

УДК 66.021.3-912:532.5(476)

**Р.И. Ланкин, В.С. Францкевич***УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь***ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И ГЕОМЕТРИИ НАСАДКИ НА ГИДРОДИНАМИКУ  
В МАССООБМЕННОМ АППАРАТЕ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ**

**Аннотация.** В горнодобывающих отраслях промышленности используются насадочные и тарельчатые колонны для процесса массообмена. В данной работе дано краткое представление о насадочных колоннах и их применении. Изложен принцип работы подвижных насадок, а также указаны их основные недостатки. Представлена схема и описание экспериментальной абсорбционной колонны, описана методика проведения экспериментальных исследований. По результатам исследований спроектированы и изготовлены новые виды насадочных тел. По результатам экспериментальных исследований построены графики зависимости гидравлического сопротивления подвижных шаровых насадок от скорости газа.

**Ключевые слова:** абсорбция, абсорбционная колонна, подвижная насадка, элемент насадки, гидравлическое сопротивление.

**R.I. Lankin, V.S. Frantskevich***Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus***THE INFLUENCE OF THE NOZZLE SHAPE AND GEOMETRY  
ON THE HYDRODYNAMICS IN A FLUIDIZED BED MASS  
TRANSFER APPARATUS**

**Abstract.** The mining industries use packed and plate columns for the mass transfer process. This paper provides a brief overview to packed columns and their applications. The principle of operation of movable nozzles is described, as well as their main disadvantages are shown. The scheme and description of the experimental absorption column are presented, and the methodology for conducting experimental studies is also described. Based on the research results, new types of nozzle bodies were designed and manufactured. Graphs of the dependence of the hydraulic resistance of movable ball nozzles on gas velocity, based on the results of experimental research, were constructed.

**Keywords:** absorption, absorption column, movable nozzles, nozzle element, hydraulic resistance.

**Введение**

Процессы массо- и теплообмена применяются в горнорудной промышленности. При добыче горных пород образуется большое количество пыли. Высокое содержание пыли в воздухе может привести к профессиональным заболеваниям. Во избежание этого используют массо- и теплообменные процессы и оборудование.

Массообменные процессы связаны с переносом вещества разнообразного химического состава в потоках различного агрегатного состояния через поверхность контакта фаз и характеризуются скоростью межфазного взаимодействия. Скорость процессов массообмена и массопередачи, направление их протекания, характер взаимодействия потоков в зависимости от физико-химических свойств, а также от физических и гидродинамических условий протекания определяют интенсивность, конструкцию и конструктивные особенности использования массо- и теплообменного оборудования [1], [2].

В основе абсорбции лежит массообмен. Абсорбция – это один из важных процессов очистки газа, который применяется во многих процессах. Абсорбат может растворяться в жидкой фазе, а может вступать с ней в реакцию [3].

В роли абсорберов часто используют насадочные, тарельчатые и с механическим распыливанием колонны. Широкое применение получили насадочные абсорберы с подвижной насадкой, поскольку могут работать в условиях коррозии, при наличии жидкостей, склонных к вспениванию, при высоких соотношениях жидкости и газа, при наличии твердых включений в жидкой фазе, а также в тех случаях, когда необходимо небольшое гидравлическое сопротивление системы [3], [4].

Насадочные аппараты чаще всего применяются при противотоке жидкости и газа. Однако в особых случаях они используются в схеме с поперечным потоком, когда жидкость течет вниз через слой насадки, а газ подается горизонтально, или в прямотоке, когда жидкость и газ протекают в одном направлении. Прямоточные аппараты с использованием структурированных насадочных элементов применяются для очистки газов, если достаточно одной контактной ступени, например, когда происходит необратимая реакция [5].

По сравнению с тарельчатыми, насадочные колонны обычно предпочтительнее для небольших установок, агрессивных условий эксплуатации, жидкостей со склонностью к пенообразованию, очень высоких соотношений жидкости и газа, а также в случаях, где желателен низкий перепад давления [5].

Подвижная насадка в абсорбере играет роль дробящего и турбулизирующего устройства для жидкой фазы и объемного барботера для газовой фазы. Подвижная насадка характеризуется тем, что она может работать в значительном интервале плотностей орошения ( $1 - 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ). Достоинством этих насадок является их самоочищаемость, а также очистка стенок колонны и опорно-распределительной решетки от любого осадка в процессе эксплуатации, что позволяет работать такому слою с кристаллизующимися и загипсовывающимися растворами [6], [7].

В абсорбционных аппаратах с подвижной насадкой насадочные тела поддерживаются за счет газового потока в псевдооживленном (кипящем) состоянии. В качестве насадочных тел могут использоваться сплошные или полые шары из полиэтилена, пенополистерола, полипропилена и других пластмасс, также могут изготавливаться из резины. Положение шаров фиксируется опорной и ограничительной решетками. Опорная (нижняя) решетка необходима для поддержания насадки, а ограничительная (верхняя) – предотвращает унос насадки из аппарата [8].

Мокрая очистка газов осуществляется за счет соприкосновения и захвата пылевых частиц жидкостью. Она используется для тонкой очистки газов, если допускается охлаждение и увлажнение газа. Преимуществом мокрого пылеулавливания считается то, что в аппарате одновременно можно проводить не только массообменные (абсорбцию) процессы, но и теплообменные (охлаждение). Недостатком является образование большого количества шлама в сточных водах. Основными условиями работы мокрых пылеуловителей служат созданная поверхность контакта газовой и жидкой фаз, а также высокая турбулентность газа [9].

Одним из важных показателей работы массообменных аппаратов является интервал изменения параметров устойчивой работы абсорберов. Для абсорберов с псевдооживленной насадкой к основным параметрам относятся: скорость газа в свободном сечении абсорбера  $\omega$ , плотность орошения  $U$ , высота статического слоя  $H_{ст}$  и характеристики псевдооживаемой насадки и опорно-распределительных устройств [8].

Целью данной работы являлось изучение влияния формы и геометрии подвижной насадки на гидродинамику массообменной колонны.

**Основная часть**

Объектом исследования являлась спроектированная и изготовленная абсорбционная установка (рисунок 1) с одним элементом насадки.

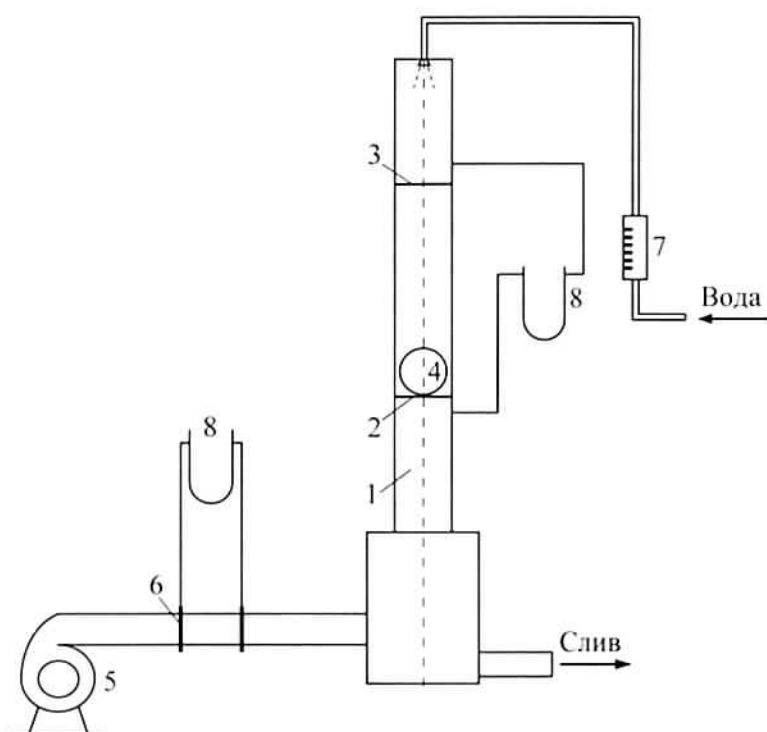


Рисунок 1 – Абсорбционная установка

регулированием частоты вращения рабочего колеса частотным преобразователем. Замер расхода воздуха осуществлялся с использованием диафрагмы 6, соединенной с ней дифманометром 8.

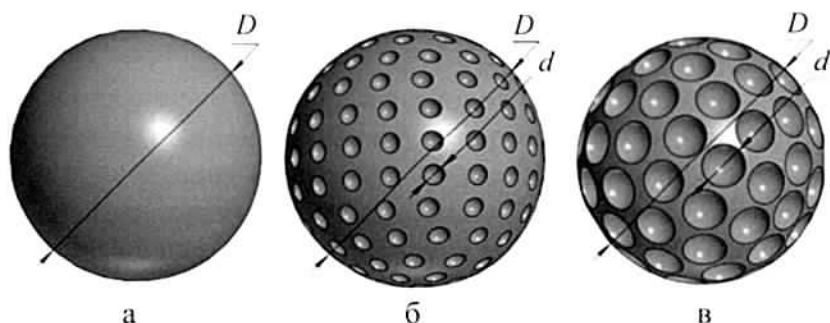
Жидкая фаза (вода) подавалась в колонну посредством распыления ее через форсунку, расположенную в верхней части колонны. Расход воды в колонне контролировался ротаметром 7.

В качестве опорно-распределительной и ограничительной решеток использовалась сетка, что обеспечило минимизацию гидравлического сопротивления, в дальнейшем этим сопротивлением можно пренебречь.

Элементы насадки, используемые в исследовании, были спроектированы и изготовлены, изображены на рисунках 2 и 3 [10].

Абсорбционная установка представляет собой трубу, изготовленную из оргстекла. В низу колонны 1 расположен резервуар, который служит для сбора жидкости. В трубе расположены опорно-распределительная 2 и ограничительная 3 решетки. На опорно-распределительную решетку 2 помещался элемент насадки 4, который в дальнейшем изменялся.

Перепад давления фиксировался U-образным дифманометром 8. Газовая фаза (воздух) подавалась в колонну с использованием радиально установленного патрубка с установленным на нем вентилятором 5. Измерение расхода осуществлялась



а – гладкий шар; б – шар с отношением диаметров  $d/D = 0,075$ ;  
в – шар с отношением диаметров  $d/D = 0,225$

Рисунок 2 – Насадочные тела шарообразной формы

На рисунке 2а изображен шар, который представляет собой правильную сферу и не содержит «лунок». Диаметр этого шара  $D$ . В дальнейшем такой шар будет называться гладкий шар или тип 1.

На рисунке 2б представлен шар, с диаметром  $D$ , выполненный в виде правильной сферы. Этот шар содержит количество «лунок»  $3,725D$  (в мм), глубиной  $0,0375D$ . Расстояния между соседними «лунками» лежит в диапазоне  $(1 \div 1,5)d$ . Далее такой шар именуется как шар с отношением диаметров  $d/D = 0,075$  или тип 2.

Шар (рисунок 2в) выполнен также в виде правильной сферы диаметром  $D$ , на которой выполнены «луники» в количестве  $1,975D$  (в мм) в виде полусфер, расстояние между которыми  $(0,3 \div 0,7)d$ , а глубина «лунок» равна  $0,0875D$  [11]. Этот шар в дальнейшем будет называться: шар с отношением диаметров  $d/D = 0,225$ , тип 3.

Центры тяжести этих шаров находятся в геометрическом центре без смещения.

В процессе изучения гидродинамики возникло предположение, что элемент насадки со смещенным центром тяжести будет работать иначе. Предположительно, он будет иметь меньшее гидравлическое сопротивление за счет больших «лунок». У этой насадки поверхность массообмена больше.

Такой элемент насадки представлен на рисунке 3.

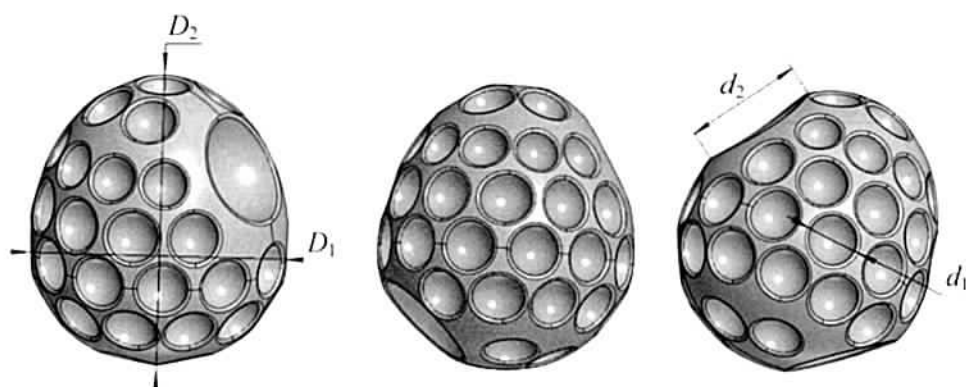


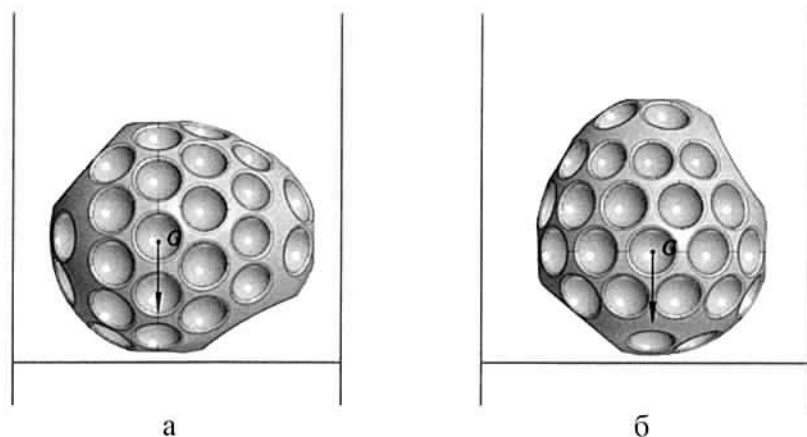
Рисунок 3 – Элемент насадки со смещенным центром тяжести

Данный элемент насадки изготовлен в виде овоидной формы. Соотношения диаметров  $D_1$  к  $D_2$  составляют  $1:1,125$ . Под углами  $45^\circ$  по обе стороны насадки расположены большие «луники», глубина которых  $0,225D_1$ . Меньшие «луники» – в количестве  $1,275D_1$  (в мм), и глубиной  $0,0875D_1$ . В дальнейшем этот элемент насадки будет именоваться как тип 4.

Все эти элементы насадок изготовлены из полимерной нити и распечатаны на 3D принтере. Плотности каждого из них составляют  $400 \text{ кг/м}^3$ , а также все они имеют одинаковую массу.

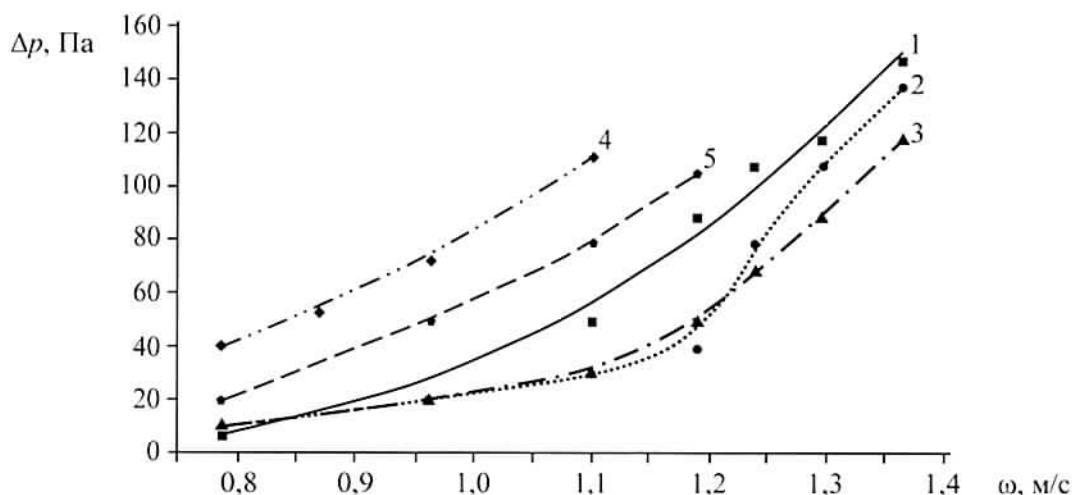
Отношение диаметра трубы колонны к диаметру шара составляет  $D_K/D = 1,125$ . Это обусловлено тем, что элементы насадки совершают хаотичные и пульсационные движения и находятся во время работы во взвешенном состоянии [12]. Поэтому можно предположить, что расстояние между соседними элементами насадки незначительное. Это способствует тому, что данное экспериментальное исследование приближено к установке, используемой на предприятиях.

Экспериментальное исследование насадки со смещенным центром тяжести проводилось в двух начальных положениях: горизонтальном (рисунок 4а) и вертикальном (рисунок 4б).



а – горизонтальное положение; б – вертикальное положение  
Рисунок 4 – Начальное положение насадки

В ходе исследования скорость газа в трубе  $\omega$  изменялась в пределах от 0,8 м/с до 1,35 м/с, а плотность орошения жидкостью составляла  $U = 0,0087 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . По результатам исследования были построены графики зависимости гидравлического сопротивления  $\Delta p$  насадки от скорости газа в колонне  $\omega$  (рисунок 5).



1 – гладкий шар, тип 1; 2 – шар с отношением диаметров  $d/D = 0,075$ , тип 2;  
3 – шар с отношением диаметров  $d/D = 0,225$ , тип 3; 4 – насадка со смещенным центром тяжести (тип 4), расположенная горизонтально;

5 – насадка со смещенным центром тяжести (тип 4), расположенная вертикально

Рисунок 5 – Зависимость гидравлического сопротивления  $\Delta p$  элемента насадки от скорости газа в колонне  $\omega$

Из графика видно, что с увеличением скорости газа гидравлическое сопротивление возрастает согласно следующим уравнениям регрессии, которые были получены методом наименьших квадратов [13]:

– для гладкого шара, тип 1:

$$\Delta p = 363,91 \cdot \omega^2 - 534,15 \cdot \omega + 201,97; \quad (1)$$

– для шара с отношением диаметров  $d/D = 0,075$ , тип 2:

$$\Delta p = 614,19 \cdot \omega^2 - 1108,6 \cdot \omega + 505,94; \quad (2)$$

– для шара с отношением диаметров  $d/D = 0,225$ , тип 3:

$$\Delta p = 438,62 \cdot \omega^2 - 764,71 \cdot \omega + 342,35; \quad (3)$$

– для шара со смещенным центром тяжести (тип 4) в горизонтальном начальном положении (4) и вертикальном (5):

$$\Delta p = 114,84 \cdot \omega^2 - 31,227 \cdot \omega + 26,948; \quad (4)$$

$$\Delta p = 148,92 \cdot \omega^2 - 69,934 \cdot \omega + 1,008. \quad (5)$$

После построения графиков была рассчитана величина достоверности аппроксимации  $R^2$ , которая составляла более 0,96 для каждого из экспериментов.

В экспериментальном исследовании с насадкой со смещенным центром тяжести отрыв самой насадки происходил гораздо раньше, чем с насадками в виде правильной сферы. Столь ранний отрыв насадки может быть обусловлен «лунками», диаметр которых  $d_2$ , т.к. элемент насадки находится во взвешенном состоянии, и при попадании газовой фазы в эту «лунку» создается подъемная сила, достаточная, чтобы этот элемент унесло газовым потоком.

Наибольшее гидравлическое сопротивление из насадок в виде правильных сфер замечено в насадке типа 1. С другими насадками шарообразной формы (типа 2 и типа 3) гидравлическое сопротивление меньше. Форма «лунок» не влияет на гидравлическое сопротивление до скорости газа в трубе 1,1 м/с. В пределах скорости 1,1 – 1,25 м/с начинается незначительное расхождение экспериментальных линий. При скорости газа свыше 1,25 м/с линии начинают значительно расходиться. В шаре типа 2 наблюдается резкий скачок гидравлического сопротивления. А наименьшее гидравлическое сопротивление достигается в шаре типа 3.

Следует отметить, что форма и количество «лунок» влияют на гидравлическое сопротивление. В данном эксперименте шар с отношением диаметров  $d/D = 0,075$  создает большее гидравлическое сопротивление. Это обусловлено тем, что при подаче жидкой фазы на насадку вода может заполнять собой множество «лунок» небольшого размера, что было наглядно замечено в ходе исследования. Такой шар, как бы сглаживается, но по сравнению с гладким – его геометрическая поверхность больше, а поверхность массообмена отличается незначительно.

### **Заключение**

Газовый поток, который проходит через элемент насадки, испытывает гидравлическое сопротивление. Разность давлений до и после этого элемента должна быть равна гидравлическому сопротивлению, которое возникает в процессе прохождения через насадку. Как известно, гидравлическое сопротивление зависит от геометрических характеристик, гидродинамического режима работы аппарата, а также от формы, количества насадок. Также влияние оказывают скорость газа и плотность орошения.

Наибольшее гидравлическое сопротивление было замечено при использовании насадки со смещенным центром тяжести, наименьшее – шара, с отношением диаметров  $d/D = 0,225$ . При использовании этого шара геометрическая поверхность больше, что должно оказывать положительное влияние на эффективность массообмена.

### **Список использованных источников**

1. Врагов А.П. Массообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв: навч. посібник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. – 284 с.

2. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. – Л.: Химия, 1972. – 248 с.
3. Коуль А.Л., Ризенфельд Ф.С. Очистка газов. Пер. с англ. И.И. Абрамсона и Л.М. Черняка; под общ. ред. И.И. Абрамсона. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 396 с.
4. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбера с подвижной шаровой насадкой // Труды БГТУ. Сер. 2. Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2 (259). – С. 107-114.
5. Kohl A.L., Neilsen R.B. Gas purification. – 5th ed. – Texas: Gulf Publishing Company, 1997. – 1395 p.
6. Левш И.П., Убайдуллаев А.К. Тарельчатые абсорберы и скрубберы с псевдоожиженным (подвижным) слоем орошаемой насадки. – Ташкент: Узбекистан, 1981. – 236 с.
7. Billet R. Packed Towers in Processing and Environmental Technology. Translated by Fullarton J.W. – Weinheim: VCH, 1995. – 382 p.
8. Заминян А.А., Рамм В.М. Абсорберы с подвижной насадкой. – М.: Химия, 1980. – 184 с.
9. Калишук Д.Г., Саевич Н.П., Вилькоцкий А.И. и др. Процессы и аппараты химической технологии. Расчет и проектирование массообменных аппаратов: учеб. пособие для студентов учреждений высшего образования по химико-технологическим специальностям. – Минск: БГТУ, 2014. – 498 с.
10. Ланкин Р.И., Францкевич В.С., Нурмухамедов Х.С. Исследование формы элемента насадки на гидродинамику в массообменном аппарате с подвижной насадкой // Нефтегазохимия-2023: материалы VI Междунар. науч.-технич. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке / Минск (1 – 3 ноября 2023 г.). – Минск: БГТУ, 2023. – С. 199-203.
11. ВУ 20230256 (заявка) Насадка для массообменных процессов. 12.12.2023.
12. Балабеков О.С., Волненко А.А. Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой: монография. – Шимкент: GOLDDYES, 2015. – 184 с.
13. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – Л.: Физматгиз, 1962. – 352 с.

#### Информация об авторах

#### Information about the authors

*Роман Игоревич Ланкин* – аспирант кафедры «Машин и аппаратов химических и силикатных производств», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: roman147l@icloud.com.

*Roman Igorevich Lankin* – Postgraduate Student of the Department “Machines and Apparatuses of Chemical and Silicate Production”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: roman147l@icloud.com.

*Виталий Станиславович Францкевич* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических и силикатных производств», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: fvs2@tut.by.

*Vitali Stanislavovich Frantskevich* – Ph. D. (Engineering), Head of the Department “Machines and Apparatuses of Chemical and Silicate Production”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: fvs2@tut.by.

Поступила в редакцию 07.02.2024 г.