

УДК 661.86.08

А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева,
Э. Р. Зверева

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДАЧИ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В ВОЗДУХОВОД КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ МАЗУТА

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

Мазут играет важную роль в топливно-энергетическом балансе нашей страны. От его качества существенно зависят условия хранения, сжигания, объем выбросов вредных веществ в атмосферу, работа как основного оборудования, так и вспомогательного. Присадки в нефтяные топлива предотвращают интенсивное окисление, снижают износ и коррозию оборудования, улучшают вязкостно-температурные характеристики топлива и другие характеристики процесса. Целесообразно применение присадок, составы которых будут зависеть от свойств и требований конкретного топлива. С целью снижения выбросов вредных веществ в атмосферу в статье предлагается обավение в воздуховод камеры сгорания присадки в виде обезвоженного карбонатного шлама, позволяющего снизить выбросы окислов серы. Для реализации использования присадки в виде карбонатного шлама авторами предложена конструкция пневмотранспортного устройства для дозирования подачи с малыми концентрациями. На основании компьютерного моделирования разработано пневмотранспортное устройство с четырьмя выходными отверстиями. Описан принцип работы устройства. Созданное устройство позволяет осуществлять равномерное транспортирование мелкодисперсного материала в воздуховод котла без образования застойных зон. В статье ставится задача исследовать основные технологические параметры при опускании пневмотранспортного устройства в ёмкость по мере выдувания им мелкодисперсного материала. В статье рассматриваются особенности отбора мелкодисперсного материала из дозирующего устройства. Рассмотрен способ уменьшения потребления энергии пневмотранспортной установкой за счет создания перепада давления на входном и выходном отверстиях и применения компрессора. Результаты проведенных исследований показали, что необходимо увеличивать скорость газового потока на 15% от минимально допустимой, поскольку по мере погружения устройства на глубину емкости с присадкой происходит уменьшение давления, оказанного на поверхность мелкодисперсного материала, что приводит к уменьшению массовой концентрации смеси на выходе из устройства. Представлены зависимости, демонстрирующие, что применение компрессора для нагнетания воздуха в пределах 24–28 м/с является наиболее рациональным решением.

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

STUDYING THE FEED-IN OF FINES INTO THE BOILER DUCT WHEN BURNING FUEL OIL

Keywords: pneumatic conveyer, dispenser, carbonate sludge, combustion products.

Fuel oil is essential to the fuel and energy balance of our country. The conditions of waste storage and incineration, the volumes of harmful air emissions, and the operation of prime and supporting equipment largely depend on its quality. Petroleum fuel additives prevent from intensive oxidation, reduce the equipment wearing and corrosion, and enhance the viscosity-temperature characteristics of fuels and other characteristics of the process. It is reasonable to use additives the compositions of which would depend on the properties of and the requirements for an individual fuel. For the purpose of reducing harmful air emissions, this paper proposes to add into the combustion chamber duct an additive in form of dewatered carbonate sludge that allows reducing sulfur oxide emissions. To implement the use of the carbonate sludge additive, the authors have proposed the design of a pneumatic conveyer intended for dispensing the feed-in with small concentrations. Based on computer-aided simulations, we have developed a pneumatic conveyer with four outlets. The principle of the conveyer operation has been described. The conveyer developed allows for uniform feeding the fines into the boiler duct without forming any stagnate areas. The paper sets the task of studying the main process parameters when running the pneumatic conveyer into the reservoir as it blows out the fines. This paper considers the special aspects of drawing the fines from dispenser. We have also considered the method to reduce the energy consumption by the conveyer due to creating the inlet/outlet pressure difference and using a compressor. Findings of the studies performed have shown that it is necessary to increase the gas flow rate by 15 % of the minimum permissible one, since with running the conveyer into the depth of the reservoir containing the additive, the pressure decreases, exerted on the surface of fines, which results in decrease in the mass concentration of the mixture at the conveyer outlet. Dependences are presented that demonstrate that using a compressor is the most reasonable solution to pump air within the range of 24-28 m/s.

Вследствие не стабильной экономической ситуации в стране, некоторые ТЭЦ перешли на сжигание более дешевого вида топлива – мазута. Для уменьшения выброса вредных веществ в атмосферу при сжигании мазута возможно использование присадки в виде обезвоженного карбонатного шлама водоподготовки, позволяющего связывать серу, тем самым уменьшая выбросы оксидов серы в атмосферу [1].

В 2016 году на Набережночелнинской ТЭЦ ОАО «Генерирующая компания» в ходе испытаний использования мелкодисперсной присадки при сжигании мазута в камере сгорания, возникли сложности ее транспортирования из емкости объемом 200 л в воздуховод. В силу своих свойств карбонатный шлам слипался в воронке, образуя пробку, что приводило к нестабильной работе. Применение специаль-

ных устройств для перемещения материала не представлялось возможным, в виду отсутствия пневмотранспортных устройств для осуществления данного процесса.

Для решения данной проблемы было смоделировано и создано пневмотранспортное устройство, представляющую крышку для емкости с входным 1 и выходным 2 отверстиями. В отверстие 1 встроена линия подачи воздуха, которая соединена с распределительным устройством, имеющим пять каналов для распределения потока, проходящего по устройству. Линия подачи воздуха имеет свободный ход через входное отверстие 1, что позволяет распределительному устройству опускаться на поверхность присадки по мере ее выдувания из емкости (рис. 1).

Пневмотранспорт является одним из способов механизации и автоматизации перемещения насыпных материалов. Широкое распространение этот вид транспорта получил в середине XX века. Основные сферы применения пневмотранспортных установок: строительная промышленность, сельское хозяйство, легкая промышленность, химическая промышленность, пищевая промышленность, металлургия, энергетика и т.д. При этом около 30% объема всех работ по транспортировке сыпучих материалов приходится на долю пневмотранспорта [2–6].

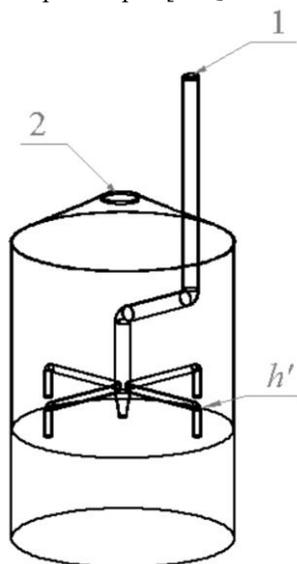


Рис. 1 – Модель пневмотранспортного устройства, помещенного в емкость с присадкой: 1 – входное отверстие, 2 – выходное отверстие, h' – относительная координата

Транспортирование сыпучих материалов пневматическим способом обладает рядом неоспоримых достоинств перед другими. Наиболее существенными достоинствами являются: компактность, возможность полной автоматизации, простота обслуживания, высокие гигиенические показатели [7–9].

Однако при всем разнообразии существующих пневмотранспортных установок для сыпучих материалов, практически каждая из них направлена на транспортирование крупнодисперсного материала. Иными словами, использование такого способа для транспортирования малых объемов мелкодисперсного материала является экономически не рентабель-

ным, и не реализуется известными способами, что требует модернизации установок или создания новых.

Целью настоящей работы является исследование процесса транспортирования мелкодисперсного материала по мере выдувания частиц из емкости и анализ влияния пониженного давления на выходном отверстии устройства на пневмотранспорт материала. Поскольку выдувание частиц из емкости происходит с помощью компрессора, создающего необходимую скорость газового потока, то для уменьшения нагрузки на компрессор предлагается увеличить перепад давления на входном и выходном отверстиях устройства.

На рис. 1 представлена 3D модель дозирующего устройства, помещенного в емкость с карбонатным шламом. Емкость, выполненная из стали, имеет цилиндрическую форму со следующими конструктивными размерами: высота $h = 850$ мм, наружный диаметр $d_n = 600$ мм, толщина стенки емкости $\delta = 1$ мм. Пневмотранспортное устройство, выполненное в виде крышки, имеет два отверстия: 1 – входное отверстие диаметром $d_1 = 40$ мм, соединяющую линию подачи воздуха и распределительное устройство с пятью выходными каналами каждый диаметром $d_3 = 18$ мм и выходное отверстие 2 диаметром $d_2 = 70$ мм [10, 11].

Для исследования была построена модель емкости с разработанным устройством. Чтобы получить закономерности изменялись давление P_1 на входном отверстии 1 в пределах 1,01–1,1 бар, P_2 на выходном отверстии 2 в пределах 0,8–0,95 бар и относительный уровень поверхности присадки в емкости h' . Для удобства была введена относительная координата h' , которая определялась соотношением:

$$h' = \frac{h_{\text{реальный}}}{h_{\text{общий}}} \quad (1)$$

Также задавались некоторые постоянные параметры: массовый расход частиц 0,05 кг/с; начальная скорость частиц 0 м/с; температура воздуха 20°C. Физико-химические показатели шлама водоподготовки – диаметр частиц $d_p = 100$ мкм, плотность частиц $\rho_p = 4000$ кг/м³. В ходе исследований были приняты следующие допущения – концентрация твердого компонента исключает взаимодействие между частицами, влияние частиц на движение несущей среды не учитывается [12]. Для визуализации результатов исследования на графиках представлено изменение отношения массовой концентрации аэросмеси к исследуемому параметру: давление P_2 на выходном отверстии, относительная высота присадки h' в емкости (рис. 2–4).

Под массовой концентрацией аэросмеси подразумевают отношение массового расхода материала к массовому расходу воздуха, выдуваемого из установки в единицу времени. Эту величину обычно обозначают через μ (кг/кг) и определяют по формуле [6]:

$$\mu = \frac{G_M}{G_B} \quad (2)$$

Результаты показали, что применение вакуумных устройств для обеспечения пониженного давления на выходном отверстии устройства является нецелесо-

образным. С точки зрения финансовых затрат экономичнее увеличить потребление электроэнергии компрессором для создания более высоких скоростей газового потока, чем создавать перепад давления на входном и выходном отверстиях и получить незначительное повышение эффективности пневмотранспортного устройства (рис. 2, 3). Также необходимо увеличивать скорость газового потока на 15% от минимально допустимой, поскольку по мере погружения устройства на глубину емкости происходит уменьшение давления, оказанного на поверхность мелкодисперсного материала, что приводит к уменьшению массовой концентрации на выходе из устройства.

На рис. 2 представлена зависимость массовой концентрации μ от давления P_2 на выходном отверстии. Отмечается не совсем логичная закономерность: по мере роста давления P_2 происходит увеличение массовой концентрации μ . Однако снижение перепада давления на входном 1 и выходном 2 отверстиях должно уменьшать концентрацию аэросмеси, выдуваемой из емкости. Наиболее высокие значения массовой концентрации μ наблюдаются на второй линии при давлении P_1 на входном отверстии, равном 1,05 бар. Создание давления P_1 больше или меньше 1,05 бар понижает эффективность работы устройства.

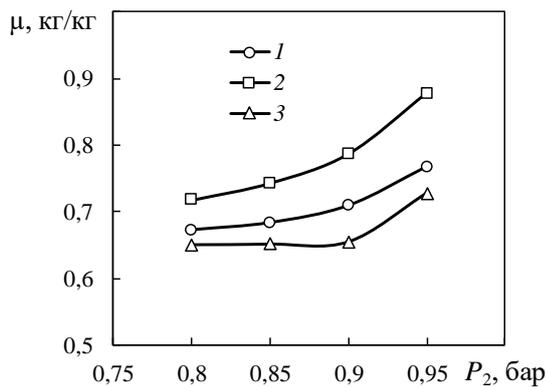


Рис. 2 – Зависимость массовой концентрации μ от давления P_2 при разном давлении P_1 , бар: 1 – 1,01, 2 – 1,05, 3 – 1,1

С учетом полученных результатов на рис. 2, было рассмотрено более детальное влияние давления P_2 на массовую концентрацию μ (рис. 3). Для этого каждая линия с рис. 2 была преобразована в две, характеризующие массовый расход воздуха и массовый расход исследуемых частиц соответственно. Данное преобразование позволяет объяснить обратные зависимости на рис. 2. При увеличении перепада давления на двух отверстиях устройства фиксируемый массовый расход воздуха на выходном отверстии 2 возрастает на 12% быстрее массового расхода исследуемых частиц, что в отношении, определяемом формулой (2), показывает причину увеличения массовой концентрации μ при стремлении перепада давления $P_1 - P_2 \rightarrow 0$ на рис. 2.

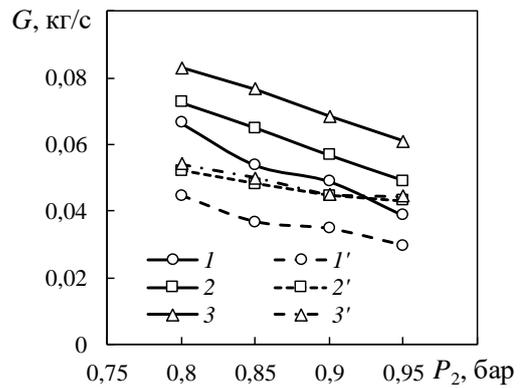


Рис. 3 – Зависимость массового расхода воздуха (сплошные линии) и массового расхода частиц мелкодисперсного материала (штриховые линии) от давления P_2 , при разном давлении P_1 , бар: 1 – 1,01, 2 – 1,05, 3 – 1,1

Вследствие того, что создание пониженного давления на выходном отверстии 2 преимущественно повышает только массовый расход воздуха, а массовый расход частиц остается практически неизменным, то данная модернизация для предлагаемого устройства является нецелесообразной. Поскольку перепад давления существенно не увеличивает массовый расход частиц, выдуваемых из емкости, то в последующих исследованиях на выходном отверстии 2 задавалось атмосферное давление 10^5 Па.

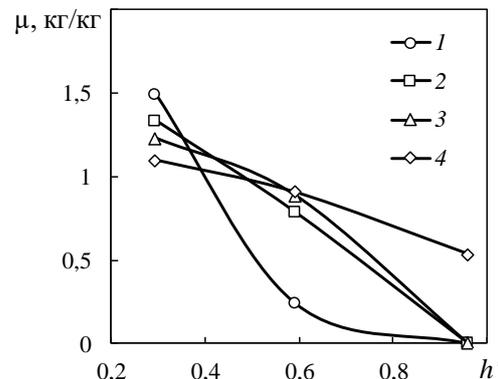


Рис. 4 – Зависимость массовой концентрации μ от уровня поверхности мелкодисперсного материала h' , при разных скоростях воздуха на входе в устройство W , м/с: 1 – 22,5, 2 – 25, 3 – 27,5, 4 – 30

На рис. 4 представлен график, отображающий изменение массовой концентрации μ по мере выдувания верхних слоев частиц и погружения дозатора вглубь емкости. После транспортирования 40% мелкодисперсного материала, находящегося в емкости, необходимо увеличивать начальную скорость потока воздуха на 10–15% для выравнивания значений массовой концентрации μ до первоначальных значений. Нагнетание скорости газового потока $W < 24$ м/с не рекомендуется, так как при данных значениях скорости массовая концентрация μ стремится к низким отметкам 0–0,25 кг/кг.

Таким образом, исследования показали, что создание перепада давления на входном 1 и выходном 2 отверстиях способствует увеличению преимуще-

ственно массового расхода воздуха, массовый расход частиц увеличивается на 2–4%, что указывает на нецелесообразность создания перепада давления на входном и выходном отверстиях. Использование компрессора для нагнетания воздуха в пределах 24–28 м/с является наиболее рациональным решением.

Созданное устройство позволяет осуществлять равномерное транспортирование мелкодисперсного материала в воздухопровод котла без образования застойных зон.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4522.2018.8.

Литература

1. Э.Р. Зверева, А.В. Дмитриев, М.Ф. Шагеев, Г.Р. Ахметвалиева, *Теплоэнергетика*, 8, 50-56 (2017).
 2. А.В. Гавриленко, *Вестник ИрГТУ*, 4 (99), 23-26 (2015).
 3. М.В. Василевский, В.И. Романдин, Е.Г. Зыков, *Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов*. ТПУ, Томск, 2013. 288 с.
 4. В.Н. Евстифеев, *Трубопроводный транспорт пластичных и сыпучих материалов в строительстве*. Стройиздат Москва, 1989. 248 с.
 5. С.Ф. Шишкин, Д.Н. Гаврилюк, *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 3, 114-117 (2009).
 6. В.А. Кружков, *Металлургические подъемно-транспортные машины*. Metallurgia, Москва, 1989. 464 с.
 7. А.Я. Малис, М.Г. Касторных, *Пневматический транспорт для сыпучих материалов*. Агропромиздат, Москва, 1985. 344 с.
 8. Г.А. Родионов, В.В. Бухмиров, *Вестник Череповецкого государственного университета*, 1, 1, 20-21 (2013).
 9. В.Д. Смирнов, *Инженерно-физический журнал*, VIII, 3, 349-357 (1965).
 10. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, С.Ф. Лорай, *Вестник технологического университета*, 20, 17, 39-41 (2017).
 11. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, Г.Х. Гумерова, *Вестник технологического университета*, 21, 2, 99-103 (2018).
 12. А.А. Кузнецова, *Современные проблемы науки и образования*, 3, 164-165 (2012).
-
- © **А. В. Дмитриев** – д.т.н., доцент, зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, **В. Э. Зинуров** – магистрант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru, **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры ПАХТ ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja_deva@mail.ru, **Э. Р. Зверева** – д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «КГЭУ», belvira6@list.ru.
- © **A. V. Dmitriev** – doctor of technical sciences, associate professor, the head of «Theoretical Bases of Heat Engineering» chair, KSPEU, ieremiada@gmail.com, **V. E. Zinurov** – graduate student, KSPEU, vadd_93@mail.ru, **O. S. Dmitrieva** – candidate of technical sciences, associate professor of PACHT chair, Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology, ja_deva@mail.ru, **E. R. Zvereva** – doctor of technical sciences, professor, KSPEU, belvira6@list.ru.