) ВЕП предложенной насадки ниже на 50 – 60 %. Кроме этого, наличие встроенных



**Рис. 5. Зависимость количества теоретических ступеней на 1 м устройства от массовой скорости газа и расхода жидкости для модификации устройства 1.**

Плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ : 1 – 0,0044; 2 – 0,0054; 3 – 0,0081

Таблица 3

**Значения коэффициентов для определения поверхностного коэффициента массоотдачи, м/с**

Параметр	Теплообменный модуль	Сетчатая насадка
$A_{MSn}, A_{MSc}$	0,02	0,074
$n'$	0,88	0,880

теплообменных модулей позволяет поддерживать оптимальную температуру в условиях значительного выделения или поглощения тепла, что говорит о широких возможности применения предложенного устройства в массообменной аппаратуре при значительных тепловых эффектах.

#### *Список литературы*

1. Пат. на полезную модель 141498 Российская Федерация, МПК В01D 3/28. Теплообменное устройство / Степыкин А. В., Сидягин А. А. ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Нижегор. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева». – № 2013154833/05 ; заявл. 10.12.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. – 2 с.
2. Степыкин, А. В. Контактные устройства для проведения теплонапряженных массообменных процессов / А. В. Степыкин, А. А. Сидягин // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 18 – 21.
3. Рамм, В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – М. : Химия, 1975. – 767 с.
4. Степыкин, А. В. Экспериментальное исследование гидродинамических режимов работы блочно-модульной тепло-массообменной насадки [Электронный ресурс] / А. В. Степыкин, А. А. Сидягин // Современ. проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – Режим доступа : [www.science-education.ru/119-15003](http://www.science-education.ru/119-15003) (дата обращения: 18.05.2015).
5. Степыкин, А. В. Определение активной поверхности блочной насадки / А. В. Степыкин, А. А. Сидягин // Стратегические коммуникации, теоретические знания и практические навыки в экономике, управлении проектами, педагогике, праве, политологии, природопользовании, психологии, медицине, философии, филологии, социологии, технике, математике, физике, химии : сб. науч. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф., 29–30 нояб. 2013 г. / С.-Петерб. ин-т проект. менеджмента. – СПб., 2013. – С. 290 – 292.
6. Sulzer Chemtech. Structured Packings for Distillation, Absorption and Reactive Distillation. – Режим доступа : [http://www.sulzer.com/ru/-/media/Documents/ProductsAndServices/Separation\\_Technology/Distillation\\_Absorption/Brochures/Structured\\_Packings.pdf](http://www.sulzer.com/ru/-/media/Documents/ProductsAndServices/Separation_Technology/Distillation_Absorption/Brochures/Structured_Packings.pdf) (дата обращения 18.05.2015).
7. VAKU-PAK. Проспект. – Germania Chemnitz, Schulstrabe 63, 1991.

---

## **Mass-Transfer Characteristics of the Regular Packing Device with the Integrated Heat-Transfer Modules**

**A. V. Stepykin, A. A. Sidyagin, V. M. Ulyanov**

*Department “Machines and devices of Food and Chemical Production”,  
Nizhny Novgorod State Technical University Dzerzhinsky Polytechnic Institute (branch);  
[cngh@yandex.ru](mailto:cngh@yandex.ru)*

**Keywords:** absorption; contact devices; heat exchange; mass transfer; rectification; regular packing.

**Abstract:** The description of the contact device consisting of a regular packing and heat-transfer elements is provided. It should be noted that the offered contact device possesses a compound structure that is reflected in the approaches to its calculation. The results of the study of mass-transfer characteristics of the developed contact device are

presented in the paper. A specially developed laboratory stand with a column of 200 mm was used. The experiment was conducted on the system water-air using the evaporation model. The coefficients of the empirical equations were defined. The values of coefficients depend on the quantity of heat-transfer modules and the quantity of packing elements in the block. Mass transfer characteristics of the proposed device are comparable to the known structured packing devices. However, the existing devices lack the of heat transfer.

### References

1. Stepykin A.V., Sidyagin A.A. ; Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev. *Teplomassoobmennoe ustroistvo* (Heat and mass transfer device), Rossiiskaya Federatsiya, 2014, Utility Pat. 141498, 2 p.
2. Stepykin A.V., Sidyagin A.A. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2014, vol. 50, issue 5-6, pp. 301-305.
3. Ramm V.M. *Absorbtsiya gazov* (Absorption of gases), Moscow: Khimiya, 1975, 767 p.
4. Stepykin A.V., Sidyagin A.A. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 5, available at: [www.science-education.ru/119-15003](http://www.science-education.ru/119-15003) (accessed 18 May 2015).
5. Stepykin A.V., Sidyagin A.A. *Strategicheskie kommunikatsii, teoreticheskie znaniya i prakticheskie navyki v ekonomike, upravlenii proektami, pedagogike, prave, politologii, prirodopol'zovanii, psikhologii, meditsine, filosofii, filologii, sotsiologii, tekhnike, matematike, fizike, khimii* (Strategic communications, theoretical knowledge and practical skills in economics, project management, pedagogy, law, political science, nature, psychology, medicine, philosophy, philology, sociology, engineering, mathematics, physics, chemistry), Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 29-30 November 2013, St. Petersburg, 2013, pp. 290-292.
6. Sulzer Chemtech, *Structured Packings for Distillation, Absorption and Reactive Distillation*, available at: [http://www.sulzer.com/ru/-/media/Documents/ProductsAndServices/Separation\\_Technology/Distillation\\_Absorption/Brochures/Structured\\_Packings.pdf](http://www.sulzer.com/ru/-/media/Documents/ProductsAndServices/Separation_Technology/Distillation_Absorption/Brochures/Structured_Packings.pdf) (accessed 18 May 2015).
7. VAKU-PAK, *Catalogue*, Germania Chemnitz, Schulstrabe 63, 1991.

---

## Massewechselcharakteristiken der Regelgitterung mit den eingebrachten Wärmewechselmoduln

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse der Untersuchung der Massenwechselcharakteristiken der Kontakteinrichtung, die aus der Regelgitterung und den blattartigen Wärmewechselelementen besteht, dargelegt. Die Experimente wurden auf dem System Wasser-Luft mit der Benutzung des Modells der Verdunstung auf dem speziellerarbeiteten Laborprüfstand mit der Kolonne 200 mm im Durchmesser durchgeführt.

Es sind die Koeffizienten der empirischen Gleichungen für die Bestimmung der Koeffizienten der Massenabgabe erhalten. Es ist gezeigt, dass ihre Werte von der Menge der Wärmewechselmoduln und der Zahl der Elemente der Netzgitterung im Block abhängen. Es sind die Volumen- und Oberflächenkoeffizienten der Massenabgabe in der Gasphase und die Höhe der Einheitsübertragung bestimmt. Die Massewechselcharakteristiken der vorgeschlagenen Einrichtung kann man mit den bekannten strukturierten Gitterungen vergleichen. Aber die Letzten haben keine Möglichkeit der Organisierung des Wärmewechsels.

## Caractéristiques de transfert de masse de la buse régulière avec des modules de transfert thermique incorporés

**Résumé:** Sont présentés les résultats de la recherche des caractéristiques de transfert de masse de l'appareil de contact constitué de la buse régulière et des éléments de transfert thermique lamineux. Les expériences ont été réalisées par un système d'eau et d'air à l'aide du modèle d'évaporation spécialement élaboré sur un stand de laboratoire avec une colonne du diamètre de 200 mm.

Sont obtenus les coefficients des équations empiriques pour déterminer les facteurs de transfert de masse. Est montré que leur valeurs dépendent de la quantité de modules de transfert thermique et du nombre de la buse en grille dans le bloc. Les caractéristiques de transfert de masse de l'appareil proposé sont compatibles avec les buses connues. Cependant, dans ces dernières manque la possibilité de l'organisation de transfert thermique.

---

**Авторы:** *Степыкин Антон Викторович* – ассистент кафедры «Машины и аппараты химических и пищевых производств»; *Сидягин Андрей Ананьевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Машины и аппараты химических и пищевых производств»; *Ульянов Владимир Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических и пищевых производств», Дзержинский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», Дзержинск.

**Рецензент:** *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---