

Д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), д. т. н. Н. П. Косарев, д. т. н. Н. Г. Валиев

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»,
Екатеринбург, Россия

УДК 621.867.8

ПНЕВМОПОДЪЕМНИК СО СВОБОДНЫМ ИСТЕЧЕНИЕМ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА С ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ РАБОТЫ

Дано описание крутонаклонного пневмоподъемника с каскадным движением материалов для подачи глиноземной пыли от электрофильтров до приемного бачка вращающейся обжиговой печи цеха кальцинации для ОАО «БАЗ-СУАЛ». Предложены новое устройство для непрерывного подъема сыпучих материалов, а также зависимости определения технических параметров пневмоподъемника.

Ключевые слова: пневмоподъемник, диспергирующие решетки, диаметр транспортной трубы, кипящий слой, сепарационное пространство, газовые пузыри, расходная концентрация.

Для ОАО «БАЗ-СУАЛ» был смонтирован крутонаклонный пневмоподъемник с каскадным движением материалов для подачи глиноземной пыли от электрофильтров до приемного бачка вращающейся обжиговой печи цеха кальцинации (рис. 1) [1–7]. Уменьшение скоростей пылегазовых потоков привело к снижению расходов на пылегазоочистку. Подъем насыпного груза осуществлялся с высокой концентрацией в газовой смеси и малыми скоростями, а значит, с малым расходом сжатого газа.

На рис. 2 показан вариант [7] выполнения диспергирующих поперечных решеток в трубопроводе. Решетки 11 и 12 вставок 8 новой разработки выполнены с углом α наклона к горизонту от 4 до 8° по направлению наклона транспортного трубопровода 9. Этот наклон регулируется в пределах $\pm 2^\circ$. Угол α наклона решетки остается неизменным для разных углов β наклона трубопровода от вертикали при перемещении одного и того же материала. Вставки 8 могут быть выполнены из двух частей.

Одна часть вставки выполнена в виде решетки 11, установленной перпендикулярно основному потоку материаловоздушной смеси. Вторая часть вставки — в виде решетки 12, установленной под углом α наклона к горизонту по типу аэрожелоба от 4 до 8° и по направлению наклона трубопровода.

Линия перегиба 13 поперечных вставок гибкая. Под воздействием крепежного элемента 7 решетки 11 и 12 могут передвигаться поперек

трубопровода. В результате этого угол их наклона можно изменять в пределах $\pm 2^\circ$ в зависимости от транспортируемого насыпного груза.

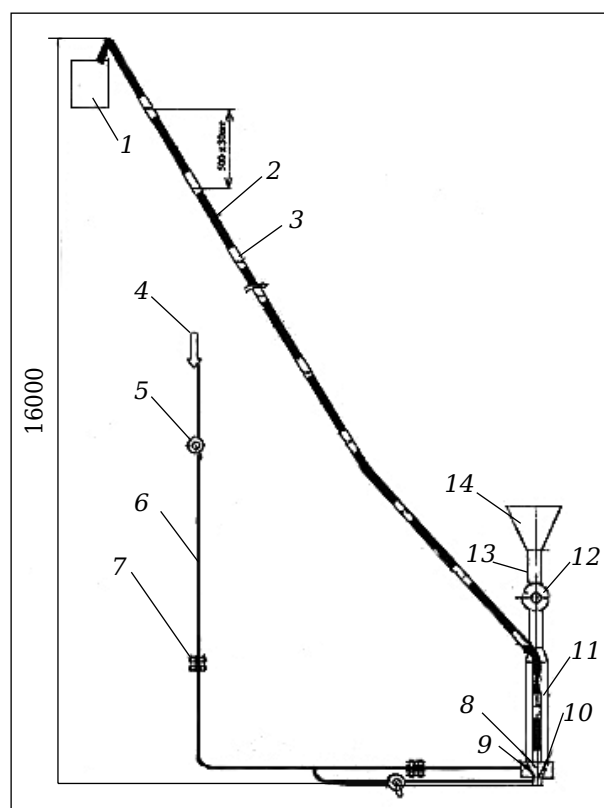


Рис. 1. Пневмоподъемник для ОАО «БАЗ - СУАЛ»: 1 — пылевой бачок; 2 — транспортная труба; 3 — диспергирующая решетка; 4 — подвод сжатого воздуха из коллектора; 5 — вентиль; 6 — трубопровод сжатого воздуха; 7 — диафрагма двойная; 8 — смешивательная камера; 9 — решетка смешивательной камеры; 10 — воздухо-распределительная решетка; 11 — нижняя часть загрузочной трубы; 12 — пылевой шибер; 13 — загрузочная труба; 14 — бункер уловленной пыли



С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

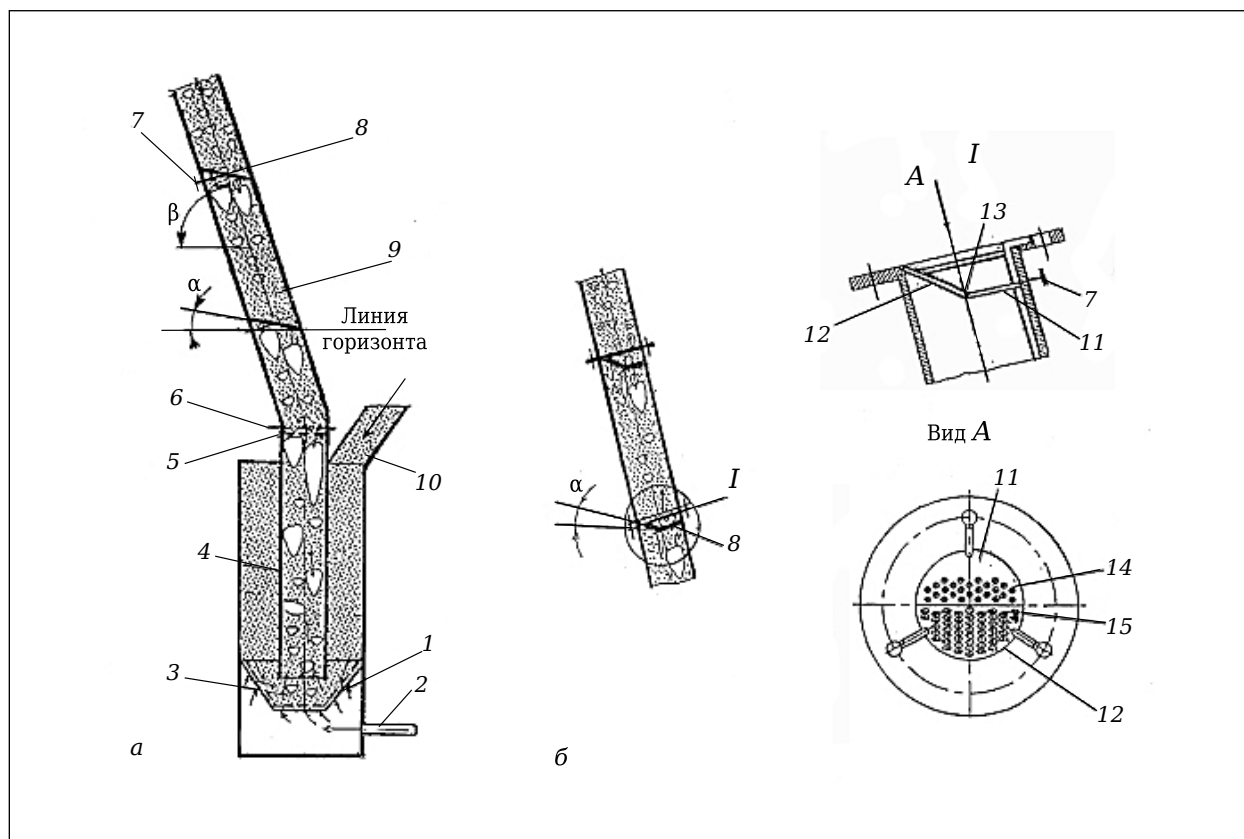


Рис. 2. Наклонный пневмоподъемник: *а* — общий вид установки; *б* — вариант выполнения вставок; 1 — пористая газораспределительная перегородка; 2 — патрубок для подвода сжатого воздуха; 3 — смесительная камера; 10 — загрузочный патрубок; остальные обозначения — в тексте

Принцип подбора отверстий 14 и 15 решеток 11 и 12 аналогичен подбору отверстий решеток 5 и 6 вертикального трубопровода 4.

Частицы сыпного материала (груза) скользят по наклонной плоскости решеток как по аэрожелобу в центральную часть трубопровода, что уменьшает абразивный износ его стенок. Происходит выравнивание материала газовой смеси по всему сечению трубопровода. Уменьшение трения сыпного груза при движении по трубе уменьшает энергозатраты на его перемещение. Высота подъема сыпного груза зависит от перепада давления, количества дополнительных вставок, встроенных в трубопровод, и количества и диаметра отверстий в этих вставках.

Таким образом, наличие решеток, установленных под углом α наклона к горизонту по типу аэрожелоба и по направлению наклона трубопровода, препятствует движению сыпного груза по нижней стенке трубопровода. Это уменьшает вероятность завала трубопровода в процессе его работы, что, в свою очередь, повышает надежность работы устройства. Уменьшение скоростей пылегазовых потоков неизбежно приводит к снижению расходов на пылегазоочистку. Подъем сыпного груза осуществляется с высокой концентрацией в газовой смеси

и малыми скоростями, а значит, с малым расходом сжатого газа. При пневмоподъеме на высоту до 40 м можно достичь массовой концентрации сыпного груза в газе 200–300 кг/кг, скорости газового потока 1–3 м/с, что позволяет значительно уменьшить расход сжатого газа, а значит, снизить энергозатраты на пневмоподъем и пылегазоочистку при работе на пониженных скоростях газового потока.

В известных устройствах важным фактором является наличие расчетной высоты сыпучего материала в вертикальном загрузочном питателе. В результате неравномерной подачи сыпучего материала в вертикальный загрузочный питатель, а затем в смесительную камеру происходит нарушение минимальной высоты H подпора от столба сыпучего материала. В этой ситуации кипящий слой сыпучего материала под действием избыточного давления газа (воздуха) в смесительной камере начинает двигаться не только в вертикальный транспортный трубопровод, но и в вертикальный загрузочный питатель навстречу движущемуся вниз сыпучему материалу. При этом образующиеся в кипящем слое мелкие газовые пузыри сливаются в крупные, которые поднимаются вверх, вытесняя сыпучий материал, движущийся навстречу, из загрузоч-

ного питателя наружу. В результате происходит перерасход сжатого газа, загрязнение рабочих участков пылью и нарушение работы системы непрерывного пневмоподъема материала.

Устройство [8] для непрерывного подъема сыпучих материалов (рис. 3) содержит смесительную камеру 1 с вертикальным транспортным трубопроводом 2. В нижней части смесительной камеры 1 установлены патрубок 3 для подвода сжатого воздуха (газа) и пористая газораспределительная перегородка 4. По высоте транспортного трубопровода 2 рассредоточенно смонтированы поперечные вставки 5 в виде решеток или сеток. Для исключения (или значительного снижения) возможности выброса сыпучего материала из загрузочного питателя (подпитывающей части) 6 вследствие прорыва сжатого воздуха в виде пузырей из смесительной камеры в сторону его открытого участка (см. рис. 3) последний снабжен дополнительным сопротивлением 7 [9]. Дополнительное сопротивление 7 выполнено в виде решетки, которая установлена ниже расчетного верхнего уровня 8 сыпучего материала.

Загрузочный питатель 6 предназначен для выполнения двух функций: обеспечения требуемой производительности по материалу и надежного запирания сжатого воздуха для предотвращения прорыва его из смесительной камеры 1 в загрузочный питатель исходного материала. Для выполнения первой функции необходим выбор надлежащей площади поперечного сечения загрузочного питателя. Для осуществления второй функции конструкция загрузочного питателя 6 должна быть выполнена с максимальной внутренней поверхностью, иметь достаточную высоту, а также должна быть снабжена дополнительным сопротивлением 7.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Сыпучий материал из подпитывающей части 6 непрерывно поступает в смесительную камеру 1. Сжатый воздух (газ) через пористую перегородку 4 подается под слой сыпучего материала. После прохода через пористую перегородку 4 поток газа, воздействуя на сыпучий материал, аэрирует его до псевдооживленного состояния. Под действием избыточного давления газа в смесительной камере 1 и постоянного подпора сыпучего материала, поступающего из вертикального загрузочного питателя (подпитывающей части) 6, псевдооживленный материал подается в трубопровод 2. Высота подъема материала зависит от перепада давления, количества вставок 5, встроенных в трубопровод 4, количества и диаметра отверстий в вставках 5.

В результате неравномерной подачи сыпучего материала в вертикальный загрузочный питатель (подпитывающую часть) 6, а затем в смесительную камеру 1 происходит нарушение минимальной высоты H подпора сыпучего мате-

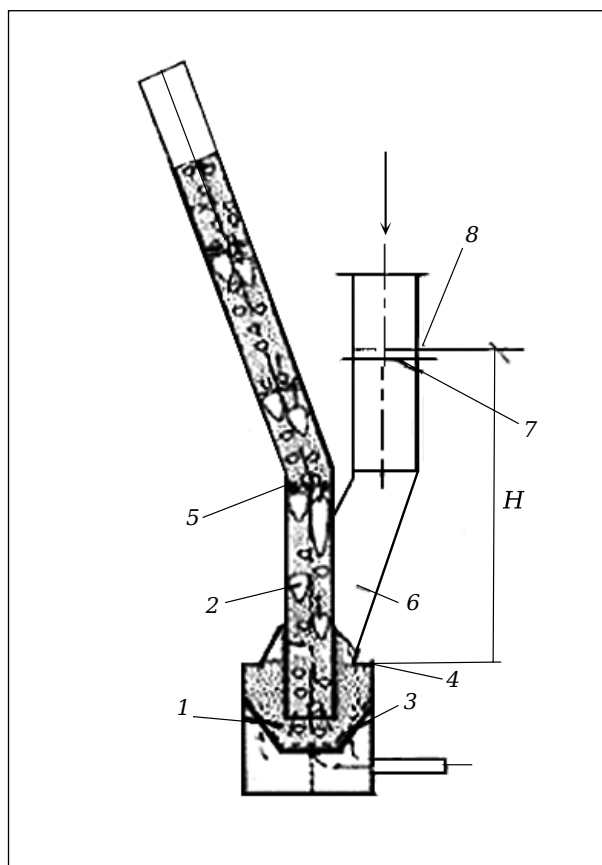


Рис. 3. Схема устройства для непрерывного подъема сыпучих материалов

риала. В этой ситуации кипящий слой сыпучего материала под действием избыточного давления газа в камере 1 начинает двигаться не только в вертикальный транспортный трубопровод 2, но и в вертикальный загрузочный питатель 6 навстречу движущемуся вниз материалу. При этом образующиеся в кипящем слое мелкие газовые пузыри сливаются в крупные, которые поднимаются вверх, вытесняя материал из загрузочного питателя наружу. При достижении заглубленной в сыпучий материал поперечной вставки 7 газовые пузыри гасятся, поэтому выброса сыпучего материала из загрузочного питателя не происходит.

Установлено, что даже слой материала незначительной высоты (1 м) в загрузочном питателе подъемника со свободным истечением может выдерживать высокое давление газа (до 0,05 МПа), что позволяет эксплуатировать подъемник без герметизации питателя (подпитывающей части).

Таким образом, транспортирование осуществляется стабильно, с малым расходом воздуха и без выбросов сыпучего материала в окружающую среду.

При нежелательном уносе частиц материала в верхнем сечении скорость газа для наимень-

ших частиц будет соответствовать порозности $\varepsilon < 1$. Высота h кипящего слоя с его порозностью ε определяется соотношением

$$h = h_0(1 - \varepsilon_0)/(1 - \varepsilon), \quad (1)$$

где h_0 — высота неподвижного (фильтрующего) слоя; ε_0 — порозность неподвижного слоя частиц насыпного груза.

Руководствуясь гидродинамическим состоянием кипящего слоя, необходимо соблюдать условие

$$h \geq kh_{\text{ст}}, \quad (2)$$

где $k = 3$ при незначительном расширении слоя ($\varepsilon = 0,55$); $k = 4$ при большом расширении слоя.

Высота $h_{\text{ст}}$ гидродинамической стабилизации газовых струй, вырывающихся из отверстий распределительной решетки, может быть принята (для частиц размером ~ 1 мм и при незначительном расширении слоя)

$$h_{\text{ст}} \approx 20d_0, \quad (3)$$

где d_0 — диаметр отверстий в решетке,

$$h \geq 3 \cdot 20 \cdot 5 \geq 300 \text{ мм.}$$

Высоту сепарационного пространства $h_{\text{с.п}}$ установки принимают

$$h_{\text{с.п}} = (3,5 \div 4,5)h \approx 3,5 \cdot 300 \approx 1050 \text{ мм.}$$

Высоту сепарационного пространства можно определить по графику, представленному на рис. 4 [10]. По скорости газа в свободном сече-

нии аппарата и его диаметру определяется отношение $H_{\text{с.п}}/D$.

Соппротивление аппарата кипящего слоя может быть рассчитано по уравнению

$$\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_c + \Delta P_{\text{м.с}}, \quad (4)$$

где ΔP_p — сопротивление распределительной решетки,

$$\Delta P_p = \xi \rho_c v^2 / 2, \quad (5)$$

ξ — коэффициент сопротивления отверстий распределительной решетки, $\xi = 1,5$; ρ_c — плотность среды, кг/м^3 ; v — скорость газа в отверстиях решетки, м/с ; ΔP_c — сопротивление кипящего слоя,

$$\Delta P_c = h(1 - \varepsilon)(\rho_m - \rho_c)g; \quad (6)$$

$\Delta P_{\text{м.с}}$ — потери давления в местах сопротивления (патрубки, внезапные сужения, расширения и повороты), Н/м^2 ; ρ_m — плотность материала, кг/м^3 .

Распределительные решетки чаще всего выполняются из перфорированных листов или набора колосников. Беспровальные решетки делают из сдвоенных листов, оси отверстий которых смещены относительно друг друга. Свободное сечение отверстий f_c составляет обычно $0,02\text{--}0,1$.

Явление уноса из псевдооживленного слоя достаточно подробно рассмотрено в работах [3, 11]. Зависимость массового расхода частиц G от высоты надслоевой зоны имеет вид:

$$G = G_0 \exp\left(-K_{\text{ск}} \frac{H_{\text{н}}}{v_{\text{г}}}\right), \quad (7)$$

где G_0 — массовый расход частиц на поверхности кипящего слоя, кг/с ; $K_{\text{ск}}$ — константа скорости, с^{-1} ; $H_{\text{н}}$ — высота надслоевой зоны, м ; $v_{\text{г}}$ — скорость газовой среды, м/с .

$$G_0 = F v_{\text{г}} B \exp\left(-\frac{b}{v_{\text{г}}}\right), \quad (8)$$

где F — площадь поперечного сечения транспортной трубы, м^2 ; B — параметр для каждого диаметра трубы; b — константа, м/с . Для расчета параметра B нами разработана аппроксимация с адекватностью 99 %, которая имеет вид [3]:

$$B = 851,9D_{\text{т}} - 1052,1D_{\text{т}}^2 - 479,8D_{\text{т}} \ln(1,16 + D_{\text{т}}), \quad (9)$$

где $D_{\text{т}}$ — внутренний диаметр трубы, м . Для определения константы b имеем зависимость [11]:

$$b = 886 (10\rho_{\text{эф}})^{0,5} d_{\text{ч}}, \quad (10)$$

где $\rho_{\text{эф}}$ — эффективная плотность дисперсной фазы, кг/м^3 ; $d_{\text{ч}}$ — размер частиц, м . При $G_0/G = 50$ для высоты минимального уноса $H_{\text{мин.ун}}$ из зависимости (7) имеем

$$K_{\text{ск}} H_{\text{мин.ун}} = -v_{\text{г}} \ln(1/50). \quad (11)$$

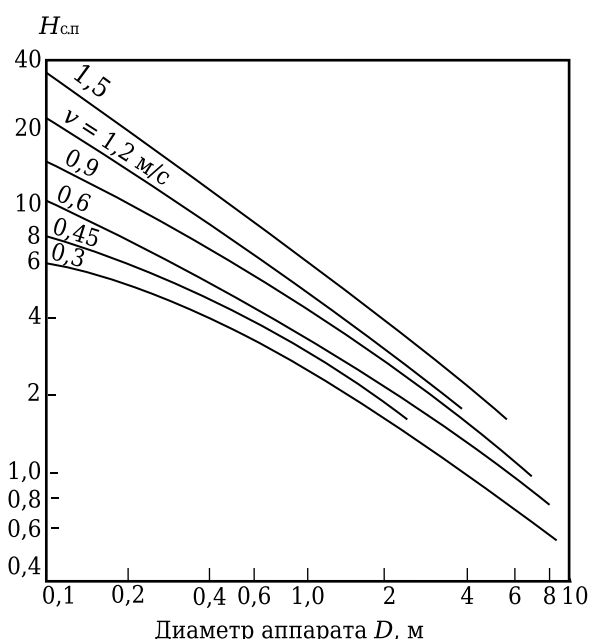


Рис. 4. График для определения высоты сепарационного пространства

Для гарантированной работы пневмоподъемника, работающего в режиме уноса частиц из псевдоожиженного слоя, необходимо, чтобы на высоте надслоевой зоны $H_{\text{мин.ун}}$ была обеспечена заданная производительность по твердой фазе.

На базе зависимостей (8)–(11) для различных значений скоростей газовой среды можно рассчитать массовый расход твердой фазы на высоте надслоевой зоны, равной высоте минимального уноса. Результаты данного расчета представлены в работе [3], в которой указано, что при скорости газа $v_r = 1,069$ м/с массовый расход дисперсной фазы на высоте минимального уноса равен заданной производительности по материалу 1300 кг/ч.

Для определения диаметра транспортной трубы воспользуемся зависимостью расходной концентрации μ груза от параметра M в режиме пневмотранспорта [3]:

$$\mu = 0,001106 \cdot 1,845^{2,25 \ln(M)} - 9M^{0,8}, \quad (12)$$

где M — режимный параметр, $M = v_r^2 \cdot 10^6 / (g d_{\text{ч}} \rho_{\text{нас}})$, см⁶/г²; $\rho_{\text{нас}}$ — насыпная плотность материала, кг/м³.

Для скорости газового потока $v_r = 1$ м/с, среднего размера частиц $d_{\text{ч}} = 10$ мкм и плотности $\rho_{\text{нас}} = 1200$ кг/м³ параметр $M = 7078,94$ см⁶/г². Соответственно, расходная концентрация μ согласно уравнению (12) равна 221,21 кг/кг. Отсюда находим внутренний диаметр транспортной трубы:

$$D_r = 1000 \sqrt{\frac{4G}{\pi \mu v_r \rho_r}} = 46 \text{ мм.}$$

При производительности по материалу 1300 кг/ч принимаем внутренний диаметр транспортной трубы $D_r = 50$ мм [12].

Библиографический список

1. Давыдов, С. Я. Закономерности пневмоподъема псевдоожиженного материала / С. Я. Давыдов, С. Н. Сычев // Новые огнеупоры. — 2011. — № 3. — С. 33, 34.
2. Давыдов, С. Я. Особенности транспорта мелкодисперсных материалов / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, А. В. Катаев // Новые огнеупоры. — 2002. — № 3. — С. 59, 60.
3. Выбор оборудования для перемещения и складирования глиноземной пыли и разработка технологии ее утилизации. Разработка принципиальной схемы транспорта пыли. Разработка и испытание бункерного устройства (заключительный). Обоснование целесообразности использования глиноземной пыли в производстве (промежуточный): отчет о НИР; рук. работы С. Я. Давыдов. — Екатеринбург, 2000. — 154 с.
4. Давыдов, С. Я. Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.
5. Давыдов, С. Я. Особенности транспортабельности мелкодисперсных материалов / С. Я. Давыдов, А. В. Катаев, Г. Э. Вебер // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. докл. международной научно-технической конференции. Чтения памяти В. Р. Кубачека. — Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 2002. — С. 99–110.
6. Давыдов, С. Я. Закономерности пневмоподъема псевдоожиженного материала / С. Я. Давыдов, С. Н. Сычев // Новые огнеупоры. — 2011. — № 3. — С. 33, 34.
7. Пат. 2294886 РФ. Устройство для подъема сыпучих материалов с повышенной концентрацией в газовой смеси / Давыдов С. Я. — № 2005107861; заявл. 21.03.05; опубл. 10.03.07, Бюл. № 7.
8. Пат. 2194661 РФ. Устройство для подъема сыпучих материалов с повышенной концентрацией в газовой смеси / Давыдов С. Я., Рукомойкин А. А., Пономарев А. В. — № 2000118011; заявл. 06.07.00; опубл. 20.12.02, Бюл. № 35.
9. Пат. на полезную модель 138223 РФ. Устройство для непрерывного подъема сыпучих материалов / Давыдов С. Я., Косарев Н. П., Вальев Н. Г. — № 2013139816/11; заявл. 27.08.13; опубл. 10.03.14, Бюл. № 7.
10. Разумов, И. М. Псевдоожижение и пневмотранспорт сыпучих материалов / И. М. Разумов. — М.: Химия, 1964. — 161 с.
11. Кунин, Д. Промышленное псевдоожижение / Д. Кунин, О. С. Левенишпил; пер. с англ.; под ред. М. Г. Слинько и Г. С. Яблонского. — М.: Химия, 1976. — 448 с.
12. Давыдов, С. Я. Использование кипящего слоя для энергосберегающего пневмоподъема мелкодисперсной пыли / С. Я. Давыдов // Новые огнеупоры. — 2012. — № 9. — С. 17–22.

Davydov, S. Ya. Use of a fluidized bed for the energy-efficient pneumatic transport of fine dust / S. Ya. Davydov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 53, № 5. — P. 292–297. ■

Получено 24.12.13

© С. Я. Давыдов, Н. П. Косарев,
Н. Г. Валиев, 2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



10-я международная выставка-конференция «Minerals, Metals, Metallurgy & Materials» — MMMM-2014

4–7 сентября 2014 г.

г. Нью-Дели, Индия

<http://ural-cci.ru/activities/>