

Д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), к. т. н. С. В. Белов, Т. Н. Черемисина

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,  
г. Екатеринбург, Россия

УДК 622.411.5:622.06

## ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЕ И РЕШЕНИЯ ПО ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЮ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В КАРЬЕРАХ

Определены образования пыли в карьерах огнеупорного производства, ее опасность для здоровья обслуживающего персонала. Представлены свойства пыли в зависимости от размера ее частиц. Рассмотрены известные методы улавливания вредной пыли и их недостатки. Предложено новое транспортное средство высокой проходимости с использованием воздушной подушки для подборки и транспортировки пылеобразующих сыпучих материалов в условиях непроходимости по суше.

**Ключевые слова:** карьеры огнеупорного производства, опасные и вредные технологические процессы, пыль сырьевых материалов, пылеулавливание, транспортное средство высокой проходимости (ТСВП), охрана труда.

**К** самым вредным производствам и профессиям по показателям вредности и с тяжелыми условиями труда относятся горные работы. Современный уровень открытых горных работ характеризуется большой мощностью используемого оборудования и высокой интенсивностью технологических процессов на глубине до 300–600 м. Основными наиболее опасными и вредными технологическими процессами на карьере являются буровзрывные работы, экскавация горной массы, транспортировка горной массы, складирование, отвалообразование. В условиях таких работ на безопасность работающих в карьере влияет такой опасный и вредный фактор, как интенсивное пылеобразование. Источники пыли были, есть и будут.

Пыль, образующаяся на предприятиях строительной индустрии, весьма разнообразна по свойствам, химическому и дисперсному составу [1]. Неорганической является пыль сырьевых материалов горных пород и строительных материалов. Все горные породы (и пыль горных пород) делятся по способу образования на три большие группы: изверженные, осадочные и метаморфические. Изверженные породы (гранит, диорит и им подобные) широко используют в производстве щебня, необходимого для получения высокопрочных бетонов. Для пыли изверженных пород характерен средний диаметр частиц 20–30 мкм, удельная поверхность частиц 2500–4500 см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>.

Пыль осадочных пород — это пыль песка, каолина, глины, доломита, известняка. Осадочные породы наиболее широко применяют в производстве строительных материалов. Например, песок является сырьевым материалом силикатного и глиняного кирпича, стеклянного и минерального волокна, а также входит в состав керамических изделий [2, 3]. Метаморфические породы — гнейс, кварцит, талькомагнезит — используют в производстве огнеупорных материалов. Следует отметить силикозоопасность пыли метаморфических пород, так как наличие свободного SiO<sub>2</sub> в кварцевой пыли достигает 70–85 %.

Разработка асбеста ведется преимущественно открытым карьерным способом с дальнейшим обогащением руды на фабриках. Месторождения асбеста разбросаны по всему миру, крупнейшее из которых находится в России, на Урале. Асбестовая пыль выделяется на разных этапах производства асбеста и асбестоцементных изделий [<http://biofile.ru/bio/36816.html>]. Пыль асбеста квалифицирована как канцерогенное вещество. Безопасного количества асбестовой пыли не существует. Любая доза способна стать причиной заболевания. В первую очередь асбест причиняет вред тем, кто с ним регулярно работает при добыче, строительстве, производстве и т. д. Опасно даже одно волокно асбеста, попавшее в легкие человека [[http://www.b-g.by/ru/6\\_2011/society/7667/](http://www.b-g.by/ru/6_2011/society/7667/)]. Наибольшим фиброгенным действием обладают пылевые частицы, содержащие свободный SiO<sub>2</sub>. Весьма опасна для здоровья работающих пыль кварца, кристобалита и тридимита, образующаяся при производстве стекла и диносовых изделий, содержащая выше 90 % свободного SiO<sub>2</sub>.

При производстве массовых взрывов выделяется огромное количество пыли и газа в окружа-



С. Я. Давыдов

E-mail: davidovtrans@mail.ru

ющую среду. Масса заряда на взрыв в карьерах достигает 300–1000 т, а масса взорванной горной породы 5 млн т. По данным гранулометрического состава раздробленных взрывом горных пород разной крепости установлено, что в расчете на 1 кг взрывчатых веществ при проведении массовых взрывов в пылегазовое облако поступает от 80 до 320 г пылевой фракции до 20 мкм [4]. Было установлено [5], что удельное количество пыли на единицу объема горной массы зависит от крепости пород, возрастает с увеличением глубины выработки и изменяется в диапазоне 30–160 г/м<sup>3</sup>.

Известно, что степень вредного воздействия пыли на оборудование и персонал карьера определяется ее физико-химическими свойствами и концентрацией в воздухе. В свою очередь, свойства пылевых частиц в основном зависят от их минерального и химического составов и крупности. В зависимости от крупности частиц различают крупную пыль (100–500 мкм), которая легко выпадает из потоков газа; мелкую пыль (10–100 мкм), которая оседает в спокойной среде; тонкую пыль — туманы (0,1–10 мкм), которая трудно оседает даже в спокойной газовой среде; весьма тонкую пыль — дымки (<0,1 мкм), находящуюся в броуновском движении и не оседающую в обычных условиях [6]. Более подробная характеристика изменения свойств пыли в зависимости от крупности частиц приведена в таблице [7].

Дисперсность витающей пыли в карьерах чрезвычайно высока. Так, в атмосфере Сибайского карьера при экскаваторных работах, на дорогах при движении автосамосвалов вся пыль имеет размеры до 5 мкм, в том числе 98 % частичек размерами 2 мкм и менее. В кабинах экскаваторов Высокогорского, Гороблагодатского и Лебединского железорудных, Гайского серно-обогатительного и Сорского молибденового карьеров число пылинок до 3 мкм составляет 75–80 %. Содержание частиц пыли размерами до 2 мкм в различных рабочих зонах Коркинских и Богословских карьеров составляет 71–73 %.

Дисперсный состав пыли можно представить в виде содержания по числу или по массе частиц различных фракций. Фракцией называют относительную долю частиц, размеры которых находятся в определенном интервале значений, при-

нятых в качестве нижнего и верхнего пределов. Большинство промышленной пыли подчиняется нормально-логарифмическому закону распределения частиц по размерам. В этом случае интегральная кривая распределения частиц по размерам может быть выражена аналитически [8]:

$$D(d_q) = \frac{100}{\lg \sigma_q \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lg d_q} e^{-\frac{\lg^2(d_q/d_m)}{2\lg^2 \sigma_q}} d \lg d_q,$$

где  $D(d_q)$  — относительное содержание частиц меньше данного размера  $d_q$ , %;  $\lg \sigma_q$  — среднеквадратичное отклонение в функции данного распределения;  $\lg(d_q/d_m)$  — логарифм отношения текущего размера  $d_q$  к медианному для данного распределения размеру  $d_m$ , который представляет собой такой размер, при котором число частиц крупнее  $d_m$  равно числу частиц мельче  $d_m$ .

Максимальный размер отдельных пылинок, попадающих в легкие человека, обычно не превышает 10 мкм; основное количество частиц имеет размер 5 мкм и менее. Наиболее опасными считаются частицы, размеры которых не превышают 2 мкм. Наличие их в атмосфере Ангренского разреза указывает на то, что витающая в разрезе пыль полидисперсна и содержит до 95 % частиц размерами не более 10 мкм.

Производственная пыль — одна из наиболее распространенных профессиональных вредностей, которая может вызывать пылевые заболевания, занимающие первое место в мире среди профессиональных заболеваний. Опасность легочных заболеваний возрастает с увеличением содержания в пылевой аэрозоли свободного SiO<sub>2</sub>. При этом отмечено, что удельная доля SiO<sub>2</sub> в составе пыли на железорудных карьерах изменяется от 5,5 до 16,7 %, а на карьерах, добывающих руды цветных металлов, может достигать 60 %. Особую опасность представляют пылевые образования в атмосфере карьеров, добывающих радиоактивные руды. Вдыхание пыли, содержащей уран, радий, радиоактивный свинец, соединения тория, полоний и другие изотопы, а также пыли с адсорбирующимися на ней из воздуха короткоживущими продуктами распада радона, активность которых на 4–5 порядков превышает активность указанных выше веществ, приводит к внутреннему облучению и раку легких. Неко-

**Свойства пыли в зависимости от размера частиц**

Показатель	Размер частиц, мкм			
	>5	0,1–5	0,001–0,1	<0,001
Характеристика частиц	Грубодисперсные	Тонкодисперсные	Коллоидные	Молекулярные
Видимость при наблюдении	Видимы простым глазом	Видимы под микроскопом	Видимы под ультрамикроскопом	Невидимы
Способность к диффузии	Неспособны	Почти не способны	Способны с малой скоростью	Способны
Способность к коагуляции	Неспособны	Способны	Способны	Неспособны
Участие в броуновском движении	Не участвуют	Небольшое участие	Участвуют	Участвуют

торые виды пыли (например, угольная, торфяная, серная), взвешенные в воздухе, также представляют собой взрывоопасную смесь.

Проблема очистки воздуха в карьерах является весьма актуальной с точки зрения производительности работ по добыче породы, а также с точки зрения обеспечения санитарных норм, ограничивающих предельно допустимые концентрации вредных газов и аэрозоля.

Известен способ проветривания карьеров путем принудительного перемещения потоков воздуха по трубопроводам, проложенным по бортам карьера, или по подземным горным выработкам, проводимым с поверхности к бортам или по дну [9]. Недостатком этого способа является создание только восходящих потоков воздуха в ограниченных зонах проветривания карьера вблизи источников загрязнения, что не позволяет обеспечить вынос из карьера всех вредностей в полном объеме. Другой способ проветривания карьера включает нагнетание по выработкам воздуха от вентилятора, установление в устьях горизонтальных выработок диффузоров, с помощью которых изменяют направление струи в вертикальной и горизонтальной плоскостях [9]. Недостатком этого способа является невозможность подачи по подземным выработкам большого количества воздуха, которого недостаточно для получения на выходе из карьера необходимой скорости струи воздуха для выноса всего объема вредностей. Это значительно снижает эффективность проветривания карьера, так как при этом необходимо учитывать расположение струи воздуха относительно ветра на поверхности, чтобы исключить попадание выносимых вредностей обратно в карьер из-за незначительной скорости подаваемой струи воздуха. Для решения этой проблемы используют различные технологические средства, основными из которых являются воздуховоды и системы пылегазоочистки, очищающие воздух в локальных зонах карьера и в cabina работающей техники [10].

В масштабах всего карьера вентиляция воздуха обычно осуществляется естественным образом за счет вертикальных воздушных перемещений, а также за счет горизонтальных перемещений воздуха (ветра) на земной поверхности, инжектирующих загрязненный воздух из полости карьера. Однако при слабом ветре, особенно при возникновении атмосферных инверсий в районе расположения карьера, естественная вентиляция воздуха нарушается. Это приводит к сильной загазованности внутри карьера продуктами сжигания топлива работающей техники, а также к запыленности в результате проведения вскрышных работ.

Известен способ вентиляции воздуха в карьере при неблагоприятных метеорологических условиях, который заключается в использовании струи работающего авиационного двигателя,

установленного внутри карьера, для создания термодинамического вертикального воздушного потока. Однако практический опыт показал, что эффект вентиляции карьера (особенно в глубоких карьерах) при использовании этого способа очень низкий ввиду того, что, не достигая уровня земной поверхности, вертикальный поток теряет свою скорость и преобразуется в нисходящий. При этом происходят циркуляция загрязненного воздуха внутри карьера и дополнительное обогащение его вредными веществами, источником которых является сам двигатель.

Конвективные струи, обеспечивающие вертикальное перемещение воздушных масс, возникают вследствие создания вертикальных температурных градиентов, а значит, и градиентов плотности воздуха за счет его прогрева на дне карьера. Прогрев воздуха также может осуществляться тепловыми установками, выполненными в виде отдельных горелок, установленных на поворотной форме, либо в виде цилиндра, внутри которого смонтирована система горелок. Недостатком этого способа является большой расход топлива (~1 кг/с). Кроме этого, при сжигании топлива в факелах происходит его неполное сгорание, что приводит к образованию сажи, загрязняющей воздух.

Для повышения эффективности вентиляции карьеров и воздушного пространства в прилегающих к ним районах, а также для снижения энергозатрат при этих работах используют также электрический способ вентиляции, который заключается в создании вертикального воздушного потока с помощью генерирования отрицательных ионов. Генерируемые источником ионы под действием сил, создаваемых отрицательным полем Земли и положительным полем ионосферы, перемещаются вверх, увлекая за собой воздух.

Известен комплекс мер по уменьшению пылеобразования на карьерах, но полностью справиться с этой проблемой не удастся. Около 30 % угля теряется в виде пыли во время добычи и от 50 до 60 млн т материала ежегодно остается под землей. Исследователи из Университета Нельсона Манделы (Южная Африка) разработали новое топливо, которое произведено из комбинации водорослей и угольной пыли. Угольная пыль в качестве основного компонента является побочным продуктом процесса добычи угля. Это топливо, как утверждается, может положительно влиять на окружающую среду [<http://gisprofi.com/gd/documents/uchenye-proizveli-novoe-toplivo-iz-ugolnoj-pyli-i-vodoroslej.html>].

В настоящее время существует несколько методик расчета пылегазового загрязнения атмосферы при производстве массовых взрывов на карьерах — например, методика расчета вредных выбросов для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей), разработанная ИГД им. А. А. Ско-

чинского [11]. Масса твердых частиц (пыли)  $m$ , т, выбрасываемых с пылегазовым облаком, определяется по зависимости

$$m = qKQ \cdot 10^{-3},$$

где  $q$  — удельное пылевыведение по методике ИГД им. М. М. Скочинского,  $q = 0,11 \text{ кг/м}^3$ ;  $K$  — переводной поправочный коэффициент прочностного породного пылевыведения,  $K = 1$ ;  $Q$  — количество одновременно взрываваемой горной массы, т.

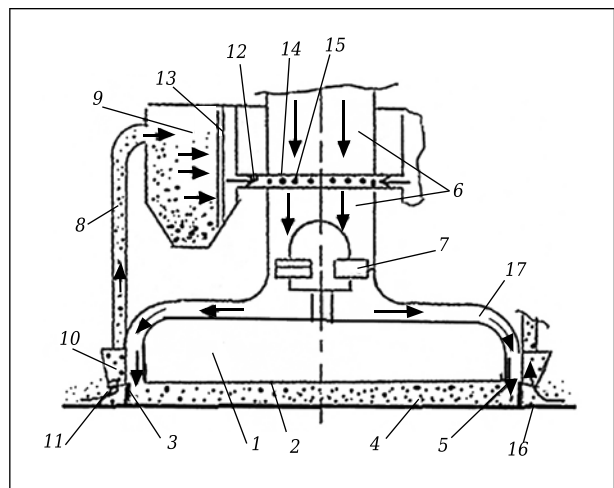
Пыль, образовавшаяся при разработке карьеров, используется в строительной отрасли для строительства дорог и в производстве таких изделий, как кирпич и керамическая плитка. Недавние исследования по потенциалу карьерной пыли на цементных смесях фокусировались на частичной замене песка.

В этой связи перед авторами встал вопрос, можно ли не только уменьшить работы по очистке воздуха в карьерах от пыли, но и собрать эту самую пыль как ценное добавочное сырье для промышленных предприятий. Для решения этой задачи авторы предложили транспортное средство высокой проходимости (ТСВП). В настоящее время известно большое количество судов высокой проходимости, которые решают в основном одну задачу — перемещение по труднодоступной местности, т. е. такие виды транспорта, которым дороги не нужны. Разработанное авторами ТСВП [12] относится к транспортной технике с использованием воздушной подушки для подборки и транспортировки пылеобразующих сыпучих материалов в условиях непроходимости по земле, например в карьерах после взрывных работ, экскавации, работ по перемещению горной массы и др.

Важнейшей задачей разработки является расширение области использования ТСВП для сбора пылеобразующего сыпучего материала с поверхности грунта, который является добавочным ценным сырьем для промышленных предприятий. Это позволяет экономить энергетические затраты на производство той же самой промышленной пыли, получая ее уже в готовом виде. ТСВП содержит корпус 1 (см. рисунок) с днищем 2 и гибкое ограждение 3 полости 4 воздушной подушки, выполненное по периметру днища 2. За пределами периметра гибкого ограждения 3 воздушной полости 4 днища 2 установлены сопла 5 (щелевые сопла) для подачи сжатого воздуха в полость 4 воздушной подушки. Всасывающий воздухозаборник 6 снабжен нагнетателем 7 воздуха. Перепускные трубопроводы 8 подсоединены к грузовому контейнеру 9. За пределами периметра ограждения (юбки) 3 воздушной полости 4 днище 2 снабжено закольцованным патрубком 10 с соплами 11 для засасывания сыпучего материала. При этом закольцованный патрубок 10 с помощью перепуск-

ных трубопроводов 8 сообщен последовательно сначала с грузовым контейнером 9 для сбора сыпучего материала, а затем с воздухозаборником 6. Для очистки воздуха от сыпучего материала грузовой контейнер 9 снабжен фильтром 13. К грузовому контейнеру 9 подведен перепускной трубопровод 12, который преобразован в закольцованный перфорированный трубопровод 14, встроенный в периметр воздухозаборника 6. Отверстия 15 перфорированного трубопровода 14 обращены в полость воздухозаборника 6.

С помощью нагнетателя воздуха 7 создают атмосферное давление, которое рассчитывают из условия массы перемещаемого транспортного средства. Высота подъема транспортного средства над почвой на оптимальную величину устанавливается автоматически. При большой высоте подъема давление воздуха будет уходить через увеличивающийся зазор между бортом юбки 3 и поверхностью 16 почвы, устранить который полностью невозможно, и тогда атмосферного давления в пространстве будет недостаточно для дальнейшего подъема транспортного средства, в результате чего оно опустится. Воздушная подушка между гибкой юбкой 3 и плоским днищем 2 создается потоком воздуха из кольцевых сопел 5. Под днищем 2 образуется слой сжатого воздуха, который приподнимает транспортное средство над поверхностью грунта 16. Изменения высоты подъема в процессе перемещения транспортного средства на воздушной подушке осуществляется за счет регулирования формы и геометрических размеров сопел 5. Потоками сжатого воздуха из сопел 5 происходят ворошение, выбивание и подъем пылевых частиц материала с неровных поверхностей грунта 16. При прокачке нагнетателем 7 в воздухозаборнике 6 создается вакуум. Поднятые пылевые частицы засасываются потоками воздуха соплами 11 в закольцованный патрубок 10 и направляются по перепускным трубопроводам 8 в бункер 9.



Транспортное средство высокой проходимости (ТСВП)

После очистки фильтром 13 от пылевых частиц воздух засасывается в воздухозаборник 6. В воздухозаборнике 6 очищенный воздух смешивается с атмосферным, откуда эта воздушная смесь нагнетателем 7 по воздуховоду 17 через сопла 5 подается в полость 4 воздушной подушки.

Для этого варианта использования новой разработки перепад давления  $\Delta P_{\text{пер}}$ , Па, для нагнетателя 7 определяется из следующей зависимости [1, 13–17]:

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{наг}} + \Delta P_{\text{в}},$$

где  $\Delta P_{\text{наг}}$  — потеря давления нагнетателя для создания воздушной подушки, Па;  $\Delta P_{\text{в}}$  — потеря давления во всасывающей линии, Па.  $\Delta P_{\text{наг}}$  можно определить по формуле [13, 14]

$$\Delta P_{\text{наг}} = 0,11(\Delta/\sqrt{S})^{0,25}l\rho v^2/\sqrt{S},$$

где  $\Delta$  — шероховатость воздуховода, м;  $S$  — площадь поперечного сечения воздуховода, м<sup>2</sup>;  $l$  — длина воздуховода, м;  $\rho$  — плотность воздуха в воздуховоде, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  — скорость движения воздуха по воздуховоду, м/с.

#### Библиографический список

1. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2007. — 317 с.
2. **Давыдов, С. Я.** Новое энергосберегающее печное, транспортное и складское оборудование в производстве цемента : учеб. пособие / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2004. — 170 с.
3. **Давыдов, С. Я.** Вращающиеся печи предприятий строительных материалов : учеб. пособие / С. Я. Давыдов, В. А. Пьячев, И. Д. Кащеев [и др.]. — Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2006. — 352 с.
4. **Адушкин, В. В.** Основные факторы воздействия открытых горных работ на окружающую среду / В. В. Адушкин // Горный журнал. — 1996. — № 4. — С. 49–55.
5. **Бересневич, П. В.** Аэрология карьеров / П. В. Бересневич. — М. : Наука, 1990. — 280 с.
6. **Давыдов, С. Я.** Результаты исследования схемы пневмотранспорта известковой пыли, содержащей наночастицы, в ОАО «Серовский завод ферросплавов» / С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев, В. С. Кийко, В. Н. Корюков // Новые огнеупоры. — 2015. — № 11. — С. 17–22.
7. **Руденко, К. Г.** Обеспыливание и пылеулавливание при обработке полезных ископаемых / К. Г. Руденко, А. В. Калмыков. — М. : Недра, 1987. — 264 с.
8. **Овчинников, А. А.** Исследование процесса улавливания твердых частиц в высокоэффективных скрубберах вихревого типа / А. А. Овчинников, Н. З. Дубкова, М. Г. Кузнецов [и др.]. — Казань : КГТУ, 2009. — 77 с.
9. **Пат. 2036311 Российская Федерация.** Способ проветривания карьеров / Батманов Ю. К., Зельвянский М. Ш., Позняков Г. Г., Саратикянц С. А., Худяков А. Н. — № 4888496/03 ; заявл. 05.12.90 ; опубл. 27.05.95.

Суммарная потеря напора  $\Delta P_{\text{в}}$ , создаваемого во всасывающей линии ТСВП, определяется как сумма потерь давления на отдельных участках:

$$\Delta P_{\text{в}} = \Delta P_{\text{т}} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{ф}},$$

где  $\Delta P_{\text{т}}$  — потери давления во всасывающем гибком трубопроводе;  $\Delta P_{\text{с}}$  — потеря динамического напора транспортирующего воздуха в заборном сопле;  $\Delta P_{\text{ф}}$  — потери давления в фильтре очистки запыленного воздуха.

При создании всасывающей линии ТСВП подробный расчет суммарной потери напора можно выполнить по известной методике [1, 16, 17]. Таким образом, созданное ТСВП решает экологические и производственные задачи. Экологическая задача — охрана окружающей среды от вредных примесей, которые содержит производственная пыль, производственная задача — охрана труда рабочих. Технический результат — расширение области использования ТСВП для сбора пылеобразующего сыпучего материала с поверхности грунта, который является добавочным ценным сырьем для промышленных предприятий.

10. **Пат. № 2121260 Российская Федерация.** Электрический способ вентиляции карьеров и воздушной массы в прилегающих к ним районах / Уйбо В. И. — № 96110119 ; заявл. 21.05.96 ; опубл. 10.11.98.
11. Методики расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). — Люберцы : ННЦ ИГД им. А. А. Скочинского, 1999. — 47 с.
12. **Заявка 2015157171 Российская Федерация.** Транспортное средство высокой проходимости / Давыдов С. Я., Белов С. В., Черемисина Т. Н. ; заявл. 29.12.2015.
13. **Абрамович, Г. Н.** Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 2 / Г. Н. Абрамович. — М. : Наука, 1991. — 304 с.
14. **Вавилов, И. С.** Летательный аппарат на воздушной подушке: проблемы остойчивости / И. С. Вавилов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2009. — № 2 (80). — С. 133–136 (<http://cyberleninka.ru/article/n/letatelnyy-apparat-na-vozdushnoy-podushke-problemy-ostoychivosti>).
15. **Носырев, Б. А.** Вентиляторные установки шахт и метрополитенов : уч. пособие / Б. А. Носырев, С. В. Белов. — Екатеринбург : Изд-во УГГГА, 2000. — 278 с.
16. **Евтюков, С. А.** Пневмотранспортное оборудование в строительной индустрии и строительстве / С. А. Евтюков, М. М. Шапунов ; под общей ред. С. А. Евтюкова. — СПб. : Издательство ДНК, 2005. — 360 с.
17. **Малевиц, И. П.** Транспортировка и складирование порошкообразных строительных материалов / И. П. Малевиц, В. С. Серяков, А. В. Мишин. — М. : Стройиздат, 1984. — 184 с. ■

Получено 14.01.16  
© С. Я. Давыдов, С. В. Белов,  
Т. Н. Черемисина, 2016 г.