

УДК 662.71/74

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВИТАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПЫЛЕВИДНОГО ТОРФЯНОГО ТОПЛИВА

© 2020 г. О. А. Евдокимов^{1,*}, А. С. Михайлов^{2,**}, С. В. Веретенников^{1,***}, Р. А. Серов^{1,****}

¹ ФГБОУ ВО “Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева”,
152934 Рыбинск, Россия

² ООО “ГК Регион Энерго”, 152934 Рыбинск, Россия

*e-mail: yevdokimov_oleg@mail.ru

**e-mail: mihailov@region-energo.net

***e-mail: serveret@yandex.ru

****e-mail: serovroman85@mail.ru

Поступила в редакцию 03.04.2020 г.

После доработки 27.04.2020 г.

Принята к публикации 03.06.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований скорости витания торфяной пыли в воздушном потоке при различном дисперсном составе частиц, а также проведены исследования их размеров и формы микроскопическими методами. Изучены особенности аэродинамического сопротивления частиц торфа различных размеров потоку воздуха и определена критериальная взаимосвязь коэффициента сопротивления C_D и числа Рейнольдса (Re). Выполнено сравнение экспериментальных результатов по скорости витания торфяной пыли с данными расчетов по известным методикам, даны рекомендации по их применению в вопросах проектирования пневматических систем топливоподачи.

Ключевые слова: торф, размол, пылевидное твердое топливо, скорость витания, коэффициент сопротивления

DOI: 10.31857/S0023117720050047

ВВЕДЕНИЕ

Развитие малой энергетики, к преимуществам которой относятся практически полное отсутствие потерь и затрат на передачу электричества и тепла, высокая надежность снабжения, а также возможность реализации нетрадиционных подходов, связанных с применением возобновляемых источников энергии, таких как торф и древесное топливо, в настоящее время является актуальным. Полученные топлива характеризуются достаточно низкой токсичностью, что позволяет повысить экологические параметры процесса производства энергии и сократить объемы природных ресурсов [1–3].

По статистическим данным, торфяное и древесное топливо имеет более низкую стоимость по сравнению с другими видами добываемого топлива, при этом, рассматривая энергетическую сторону вопроса, торф имеет более высокую теплоту сгорания, что дает преимущество для развития эффективного производства энергии [4].

Одна из наиболее перспективных технологий горения твердых топлив — его сжигание в измельченном пылевидном состоянии в потоке движущегося воздуха, которая находит применение и в устройствах малой мощности. Существующие малоразмерные горелочные устройства сжигания твердого пылевидного торфа обладают высокой эффективностью с точки зрения экологических, энергетических и экономических характеристик [5–7]. Тем не менее стабильность работы таких устройств в значительной степени зависит от условий и режимов подачи пылевоздушной смеси, которые определяются равномерностью и дисперсностью размола топлива, формой и аэродинамическим сопротивлением частиц, а также скоростью их витания. Последнее обуславливает актуальность проведения расчетных и экспериментальных исследований, связанных с определением особенностей витания частиц пылевидного торфа в условиях его подачи в устройства сжигания, а также поиска наиболее эффективных режимов реализации данного процесса.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВИТАНИЯ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА

Под скоростью витания при создании систем подготовки и подачи топливной пыли понимают скорость свободного падения частицы в неподвижном воздухе под действием силы тяжести. Соотношение между скоростью витания частицы и ее диаметром зависит от того, является ли локальный для частицы поток ламинарным или турбулентным. В ламинарном потоке частица падает быстрее, чем в турбулентном потоке, где частицы стремятся выровняться для максимального сопротивления, а само сопротивление возрастает вследствие вихреобразования за частицами.

На основе простейшего анализа сил тяжести и сопротивления, действующих на частицу топлива сферической формы, можно определить, что скорость витания V_t (*terminal velocity*) рассчитывается по зависимости [8]

$$V_t = \sqrt{\frac{4gd_p(\rho_f - \rho_a)}{3C_D\rho_a}}, \quad (1)$$

где d_p – диаметр частицы; ρ_f – плотность топлива; ρ_a – плотность воздуха; g – ускорение свободного падения; C_D – коэффициент сопротивления частицы (*particle drag coefficient*). Наибольшую сложность в процессе применения данного подхода имеет корректный выбор значений коэффициента сопротивления C_D , величина которого в большинстве случаев находится в диапазоне $0 < C_D < 10$.

В литературе имеется ряд работ, посвященных экспериментальному и расчетному определению коэффициента C_D [9–14], при этом большинство исследователей сходятся во мнении, что для частиц сферической формы коэффициент сопротивления является функцией числа Рейнольдса $C_D = f(\text{Re})$ [9]. Широкий обзор различных зависимостей и рекомендаций приведен в [10], где содержатся данные о коэффициентах сопротивления твердых и деформируемых частиц различной формы. В работах [11–13] опубликованы результаты экспериментальных исследований для частиц биомассы, направленные на определение C_D . Влияние несферичности частиц пыли также может быть учтено путем умножения коэффициента сопротивления для сферической частицы на коэффициент формы k , значение которого для частиц шаровой формы $k = 1$. С учетом этого в работе [14] рекомендуется для округленной частицы с неровной поверхностью принимать $C_D = 2.5$, продолговатых частиц $C_D = 3$, пластинчатых $C_D = 5$, для смеси частиц неправильной формы $C_D = 2.9$.

Также для расчета скорости витания можно использовать методики, основанные на применении критериального подхода без определения коэффициента сопротивления. Одна из таких методик основана на применении критериев Лященко

Ly (*Lyashchenko number*), Архимеда Ar (*Archimedes number*) и Рейнольдса Re (*Reynolds number*) [15, 16].

Согласно данному подходу, скорость витания определяется уравнением

$$V_t = \sqrt[3]{\frac{Ly\nu(\rho_f - \rho_a)}{\rho_a}}, \quad (2)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха. Число Лященко Ly определяется с учетом числа Архимеда Ar по критериальным уравнениям: $Ly = 1.71 \cdot 10^{-4} Ar^2$ при $1.8 \cdot 10^{-2} < Ar < 28$; $Ly = 2.49 \cdot 10^{-3} Ar^{1.2}$ при $28 < Ar < 5.8 \cdot 10^4$; $Ly = 5.36 \cdot Ar^{0.5}$ при $5.8 \cdot 10^4 < Ar < 5 \cdot 10^9$. Число Архимеда Ar при этом рассчитывается по зависимости

$$Ar = \frac{d_p^3 g (\rho_f - \rho_a)}{(\rho_a \nu^2)}. \quad (3)$$

Другим критериальным подходом к определению скорости витания является применение корреляции между числами Re и Ar в виде

$$\lambda Re^2 = \frac{4}{3} Ar, \quad (4)$$

где λ – коэффициент Дарси (*Darcy friction factor*). Используя для нахождения числа Ar зависимость (3) и рассчитывая число Re , скорость витания может быть определена по уравнению

$$V_t = \frac{Re \nu}{d_p}. \quad (5)$$

Уравнение (5) также может быть решено в рамках иной корреляции между числами Re и Ar , предложенной в работах [14, 17]. Согласно отмеченному подходу, число Re должно определяться по зависимости

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0.6\sqrt{Ar}}. \quad (6)$$

Проблема применения указанных критериальных подходов для определения скорости витания пылевидного торфа заключается в том, что они были преимущественно получены для негорючих сыпучих материалов, состоящих из частиц сферической формы или близких к ней. Применение подхода, основанного на использовании поправки для несферической формы частиц пыли, требует экспериментальной верификации для уточнения значений коэффициента сопротивления C_D с учетом свойств и особенностей структуры торфяного топлива. Кроме этого, остается неизвестным влияние условий и дисперсности размола торфа на специфику витания его частиц.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВИТАНИЯ ЧАСТИЦ ТОРФЯНОЙ ПЫЛИ

Цель экспериментальных исследований – определение аэродинамических свойств пылевидного торфяного топлива в зависимости от размера частиц. Для приготовления пыли использовались торфяные гранулы, изготовленные методом формования на экструдере шнекового типа по технологии, описанной в работах [18–20]. Для производства гранул и пыли использовали верховой торф пушицево-сфагнового вида Гусевского месторождения Владимирской области РФ со степенью разложения $R = 30\%$. Выбор верхового торфа для проведения исследований обусловлен его низкой зольностью $A^d = 3.5\%$, высокими теплотой сгорания $Q_n^p = 19.3$ МДж/кг и содержанием летучих соединений $V^d = 64.8\%$, которые в совокупности определяют его широкую применимость в теплотехнических устройствах.

Экспериментальные исследования проводились по трем направлениям: определение дисперсности торфяной пыли; визуальное микроскопическое исследование частиц пылевидного торфа; определение скорости витания и коэффициента сопротивления.

На первом этапе работ осуществлялся размол торфяных пеллет в мельнице-дезинтеграторе ДСЛ-94-15М в диапазоне частоты вращения роторов от 6000 до 11000 об./мин, что соответствовало скоростям соударения пальцев от 60 до 100 м/с. Далее проводилось определение дисперсности полученной пыли методом ситового анализа в соответствии с ГОСТ 33162-2014. Комплект состоял из сит со следующими проходными сечениями: 50, 60, 100, 160, 200, 315, 400, 630, 1000, 1600 мкм.

Фотосъемка микроструктуры торфяной пыли проводилась с помощью цифровой камеры-окуляра модели DCM510 для микроскопа Метам ЛВ-41, а также цифровым светодиодным микроскопом с увеличением не менее 400X. Микроскопия проводилась двумя методами: анализ структуры пыли традиционным “сухим” методом; “мокрый” метод анализа с использованием спиртового раствора (40% этилового спирта и 60% дистиллированной воды). Анализ обоими методами осуществлялся на основе не менее чем пяти снимков каждого образца торфяной пыли.

Для проведения исследований по изучению витания торфяной пыли была изготовлена экспериментальная установка, показанная на рис. 1. Методика определения необходимого минимального для витания расхода воздуха заключалась в следующем. Воздух через трубопровод 1 от компрессора попадал в расходомер-регулятор 2, на котором устанавливался расход, при котором частицы торфа, засыпанные через верхнее отвер-



Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – трубопровод (подключенный к компрессору), 2 – массовый расходомер *BronkhorstMV-306*, 3 – стойка, 4 – стеклянная трубка, 5 – соединительная муфта (с брезентовой прокладкой внутри).

стие в стеклянную трубку 4 с диаметром 14 мм, находились в равновесном состоянии. Масса частиц торфа, засыпаемых в установку при проведении эксперимента, составляла 1 г. Таким образом, сила тяжести, действующая на частицы, уравновешивалась силой аэродинамического сопротивления, создаваемой потоком воздуха. Отмеченная постановка полностью соответствует экспериментальным подходам, реализованным в работах [11–13].

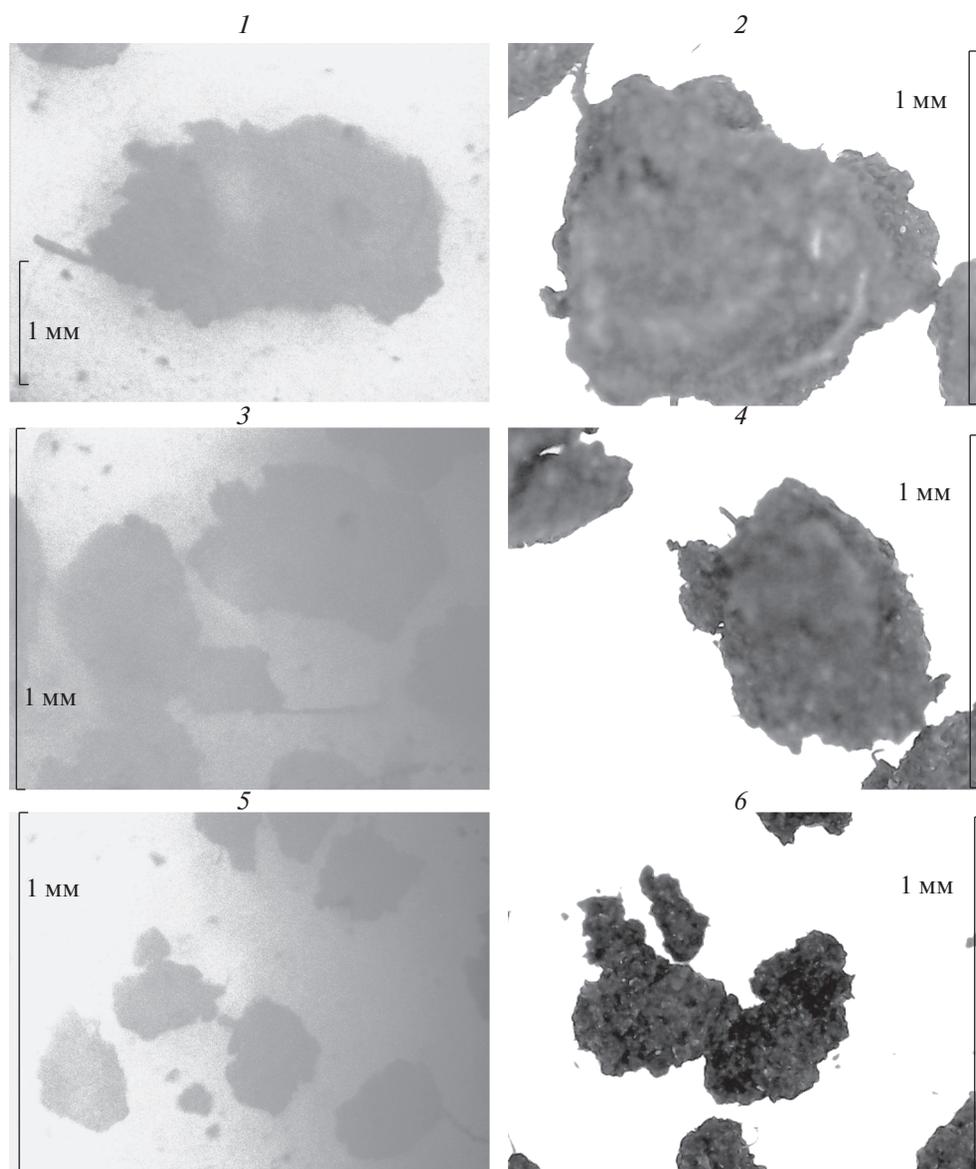


Рис. 2. Результаты микроскопии частиц торфяной пыли: 1 – $d_p = 1600$ мкм (“мокрый” метод); 2 – 1600 мкм (“сухой” метод); 3 – $d_p = 630$ мкм (“мокрый” метод); 4 – 630 мкм (“сухой” метод); 5 – $d_p = 310$ мкм (“мокрый” метод); 6 – $d_p = 310$ мкм (“сухой” метод).

На рис. 2 показаны результаты микроскопической фоторегистрации торфяной пыли различного дисперсного состава, полученные с использованием “сухого” и “мокрого” методов. Видно, что частицы пыли размером 1600 мкм и более представляют собой сфероподобные образования с неровной ограничивающей поверхностью. Кроме этого, в образцах такой пыли встречается небольшое количество криволинейных цилиндрических элементов, что характерно для случаев использования верхового торфа, содержащего в своем составе частицы корней, мха и прочих органических образований.

Микроскопический анализ пыли с характерными диаметрами порядка 630 мкм свидетельствует о том, что при дроблении в дезинтеграторе форма частиц становится более продолговатой, близкой к вытянутому эллипсоиду с “рваными” границами. Такой вывод одновременно следует как из анализа большого количества снимков пыли данной дисперсности, так и из сопоставления потенциального поперечного размера частиц с глубиной резкости используемой оптики. Различные условия фокусировки микроскопа в центре и на краях частицы говорят о том, что ее поперечный размер существенно больше глубины резкости устройства. Также необходимо обратить

внимание на устойчивое статичное положение частиц торфа при микроскопическом исследовании, что свидетельствует о том, что их поперечные размеры несколько меньше продольных.

Последующее измельчение торфа на частоте вращения роторов мельницы-дезинтегратора 11000 об./мин приводит к расслоению частиц пыли и определяет их пластинчатую форму. Это справедливо для частиц с характерными размерами $50 \text{ мкм} < d_p < 400 \text{ мкм}$; частицы размером менее 50 мкм не исследовались.

В табл. 1 показаны результаты измерения расхода воздуха, подаваемого в стеклянную трубку экспериментального стенда при определении условий витания торфяной пыли различной дисперсности.

На рис. 3 показано сравнение зависимостей скорости витания торфяной пыли от характерного размера частиц, полученных экспериментально, а также расчетными методами по уравнениям (1)–(6). Видно, что максимальное соответствие эксперименту (рис. 3, кривая 5) достигается для результатов расчета по уравнению (1) с использованием значения коэффициента сопротивления $C_D = 2.5$ (рис. 3, кривая 4). В то же время в области размеров частиц $d_p < 400 \text{ мкм}$ расхождение отмеченных кривых усиливается, что, очевидно, связано с изменением их формы и необходимостью коррекции значений коэффициента C_D .

Сопоставление результатов эксперимента с данными расчетов по другим критериальным методикам (рис. 3, кривые 1–3) позволяет сделать вывод об их существенном расхождении как в области крупных частиц, так и мелкодисперсной пыли. Рекомендуется использовать указанные методики только для экспресс-оценки условий витания твердых частиц, поскольку отклонение величины расчетной скорости витания от действительно необходимой может привести к значительному изменению концентрационного соотношения топлива и воздуха в аэросмеси, подаваемой в горелочное устройство, и существенным образом повлиять на его рабочий процесс.

Для получения более точной зависимости аэродинамических свойств торфяной пыли от ее геометрических характеристик проведены экспериментальные исследования для нескольких типов засыпки частиц торфа. Как было сказано ранее, базовым вариантом засыпки служило значение $m_1 = 1 \text{ г}$. Дополнительно были исследованы засыпки с массой $m_2 = 2 \text{ г}$ и $m_3 = 3 \text{ г}$. Результаты экспериментов показаны на рис. 4 в виде сопоставительной гистограммы.

Анализ полученных результатов говорит о том, что масса засыпаемого торфа не имеет большого влияния на значения необходимого расхода воздуха и скорости витания частиц в выбранных гео-

Таблица 1. Результаты эксперимента по определению скорости витания

№	Размер частиц d_p , мкм	Расход воздуха M_p , г/с	Скорость витания V_p , м/с
1	63	0.082	0.44
2	100	0.106	0.57
3	160	0.153	0.83
4	200	0.173	0.94
5	315	0.221	1.19
6	400	0.271	1.46
7	630	0.367	1.98
8	1000	0.470	2.54
9	2000	0.598	3.22

метрических условиях постановки эксперимента. Максимальное отклонение значений не превышает 1.5%. Выбор значений массы навесок был продиктован необходимостью проведения исследований по витанию торфяной пыли в сопоставимых динамических условиях при ее подаче в малоразмерные горелочные устройства мощностью 10–30 кВт, при запуске и работе которых возникают наибольшие проблемы с обеспечением стабильного поступления свежей аэросмеси внутрь устройства.

На основании проведенных экспериментальных измерений была установлена зависимость коэффициента сопротивления C_D от характерного размера частиц торфяной пыли, приведенная

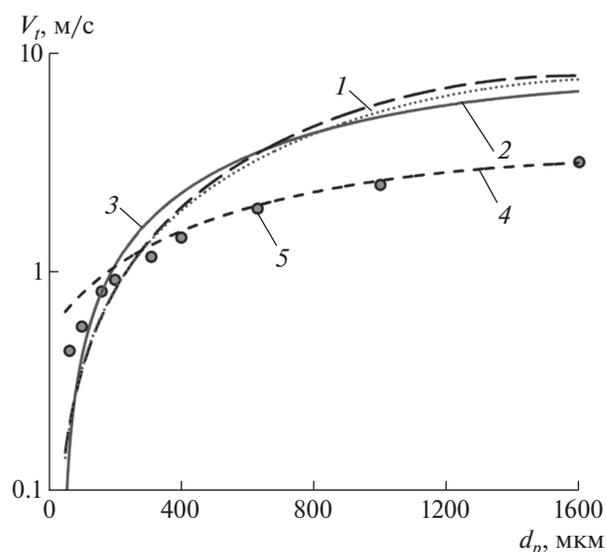


Рис. 3. Зависимость скорости витания торфяной пыли от размера частиц: 1 – расчет по уравнениям (4) и (5); 2 – расчет по уравнениям (2) и (3); 3 – расчет по уравнениям (5) и (6); 4 – расчет по уравнению (1) при $C_D = 2.5$; 5 – эксперимент.

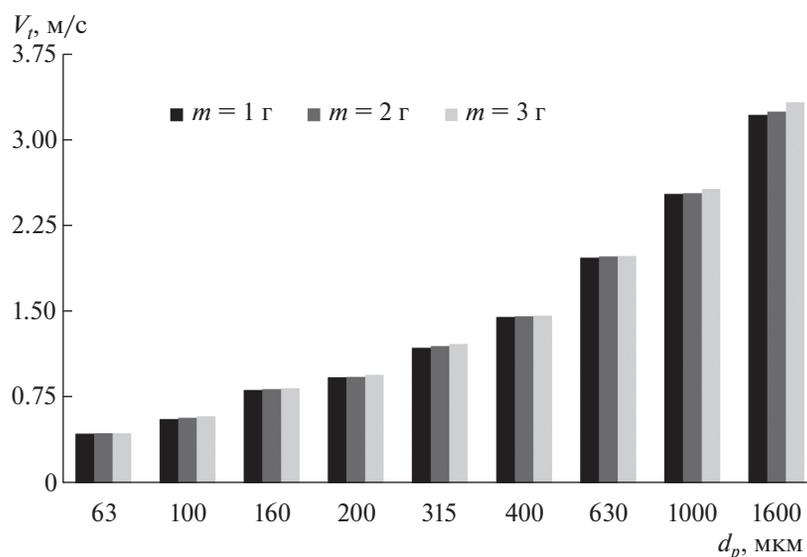


Рис. 4. Зависимость скорости витания частиц торфяной пыли от их размера для различной массы засыпки.

на рис. 5. Анализ полученной зависимости полностью согласуется с данными микроскопии торфяной пыли, определяя значение коэффициента $C_D \approx 2.5$ для крупных частиц размером $d_p > 600$ мкм и $C_D \approx 5.0$ для мелкодисперсной пыли $d_p < 100$ мкм. В диапазоне значений $100 < d_p < 600$ мкм при уменьшении гранулометрического состава пыли происходит постепенное увеличение коэффициента сопротивления C_D от $C_D \approx 2.5$ до $C_D \approx 5.0$, сопровождающееся изменением формы большинства сфероподобных частиц до пластинчатого со-

стояния. Указанная зависимость хорошо описывается степенным уравнением вида

$$C_D = 5.7 \text{Re}_t^{-0.16}, \quad (7)$$

где $\text{Re}_t = V_t d_p / \nu$ – число Рейнольдса, рассчитанное по скорости витания V_t . Данное уравнение может быть использовано для определения коэффициента аэродинамического сопротивления частиц пылевидного торфа при создании систем его пневматической подачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить скорость витания пылевидного торфа различной дисперсности, а также установить вид зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления частиц от их характерного размера. По результатам экспериментов установлено, что коэффициент сопротивления C_D изменяется от значения $C_D \approx 2.5$ для частиц размера $d_p = 1600$ мкм до величины $C_D \approx 5.0$ при $d_p = 100$ мкм, причем закон изменения представляет собой степенную функцию и обобщен в виде критериального уравнения. Данные микроскопического исследования частиц торфяной пыли полностью подтверждают полученные экспериментальные результаты и согласуются с данными [11–14]: при $C_D \approx 2.5$ частицы имеют форму неправильной сферы с «рваными» границами, а при увеличении мелкости размола – принимают пластинообразную форму с повышенным коэффициентом сопротивления до $C_D \approx 5.0$.

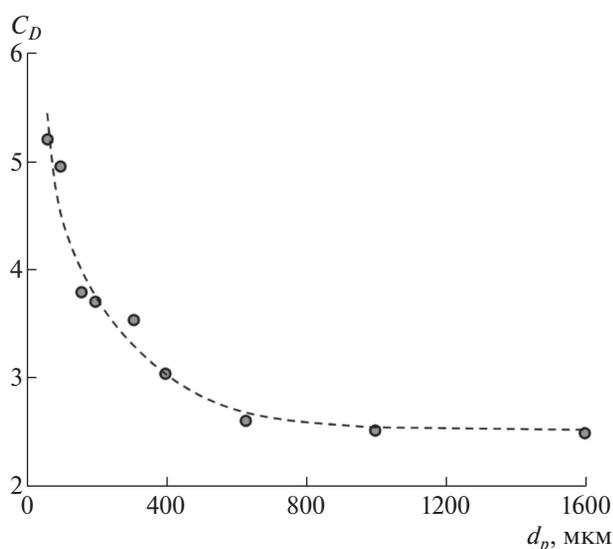


Рис. 5. Зависимость коэффициента сопротивления частиц торфяной пыли от их размера.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-1774.2019.8 “Разработка способа стабилизации горения твердого пылевидного топлива в противоточном закрученном течении”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Filippov S.P.* // Therm. Eng. 2009. V. 56. № 8. P. 665.
2. *Онищенко Г.Б., Лазарев Г.Б.* Развитие энергетики России: Направления инновационно-технологического развития. М.: Россельхозакадемия, 2008. 198 с.
3. *Безруких П.П., Дегтярев В.В.* Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива. М.: ИАЦ Энергия, 2007. 272 с.
4. *Штин С.М.* // Горн. инф.-аналит. бюл. 2011. № 7. С. 82.
5. *Mikhailov A.S., Piralishvili Sh.A., Stepanov E.G., Spe-sivtseva N.S.* // J. Eng. Phys. Thermophy. 2017. V. 90. № 2. P. 491.
6. *Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Vere-tennikov S.V.* // Thermal Sci. and Engng Progress. 2020. V. 17. P. 100510.
7. *Evdokimov O., Mikhailov A., Piralishvili S.* // Procedia Environmental Sci., Engng and Management. 2019. V. 6. № 3. P. 375.
8. *Snowsill W.L.* Instrumentation Reference Book. Chap-ter 16 - Particle Sizing. Oxford, UK: Elsevier Inc., 2010. 928 p.
9. *Мартыанова А.Ю.* Совершенствование методов расчета вакуумных систем обеспыливания на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей: Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГАСУ, 2017. 192 с.
10. *Kelbaliyev G.I.* // Theoretical Foundations Chem. Engng. 2011. V. 45. № 3. P. 248.
11. *Dunnu G., Maier J., Schnell U., Scheffknecht G.* // Fuel. 2010. V. 89. № 12. P. 4053.
12. *Liedmann B., Arnold W., Krüger B., Becker A., Krusch S., Wirtz S., Scherer V.* // Fuel. 2017. V. 200. P. 252.
13. *Krueger B., Wirtz S., Scherer V.* // Powder Technology. 2015. V. 278. P. 157.
14. *Успенский В.А.* Пневматический транспорт. М.: Металлургиздат, 1952. 152 с.
15. *Разумов И.М.* Псевдоожижение и пневмотранспорт сыпучих материалов. М.: Химия, 1972. 240 с.
16. *Павлушенко И.С.* // ЖПХ. 1956. Т. 28. № 6. С. 885.
17. *Тураев Н.С., Брус И.Д., Кантаев А.С.* Расчет устано-вок пневмотранспорта. Томск: Изд-во ТПУ, 2015. 28 с.
18. *Михайлов А.С., Пиралишвили Ш.А., Степанов Е.Г., Бирфельд А.А., Спесивцева Н.С.* // ХТТ. 2016. № 5. С. 38. [Solid Fuel Chemistry, 2016, vol. 50, no. 5. p. 310. <https://doi.org/10.3103/S0361521916050074>. <https://doi.org/10.7868/S0023117716050078>
19. *Mikhailov A.S., Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Spe-sivtseva N.S.* // Inter. J. Ener. Clean Env. 2017. V. 18. № 3. P. 231.
20. *Михайлов А.С., Пиралишвили Ш.А., Евдокимов О.А., Емец А.А., Веретенников С.В.* // ХТТ. 2019. № 4. С. 34. [Solid Fuel Chemistry, 2019, vol. 53, no. 4. p. 222. <https://doi.org/10.3103/S0361521919040098> <https://doi.org/10.1134/S0023117719040091>