

# ХИМИЧЕСКОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ  
ИЗДАЕТСЯ С ИЮЛЯ 1932 ГОДА



7/2021

ИЮЛЬ

## СОДЕРЖАНИЕ

Журнал издается при поддержке:  
РОССИЙСКОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ  
ОАО «ГАЗПРОМ»  
МОСКОВСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

Редакционная коллегия:

Главный редактор  
Б.В. ГУСЕВ

Ответственный секретарь  
Г.П. ЗУЕВА

А.М. АРХАРОВ	Е.Д. РОГОВОЙ
Б.В. БУДУЛЯК	А.В. РОМАНИХИН
М.Б. ГЕНЕРАЛОВ	А.И. СМОРОДИН
В.М. ДЕМИН	И.Я. СУХОМЛИНОВ
В.Я. КЕРШЕНБАУМ	Е.А. УРЬВАЕВА
В.М. ЛУКЬЯНЕНКО	И.Г. ХИСАМЕЕВ
С.Б. НЕСТЕРОВ	В. ХРЗ

Издатель журнала:  
ООО «РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА «ХНГМ»

Подписка на журнал  
«Химическое и нефтегазовое машиностроение» —  
через редакцию журнала

Адрес редакции:  
105118, Москва,  
Проспект Буденного, 30/8, кв. 219  
(для редакции журнала)  
Тел. 8 (915) 339-37-61  
E-mail: himnef@mospolytech.ru  
http://www.himnef.ru

Верстка и дизайн: ИП ЯЛАНСКИЙ В.В.

Сдано в набор 15.06.2021 г. Подписано  
в печать 15.07.2021 г. Формат 62×94/8.  
Печать цифровая. Бумага мелованная.  
Печ. л. 6. Заказ 345/21.

Отпечатано в ООО «Клуб Принт»  
127018, Москва, 3-й пр-д Марьиной роши, д. 40, к. 1

Перепечатка публикуемых материалов возможна  
только с письменного разрешения редакции

Английская версия журнала  
«Химическое и нефтегазовое машиностроение»  
издается под названием  
Chemical and Petroleum Engineering  
и распространяется издательством Springer  
http://www.springeronline.com

### ИССЛЕДОВАНИЯ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. РАСЧЕТЫ. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ



#### ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

- Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Мадьшев И.Н., Дмитриева О.С.** Влияние конструктивных параметров классификатора с соосно расположенными трубами на эффективность фракционирования мелкодисперсного сыпучего материала . . . . . 3
- Гирба Е.А., Кораблева О.Н.** Определение коэффициента инжекции жидкогазовых инжекционных аппаратов . . . . . 7
- Печенегов Ю.Я., Олискевич В.В., Царюнов А.В.** Энергоэффективная паровая атмосферная сушилка с термокомпрессором для обезвоживания осадочного ила сточных вод . . . . . 10
- Леонтьев В.К., Кораблева О.Н.** Экспериментальное определение энергии аэрирования и газосодержания среды в газожидкостных эжекционных аппаратах . . . . . 14

#### КРИОГЕННАЯ ТЕХНИКА. ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ. ВАКУМНАЯ ТЕХНИКА

- Горбачев С.П., Семенов В.Ю., Клебеев Т.И.** Технологические схемы криогенных двухоболочечных резервуаров для СПГ . . . . . 16
- Угольникова М.А., Чернявская В.В.** Исследование динамики образования водного льда при работе емкостных криоконцентраторов . . . . . 20

#### КОМПРЕССОРЫ. НАСОСЫ. ТРУБОПРОВОДНАЯ АРМАТУРА

- Щерба В.Е., Шалай В.В., Григорьев А.В., Павлюченко Е.А., Овсянников А.Ю.** Обобщенный подход к оценке энергетической эффективности охлаждения компрессоров объемного действия. . . . . 23
- Юша В.Л., Бусаров С.С.** Особенности реализации многоступенчатого сжатия в воздушных компрессорных агрегатах на базе тихоходных длинноходовых ступеней . . . . . 27

#### ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ



- Гуданов И.С., Лебедев А.Е., Ватагин А.А., Долгин Д.С.** Обеспечение равномерного распределения газового потока в активном сечении электрофильтра ЭГАВ1-22-15-7-4 . . . . . 31

#### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ



- Нестеров Н.В., Воронцов Б.С.** Изготовление бронзово-стальных биметаллических изделий литьем по газифицируемым моделям. . . . . 34
- Родионов Ю.В., Никитин Д.В., Воронин Н.В., Филатов И.С.** Исследование магнитотермического поверхностного армирования полимерных материалов . . . 37

#### ИНФОРМАЦИЯ



- Хабарова Д.Ф., Лазарев И.И., Битюцких К.В.** Модель рабочего процесса пеносмесителя пожарного диафрагменного типа и методика расчета диаметров диафрагм . . . . . 40
- Микулёнок И.О.** Классификация устройств для распределения и перераспределения жидкости в массообменных колоннах с неподвижной насадкой (обзор конструкций) . . . . . 44
- Памяти Ильяса Фаритовича Султанова (12.11.1956 г. — 20.05.2021 г.) . . 3-я стр. обложки



## CONTENTS

### RESEARCH. DESIGN CALCULATIONS. OPERATING EXPERIENCE



#### PROCESSES AND EQUIPMENT OF CHEMICAL, OIL AND GAS TECHNOLOGIES

- Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Dmitrieva O.S.* Effect of the design parameters of the classifier with coaxial pipes on the efficiency of fractionation of fine powder material . . . . . 3
- Girba E.A., Korableva O.N.* Determination of the injection ratio of liquid-gas injection machines . . . . . 7
- Pechenegov Yu.Ya., Olishevich V.V., Tsaryunov A.V.* Energy efficient steam atmospheric dryer with thermal compressor for sewage sludge dewatering . . . . . 10
- Leontiev V.K., Korableva O.N.* Experimental determination of the aeration energy and gas content of the medium in the gas-liquid ejection apparatus . . . . . 14

#### CRYOGENIC TECHNOLOGY. PRODUCTION AND APPLICATION OF INDUSTRIAL GASES. VACUUM TECHNOLOGY

- Gorbachev S.P., Semenov V.Yu., Klebleev T.I.* Flow schemes of double-walled cryogenic LNG storage tanks . . . . . 16
- Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V.* Study of the dynamics of water ice formation during the operation of capacitive cryoconcentrators . . . . . 20

#### COMPRESSORS. PUMPS. PIPELINE FITTINGS

- Shcherba V.E., Shalai V.V., Grigoriev A.V., Pavlyuchenko E.A., Ovsyannikov A.Yu.* Generalized approach to evaluating the energy efficiency of volumetric compressor cooling . . . . . 23
- Yusha V.L., Busarov S.S.* Features of the implementation of multistage compression in air compressor units based on low-speed long-stroke stages . . . . . 27

### INDUSTRIAL ECOLOGY



- Gudanov I.S., Lebedev A.E., Vatagin A.A., Dolgin D.S.* Ensuring the uniform distribution of the gas flow in the active section of EGAVI-22-15-7-4 electrostatic precipitators . . . . . 31

### PRODUCTION TECHNOLOGY



- Nesterov N.V., Vorontsov B.S.* Production of bronze-steel bimetallic parts by means of lost-foam casting process . . . . . 34
- Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Voronin N.V., Filatov I.S.* Study of magneto-thermal surface reinforcement of polymeric materials . . . . . 37

### INFORMATION



- Khabarova D.F., Lazarev I.I., Bityutskikh K.V.* Model of the operating process of a bladder tank diaphragm foam mixer and a method for calculating the two diaphragm diameters . . . . . 40
- Mikulionok I.O.* Classification of devices for distribution and redistribution of liquid in mass-exchanged columns with a motionless packing (*review of designs*) . . . . . 44
- In memory of Ilyas Faritovich Sultanov** (12.11.1956—20.05.2021) . . . . . 3rd page of the cover

\* The English version of the journal «Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie» is published under the title «Chemical and Petroleum Engineering» and is distributed by Springer <http://www.springeronline.com>



УДК 66.01

*В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, д-р техн. наук  
(Казанский государственный энергетический университет, Россия);  
И.Н. Мадышев, О.С. Дмитриева, кандидаты техн. наук  
(Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия)  
E-mail: ieremiada@gmail.com*

### Влияние конструктивных параметров классификатора с соосно расположенными трубами на эффективность фракционирования мелкодисперсного сыпучего материала\*

Для классификации сыпучего материала на фракции (что необходимо при производстве порошковой продукции [1–4]) применяются специализированные аппараты — воздушные классификаторы, основной функцией которых является быстрое и энергоэффективное фракционирование большого объема смешанного сыпучего материала.

Особенно актуальна классификация мелкодисперсных частиц (размером до 40 мкм), например, при производстве катализаторов и адсорбентов — сыпучих порошков на основе силикагеля. Такие продукты применяются, в частности, в адсорберах для осушки и отбензинивания природного газа перед транспортировкой. На первом этапе производства силикагель измельчается в мельнице, однако после помола полученные частицы существенно различаются по размерам. На следующих этапах производится классификация мелкодисперсных частиц размером до 40 мкм (граница разделения может варьироваться в зависимости от технического задания [5–8]). При этом селективность традиционных воздушных аппаратов при фракционировании мелкодисперсного

сыпучего порошка на основе силикагеля является низкой.

Воздушные центробежные классификаторы предназначены для разделения порошкообразных материалов с диапазоном регулирования граничной крупности от 40 до 200 мкм. Процесс сепарации частиц из газового потока по крупности и плотности осуществляется за счет действия на завихренный газовый поток центробежных сил.

По способу организации завихренной структуры потока центробежные классификаторы подразделяются на динамические (вихревое движение создается механически вращающимся ротором, при этом эффективность классификации составляет 85...90 % и более) и статические (вихревая структура создается направляющими лопатками, при этом обеспечивается разделение сыпучего материала с размером частиц 60...500 мкм с эффективностью более 80 %).

Достоинствами динамических классификаторов (по сравнению со статическими) являются более высокая эффективность и более низкая граница диапазона регулирования крупности частиц. Однако в связи с более сложной конструкцией (с подвижными элементами)

у динамических классификаторов — более высокое гидравлическое сопротивление, чем у статических классификаторов. При применении воздушного способа разделения материала (по крупности или плотности) необходимо соблюдение условия низкой абсолютной влажности материала — до 1...2 %. При более высокой влажности зерна материала слипаются и их разделение невозможно.

В настоящее время проблемой разделения мелкодисперсных сыпучих материалов занимаются многие специалисты. Например, в работе [9] (на основе классического классификатора с верхними патрубками) предложен новый классификатор с двумя входными патрубками (в середине корпуса), в котором обеспечивается вихревая структура потоков с двумя вихрями. Это позволяет снизить унос мелкодисперсных частиц в крупную фракцию, что было существенным недостатком классического классификатора.

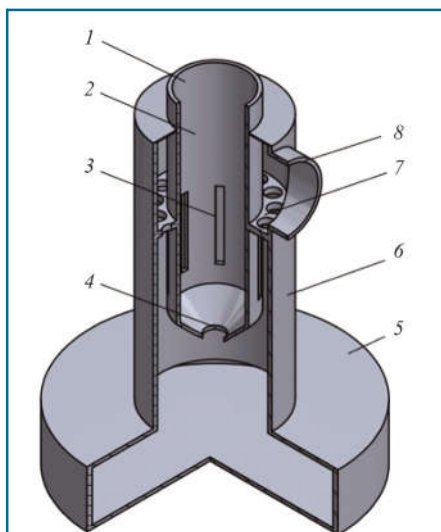
В работе [10] предложена конструкция гидровихревого классификатора для разделения на фракции (с заданной дисперсией) микрочастиц номинальным диаметром от 0,5 до 5 мкм. Установлено,

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-2710.2021.4.

что эффективность гидровихревой классификации зависит от определяющего фактора — медианного диаметра частиц; геометрические параметры классификатора определяются требуемой производительностью и энергетическими характеристиками классификатора.

Авторами данной статьи разработан классификатор с соосно расположенными трубами (рис. 1) для фракционирования мелкодисперсного сыпучего материала на основе силикагеля.

Конструкция классификатора — две (одна в другой) цилиндрические трубы разных диаметров. При этом в трубах выполнены входное 1 и выходное 8 отверстия, прямоугольные щели 3, конусообразное отверстие 4. В конструкции предусмотрены бункер 5 и решетка с круглыми отверстиями 7. Для прочности конструкции внутренняя цилиндрическая труба приваривается к внешней трубе в верхней части (в области входного отверстия) и к решетке



**Рис. 1. Трехмерная модель классификатора с соосно расположенными трубами (вид с разрезом):**

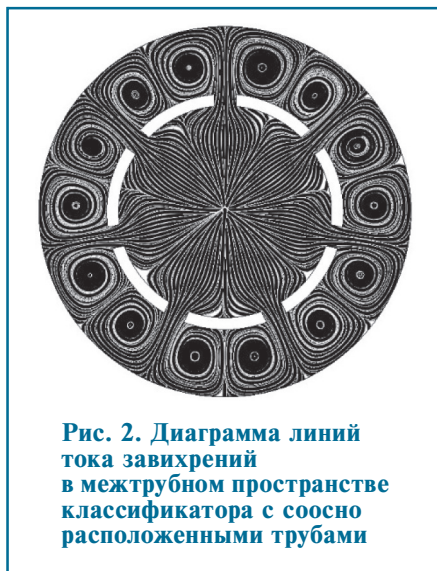
- 1 — входное отверстие;
- 2 — внутренняя цилиндрическая труба;
- 3 — прямоугольные щели;
- 4 — конусообразное отверстие внутренней цилиндрической трубы;
- 5 — бункер;
- 6 — внешняя цилиндрическая труба классификатора;
- 7 — решетка с круглыми отверстиями;
- 8 — выходное отверстие

с круглыми отверстиями 7, а решетка приваривается к внутренней поверхности внешней трубы.

Основой фракционирования мелкодисперсного порошка (на основе силикагеля) в разработанном классификаторе с соосными трубами является образование в межтрубном пространстве завихрений с высокими значениями центробежных сил, что позволяет сепарировать мелкодисперсные частицы из потока газа [11, 12].

*Принцип работы классификатора:* газовый поток с диспергированными мелкодисперсными частицами поступает в устройство через отверстие 1, опускается вниз по трубе 2 до уровня, на котором расположены прямоугольные щели 3, и равномерно распределяется в осесимметричном направлении в сторону щелей, при этом центральная часть потока опускается ниже — к конусообразному отверстию внутренней трубы 4. При движении газового потока в области трубы 4 и при повороте газа в сторону щелей 3 наиболее крупные частицы за счет инерционных сил удаляются из потока и поступают в бункер 5 через отверстие 4 (см. рис. 1).

При прохождении каждой из щелей 3 поток газа делится на две части, направленные в противоположные стороны, с образованием завихрения (рис. 2), при этом число завихрений в 2 раза больше числа прямоугольных щелей 3.



**Рис. 2. Диаграмма линий тока завихрений в межтрубном пространстве классификатора с соосно расположенными трубами**

При вращении газа возникают центробежные силы высоких значений, так как радиусы завихрений достаточно малы. Под действием центробежных сил мелкодисперсные частицы удаляются из структуры потока и отбрасываются в «мертвые зоны», образующиеся между двумя соседними завихрениями в пограничном слое внутренней поверхности трубы 6.

У каждого завихрения при вращении имеется область контакта с соседними завихрениями, при этом векторы скоростей газового потока в данных областях — сонаправлены. Таким образом, при взаимном ускорении соседних завихрений обеспечивается увеличение сепарационной эффективности классификатора вследствие увеличения центробежных сил. Далее газовый поток с частицами (размер которых не соответствует диапазону размеров сепарируемых частиц) проходит через решетку 7 и выходит через отверстие 8. Круглые отверстия в решетке 7 выполнены в местах, по высоте которых движутся завихрения.

Изменение границы разделения сыпучего мелкодисперсного порошка в классификаторе обеспечивается варьированием конструктивных параметров классификатора. Поэтому целью данной работы является исследование эффективности фракционирования мелкодисперсного сыпучего порошка в зависимости от конструктивных параметров классификатора с соосно расположенными трубами.

Исследования проведены путем численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent на основе метода конечных элементов — сеточного метода. Численное моделирование течения газового потока произведено путем решения уравнения Навье — Стокса:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (1)$$

где  $\nabla$  — оператор набла;  $\Delta$  — векторный оператор Лапласа;  $t$  — время, с;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho$  — плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $p$  — давление, Па;  $\vec{v}$  — векторное поле скорости;  $\vec{f}$  — векторное поле массовых сил.

Уравнение Навье — Стокса дополнено уравнением неразрывности потока:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (2)$$

Использована модель турбулентности Transition SST.

Построение трехмерной геометрии классификатора с соосно расположенными трубами проведено в программном комплексе Autodesk Inventor с последующим экспортом в программу ANSYS Fluent.

Основные геометрические размеры классификатора: диаметры входного и выходного отверстий — 60 мм; диаметр внешнего цилиндрического корпуса — 100 мм; высота классификатора — 290 мм; высота и ширина прямоугольный щелей — 60 × 6 мм; диаметр отверстий решетки — 12 мм; глубина и диаметр бункера — 50 × 210 мм.

При численном моделировании заданы следующие параметры: входная скорость газового потока 5 м/с; давление окружающей среды на выходном отверстии 101 325 Па; температура газа 20 °С. Мелкодисперсный сыпучий материал — силикагель плотностью 1075 кг/м<sup>3</sup>. Размер мелкодисперсных частиц силикагеля варьировался в диапазоне 1...10 мкм. На всех твердых поверхностях внутри модели классификатора задано условие отскокивания частиц. Для получения выборки данных, характеризующих влияние конструктивных параметров классификатора на эффективность фракционирования силикагеля, произведено масштабирование конструкции (1:1, 1:2, 2:1, 1:4), варьировались высота прямоугольной щели  $h = 10...30$  мм и ширина щели  $h_s = 3...10$  мм.

Оценка эффективности классификатора с соосно расположенными трубами произведена по формуле:

$$E = n_{\text{trapped}} / n_{\text{in}}, \quad (3)$$

где  $n_{\text{trapped}}$  — число мелкодисперсных частиц силикагеля в бункере классификатора после прохождения запыленного газа через классификатор;  $n_{\text{in}}$  — число мелкодис-

персных частиц силикагеля, диспергированных в газовом потоке, поступающем в классификатор.

Потери давления в классификаторе с соосно расположенными трубами оценены по выражению:

$$\Delta p = p_1 - p_8, \quad (4)$$

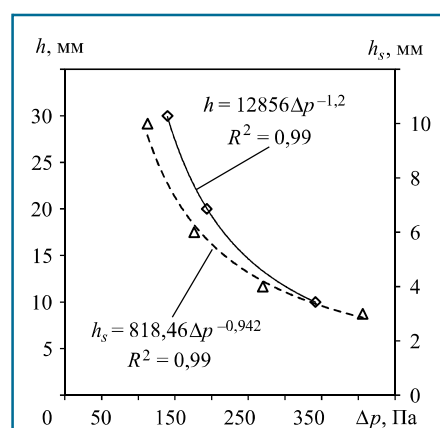
где  $p_1, p_8$  — значения давления на входном и выходном отверстиях классификатора, Па.

В ходе исследований установлено: внутри классификатора с соосно расположенными трубами возникает структурированный вихревой поток, что позволяет сепарировать из газа частицы определенного диапазона размеров (в зависимости от конструктивных параметров устройства) с эффективностью 65...75 %. При пропорциональном уменьшении размеров всех элементов классификатора граница разделения сыпучего материала перемещалась в меньшие диапазоны размеров. При уменьшении высоты прямоугольной щели  $h$  (от 30 до 10 мм) и ширины прямоугольной щели  $h_s$  (от 10 до 3 мм) потери давления в классификаторе увеличивались от 110 до 405 Па (рис. 3), что связано с уменьшением

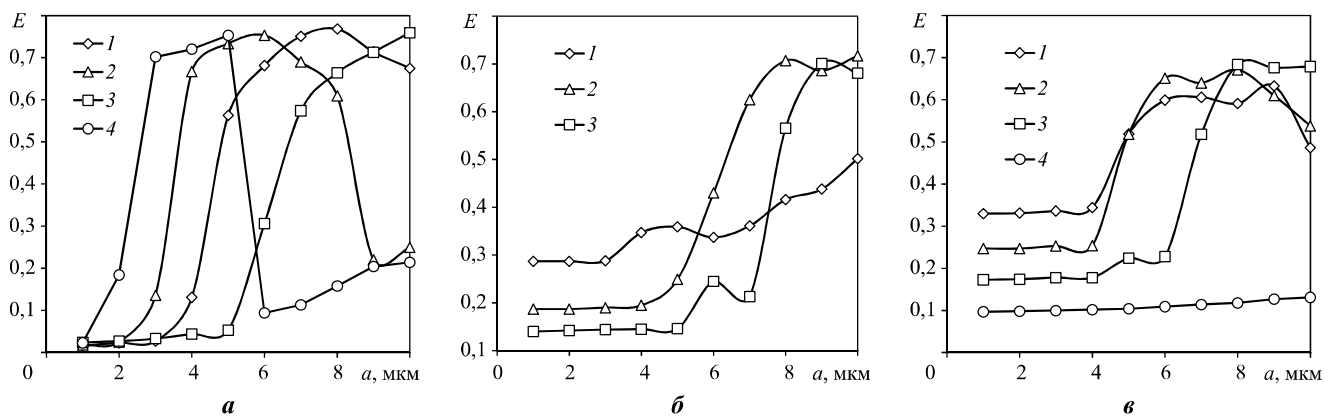
площади проходных сечений щелей, выполненных во внутренней цилиндрической трубе, и соответствующим увеличением гидравлического сопротивления.

Эффективность классификатора с соосно расположенными трубами при масштабе конструкции 1:1, 1:2, 2:1, 1:4 составила 65...75 % при улавливании частиц размерами 6...8, 4...6, 8...10, 3...5 мкм соответственно. При улавливании частиц, размеры которых не входят в установленные диапазоны размеров, эффективность классификатора составляет не более 25 %. Предположительно это связано с тем, что частицы, входящие по размерам в указанные диапазоны (при различных масштабах конструкции), отбрасываются в «мертвые зоны», где центробежные силы не оказывают действия на частицы, которые постепенно оседают в бункер классификатора. Очевидно, что частицы большего размера «выбиваются» из газового потока с большей эффективностью. Однако, если размеры частиц — больше установленного диапазона размеров, то эффективность улавливания частиц в классификаторе с соосно расположенными трубами снижается на 40...50 %, так как при этом частицы «отскакивают» от внутренних стенок внешнего цилиндрического корпуса классификатора обратно в поток. Для частиц, размеры которых меньше установленного диапазона размеров, низкая эффективность классификатора обусловлена недостаточными значениями центробежных сил в межтрубном пространстве для удаления частиц из структурированного завихренного потока (рис. 4, а).

Увеличение высоты прямоугольных щелей при неизменных остальных конструктивных параметрах классификатора приводит к снижению эффективности сепарации мелкодисперсных частиц размером до 5 мкм. При высоте прямоугольной щели 10, 20, 30 мм эффективность улавливания частиц до 5 мкм составила в среднем 31,4; 20,2; 14,3 %. При этом эффективность улавливания мелкодисперсных частиц некоторого диапазона размеров была неизменной — 28,7 % (для частиц



**Рис. 3. Зависимости потерь давления  $\Delta p$  в классификаторе с соосно расположенными трубами от высоты прямоугольной щели  $h$  (сплошная линия) и ширины прямоугольной щели  $h_s$  (пунктирная линия). Входная скорость газового потока 5 м/с. Масштаб конструкции 1:1**



**Рис. 4. Зависимости эффективности  $E$  улавливания мелкодисперсных частиц в классификаторе с соосно расположенными трубами от размера частиц  $a$ :**

$a$  — при различных масштабах конструкции классификатора: 1 — 1:1; 2 — 1:2; 3 — 2:1; 4 — 1:4;  
 $б$  — при различных значениях высоты прямоугольной щели  $h$  (масштаб конструкции 1:1):  
 1 — 10 мм; 2 — 20 мм; 3 — 30 мм;  
 $в$  — при различных значениях ширины прямоугольной щели  $h_s$  (масштаб конструкции 1:1):  
 1 — 3 мм; 2 — 4 мм; 3 — 6 мм; 4 — 10 мм

размером 1...3 мкм); 18,9 % (для частиц размером 1...4 мкм); 14,3 % (для частиц размером 1...5 мкм) при высоте прямоугольной щели 10, 20, 30 мм соответственно. При размере мелкодисперсных частиц более 6 мкм эффективность классификатора значительно выше — 41,1; 63,3; 48,2 % при высоте прямоугольной щели 10, 20, 30 мм соответственно (см. рис. 4, б).

Таким образом, при увеличении высоты прямоугольных щелей классификатора снижается эффективность сепарации в классификаторе вследствие изменения значений центробежных сил в межтрубном пространстве (см. рис. 4, б).

При увеличении ширины прямоугольных щелей (при неизменных остальных конструктивных размерах классификатора) снижается эффективность улавливания мелкодисперсных частиц определенных диапазонов размеров (см. рис. 4, в).

При ширине прямоугольной щели 3, 4, 6, 10 мм эффективность классификатора составляет соответственно 33,5 % (для частиц размером 1...4 мкм), 25,1 % (для частиц размером 1...4 мкм), 19,2 % (для частиц размером 1...6 мкм), 11,1 % (для частиц размером 1...10 мкм). Для частиц из исследуемого интервала размеров 1...10 мкм, диаметры которых не входят в указанные диапазоны, эффективность составляет

более 50 %, а именно: 60,7 % (для частиц размером 6...9 мкм); 65,4 % (для частиц размером 6...8 мкм); 67,9 % (для частиц размером 8...10 мкм) при ширине прямоугольной щели 3, 4, 6 мм соответственно. Приближенный диапазон погрешностей рассчитанных значений эффективности 3...6 %. При ширине прямоугольной щели 10 мм получены наилучшие результаты — разделение сыпучего материала в классификаторе осуществляется практически с неизменной эффективностью при размерах частиц в диапазоне от 1 до 10 мкм (см. рис. 4, в).

Таким образом, проведенными исследованиями установлено: при создании упорядоченной вихревой структуры в межтрубном пространстве классификатора с соосно расположенными трубами обеспечивается фракционирование мелкодисперсных частиц сыпучего материала с высокой эффективностью. При различных конструктивных параметрах устройства установлены диапазоны размеров частиц, при которых эффективность классификатора практически не изменяется, что позволяет производить фракционирование частиц с достаточно большой точностью и с минимальными энергозатратами (в связи с низкими потерями давления в классификаторе).

## Выводы

Разработана новая конструкция классификатора с соосно расположенными трубами для разделения мелкодисперсных сыпучих материалов. Эффективность классификатора при выполнении конструкции в масштабе 1:1, 1:2, 2:1, 1:4 составляет 65...75 % при улавливании частиц размерами 6...8; 4...6; 8...10; 3...5 мкм соответственно.

При пропорциональном уменьшении всех размеров элементов классификатора границы разделения сыпучего материала перемещаются в меньшие диапазоны размеров частиц.

При увеличении высоты и ширины прямоугольных щелей, выполненных во внутренней трубе классификатора, снижается сепарационная эффективность классификатора с соосно расположенными трубами.

При ширине прямоугольной щели 10 мм разделение сыпучего материала в классификаторе осуществляется практически с неизменной эффективностью в диапазоне размеров частиц 1...10 мкм.

Потери давления в классификаторе с соосно расположенными трубами составляют 110...405 Па в зависимости от высоты и ширины прямоугольных щелей.

Основные достоинства разработанного классификатора с соосно расположенными трубами — высокая эффективность фракционирования мелкодисперсных частиц сыпучего материала в устройстве (при рационально подобранных конструктивных размерах), низкое гидравлическое сопротивление, простота конструкции (без движущихся механизмов).

#### Список литературы

1. Sun Z., Sun G., Peng P. et al. A new static cyclonic classifier: Flow characteristics, performance evaluation and industrial applications // Chem. Eng. Res. 2019. V. 145. P. 141—149. 2. Wu S., Liu J., Yu Y. Design of a new double layer spreading plate for a turbo air classifier // Powder Technol. 2017. V. 312. P. 277—286. 3. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Ruzanova M.A., Dmitrieva O.S.

Classification of bulk material from the gas flow in a device with coaxially arranged pipes // MATEC Web Conf. 2020. V. 193. P. 01056. 4. Koeninger B., Spoetter C., Romeis S. et al. Classifier performance during dynamic fine grinding in fluidized bed opposed jet mills // Adv. Powder Technol. 2019. V. 30. № 8. P. 1678—1686. 5. Galk J., Peukert W., Krahenen J. Industrial classification in a new impeller wheel classifier // Powder Technol. 1999. V. 105. P. 186—189. 6. Leschonski K. Classification of particles in the sub-micron range in an impeller wheel air classifier // KONA Powder and Particle Journal. 1996. V. 14. P. 52—60. 7. Nied R. Fine classification with vaned rotors: at the outer edge of the vanes or in the interior vane free area // Int. J. Miner. Process. 2004. V. 74. P. S137—S145. 8. Karunakumari L., Eswaraiah C., Jayanti S., Narayanan S.S. Experimental and numerical study of a rotating

wheel air classifier // AIChE Journal. 2005. V. 51. P. 776—790. 9. Sun Z., Liu Q., Yu X. Experimental and CFD study on a cyclonic classifier with new flow pattern // Advanced Powder Technology. 2019. V. 30. P. 2276—2284. 10. Kosarev N.P., Makarov V.N., Ugolnikov A.V. et al. Effective method for hydrochemical classification of thin-dispersed technogenic mineral waste in the mining and metallurgical complex // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. 2019. V. 19. № 4. P. 388—400. 11. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Badret-dinova G.R. et al. The gas flow dynamics in a separator with coaxially arranged pipes. MATEC Web Conf. 2020. V. 329. P. 03035. 12. Zinurov V.E., Dubkova N.Z., Popkova O.S., Dmitrieva O.S. Efficiency of different separation elements for removal of fine particles from gas // Journal of Physics: Conference Series, 2020. V. 1745. P. 012090.

УДК 66.023.001.57

Е.А. Гирба, канд. техн. наук, О.Н. Кораблева, канд. хим. наук  
(Ярославский государственный технический университет, Россия) E-mail: girbaea@ystu.ru

## Определение коэффициента инжекции жидкогазовых инжекционных аппаратов

Жидкогазовые инжекционные аппараты (разновидность струйных аппаратов [1]) применяются для нагнетания больших объемов газа за счет энергии подводимой жидкости, а также для создания небольших перепадов давлений газового потока при сравнительно невысоких энергзатратах.

Основные элементы аппарата (рис. 1) — цилиндрический корпус и форсунка для подачи жидкости. Как правило, используются механические центробежноструйные форсунки, с применением которых жидкость, подаваемая насосом под давлением, впрыскивается в аппарат с большой скоростью и дробится на мелкие капли.

Конструкция распределительного элемента (форсунки) влияет не только на форму образующегося газожидкостного потока, но и на степень его турбулизации.

За счет завихрения потока жидкости в центробежноструйной форсунке создаются высокие напряжения сдвига на границе фаз и значительно интенсифицируется процесс

массопереноса в связи с увеличением площади поверхности контакта фаз и скорости ее обновления.

Подаваемая жидкость на выходе форсунки образует капельный конус — факел жидкости, который перекрывает сечение аппарата на некотором расстоянии от форсунки и далее движется внутри цилиндрического корпуса инжекционного аппарата (см. рис. 1). Сечением в месте касания корпуса факел жидкости делится на свободный факел и стесненный факел. Движущимися с большой скоростью каплями жидкости газ инжектируется внутрь аппарата, при этом газу передается часть кинетической энергии капель. Энергия жидкости, передаваемая газу в свободном факеле, расходуется на перемещение газа, в стесненном факеле — на увеличение давления газа. В свободном факеле относительная

