



Оригинальная статья / Original article
УДК 621.86.08
<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-151-158>

ПНЕВОТРАНСПОРТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА

© А.В. Дмитриев¹, В.Э. Зинуров², О.С. Дмитриева³

^{1,2}Казанский государственный энергетический университет,
Российская Федерация, Республика Татарстан, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51.

³Нижекамский химико-технологический институт – филиал ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
Российская Федерация, Республика Татарстан, 423578, г. Нижнекамск, пр. Строителей, 47.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Разработано пневмотранспортное устройство, способное обеспечить непрерывное и равномерное транспортирование присадки в виде обезвоженного карбонатного шлама из емкости в воздухопровод. При проектировании пневмотранспортной установки важной задачей является подбор наиболее оптимальных геометрических размеров элементов установки и ее наиболее рациональных физических параметров: скорости газового потока в линии подачи воздуха, давления на входном и выходном отверстиях, необходимых для эффективной работы пневмотранспортной системы. **МЕТОДЫ.** Исследование было выполнено в гидродинамическом программном модуле SolidWorks Flow Simulation. Численное моделирование осуществлялось решением дифференциальных уравнений движения и неразрывности. Для замыкания системы уравнений использовалась двухпараметрическая $k-\epsilon$ -модель турбулентности. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Представлены результаты компьютерного моделирования и анализа влияния числа выходных отверстий распределительного устройства, являющегося по принципу действия аналогом сопел, на потери давления в пневмотранспортной установке и на эффективность пневмотранспортирования. **ВЫВОДЫ.** Установлено, что для эффективного транспортирования мелкодисперсного материала из емкости, имеющей цилиндрическую форму, необходимо использовать пневмотранспортное устройство с распределительным устройством с четырьмя выходными отверстиями.

Ключевые слова: пневмотранспорт, дозатор, пневмотранспортирование, карбонатный шлам, продукты сгорания.

Формат цитирования: Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С. Пневмотранспортная установка для транспортирования мелкодисперсного материала // Вестник Иркутского государственного университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 151–158. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-151-158

PNEUMATIC CONVEYING INSTALLATION FOR FINELY DIVIDED MATERIAL TRANSPORTATION

A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva

Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russian Federation
Nizhnekamsk Chemical Technological Institute – branch of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technological University»,
47 Stroitelei pr., Nizhnekamsk 423578, Republic of Tatarstan, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. A pneumatic conveying device capable to provide continuous and uniform transportation of the additive in the form of dehydrated carbonaceous slime from the tank into the air duct is developed. When designing a pneumatic conveying installation it is important to choose the most optimum geometrical sizes of the installation elements, the most rational physical parameters including gas flow velocity in the channels of pneumatic conveying installation and pressure at the inlet and outlet openings necessary for efficient operation of the pneumatic conveying system. **METHODS.** The research is conducted in the hydrodynamic program module SolidWorks Flow Simulation. Numerical

¹Дмитриев Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники, e-mail: ieremiada@gmail.com

Andrei V. Dmitriev, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Thermal Engineering, e-mail: ieremiada@gmail.com

²Зинуров Вадим Эдуардович, магистрант, e-mail: vadd_93@mail.ru
Vadim E. Zinurov, Master's Degree student, e-mail: vadd_93@mail.ru

³Дмитриева Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических технологий, e-mail: ja_deva@mail.ru
Oksana S. Dmitrieva, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Chemical Technologies, e-mail: ja_deva@mail.ru



model operation is carried out through the solution of differential equations of motion and continuities. A two-parameter $k-\epsilon$ turbulence model is used for the closure of the set of equations. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The article presents the results of computer simulation and the analysis of the influence of the number of outlet openings of the distributing device (which is a nozzle analog by the operation principle) on pressure losses in the pneumatic conveying installation and on pneumatic conveying efficiency. **CONCLUSIONS.** It has been determined that efficient transportation of finely divided material from the cylindrical tank requires the use of the pneumatic conveying installation with a distributing device having 4 outlet openings.

Keywords: pneumatic conveying device, batcher, pneumatic conveying, carbonaceous slime, combustion products

For citation: Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Pneumatic conveying installation for finely divided material transportation. Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 151–158 (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-151-158

Введение

В процессе производства тепла на ТЭЦ при сжигании мазута происходит выброс вредных веществ в атмосферу. В окружающую среду попадают оксиды серы, азота, углерода, ванадия и др., способствующие ухудшению экологической обстановки в области расположения ТЭЦ и разрушению озонового слоя атмосферы, влекущих увеличение заболеваемости населения. В последние годы актуальность данной проблемы возрастает вследствие изменения цен на рынке энергоресурсов: цены на менее токсичные виды топлива по сравнению с мазутом – нефть и газ – поднимаются, а на сложные по составу и принципу действия виды сырья, в данном случае мазута, – снижаются. По данным биржи СПБМТСБ, в начале 2016 года мазут стоил примерно 2,7 тыс. руб. за тонну, что в 3,7 раза дешевле по сравнению с ценой в середине 2015 года [1]. Такая ценовая политика способствует росту числа предприятий, переоборудованных для использования более дешевого вида топлива – мазута. Складывающаяся ситуация требует введения специальных мер, направленных на борьбу с выбросами вредных веществ в окружающую среду. Одной из таких мер является добавление в камеру сгорания присадки в виде обезвоженного карбонатного шлама, позволяющей связывать серу, содержащуюся в топливе в процессе его сгорания, тем самым уменьшая выбросы оксидов серы в атмосферу до 50%. При проведении физического эксперимента с применением карбонатного шлама также удалось уловить оксид ванадия [2–4].

Основной проблемой использования карбонатного шлама на ТЭЦ является его доставка в камеру сгорания. Как правило, шлам транспортируют по средствам воздуховода, оборудованного специальной воронкой для приема требуемого материала. Данную методику применить полноценно к присадке в виде обезвоженного карбонатного шлама не удалось, так как в силу своих свойств он слипался в воронке. В результате присадка поступала в камеру сгорания неравномерно, что сопровождалось уменьшением эффективности ее действия.

Для транспортирования различных видов мелкодисперсных материалов обычно используют пневмотранспортные устройства разной конструкции. Их разделяют в зависимости от характера работы на всасывающие, нагнетательные или всасывающе-нагнетательные установки. Принцип действия данных установок схож: перемещение сыпучего материала с помощью сжатого или разреженного газа [5–7]. Применительно к нашему случаю пневмотранспортных установок нет, поскольку транспортировку присадки в воздуховод необходимо осуществлять равномерно малыми порциями с массовым расходом 30–200 г/с из емкости в виде бочки объемом 200 л. Существующие же пневмотранспортные установки предназначены для транспортировки больших объемов или же не подходят конструктивно, т.е. выполнение данных условий невозможно. В связи с этим необходима разработка устройства, осуществляющего равномерное транспортирование присадки из емкости в виде боч-

ки в воздуховод или непосредственно в камеру сгорания.

Авторами данной статьи было разработано пневмотранспортное устройство нагнетательного действия (рис. 1). Оно представляет собой крышку, имеющую: входное отверстие 1 диаметром $d_1 = 40$ мм, соединяющее линию подачи воздуха 2 и распределительное устройство 3 с пятью выходными каналами диаметром 18 мм каждый, через которые проходит

нагнетаемый компрессором воздух; и выходное отверстие 4 диаметром $d_4 = 70$ мм. Крышка надевается на емкость с присадкой. Распределительное устройство 3 равномерно опускается на уровень поверхности присадки по мере выдувания частиц из емкости. К выходному отверстию 4 подсоединяется линия подачи материала, через которую выдуваемый порошок из емкости транспортируется в воздуховод.

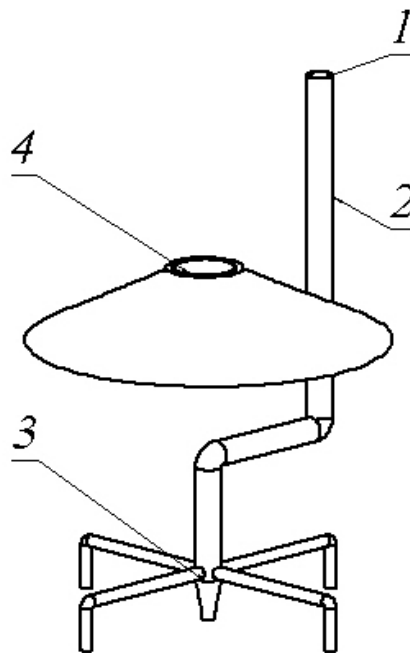


Рис. 1. Разработанное пневмотранспортное устройство нагнетательного действия
Fig. 1. Developed pneumatic conveying device of discharge action

Задачи исследования

При проектировании пневмотранспортной установки важной задачей является подбор наиболее оптимальных геометрических размеров элементов установки и ее наиболее рациональных физических параметров: скорости газового потока в линии подачи воздуха, давлении на входном и выходном отверстиях, необходимых для эффективной работы установки в целом. Существенной проблемой является необходимость гашения центробежной силы, возникающей в емкости при транспортировании из нее присадки вследствие цилиндрической формы емкости. Решением данной проблемы является создание распре-

делительного устройства с несколькими выходными каналами, расположенными осесимметрично относительно центра емкости и позволяющими гасить возникающую центробежную силу. Пример конструктивного исполнения выходных каналов распределительного устройства представлен на рис. 1, имеющего пять выходных каналов, четыре из которых размещены осесимметрично. Также возможно изменение числа осесимметричных выходных каналов у распределительного устройства: уменьшение количества выходных каналов до двух или увеличение до восьми (рис. 2).

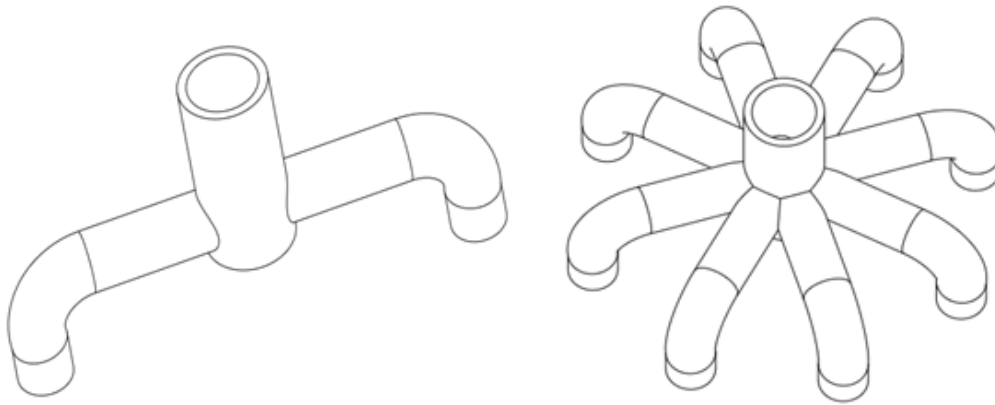


Рис. 2. Распределительные устройства с разным количеством выходных каналов
Fig. 2. Distributing devices with different number of outlet channels

Наибольший интерес вызывает задача по определению количества выходных каналов у распределительного устрой-

ства для достижения максимальной эффективности работы пневмотранспортной установки.

Методы исследования

Методика расчета базируется на компьютерном моделировании в программном модуле SolidWorks Flow Simulation, основанном на методе конечных элементов. Преимуществом данной программы, по сравнению с аналогами, например, с гидродинамическим пакетом Ansys, является возможность моделирования геометрии и выполнения всех расчетов и анализов «в одном окне».

Для проведения численного моделирования была построена 3D-модель емкости, заполненной присадкой, с пневмот-

транспортным устройством (рис. 3). В данном случае распределительное устройство имело девять выходных каналов: один центральный и восемь осесимметричных. В ходе численного моделирования геометрия распределительного устройства изменялась на варианты конструкций, представленных на рис. 2. Далее будут указываться распределительные устройства с двумя, четырьмя и восьмью выходными отверстиями, однако каждое распределительное устройство имеет также центральное отверстие.

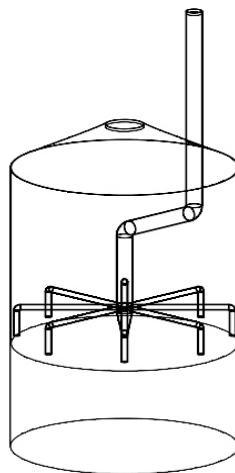


Рис. 3. Трехмерная модель емкости с пневмотранспортным устройством
Fig. 3. Three-dimensional model of the tank with a pneumatic conveying device



Численный расчет проводился при следующих допущениях: процесс течения газового потока стационарен; концентрация карбонатного шлама исключает взаимодействие между частицами; влияние частиц на движение несущей среды не учитывается [8].

Для расчетной модели были заданы следующие условия однозначности. Физические условия: в качестве материала емкости и пневмотранспортного устройства выбрана сталь; в качестве газового потока – воздух; в качестве карбонатного шлама задавались частицы плотностью $\rho_p = 4000 \text{ кг/м}^3$, диаметр частиц присадки $d_p = 75 \text{ мкм}$. Начальные условия: температура окружающей среды $T_{\text{нач.}} = 20^\circ\text{C}$. Граничные условия: скорость газового потока

на входном отверстии $W = 15 \text{ м/с}$; давление на выходном отверстии $P = 10^5 \text{ Па}$. Геометрические условия: диаметр емкости $d_c = 600 \text{ мм}$; толщина стенки $\delta = 1 \text{ мм}$; диаметр входного отверстия $d_1 = 40 \text{ мм}$; диаметр выходного отверстия $d_4 = 70 \text{ мм}$; диаметры выходных каналов распределительного устройства $d_3 = 18 \text{ мм}$; высота емкости $h = 840 \text{ мм}$.

В ходе исследований один из вышеперечисленных параметров изменялся, а другие оставались постоянными. Изучалось влияние изменения скорости газового потока в пневмотранспортной установке на эффективность выдувания частиц из емкости при разной геометрии распределительного устройства.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты компьютерного моделирования показали, что количество выходных отверстий распределительного устройства существенно влияет на эффективность пневмотранспортирования.

На рис. 4 представлена зависимость массового расхода частиц мелкодисперсного материала на выходном отверстии от скорости газового потока, подающегося во входное отверстие. Мы видим, что наибольшая эффективность транспортирования карбонатного шлама из емкости достигается с увеличением скорости газового потока. Как отмечалось ранее, вследствие цилиндрической формы емкости существует необходимость гашения центробежной силы, возникающей при транспортировании присадки. Для этого необходимо подавать воздух в емкость в разные точки поверхности мелкодисперсного материала. Логично предположить, что чем больше точек, из которых выдувается карбонатный шлам, тем легче гасить центробежную силу. Однако эффективность работы распределительного устройства с четырьмя выходными отверстиями оказалась выше распределительного устройства с восьмью выходными отверстиями: из-за модернизации появилось большее количество местных сопротивлений в результате четырех допол-

нительных выходных отверстий.

В связи с добавлением восьми выходных отверстий центробежная сила в емкости уменьшилась, но большие потери давления в пневмотранспортной установке не позволили получить более высокую эффективность транспортирования присадки по сравнению с распределительным устройством с четырьмя выходными отверстиями. Наименьшая эффективность пневмотранспортирования отмечалась при использовании распределительного устройства с двумя выходными отверстиями. В данном случае двух выходных отверстий распределительного устройства не хватает для эффективного гашения центробежной силы. Скорость газового потока $W = 20\text{--}27 \text{ м/с}$ является крайним порогом, при котором возможно выдувание присадки из емкости, так как необходимо транспортировать присадку в воздухопровод с определенным массовым расходом – $G_n = 30\text{--}200 \text{ г/с}$. Компьютерное моделирование проводилось при заданной плотности частиц $\rho_p = 4000 \text{ кг/м}^3$; в реальных условиях значения плотности частиц присадки, как правило, меньше, поэтому полученные значения массового расхода частиц G_n меньше от реальных значений на 10–20%.

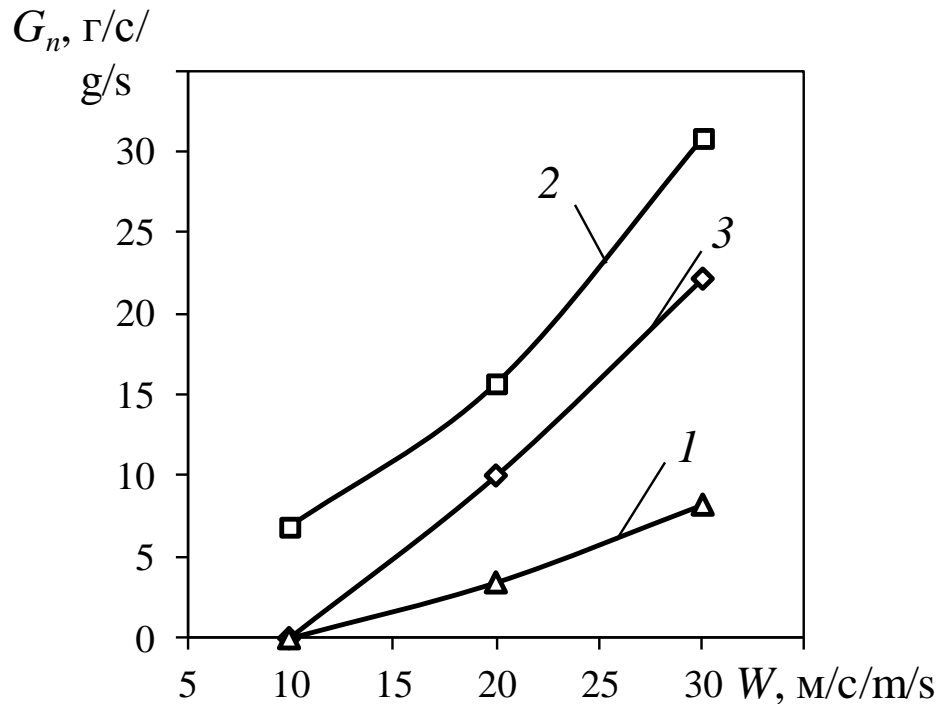


Рис. 4. Зависимость массового расхода частиц G_n мелкодисперсного материала от скорости W при разном количестве выходных отверстий распределительного устройства: 2 выходных отверстия (1); 4 выходных отверстия (2); 8 выходных отверстий (3)

Fig. 4. Dependence of mass flow of particles G_n of finely divided material on velocity W at different number of distributing device outlets: 2 outlet openings (1); 4 outlet openings (2); 8 outlet openings (3)

На рис. 5 представлена зависимость массового расхода воздуха на выходном отверстии от скорости газового потока, подающегося во входное отверстие. Наибольшие значения массового расхода воздуха, как и в случае с массовым расходом частиц, имеет пневмотранспортная установка с распределительным устройством, имеющим 4 и 8 выходных отверстий соответственно. Распределительное устройство с четырьмя выходными отверстиями имеет в среднем значение массового расхода воздуха на 12,7% выше, чем распределительное устройство с восьмью выходными отверстиями. Распределительное устройство с двумя выходными отверстиями имеет самые низкие показатели эффективности. Это связано с тем, что конструкция данного распределительного устройства не позволяет гасить центробежную силу в емкости до значений, как в случае с распределительными устройствами с четырьмя и восьмью выходными отверстия-

ми. С другой стороны, распределительное устройство с двумя выходными отверстиями имеет самые низкие потери давления. Таким образом, уменьшение потери давления в пневмотранспортной установке ведет к увеличению центробежной силы в емкости, примером является пневмотранспортная установка с распределительным устройством с двумя выходными отверстиями. Уменьшение же центробежной силы в емкости влечет увеличение потери давления в пневмотранспортной установке, примером является пневмотранспортная установка с распределительным устройством с восьмью выходными отверстиями. Наиболее оптимизированной пневмотранспортной установкой, в которой нет существенного преобладания потери давления над центробежной силой или наоборот, является пневмотранспортная установка с распределительным устройством с четырьмя выходными отверстиями.

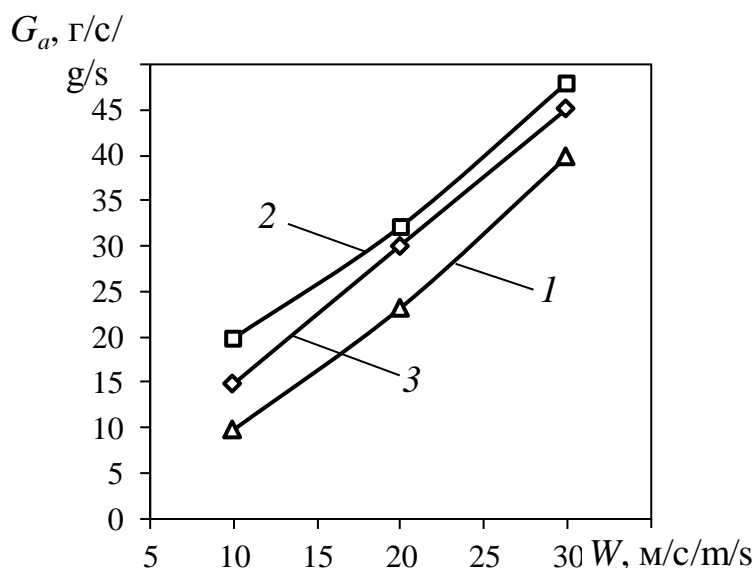


Рис. 5. Зависимость массового расхода воздуха G_a от скорости W , при разном количестве выходных отверстий распределительного устройства: 2 выходных отверстия (1); 4 выходных отверстия (2); 8 выходных отверстий (3)

Fig. 5. Dependence of mass air flow G_a on velocity W at different number of distributing device outlets: 2 outlet openings (1); 4 outlet openings (2); 8 outlet openings (3)

Проведенные исследования показали, что использование распределительного устройства позволяет довольно эффективно гасить центробежную силу. Однако важным требованием при создании пневмо-

транспортных установок для выдувания частиц из емкостей, имеющих круглое сечение, является необходимость определения зависимости потери давления в установках от центробежной силы в емкостях.

Выводы

Проведенные численные исследования позволяют произвести выбор наиболее оптимальной конструкции распределительного устройства пневмотранспортной установки. Так, например, для эффективного транспортирования карбонатного шлама из емкости цилиндрической формы лучшим решением стало применение пневмотранспортной установки с распределительным устройством, имеющим четыре выходных

отверстия. Применение предлагаемого распределительного устройства с четырьмя выходными отверстиями позволит транспортировать присадку из емкости с необходимым массовым расходом – 30–200 г/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-5215.2016.8.

Библиографический список

1. Фомичева А., Скорлыгина Н., Барсуков Ю. Мазут выходит из резервов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2902208> (20.06.2017).
2. Зверева Э.Р., Ганина Л.В., Андрияшина И.А. Влияние присадки на эксплуатационные свойства топочных мазутов // Химия и технология топлив и масел. 2009. № 5. С. 31–33.
3. Зверева Э.Р. Присадки к топочным мазутам // Известия высших учебных заведений. Проблемы

- энергетики. 2011. № 1–2. С. 7–17.
4. Зверева Э.Р., Дмитриев А.В., Шагеев М.Ф., Ахметвалиева Г.Р. Результаты промышленных испытаний карбонатной присадки к мазуту // Теплоэнергетика. 2017. № 8. С. 50–56. DOI: 10.1134/S0040363617080112
5. Малис А.Я., Касторных М.Г. Пневматический транспорт для сыпучих материалов. М.: Агропромиздат, 1985. 344 с.



6. Земерев Е.С., Малинин В.И. Неравновесное изотермическое критическое истечение порошковогазовой среды из отверстия // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 1. С. 57–61.
7. Чальцев М.Н., Войцеховский С.В. Расчет удельных потерь давления при пневматическом транспортировании мелкодисперсных материалов // Ве-

сти Автомобильно-дорожного института. 2006. № 1 (2). С. 54–58.

8. Кузнецова А.А. К вопросу о методах расчета процессов пневмотранспорта сыпучих строительных материалов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 164.

References

1. Fomicheva A., Skorlygina N., Barsukov Ju. Fuel oil is out of reserves. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/2902208> (accessed 20 June 2017).
2. Zvereva E.R., Ganina L.V., Andryushina I.A. *Vlijanie prisadki na jekspluatacionnye svojstva topochnyh mazutov* [Effects of additives on the working properties of furnace heavy fuel oils]. *Himija i tehnologija topliv i masei* [Chemistry and technology of fuels and oils]. 2009, no. 5, pp. 31–33. (In Russian).
3. Zvereva E.R. *Prisadki k topochnym mazutam* [Additives to furnace fuel oil]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki* [Proceedings of higher educational establishments. Energy problems]. 2011, no. 1–2, pp. 7–17. (In Russian).
4. Zvereva E.R., Dmitriev A.V., Shageev M.F., Ahmetvalieva G.R. *Rezultaty promyshlennyh ispytanij karbonatnoj prisadki k mazutu* [Results of industrial tests of carbonate additive to fuel oil]. *Teplojenergetika* [Thermal Engineering]. 2017, no. 8, pp. 50–56. (In Russian). DOI: 10.1134/S0040363617080112
5. Malis A.Ya., Kastornykh M.G. *Pnevmaticheskij transport dlja sypushih materialov* [Pneumatic transport

for bulk materials]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985, 344 p. (In Russian).

6. Zemerev E.S., Malinin V.I. *Neravnovesnoe izotermicheskoe kriticheskoe istechenie poroshkovogazovoj sredy iz otverstija* [Nonequilibrium isothermal critical outflow of the powder-gas medium from the hole]. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of technological university]. 2017, vol. 20, no. 1, pp. 57–61. (In Russian)

7. Chaltsev M.N., Voytsekhovskiy S.V. *Raschet udel'nyh poter' davlenija pri pnevmaticheskom transportirovanii melkodispersnyh materialov* [Calculation of specific pressure drop during pneumatic conveying of bulk solids]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta* [Bulletin of the Automobile and Highway Institute]. 2006, vol. 2, no. 1, pp. 54–58. (In Russian).

8. Kuznetsova A.A. *K voprosu o metodah rascheta processov pnevmotransporta sypushih stroitel'nyh materialov* [On the question of methods of calculating processes of pneumatic conveying of bulk construction materials]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija* [Modern Problems of Science and Education]. 2012, no. 3, p. 164. (In Russian)

Критерий авторства

Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С. разработали пневмотранспортное устройство нагнетательного действия, провели исследования и написали статью. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. have developed a pneumatic conveying device of discharge action. They conducted the research and wrote the manuscript. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 22.11.2017 г.

The article was received 22 November 2017