

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 004.42+621.928.93

*ТОЛСТЫХ АЛЕКСАНДР ВИТАЛЬЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доцент,
sinvintie@rambler.ru*

*ДОРОШЕНКО ЮЛИЯ НИКОЛАЕВНА, канд. техн. наук, доцент,
kafotopvent1@rambler.ru*

*ПЕНЯВСКИЙ ВИТАЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
pvv.tgasu@yandex.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

УЧЕТ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛИ В ЦЕХАХ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЫЛИВАЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Представлены дисперсионные характеристики пыли, образующейся при размоле и расфасовке лекарственных трав в цехе по производству биологически активных добавок, и данные по размерам пылевых частиц, полученные при проведении дисперсионного анализа микрометрическим методом. Показано, как используются эти данные для оценки скорости витания, которая используется при проектировании промышленных систем аспирации. Описан способ учета повышающего коэффициента, связанного со сложной геометрической формой частиц пыли, к скоростям витания, полученным на основе номограммы Пирумова.

Ключевые слова: аспирация; пневмотранспорт; дисперсионный состав пыли; измельчение растительного сырья; циклоны; местные отсосы.

*ALEKSANDR V. TOLSTYKH, PhD, A/Professor,
sinvintie@rambler.ru*

*YULIYA N. DOROSHENKO, PhD, A/Professor,
kafotopvent1@rambler.ru*

*VITALY V. PENYAVSKY, PhD, A/Professor,
pvv.tgasu@yandex.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

DESIGN OF DUST-REMOVING VENTILATION SYSTEMS WITH REGARD TO PARTICLE SIZE DISTRIBUTION DURING GRINDING PLANT MATERIALS

The paper studies the particle size distribution during grinding and packaging plant materials in a workshop producing biologically active additives. The dispersion micrometric analysis is used to measure the particle size. It is shown how the obtained data are used to measure the suspension velocity which is necessary for design of dust-removing ventilation systems. The multiplying ratio is calculated for the complex particle geometry and suspension velocity obtained by Pirumov's nomograph.

Keywords: aspiration; pneumatic transport; particle size distribution; plant material grinding; cyclone; local exhaust.

При работе разнообразного размольного и дробильного оборудования, применяемого в строительной отрасли, а также в металлургической, угольной, пищевой и химической промышленности, в воздух производственной зоны выбрасывается тонкодисперсная пыль [1–4]. Значительные количества тонкодисперсной пыли, содержащейся в воздухе производственных помещений, могут принести существенный вред работающим и привести к серьезным заболеваниям. Кроме того, как отмечено в работе [3], при выбросах пыли возможно образование воспламеняющихся, взрывоопасных смесей с воздухом. Существенный риск взрывов, возгораний и задымлений очень часто связан с возникновением условий, приводящих к воспламенению и детонации воздушных взвесей растительной и пищевой пыли [5].

Для обеспечения обеспыливания воздуха рабочей зоны применяются различные варианты специализированных местных отсосов, аспирационных укрытий, таких как закрытые конвейеры, кожухи [6]. В целом защита воздушной среды обеспечивается правильным расчетом и подбором оборудования систем аспирации и использованием высокоэффективных современных пылеуловителей, предназначенных для очистки удаляемого воздуха [7].

К основным факторам, определяющим конструктивные параметры аспирационных укрытий, относятся: количество пыли, выделяющейся в единицу времени, объем аспирации, концентрация пыли и дисперсный состав частиц пыли. Для оценки эффективности пылеулавливающих аппаратов также необходимо знать не только результаты дисперсионного анализа улавливаемой пыли, но и фактический размер ее частиц [2, 8, 9]. Достаточно полно исследованы дисперсионные характеристики пыли, образующейся на деревообрабатывающих предприятиях [10], в горнорудной промышленности [2, 11], на предприятиях строительной индустрии [9, 12–14].

Важной составляющей фармацевтических технологий является измельчение растительного сырья в производстве лекарственных средств и биологически активных добавок [15]. При резке и измельчении травяного сырья в воздух выбрасывается значительное количество мелкодисперсной пыли, которая должна быть удалена специальными системами аспирации [3]. В настоящее время данные по размерам частиц пыли, образующейся при измельчении растительного сырья, и ее дисперсионному составу отсутствуют в отечественной справочной и технической литературе, что побуждает проектировщиков систем аспирации использовать неточные обобщенные данные [16].

В настоящей статье представлены результаты, полученные при определении размеров частиц пылевых выбросов и дисперсионных характеристик пыли, образующейся при размоле и расфасовке лекарственных трав в цехе по производству биологически активных добавок, а также показано, как используются эти данные для оценки аэродинамической характеристики частиц пыли – скорости витания, которая является ключевым параметром при проектировании промышленных систем аспирации.

Для обеспечения нормативных характеристик воздуха и эффективной совместной работы размольного агрегата с присоединенной к нему системой циклонов и фильтров (рис. 1), предназначенных для улавливания мелкодисперсной травяной пыли, в цехе по размолу лекарственных трав были проведены проектные работы и монтаж приточной и вытяжной систем вентиляции.

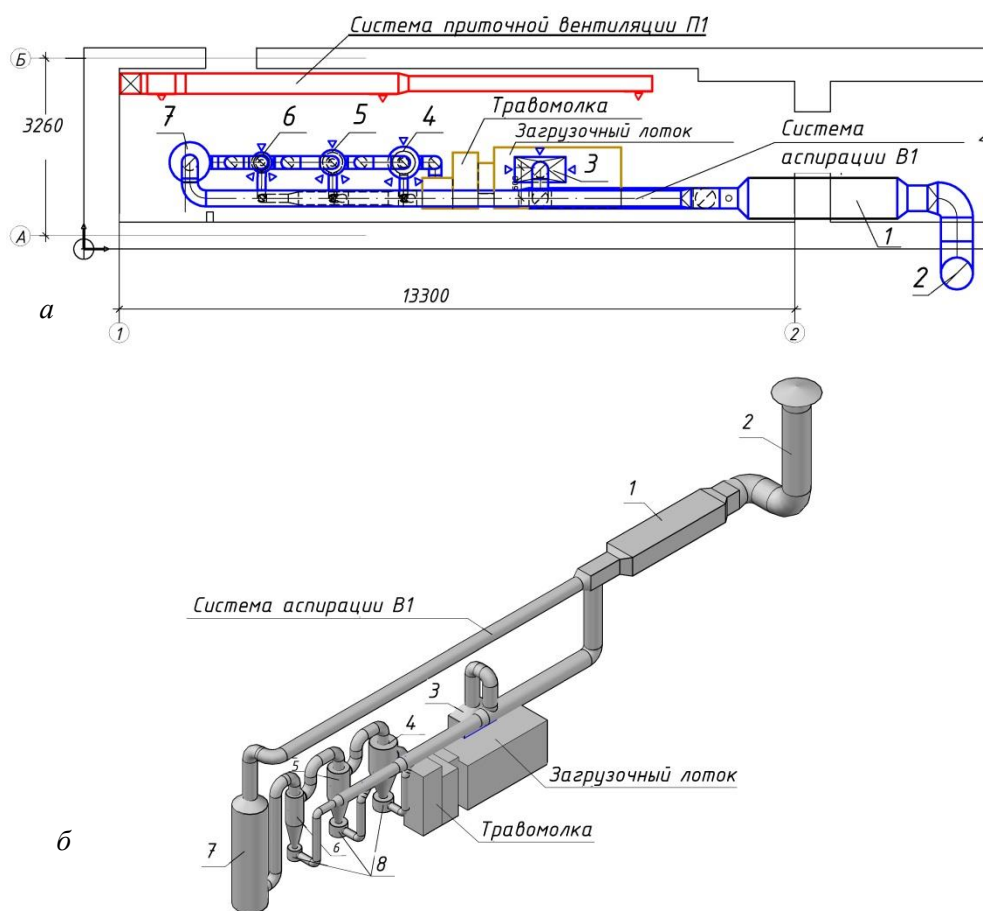


Рис. 1. Системы аспирации и вентиляции в цехе по измельчению растительного сырья: *а* – план цеха по измельчению растительного сырья; *б* – 3d-изометрия системы аспирации В1; 1 – вентиляционная установка В1; 2 – выбросной вентиляционный канал; 3 – вытяжной зонт для удаления пыли от загрузочного лотка; 4 – циклон № 1; 5 – циклон № 2; 6 – циклон № 3; 7 – рукавный фильтр; 8 – кольцевые вытяжные зонты для удаления пыли, выделяющейся в воздух при выгрузке циклонов

На плане цеха по измельчению растительного сырья (рис. 1, *а*) показаны реконструируемая система аспирации В1 и система приточной вентиляции П1. Аспирационная система В1 состоит из пылеулавливающего комплекса, включающего каскад из трех циклонов и рукавный фильтр, предназначенного для сбора и разделения на фракции измельченного готового продукта, образующегося при работе размольной установки. Кроме того, к системе В1 присоединены местные отсосы, служащие для удаления пыли, выделяющейся при разгрузке циклонов и загрузке сырья в размольный агрегат. Для определения счетных концентраций травяной пыли различных фракций использовался микрометрический метод [17]. Распределение частиц пыли по классам (фракциям) крупности определялось с использованием оптического и электронного микроскопов. Работа была выполнена на оборудовании научной лаборатории кафедры физики Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Дисперсионный анализ проводился для исходной травяной пыли, выделяющейся при работе размольного агрегата, и для пыли, разделенной на фракции различной крупности с помощью трех последовательно установленных циклонов. На рис. 2 приведены фотографии частиц травяной пыли с разрешением 40 мкм.

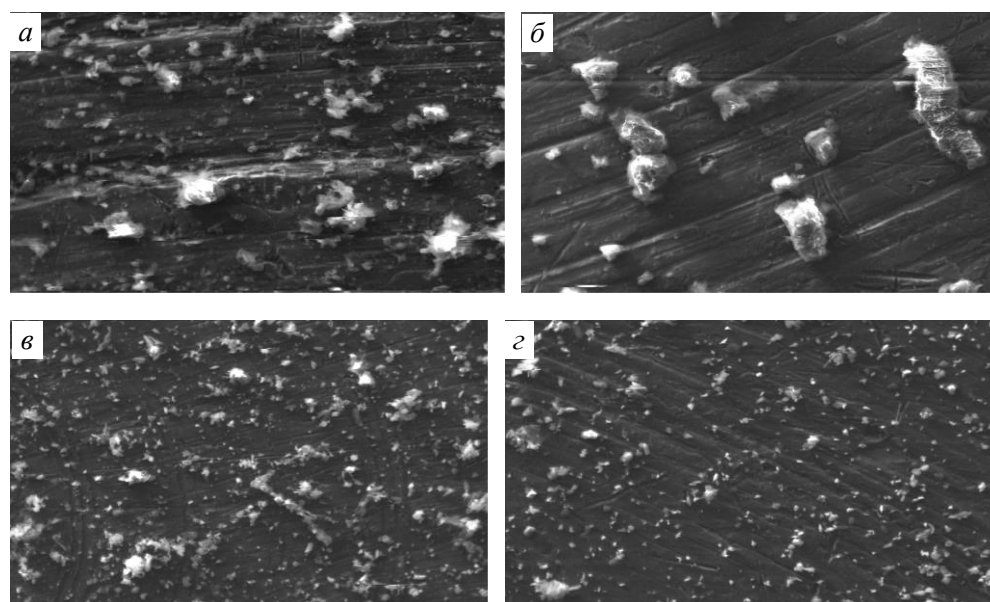


Рис. 2. Фракции размола в исходном состоянии (*а*) и осевшие в первом, втором и третьем циклонах (*б, в, г*)

Дисперсионные характеристики пыли приведены далее в виде гистограмм (рис. 3–6).

Для обеспечения эффективного удаления пыли в кольцевых зонтах у циклонов и в вентиляционном зонте над загрузочным лотком скорость воздуха во всасывающих факелах этих устройств на заданном расстоянии от отверстий должна превышать скорость витания пылевых частиц. Кроме того,

скорость витания является основополагающим параметром, использующимся при расчете вертикальных участков систем аспирации и пневмотранспорта. Для обеспечения необходимого уноса аспирируемой пыли скорости воздушных потоков на вертикальных участках должны превосходить скорости витания наиболее крупных частиц.

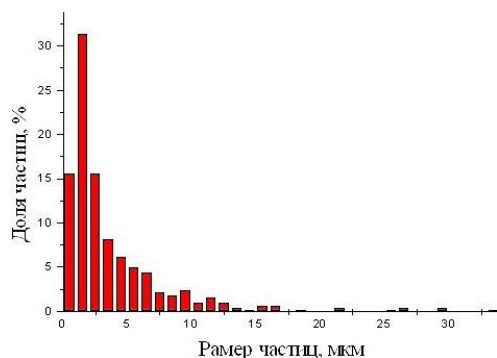


Рис. 3. Гистограмма распределения частиц по размерам в циклоне № 1

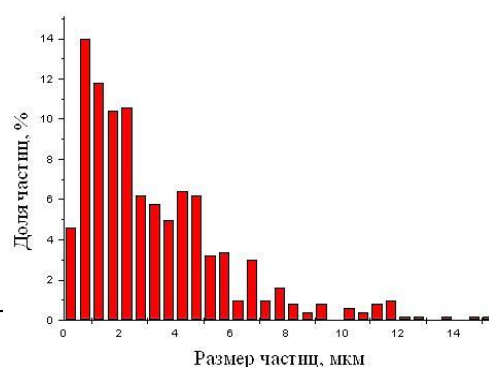


Рис. 4. Гистограмма распределения частиц по размерам в циклоне № 2

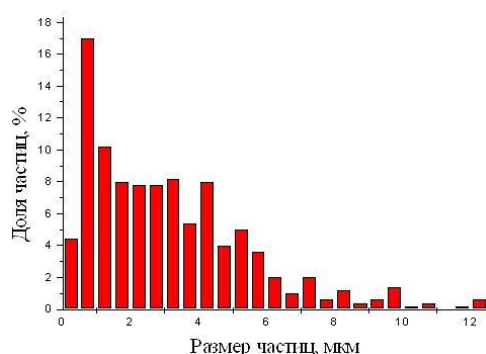


Рис. 5. Гистограмма распределения частиц по размерам в циклоне № 3

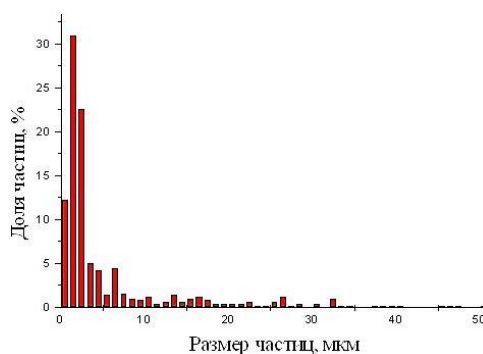


Рис. 6. Гистограмма распределения частиц по размерам в исходном состоянии перед разделением на фракции в циклонах

Для определения скорости витания частиц необходимо оценить величину кажущейся плотности удаляемой пыли. Определение кажущейся плотности пыли производилось с помощью пикнометра. Сначала были определены масса пустого пикнометра и масса пыли $M_{\text{п}} = 3,52$ г. Затем был взвешен пикнометр со спиртом. Далее в пикнометр была помещена пыль и залита спиртом. В результате взвешивания была найдена масса пикнометра с пылью и спиртом, что позволило определить объем, занимаемый частицами пыли $V_{\text{п}} = 2,12$ см³, и рассчитать их кажущуюся удельную плотность $\rho_{\text{п}}$:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{V_{\text{п}}} = \frac{3,52}{2,12} = 1,66 \text{ г/см}^3 = 1660 \text{ кг/м}^3.$$

В известной литературе по аспирации и пылеулавливанию отсутствуют инженерные формулы, предназначенные для определения скоростей витания

пылевых частиц, образующихся при измельчении растительного сырья. В работе [18] приведены эмпирические данные по скоростям витания пыли семян подсолнечника и хлопчатника, выбрасывающейся в воздух при промышленной переработке этих продуктов, а также значения скоростей витания частиц различных фракций табачной пыли.

Наиболее полные и обобщенные данные, предназначенные для определения скоростей витания частиц пыли в технологических процессах, связанных с обеспыливанием воздуха, представлены в работе [19]. Для расчета скорости витания частиц, образующихся при размоле растительного сырья, будем использовать номограмму Пирумова [19], позволяющую определять скорость витания частиц с произвольной плотностью и размерами до 300 мкм. При оценке скорости витания в качестве размера наибольшей крупности примем величину суммы наиболее вероятного размера $\delta_{\text{вер}}$ и утроенного стандартного отклонения $3\sigma_{\text{ст}}$, т. к. эти частицы составляют до 98–99 % от общего спектра пыли:

$$\delta_1 = 1,5 + 3 \cdot 4,4 = 14,7 \text{ мкм}, \quad \delta_2 = 1,25 + 3 \cdot 2,7 = 9,4 \text{ мкм}, \\ \delta_3 = 1,25 + 3 \cdot 2,4 = 8,5 \text{ мкм}, \quad \delta_4 = 1,5 + 3 \cdot 9 = 28,5 \text{ мкм},$$

где индексы 1, 2, 3 соответствуют циклонам № 1, № 2 и № 3, а индекс 4 соответствует пыли в исходном состоянии перед загрузкой в размольный агрегат (см. рис. 1, табл. 1).

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и найденных по номограмме Пирумова величин скоростей витания частиц табачной пыли

Диаметр частиц δ , мкм	Скорость витания по данным [18], см/с	Скорость витания, определенная по номограмме [19], см/с	k
5	0,9	0,14	6,43
10	3,7	0,47	7,87
20	18	2,4	7,50
30	28	5	5,60

По номограмме Пирумова [19] найдем скорости витания $v_{s,i}$ частиц травяной пыли плотностью $\rho_n = 1,66 \text{ г/см}^3$ с размерами $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$:

$$v_{s,1} = 1,07 \text{ см/с}; \quad v_{s,2} = 0,4 \text{ см/с}; \quad v_{s,3} = 0,33 \text{ см/с}; \quad v_{s,4} = 3,5 \text{ см/с}. \quad (1)$$

Однако полученные величины скоростей витания более или менее соответствуют реальным только в том случае, если форма частиц пыли близка к сферической, что явно не выполняется для растительной пыли (см. рис. 2). Для оценки влияния действительной формы частиц и строения их поверхности иногда вводят динамический коэффициент формы, равный отношению сопротивления частиц неправильной формы и сферической частицы того же объема [19].

По плотности и геометрическим характеристикам пыль, получаемая при размоле травяного сырья, близка к табачной пыли, средняя плотность которой, по данным [18], составляет $1,78 \text{ г/см}^3$. Для такой пыли известны скорости

витания, определенные опытным путем. Скорости витания табачной пыли из [18] в сравнении с соответствующими скоростями, определенными по номограмме Пирумова из [19], для частиц с размерами от 5 до 30 мкм представлены в табл. 1. В последней графе табл. 1 приведены значения отношений k величин скоростей витания, взятых из [18] и определенных по номограмме [19].

Как видно из данных табл. 1, скорости витания, определенные по универсальной номограмме, меньше соответствующих скоростей, определенных экспериментально [18], в 6–7 раз. Таким образом, скорости витания при определении по методике [19] оказываются существенно заниженными по сравнению с известными экспериментальными данными, что может привести к существенным ошибкам при проектировании местных отсосов, предназначенных для удаления травяной пыли. Для обеспечения эффективной работы местных устройств, удаляющих пыль, образующуюся при размоле растительного сырья, оценки величин скоростей витания следует выполнять с учетом коэффициента k , умножая на него значения скоростей витания, определенные по номограмме Пирумова [19].

Зависимость k (δ) можно достаточно точно аппроксимировать полиномом 3-й степени (достоверность аппроксимации составляет 0,99):

$$k(\delta) = 0,0006 \delta^3 - 0,0415 \delta^2 + 0,8121\delta + 3,3344, \quad (2)$$

где δ – размер частиц травяной пыли, мкм.

Используя определенные ранее с помощью универсальной номограммы значения скоростей витания $v_{s,i}$ (1) и зависимость (2), получим более достоверные оценки $v_{s,вт,i}$ скоростей витания травяной пыли, удаляемой системой аспирации:

$$v_{s,вт,1} = k(\delta_1) v_{s,1} = 8,21 \cdot 1,07 = 8,78 \text{ см/с}; \quad (3)$$

$$v_{s,вт,2} = k(\delta_2) v_{s,2} = 7,8 \cdot 0,4 = 3,12 \text{ см/с}; \quad (4)$$

$$v_{s,вт,3} = k(\delta_3) v_{s,3} = 7,6 \cdot 0,33 = 2,51 \text{ см/с}; \quad (5)$$

$$v_{s,вт,4} = k(\delta_4) v_{s,4} = 6,66 \cdot 3,5 = 23,3 \text{ см/с}. \quad (6)$$

Полученные скорости $v_{s,вт,4}$ были учтены при проектировании местных систем пылеудаления в расчете скорости движения воздуха в отверстии зонта над столом у агрегата для размола растительного сырья, а скорости $v_{s,вт,1}$, $v_{s,вт,2}$, $v_{s,вт,3}$ в расчете скорости движения воздуха в местных отсосах у циклонов. Последующая эксплуатация системы аспирации в цехе по измельчению растительного сырья показала, что увеличение скоростей витания при проектировании, учитывающее влияние сложной формы частиц травяной пыли, было необходимым для обеспечения вовлечения пылевых частиц в воздушные всасывающие факелы у отверстий местных отсосов.

Таким образом, перед проектированием систем обеспыливающей вентиляции в цехах, где используются технологические процессы, предусматривающие измельчение различного растительного сырья, необходимо выполнить дисперсионный анализ выделяющихся пылей и, учитывая полученные дисперсионные характеристики пыли, провести оценку соответствующих скоростей витания, необходимых для определения конструктивных характеристик местных отсосов. Если определение скоростей витания осуществляется с помощью номограммы Пирумова, необходимо учитывать повышающий

коэффициент, связанный со сложной геометрической формой частиц пыли, оценить который возможно только при наличии соответствующих экспериментальных данных.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании систем аспирации в цехах по измельчению различного растительного сырья для определения характеристик местных пылеудаляющих устройств, обоснованного выбора размеров и материалов аспирационных воздухопроводов, подбора вентиляторов и другого вентиляционного оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Логачев, И.Н.* Энергосбережение в аспирации / И.Н. Логачев, К.Н. Логачев, О.А. Аверкова. – М. : Регулярная и хаотическая динамика, 2013. – 504 с.
2. *Аксенов, С.П.* Промышленная безопасность при проектировании систем пылеудаления дробильных производств / С.П. Аксенов, Е.А. Сушко // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2008. – № 2. – С. 162–173.
3. *Таничева, Т.Г.* Аспирация оборудования объектов хранения и переработки растительного сырья, как необходимая мера, снижающая риск образования опасной концентрации пыли / Т.Г. Таничева, В.В. Шатило, С.Ю. Кислева // Потенциал современной науки. – 2015. – С. 19–22.
4. *Луканин, Д.В.* О пылевыделениях от технологического процесса гипсового производства в рабочую зону / Д.В. Луканин, М.А. Назарова, Э.Р. Бдоян // Технические науки. – от теории к практике. – 2013. – № 19. – С. 156–160.
5. *Обеспечение безопасности* на объектах хранения зерна, продуктов его переработки и комбикормового сырья / С.В. Данилова, Р.В. Анохин, П.А. Федосеев, А.С. Федосеев // Актуальная биотехнология. – 2015. – № 1 (12). – С. 50–53.
6. *Логачев, И.Н.* Аэродинамические основы аспирации / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. – СПб. : Химиздат, 2005. – 659 с.
7. *Смольников, Д.* Энергосберегающая аспирация / Д. Смольников // Хлебопродукты. – 2010. – № 4. – С. 24–26.
8. *Толстых, А.В.* Оперативное регулирование систем промышленной вентиляции для эффективной очистки газов в циклонах / А.В. Толстых, Ю.Н. Дорошенко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3. – С. 201–209.
9. *Азаров, В.Н.* К определению фактических размеров частиц пыли выбросов стройиндустрии и строительства / В.Н. Азаров, С.А. Кошкарев, М.А. Николенко // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1. – Ч. 2. – С. 44–54.
10. *Александров, А.Н.* Пневмотранспорт и пылеулавливающие сооружения на деревообрабатывающих предприятиях / А.Н. Александров, Г.Ф. Козориоз. – М. : Лесная промышленность, 1988. – 248 с.
11. *Гольцов, А.Б.* Расчет объемов аспирации при переработке руды / А.Б. Гольцов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2005. – № 12. – С. 19–21.
12. *К вопросу проектирования аспирационных укрытий* для стесненных условий / А.Б. Гольцов, А.Ю. Феоктистов, С.В. Староверов, В.М. Киреев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 4. – С. 35–37.
13. *Кошкарев, С.А.* Дисперсионный анализ пыли выбросов в системах аспирации производства цемента с использованием усовершенствованной экспериментальной установки / С.А. Кошкарев, Л.Я. Соломахина, А. Редван // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3. – С. 185–199.
14. *Allen, T.* Particle size measurement / T. Allen. – Springer, 2013. – URL : books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkjTLLsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

15. Могилюк, В. Измельчение твердых веществ / В. Могилюк, А. Добровольный // Фармацевтическая отрасль. – 2015. – № 5. – С. 64–70.
16. Новиков, В.Т. Оборудование и основы проектирования систем охраны окружающей среды. Ч. 1. Пыль, ее свойства и пылеулавливание / В.Т. Новиков. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2003. – 176 с.
17. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – М. : Химия, 1987. – 264 с.
18. Штокман, Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности / Е.А. Штокман. – М. : Изд-во АСВ, 2001. – 564 с.
19. Пирумов, А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов. – М. : Стройиздат, 1981. – 296 с.

REFERENCES

1. Logachev I.N., Logachev K.N., Averkova O.A. Energoberezhenie v aspiratsii [Energy saving in aspiration]. *Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika*. 2013. 504 p. (rus)
2. Aksenov S.P., Sushko E.A. Promyshlennaya bezopasnost' pri proektirovanii sistem pyleudaleniya drobil'nykh proizvodstv [Industrial safety in design of dust extraction systems for crushing plants]. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2008. No. 2. Pp. 162–173. (rus)
3. Tanicheva T.G., Shatilo V.V., Kisleva S.Yu. Aspiratsiya oborudovaniya ob"ektov khraneniya i perera-botki rastitel'nogo syr'ya, kak neobkhodimaya mera, snizhayushchaya risk obrazovaniya opasnoi kontsentratsii pyli [Aspiration of equipment for storage and processing of plant raw materials as a necessary measure, reducing the formation risk of dangerous dust concentration]. *Potentsial sovremennoi nauki*. 2015. Pp. 19–22. (rus)
4. Lukanin D.V., Nazarova M.A., Bdoyan E.R. O pylevydeleniyakh ot tekhnologicheskogo protsessa gipsovogo proizvodstva v rabochuyu zonu [Dust emissions from gypsum production to working area]. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike*. 2013. No. 19. Pp. 156–160. (rus)
5. Danilova S.V., Anokhin R.V., Fedoseev P.A., Fedoseev A.S. Obespechenie bezopasnosti na ob"ektakh khraneniya zerna, produktov ego pererabotki i kombikormovogo syr'ya [Ensuring safety at grain storage facilities, its processing products and raw materials]. *Aktual'naya biotekhnologiya*. 2015. No. 1 (12). Pp. 50–53. (rus)
6. Logachev I.N., Logachev K.I. Aerodinamicheskie osnovy aspiratsii [Aerodynamic bases of aspiration]. St.-Peterburg: Khimizdat Publ., 2005. 659 p. (rus)
7. Smol'nikov D. Energoberegayushchaya aspiratsiya [Energy saving aspiration]. *Khleboprodukty*. 2010. No. 4. Pp. 24–26. (rus)
8. Tolstykh A.V., Doroshenko Yu.N. Operativnoe regulirovanie sistem promyshlennoi ventilyatsii dlya effektivnoi ochistki gazov v tsiklonakh [Operation control systems of industrial ventilation for effective gas purification in cyclones]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 3. Pp. 201–209. (rus)
9. Azarov V.N., Koshkarev S.A., Nikolenko M.A. K opredeleniyu fakticheskikh razmerov chastits pyli vybrosov stroiindustrii i stroitel'stva [Actual particle size of dust emissions in construction industry]. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015. No. 1. Pp. 44–54. (rus)
10. Aleksandrov A.N., Kozoriz G.F. Pnevмотransпорт и пылеулавливающие сооружения на деревообрабатывающих предприятиях [Pneumatic transport and dust collection facilities at woodworking enterprises]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1988. 248 p. (rus)
11. Gol'tsov A.B. Raschet ob"emov aspiratsii pri pererabotke rudy [Calculation of aspiration volumes during ore processing]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2005. No. 12. Pp. 19–21. (rus)
12. Gol'tsov A.B., Feoktistov A.Yu., Staroverov S.V., Kireev V.M. K voprosu proektirovaniya aspiratsionnykh ukrytii dlya stesnennykh uslovii [Design of aspiration shelters for cramped conditions]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2013. No. 4. Pp. 35–37. (rus)
13. Koshkarev S.A., Solomakhina L.Ya., Redvan A. Dispersionnyi analiz pyli vybrosov v sistemakh aspiratsii proizvodstva tsementa s ispol'zovaniem usovershenstvovannoi eksperimental'noi ustanovki [Dispersion analysis of dust emissions in cement aspiration systems using an improved experimental installation]. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2014. No 3. Pp. 185–199. (rus)
14. Allen T. Particle size measurement. Springer, 2013. Available at: books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+du

- st+particle&ots=SkkjTLIsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VlHzn79pQE08&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false/
15. *Mogilyuk V., Dobrovol'nyi A. Izmel'chenie tverdykh veshchestv [Crushing of solids]. Farmatsevticheskaya otasl'. 2015. No. 5. Pp. 64–70. (rus)*
 16. *Novikov V.T. Oborudovanie i osnovy proektirovaniya sistem okhrany okruzhayushchei sredy. Chast' 1. Pyl', ee svoistva i pyleulavlivanie [Equipment and basis for design of environmental protection systems]. Tomsk: TPU Publ., 2003. 176 p. (rus)*
 17. *Kouzlov P.A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pylei i izmel'chennykh materialov [Analysis of disperse composition of industrial dusts and crushed materials]. Moscow: Khimiya Publ., 1987. 264 p. (rus)*
 18. *Shtokman E.A. Ventilyatsiya, konditsionirovanie i ochistka vozdukha na predpriyatiyakh pishchevoi promyshlennosti [Ventilation, air conditioning and air purification in food industry]. Moscow: ASV Publ., 2001. 564 p. (rus)*
 19. *Pirumov A.I. Obespylivanie vozdukha [Dedusting air]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1981. 296 p. (rus)*