

УДК 66.021.3

Р. И. Ланкин, В. С. Францкевич
Белорусский государственный технологический университет
**ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ АБСОРБЕРА
С ПОДВИЖНОЙ ШАРОВОЙ НАСАДКОЙ**

Массообменные аппараты используются на предприятиях химической, нефтеперерабатывающей, металлургической, пищевой и других отраслей промышленности. В работе изложено краткое представление о насадочных колоннах и их применении. Дано описание абсорберов с подвижной насадкой, в частности абсорбционно-биохимической установки (АБХУ). Приведен принцип действия подвижных насадок, а также указаны их недостатки. Описана экспериментальная абсорбционная колонна и изложена методика проведения экспериментальных исследований. По результатам экспериментов построены графики зависимости гидравлического сопротивления в колонне от скорости газа при разных плотностях орошения, составлены уравнения регрессии и построены графики аппроксимации экспериментальных данных. Проведен анализ экспериментальных значений с аппроксимированной линией.

Полученные результаты планируется использовать при апробации компьютерной модели гидродинамики газожидкостных потоков с применением вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics).

Ключевые слова: абсорбция, подвижная насадка, гидравлическое сопротивление, уравнение регрессии.

Для цитирования: Ланкин Р. И., Францкевич В. С. Гидравлическое сопротивление абсорбера с подвижной шаровой насадкой // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 2 (259). С. 107–114.

R. I. Lankin, V. S. Frantskevich
Belarusian State Technological University
**HYDRAULIC RESISTANCE OF THE ABSORBER
WITH A MOVABLE BALL NOZZLE**

Mass transfer apparatuses are used at the enterprises of chemical, oil refining, metallurgical, food and other industries. This paper provides a brief introduction and application of packed columns. A description is given of absorbers with a movable nozzle, in particular, an absorption-biochemical unit (ABCU). The principle of operation of movable nozzles is described, as well as their shortcomings. An experimental absorption column and a methodology for conducting experimental studies are described. Based on the results of the experiments, graphs of the dependence of the hydraulic resistance in the column on the gas velocity at different irrigation densities were plotted, regression equations were compiled, and plots of approximation of the experimental data were plotted. An analysis of the experimental values with an approximated line has been carried out. The data obtained are planned to be used in approbation of a computer model of the hydrodynamics of gas-liquid flows using computational fluid dynamics (Computational Fluid Dynamics).

Key words: absorption, movable nozzle, hydraulic resistance, regression equation.

For citation: Lankin R. I., Frantskevich V. S. Hydraulic resistance of the absorber with a movable ball nozzle. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geology*, 2022, no. 2 (259), pp. 107–114 (In Russian).

Введение. В настоящее время развитие промышленности наряду с резким ростом объема производства сопровождается также возрастанием выбросов в атмосферу промышленных отходящих газов. Строящиеся заводы создаются на основе мощных единичных технологических систем и высокоэффективных аппаратов. Очистка отходящих промышленных газов должна обеспечить утилизацию ценных компонентов, которые находятся в них, и охра-

ну окружающей среды от загрязнения. Обычно на очистку поступает большой объем газов и при этом требуется высокая степень извлечения компонентов [1, 2].

В химической промышленности, как и в других отраслях, насадочные и тарельчатые колонны часто используются для процессов тепло- и массообмена при абсорбции, ректификации и экстракции, в том числе для охлаждения газов и жидкостей. В основном они применяются для

противоточного потока газовой и жидкой фаз. Насадочные колонны относятся к группе массообменных установок, в которых жидкость под действием силы тяжести стекает через неупорядоченную или структурированную насадку в виде пленки либо капель. Они характеризуются низким перепадом давления и большим рабочим диапазоном скоростей газа [3].

Абсорберы с подвижной насадкой благодаря высокой эффективности, простоте конструкции и нечувствительности к загрязненности газожидкостной фазы твердыми примесями находят все более широкое применение. Они отличаются от других классов массообменных аппаратов тем, что элементы насадки находятся во взвешенном состоянии и совершают хаотичные и пульсационные движения. Аппараты применяются в промышленности, в частности в производстве минеральных удобрений и в цветной металлургии. Данные абсорберы могут работать при больших нагрузках по газовой фазе (скорость газа на полное поперечное сечение абсорбера порядка 2,5–5,0 м/с), характеризуются высокой эффективностью и обладают важным свойством: движение насадочных тел практически исключает возможность забивания осадками [4].

Одним из перспективных направлений очистки газов является использование абсорбционно-биохимических установок (АБХУ), совмещающих в себе процессы абсорбции и биохимической обработки [5].

Принцип работы АБХУ основан на естественных природных процессах – растворимости вредных органических веществ в технической воде с последующим их биохимическим окислением при помощи микроорганизмов-деструкторов до безвредных составляющих [5].

Присутствие твердых примесей в газовом потоке не влияет на рабочие характеристики АБХУ. Основными составными частями АБХУ являются: абсорбер, биореактор, вентилятор и водяной насос. В абсорбере водным абсорбентом происходит улавливание вредных веществ, а в биореакторе – их нейтрализация. В биореакторе микроорганизмы иммобилизуются на носителе, укрепленном на конструктивных элементах. Циркуляция водного раствора идет по замкнутому циклу «абсорбер – биореактор» [6, 7].

Основная часть. Мокрая очистка – один из эффективных способов удаления загрязнений из промышленного воздуха. Аппараты мокрого пылеулавливания просты по конструкции. Широко используются в пылеулавливании аппараты с подвижной насадкой, несмотря на то, что появились они относительно недавно [8, 9].

В аппаратах увеличение эффективности процессов массообмена создается псевдооживлением

насадочных тел. Насадка, которая находится внутри аппарата, удерживается в подвешенном состоянии потоком газа. Жидкость, поступающая в аппарат, создает пленку, обтекающую поверхность насадочных тел, или с большими скоростями газа включается в состав барботажного слоя газа и жидкости, или находится в виде струй и капель, распределенных в газе [10, 11]. В слое насадки направление движения и длина пути каждого элемента носит случайный характер. Течение потоков через подвижную насадку относится к одной из трудно решаемых задач газожидкостной механики.

Недостатками таких аппаратов, выявленных в процессе эксплуатации, можно считать неравномерное распределение газа в надрешеточном пространстве как по сечению, так и по высоте аппарата, а также образование застойных зон в слоях насадки.

Цель данной работы заключалась в изучении влияния технологических параметров, таких как изменение расположения входного патрубка, скорости газа и плотности орошения на гидравлическое сопротивление аппарата.

Объектом исследования выступает абсорбционная колонна (рис. 1) высотой $H = 1,8$ м и диаметром $D = 200$ мм. В основании находится резервуар объемом $V = 30$ л, который наполнен водой. В колонне располагаются три решетки, на которых насыпана насадка, с высотой слоя $h = 116$ мм (0,37 от высоты секции [12]). В качестве насадки использовался материал шарообразной формы, диаметром $d = 29$ мм ($D/d = 6,9$).

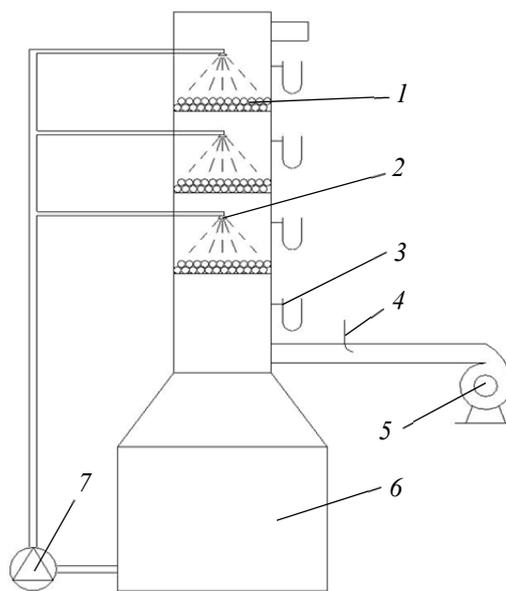


Рис. 1. Экспериментальный абсорбер:

- 1 – насадка; 2 – форсунки;
3 – клапан для измерения перепада давления с дифманометрами; 4 – трубка Пито; 5 – вентилятор;
6 – абсорбционная колонна; 7 – насос

Для определения рациональной конструкции входного патрубка с точки зрения наименьшего гидравлического сопротивления исследования проводились на трех вариантах входного газового патрубка: тангенциальный, радиальный и радиальный под углом 30° (рис. 2).

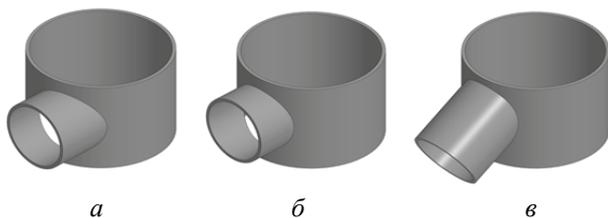


Рис. 2. Входные патрубки:
 а – тангенциальный; б – радиальный;
 в – радиальный под углом 30°

Вода из резервуара нагнеталась насосом и через форсунки поступала на каждый из трех слоев насадки. Расход воды измерялся расходомером. Воздух в колонну подавался вентилятором и регулировался изменением частоты вращения рабочего колеса с использованием частотного преобразователя. Расход воздуха измерялся дифманометром через трубку Пито, перепад давления – через клапан, соединенный с дифманометром.

В ходе исследования скорость газа в колонне изменялась в пределах от 1,7 до 4 м/с, что соответствует расходу от 190 до 500 м³/час. Плотность орошения составляла 0; 15; 17,5; 20 м³/м²·час [13].

После эксперимента с плотностью орошения 0 и 15 м³/м²·час и тремя разными конструкциями входных патрубков были построены графики зависимости гидравлического сопро-

тивления Δp , Па, в колонне от скорости газа ω , м/с (рис. 3 и 4) [14], и обозначены скорости начала псевдооживления $\omega_{пс}$ и свободного витания $\omega_{св}$.

Необходимо отметить, что в процессе исследования гидравлического сопротивления абсорбера при орошении жидкостью нет явно выраженного диапазона стабильного псевдооживления, при котором гидравлическое сопротивление с ростом скорости практически не меняется. Это еще раз подтверждает сложность и хаотичность данного процесса.

Без орошения начало псевдооживления наблюдалось при скоростях газа от 2,2–2,4 м/с; а при более 3,6 м/с – происходил отрыв верхнего слоя шаров от самой насадки.

Из полученных зависимостей видно, что конструкции входных патрубков не оказывают существенного влияния на гидравлическое сопротивление в рабочем режиме псевдооживления. Однако отмечено, что диапазон устойчивой работы слоя значительно больше при тангенциальном и радиальном подводах газа. Они в два раза выше, чем при радиальном под углом 30° вводе газовой фазы.

В ходе эксперимента с разными плотностями орошения были построены графики зависимости гидравлического сопротивления Δp , Па, в колонне от скорости газа ω , м/с (рис. 5).

При скоростях газа 2,4–2,7 м/с наблюдалось псевдооживление первого и второго слоев насадки. При таких скоростях подъемной силы не хватает на третий слой, который начинает псевдооживляться только при скоростях газа 3,1–3,4 м/с. Свыше скорости газа 3,2 м/с происходил активный унос капель жидкости.

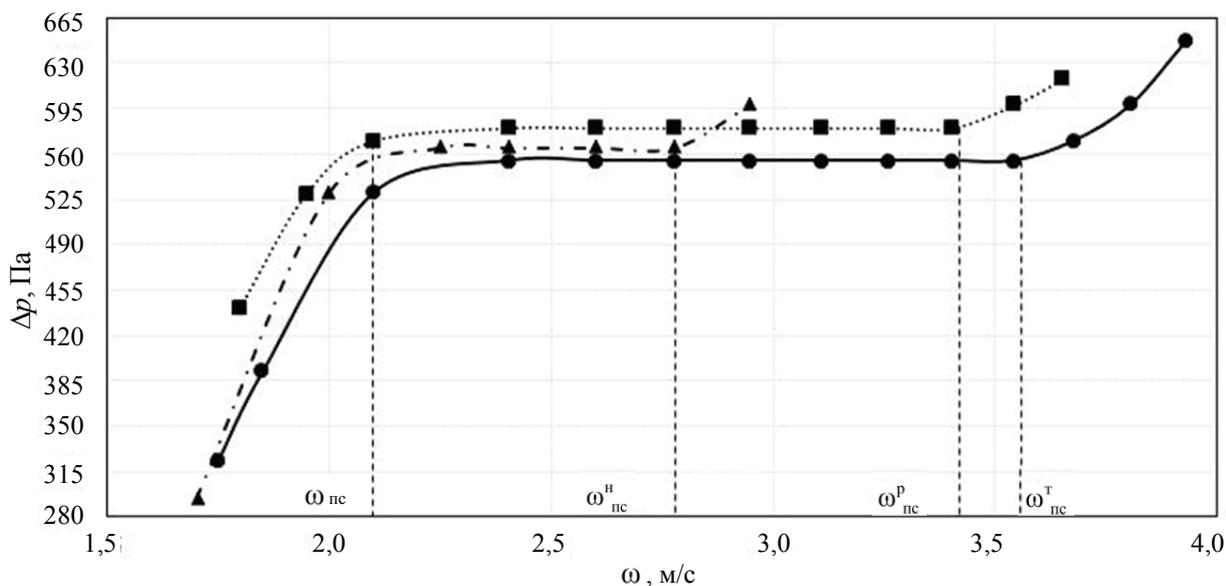


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления сухой насадки в колонне от скорости газа:
 —●— тангенциальный; - -▲- - наклонный;■..... – радиальный

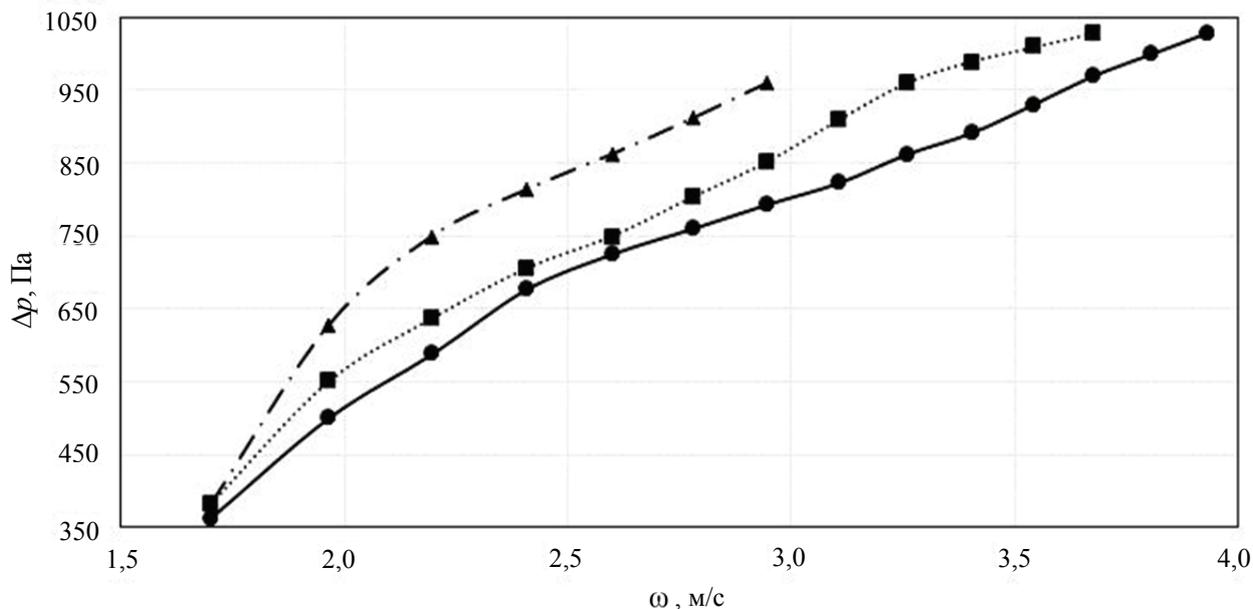


Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления в колонне от скорости газа при плотности орошения $15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$:
 – тангенциальный; -·▲-· – наклонный; ···■··· – радиальный

При увеличении плотности орошения увеличивается сопротивление, но плотность орошения не оказывает значительного влияния.

В ходе обработки экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов были построены уравнения регрессии [15]. Для этого была выбрана функция 3-го порядка $y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$. Для нахождения коэффициентов a , b , c , d составлена система уравнений (1) с четырьмя неизвестными:

$$\begin{cases} 16\,641,5 \cdot a + 4\,763,51 \cdot b + 1\,390,04 \cdot c + \\ + 415,8 \cdot d = 23\,9463,49, \\ 4\,763,51 \cdot a + 1\,390,04 \cdot b + 415,8 \cdot c + \\ + 128,42 \cdot d = 72\,709,09, \\ 1\,390,04 \cdot a + 415,8 \cdot b + 128,42 \cdot c + \\ + 41,32 \cdot d = 22\,859,59, \\ 415,8 \cdot a + 128,42 \cdot b + 41,32 \cdot c + \\ + 14 \cdot d = 7\,506,8. \end{cases} \quad (1)$$

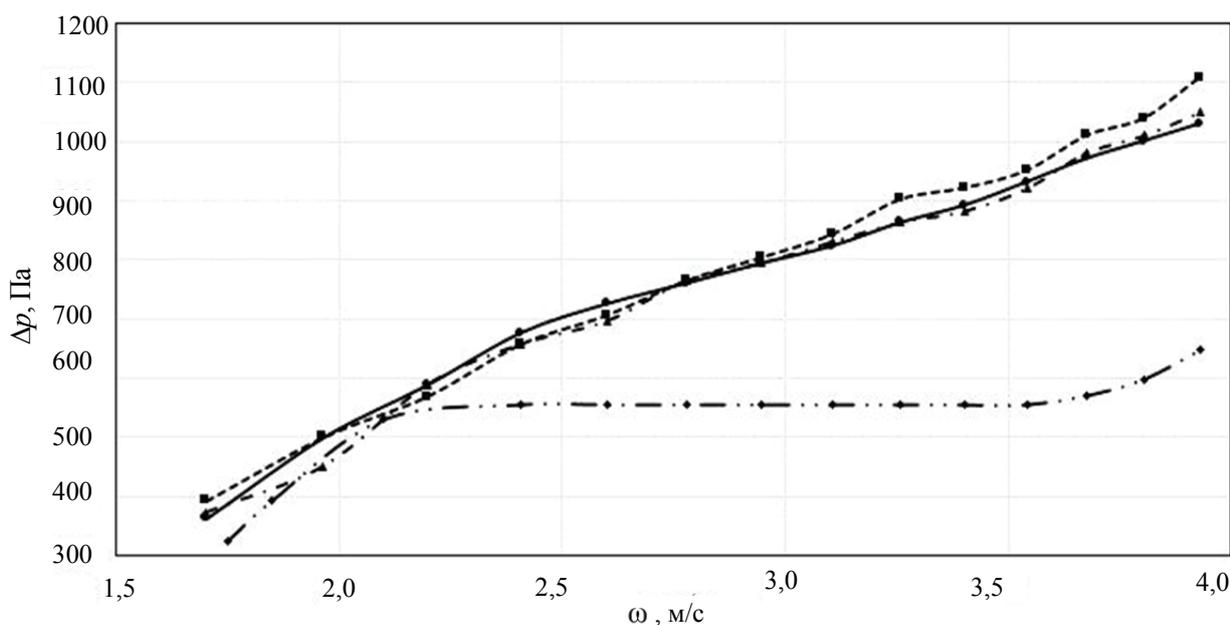


Рис. 5. Зависимость гидравлического сопротивления в колонне от скорости газа:
 – $q = 0 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$; —●— $q = 15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$; -·▲-· $q = 17,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$; ---■--- $q = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$

Затем были найдены коэффициенты a, b, c, d матричным способом:

$$a = 66,31; \quad b = -610,96; \quad c = 2\,086,9; \\ d = -1\,745,26.$$

Подставляя их в уравнение и заменяя y на Δp , а x на ω , получим уравнение (2) для плотности орошения $15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$:

$$\Delta p = 66,31 \cdot \omega^3 - 610,96 \cdot \omega^2 + \\ + 2\,086,9 \cdot \omega - 1\,745,26; \quad (2)$$

$$\Delta p = 58,16 \cdot \omega^3 - 533,91 \cdot \omega^2 + \\ + 1\,862,56 \cdot \omega - 1\,553,61; \quad (3)$$

$$\Delta p = 38,81 \cdot \omega^3 - 348,61 \cdot \omega^2 + \\ + 1\,309,26 \cdot \omega - 1\,021,62. \quad (4)$$

Далее были построены графики аппроксимации экспериментальных данных (рис. 6–8).

После построения графиков была рассчитана величина достоверности аппроксимации (R^2), которая составляла более 0,99 для каждого из экспериментов.

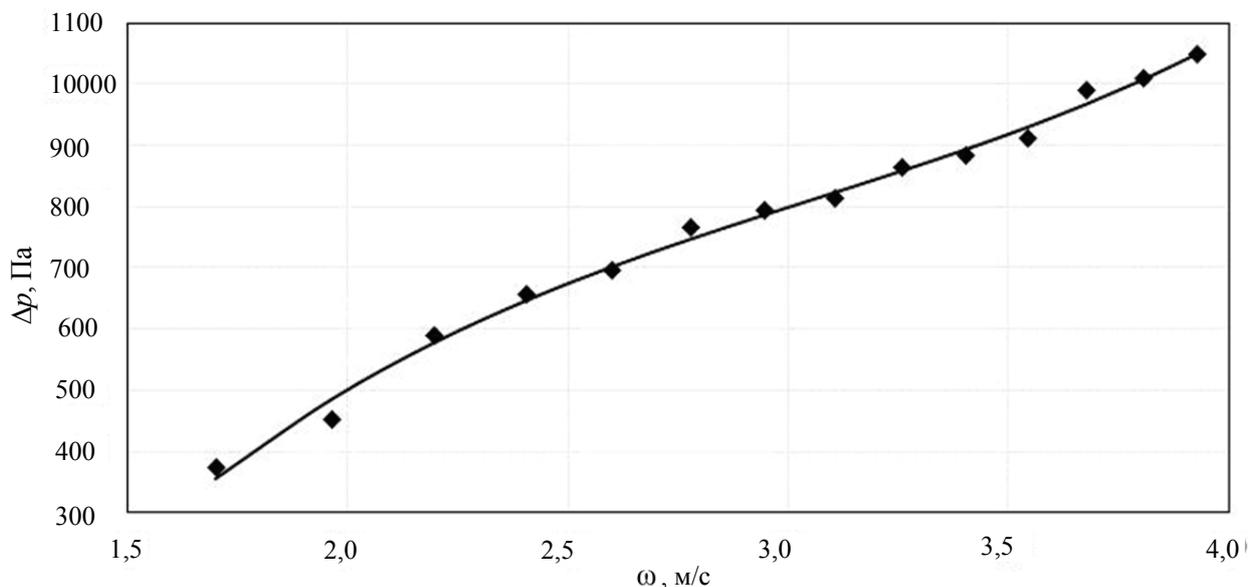


Рис. 6. Аппроксимация экспериментальных данных ($q = 15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$):
 ◆ – экспериментальные значения; — – линия аппроксимации

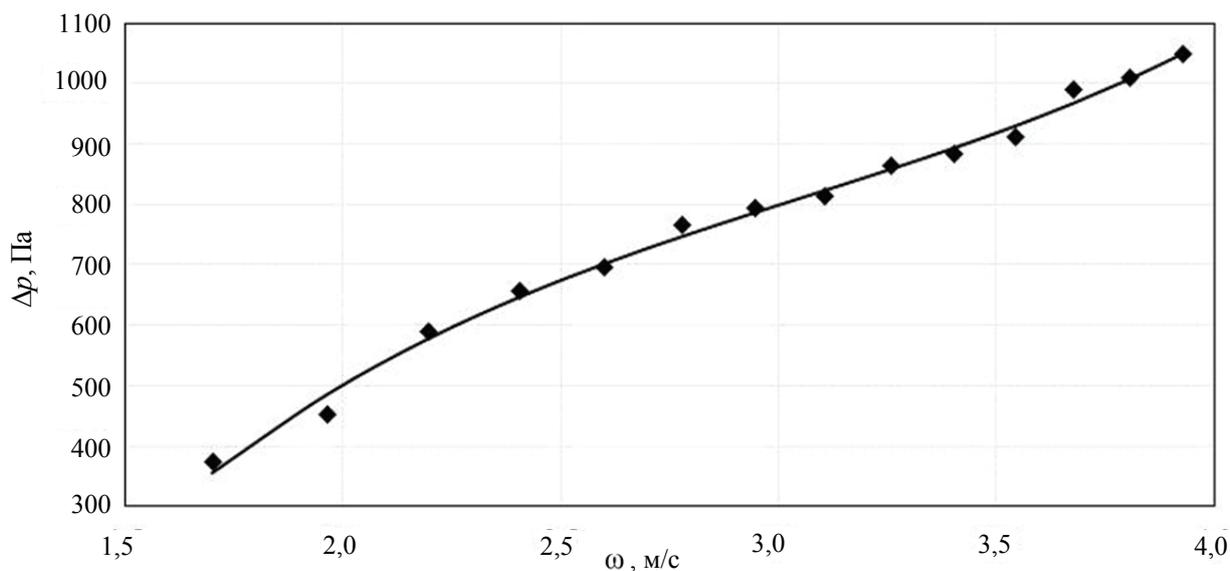


Рис. 7. Аппроксимация экспериментальных данных ($q = 17,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$):
 ◆ – экспериментальные значения; — – линия аппроксимации

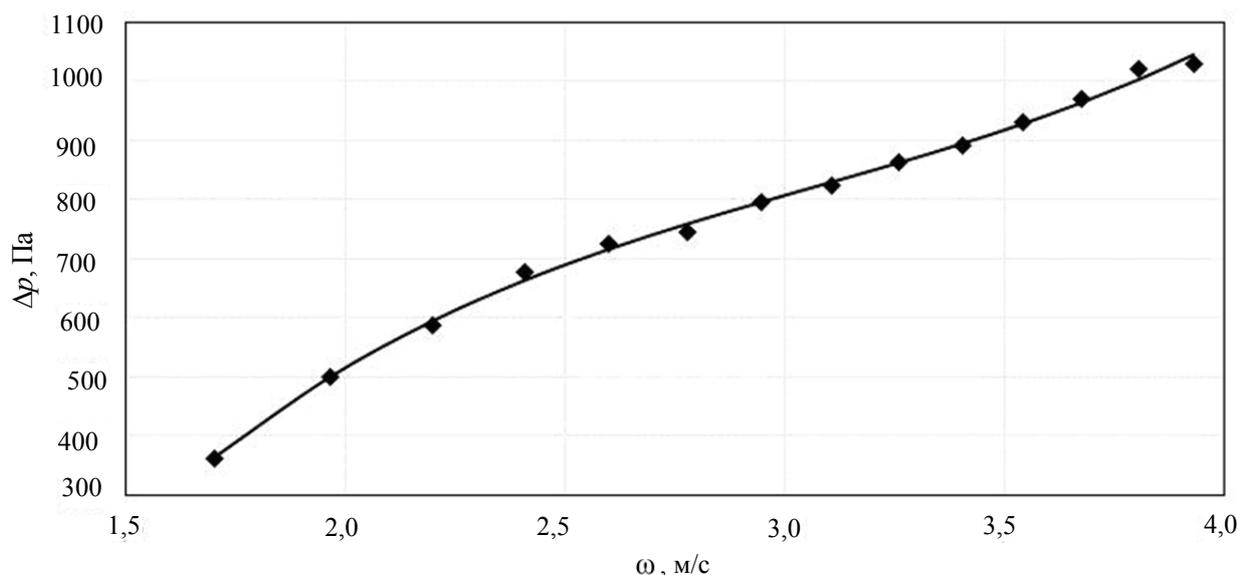


Рис. 8. Аппроксимация экспериментальных данных ($q = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{час}$):

◆ – экспериментальные значения; — — линия аппроксимации

Заключение. Проходя через колонну, газовый поток преодолевает гидравлическое сопротивление, так что разность давлений газа на входе в аппарат и выходе из него должна быть равна гидравлическому сопротивлению, оказываемому его движению. Гидравлическое сопротивление аппарата зависит от его конструктивных особенностей и гидродинамического режима работы, связанного со скоростью газа. Основное влияние на гидравлическое сопротивление оказывают скорость газа и плотность орошения.

Наименьшее гидравлическое сопротивление в колонне, а также наибольший диапазон устойчивой работы слоя были с тангенциальным входным патрубком как с орошением, так и без него. Псевдооживление двух нижних

слоев начиналось при скоростях газа 2,4–2,7 м/с, а при скоростях газа 3,1–3,4 м/с псевдооживался 3-й слой – это объясняется нехваткой подъемной силы.

С увеличением скорости потока газовой фазы, а также плотности орошения возрастает интенсивность брызгоуноса [16], который начинался при скорости газа свыше 3,2 м/с.

В дальнейшем планируется провести аналитические исследования гидравлического сопротивления абсорбера с использованием компьютерной модели гидродинамики газожидкостных потоков с применением вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics), адекватность которой будет подтверждена, в том числе и представленными в статье данными.

Список литературы

1. Замянян А. А., Рамм В. М. Абсорберы с подвижной насадкой. М.: Химия, 1980. 184 с.
2. Обзорная информация. Серия «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов». Массообменные аппараты с подвижной насадкой для очистки газов и пылеулавливания / С. С. Серманизов [и др.]. М.: НИИТЭХИМ, 1969. 72 с.
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. Рамм В. М. Абсорбция газов. 2-е изд., переработ. и доп. М.: Химия, 1976. 656 с.
5. Шаповалов Ю. П., Галибус А. С. Применение абсорбционно-биохимических установок для очистки вентиляционного воздуха от вредных веществ при производстве минераловатных плит // Базальтовые технологии. 2017. № 1. С. 35–37.
6. Защита атмосферного воздуха литейных предприятий от загрязнения вредными органическими веществами / Ю. П. Шаповалов [и др.] // Литье и металлургия. 2017. № 4 (89). С. 138–142.
7. Опыт эксплуатации абсорбционно-биохимических установок очистки вентиляционного воздуха от вредных органических веществ в литейных цехах стран СНГ / Ю. П. Шаповалов [и др.] // Литье и металлургия. 2010. № 3S (57). С. 136–139.
8. Ланкин Р. И., Францкевич В. С., Шаповалов Ю. П. Гидродинамика в аппаратах с подвижной насадкой // Нефтехимия – 2021: материалы IV Международного научно-технического фо-

рума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 нояб. 2021 г. Минск, 2021. С. 228–231.

9. Лоскутов А. Н. Аппараты мокрого типа серии ШВ с подвижной насадкой – гарантированная пылегазоочистка (ООО «НПО «Центр ШВ») // Пылегазоочистка – 2014. 2014. С. 18–21.

10. Ланкин Р. И., Францкевич В. С. Гидравлическое сопротивление абсорбционной колонны с подвижной насадкой // Химическая технология и техника: материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 31 янв. – 12 февр. 2022 г. Минск, 2022. С. 148–151.

11. Ветошкин А. Г. Процессы и аппараты газоочистки. Пенза: ПГУ, 2006. 201 с.

12. Лаптев А. Г., Минеев Н. Г., Мальковский П. А. Проектирование и модернизация аппаратов разделения в нефте- и газопереработке. Казань: ООО «Печатный двор», 2002. 220 с.

13. Балабеков О. С., Волненко А. А. Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой. Шимкент: GOLDYES, 2015. 184 с.

14. Марков В. А., Протасов С. К., Боровик А. А. Процессы и аппараты химической технологии. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2011. 206 с.

15. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Л.: Физматгиз, 1962. 352 с.

16. Котов В. М., Вальдберг А. Ю., Гельперин Н. И. Аппараты с псевдоожиженным 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. *Absorbery s podvizhnoy nasadkoy* [Absorbers with movable nozzle]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 184 p. (In Russian).

2. Sermanizov S. S., Sabyrhanov D., Holpanov L. P., Balabekov O. S. *Obzornaya informatsiya. Seriya "Okhrana okruzhayushchey sredy i ratsional'noye ispol'zovaniye prirodnykh resursov". Massoobmennyye apparaty s podvizhnoy nasadkoy dlya ochistki gazov i pyleulavlivaniya* [Overview information. Series "Environmental protection and rational use of natural resources". Mass transfer apparatus with a movable nozzle for gas purification and dust collection]. Moscow, NIITEKhIM Publ., 1969. 72 p. (In Russian).

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. Ramm V. M. *Absorbtsiya gazov* [Gas absorption]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 656 p. (In Russian).

5. Shapovalov Yu. P., Galibus A. S. The use of absorption-biochemical installations for cleaning ventilation air from harmful substances in the production of mineral wool boards. *Bazalt'ovyye tekhnologii* [Basalt technologies], 2017, no. 1, pp. 35–37 (In Russian).

6. Shapovalov Yu. P., Galibus A. S., Sudarev A. I., Glushen E. M., Nagorny R. K. Protection of the air of the foundry enterprises against pollution of harmful organic matters. *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2017, no. 4 (89), pp. 138–142 (In Russian).

7. Shapovalov Yu. P., Galibus A. S., Deshchic S. S., Pribylov A. V. Experience of operation of absorption-biochemical installations for cleaning ventilation air from harmful organic substances in foundry shops of cis countries. *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2010, no. 3S (57), pp. 136–139 (In Russian).

8. Lankin R. I., Frantskevich V. S., Shapovalov Yu. P. Hydrodynamics in apparatus with a movable nozzle. *Neftekhimiya – 2021: materialy IV Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke* [Petrochemistry – 2021: proceedings of the International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing]. Minsk, 2021, pp. 228–231 (In Russian).

9. Loskutov A. N. Wet-type apparatus of the ShV series with a movable nozzle – guaranteed dust and gas cleaning. (ООО «НПО «Центр ШВ»). *Pylegazoochistka – 2014* [Dust and Gas Cleaning-2014], 2014, pp. 18–21 (In Russian).

10. Lankin R. I., Frantskevich V. S. Hydraulic resistance of the absorption column with a movable nozzle. *Khimicheskaya tekhnologiya i tekhnika: materialy 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Chemical Technology and Engineering: proceedings of the 86th Scientific and Technical Conference of the Faculty, Researchers and PhD students (with international participation)]. Minsk, 2022, pp. 148–151 (In Russian).

11. Vetoshkin A. G. *Protsessy i apparaty gazoochistki* [Processes and devices for gas cleaning]. Penza, PGU Publ., 2006. 201 p. (In Russian).

12. Laptev A. G., Mineev N. G., Mal'kovskiy P. A. *Proyektirovaniye i modernizatsiya apparatov razdeleniya v nefte- i gazopererabotke* [Design and modernization of separation apparatuses in oil and gas processing]. Kazan', OOO "Pechatnyy dvor" Publ., 2002. 220 p. (In Russian).

13. Balabekov O. S., Volnenko A. A. *Raschet i konstruirovaniye teplomassoobmennykh i pyleulavlivayushchikh apparatov s podvizhnoy i regulyarnoy nasadkoy* [Calculation and design of heat and mass transfer and dust collecting apparatuses with a movable and regular nozzle]. Shimkent, GOLDYES Publ., 2015. 184 p. (In Russian).

14. Markov V. A., Protasov S. K., Borovik A. A. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Laboratornyy praktikum* [Processes and apparatuses of chemical technology. Laboratory workshop]. Minsk, BGTU Publ., 2011. 206 p. (In Russian).

15. Linnik Yu. V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy* [The method of least squares and the foundations of the mathematical and statistical theory of processing observations]. Leningrad, Fizmatgiz Publ., 1962. 352 p. (In Russian).

16. Kotov V. M., Val'dberg A. Yu., Gel'perin N. I. *Apparaty s psevdoozhizhennym sloyem oroshayemoy sharovoy nasadki i vozmozhnosti ikh primeneniya v protsessakh ochistki gazov i pyleulavlivaniya* [Apparatus with a fluidized bed of an irrigated ball nozzle and the possibility of their use in the processes of gas cleaning and dust collection]. Moscow, CNIITENeftekhim Publ., 1970. 52 p. (In Russian).

Информация об авторах

Ланкин Роман Игоревич – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: roman1471@icloud.com

Францкевич Виталий Станиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: fvs2@tut.by

Information about the authors

Lankin Roman Igorevich – PhD student, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: roman1471@icloud.com

Frantskevich Vitaliy Stanislavovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fvs2@tut.by

Поступила 13.06.2022