

УДК 629.1

© С. А. Евтюков, д-р техн. наук, профессор
© А. А. Шиманова, канд. техн. наук, ст. преподаватель
© В. Н. Горшков, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: s.a.evt@mail.ru, sommery@ya.ru

© S. A. Evtyukov, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. A. Shimanova, PhD in Sci. Tech., senior teacher
© V. N. Gorshkov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint-Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: s.a.evt@mail.ru, sommery@ya.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПНЕВОТРАНСПОРТА СЛЕЖАВШИХСЯ СЫПУЧИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE PROCESS OF PNEUMATIC TRANSPORTATION OF STICKY GRANULAR MATERIALS

Описан процесс пневмотранспорта слежавшихся сыпучих строительных материалов пневмоустановкой с разработанным при участии авторов рабочим органом. Выделены ключевые этапы процесса пневмотранспорта слежавшихся сыпучих строительных материалов при работе пневмоустановки. Систематизированы данные, полученные при проведении экспериментов по взаимодействию струи сжатого воздуха с различными слежавшимися строительными материалами. Представлены оптимальные характеристики процесса пневматического разрыхления при всасывании материала заборным устройством.

Ключевые слова: пневмотранспорт, слежавшиеся сыпучие строительные материалы, пневматическое разрыхление.

The paper describes the process of pneumatic conveying of sticky granular materials by means of pneumatic conveying equipment with a suction-intake device designed with the authors' participation. The key stages of the process of pneumatic conveying of sticky granular construction materials are highlighted. The data obtained in experiments on interaction of the jet of compressed air with various sticky dry materials are systemized. The optimal process parameters of pneumatic loosening at the material sampling suction with suction-intake device are presented.

Keywords: pneumatic conveying, sticky granular construction materials, pneumatic loosening.

Ввиду стремительного развития строительной индустрии необходимо совершенствовать и повышать надежность средств, участвующих в транспортировании и механизации погрузочно-разгрузочных работ сыпучих строительных материалов (ССМ).

Пневматическое транспортирование сыпучих материалов благодаря своим преимуществам, а именно: высоким показателям экологичности, чистоты, удобству использования в загруженных пространствах, нашло серьезное применение в промышленности и, в частности, в строительной индустрии [1].

Несмотря на явные преимущества пневмотранспортного оборудования, более масштабное его применение в различных транспортных схемах сдерживается рядом рациональных причин.

Во-первых, основным недостатком таких систем является сравнительно высокий расход электроэнергии на единицу массы транспортируемого материала. В современных рыночных условиях это значимый фактор для российских предприятий. Во-вторых, отсутствие целостного научного обоснования процесса пневмотранспорта, а следовательно, отсутствие единой методики расчета и конструирования пневматического оборудования, что объясняется неоднозначностью физических явлений, протекающих в пневмосистемах при транспортировании материалов (турбулентность воздушных потоков, области течения вблизи стенок трубопровода, которые сами по себе еще мало изучены). В-третьих, слабая производительность при работе со слежавшимися ССМ [6].

Все ССМ, за исключением нескольких, являются слеживающимися материалами, вследствие чего при хранении и транспортировке ССМ зачастую не удается избежать их слеживания [3]. Несмотря на то что ССМ часто встречаются в слежавшемся состоянии, его особенности не учитываются ни в методиках расчета пневмотранспортного оборудования, ни при организации погрузо-разгрузочных работ материала в таком состоянии. За время использования пневматического транспорта разработаны и освоены на практике разные способы и конструкции, позволяющие повысить эффективность пневмотранспортирования. Для оптимизации забора слежавшихся ССМ, уменьшения затрат электроэнергии, повышения качества условий труда операторов, обслуживающих пневмотранспортные комплексы, сотрудниками кафедры наземных транспортно-технологических машин СПбГАСУ при участии авторов на основании полученных ранее результатов исследования процесса пневморазрыхления слежавшихся ССМ разрабатывается модернизация конструкции заборного устройства всасывающей пневмотранспортной установки (ПТУ), представленного на рис. 1 [6]. Одной из задач модернизации является определение оптимального угла наклона разрушающего сопла к оси всасывающего наконечника, что должно обеспечить максимальное разрушение слоя уплотненного материала.

Слежавшийся ССМ при заборе всасывающей ПТУ с представленным выше устройством проходит три стадии:

- пневматическое разрыхление слежавшегося ССМ;
- всасывание разрыхленного и насыщенного воздухом сыпучего строительного материала в трубопровод;
- транспортирование аэросмеси в выбранном режиме движения по трубопроводу.

Повысив эффективность работы хотя бы на одном этапе, повысим эффективность процесса в целом. Необходимо провести экспериментальные исследования процесса пневморазрыхления уплотненного материала и установить оптимальный угол наклона разрушающего сопла.

На первом этапе рабочего процесса ПТУ материал разрыхляется под действием струй сжатого воздуха, формируемых так назы-

ваемыми разрушающими соплами заборного устройства.

Установлено, что на эффективность процесса струйного разрушения оказывают влияние различные факторы.

На основе анализа этих факторов были выявлены параметры, характеризующие первую стадию процесса пневмотранспорта слежавшихся ССМ (рис. 2) [6], а именно: коэффициент сопротивления слежавшегося сыпучего строительного материала смятию, расстояние от среза сопла до поверхности разрушения, скорость перемещения сопла, давление воздуха перед насадком. Добавим сюда угол наклона разрыхляющего сопла к оси всасывающего наконечника заборного устройства.

Таким образом получим, что производительность (ключевой показатель, характеризующий эффективность любого процесса) процесса

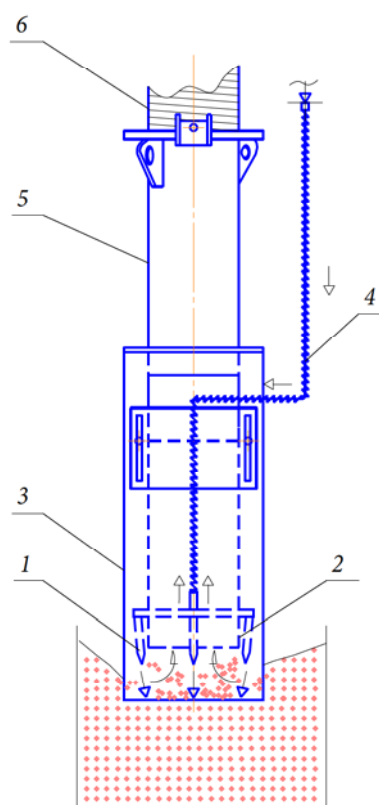


Рис. 1. Модернизируемое заборное устройство всасывающей ПТУ: 1 — разрыхляющие сопла, установленные под углом к оси всасывающего наконечника; 2 — всасывающий наконечник; 3 — защитный кожух; 4 — нагнетательный трубопровод; 5 — корпус заборного сопла; 6 — всасывающий трубопровод

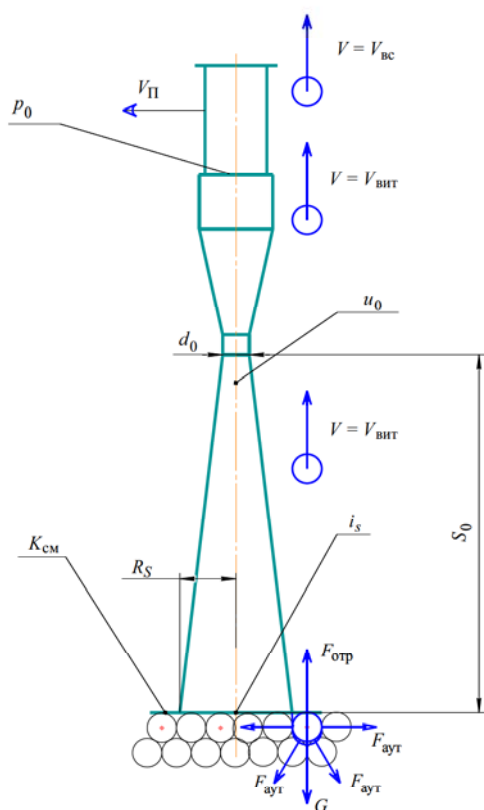


Рис. 2. Схема взаимодействия струи сжатого воздуха, формируемой разрыхляющим соплом, со слежавшимся ССМ: u_0 — скорость истечения воздуха из насадки; i_s — удельный импульс силы на фронте разрушения; R_S — радиус струи; V — скорость перемещения частицы материала; $V_{виг}$ — скорость витания частицы материала; $V_{вс}$ — скорость всасывания частицы материала, G — сила тяжести частицы; $F_{аут}$ — силы аутогезионного взаимодействия; $F_{отр}$ — сила отрыва частицы от слоя

пневматического разрыхления слежавшегося ССМ есть функция

$$Q = f(K_{СМ}, S_0, d_0, V_{П}, p_0, \gamma), \quad (1)$$

где $K_{СМ}$ — коэффициент сопротивления слежавшегося сыпучего строительного материала смятию; S_0 — расстояние от среза сопла до поверхности разрушения; d_0 — диаметр выходного

отверстия насадка сопла; $V_{П}$ — скорость перемещения сопла; p_0 — давление воздуха перед насадком; γ — угол наклона разрыхляющего сопла к оси всасывающего наконечника заборного устройства.

Ввиду сложности описания данного процесса теоретически необходимо исследовать его экспериментально и дополнить полученные ранее результаты оптимальных значений параметров первого этапа работы ПТУ, представленные в таблице.

Проведенные исследования позволят обосновать оптимальные параметры процесса пневматического транспортирования слежавшихся ССМ для перечня наиболее распространенных сыпучих строительных материалов.

Основными параметрами, характеризующими вторую стадию процесса пневмотранспорта при работе всасывающей ПТУ с заборным устройством, являются скорость всасывания, радиус устья всасывающего наконечника, радиус зоны активного всасывания. Эти параметры определяются по известным формулам [3].

Концентрация смеси μ в зоне всасывания определяется как отношение объема материала, поднятого в воздух струями воздуха, к объему воздуха, затрачиваемого на всасывание этого количества материала. Объем материала, поднятого в воздух, обусловлен параметрами процесса разрыхления. Потребность в этом объеме определяется производительностью и техническими возможностями пневмотранспортной установки, с которой применяется всасывающее заборное устройство [9].

Третья стадия, заключающаяся в транспортировании материаловоздушной смеси по трубопроводу, подробно изложена такими авторами, как М. М. Шапунов, В. С. Серяков, И. П. Малевич, М. П. Калинушкин, Р. Л. Зенков и др. [2, 4, 6, 7, 8].

Оптимальные параметры процесса разрыхления слежавшихся ССМ

Материал	p_0 , МПа	q , м ³ /с	R_0 , мм	S_0 , мм	Z, шт.	$N_{раз}$, кВт
Известь гашеная	0,102	0,007	5	42	4	0,8
Песок	0,105	0,023	5	42	4	3
Зола уноса	0,11	0,035	5	42	4	4,6
Гипс строительный	0,12	0,048	5	42	4	6,7
Цемент	0,15	0,059	5	42	4	9
Сухая строительная смесь	0,2	0,063	5	42	4	9,9

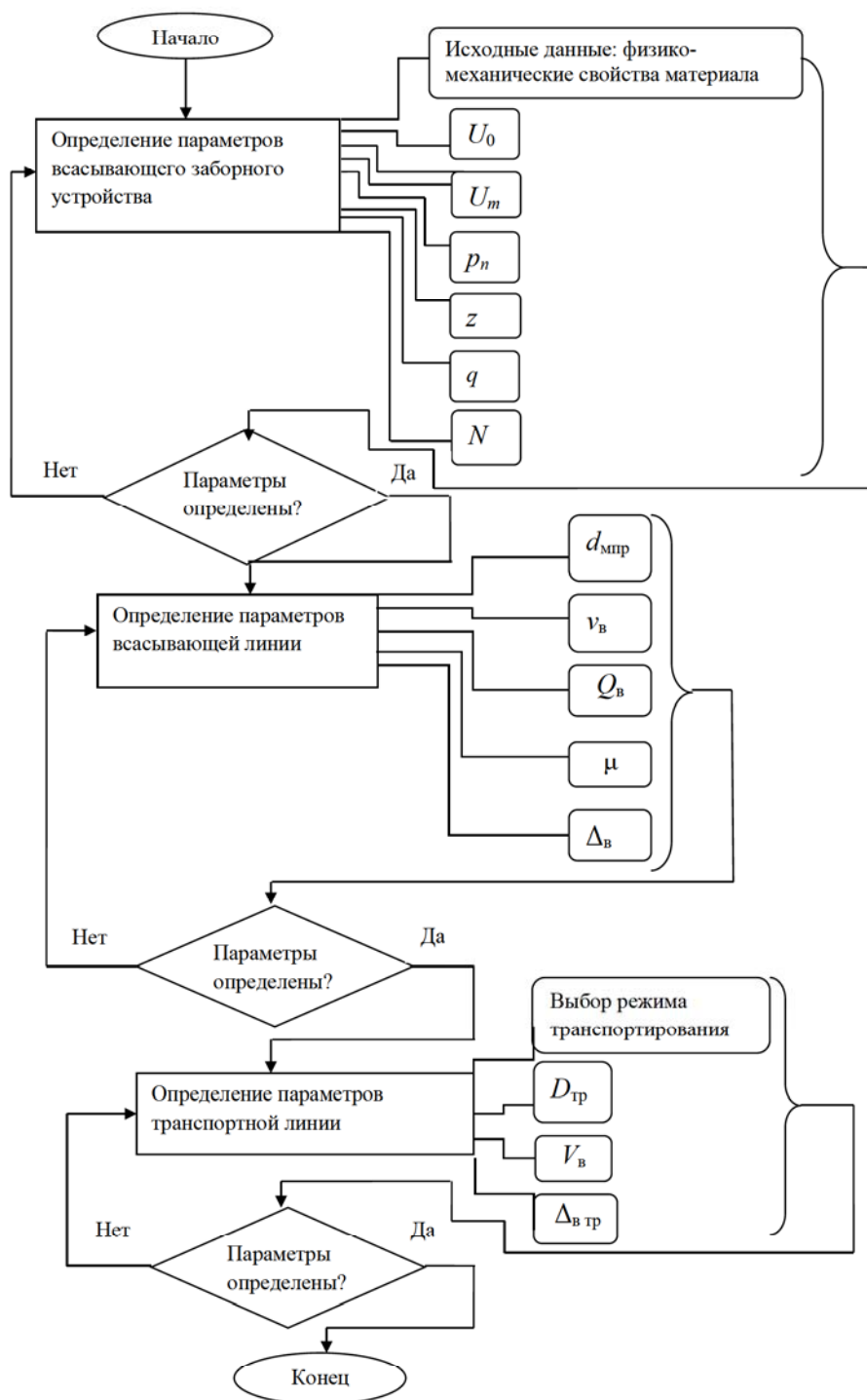


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения параметров процесса пневмотранспорта слежавшихся ССМ: U_0 — скорость рабочего воздуха на выходе из сопла, м/с; U_m — скорость рабочего воздуха на фронте разрушения, м/с; p_n — рабочее давление насоса, МПа; z — число разрушающих сопел, шт.; q — расход воздуха, затрачиваемого на разрыхление материала, м³/с; N — мощность, затрачиваемая на разрыхление материала, кВт; $d_{мпр}$ — диаметр материалопровода, м; $v_в$ — скорость воздуха во всасывающей линии, м/с; $Q_в$ — расход воздуха, м/с; μ — концентрация смеси, кг_м/кг_в; $\Delta_в$ — потери давления в трубопроводе, МПа; $D_{тр}$ — диаметр трубопровода транспортной линии, м; $V_в$ — скорость аэросмеси в транспортной линии, м/с; $\Delta_{в тр}$ — потери давления в транспортной линии, МПа

Если первые два этапа рабочего процесса ПТУ будут выполняться корректно, то третий этап будет соответствовать стандартному процессу пневмотранспортирования аэросмеси в выбранном режиме [9].

На основании вышеизложенного можно сформулировать алгоритм инженерного расчета процесса пневмотранспорта слежавшихся ССМ пневмотранспортной установкой с разработанным всасывающим заборным устройством. Согласно рабочему процессу ПТУ методику расчета можно представить в виде алгоритма (рис. 3).

На основании предложенного алгоритма необходимо разработать программу для автоматизации расчета основных параметров процесса пневмотранспорта слежавшихся ССМ. Методика расчета изложена в работе [9].

Библиографический список

1. Евтюков С. А., Шапунов М. М. Пневмотранспортное оборудование в строительной индустрии и строительстве. СПб.: ООО «Издательство ДНК», 2005. 360 с.
2. Зарницына Э. Г., Терехова О. Н. Вентиляционные установки и пневмотранспорт. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. 228 с.
3. Зимон Д. А. Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1976. 432 с.
4. Калинушкин М. П., Коппель М. А., Серяков В. С., Шапунов М. М. Пневмотранспортное оборудование: справочник. Л.: Машиностроение, 1986. 286 с.
5. Крамской В. Ф., Чарков С. Т., Квашинин Г. Р., Самойлова М. И., Первозкин А. Ю. Основы расчета пневматического транспорта. Тюмень: ТюмГНГУ, 1999. 106 с.
6. Малевич И. П. Машины и оборудование для пневматического транспортирования цемента на заводах сборного железобетона. М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1982. 44 с.
7. Серяков В. С. Исследование сопротивлений элементов пневмотранспортных цементопроводов с целью уточнения методики расчета: дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 180 с.
8. Шапунов М. М. Исследование и создание пневматических разгрузчиков цемента: дис. ... канд. техн. наук. М., 1980. 171 с.

9. Шиманова А. А. Методика определения параметров заборного устройства для пневмотранспортирования слежавшихся сыпучих строительных материалов: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 124 с.

References

1. Evtyukov S. A., Shapunov M. M. *Pnevмотransportnoe oborudovanie v stroitel'noy industrii i stroitel'stve* [Pneumatic-transportation equipment in the construction industry and construction]. Saint-Petersburg, DNK Publ., 2005, 360 p.
2. Zarnitsyna Eh. G., Terekhova O. N. *Ventilyatsionnye ustanovki i pnevмотransport* [Ventilation equipment and pneumatic transportation]. Barnaul, AltSTU Publ., 2011, 228 p.
3. Zimon D. A. *Adgeziya pyli i poroshkov* [Adhesion of dust and powders]. Moscow, Khimiya Publ., 1976, 432 p.
4. Kalinushkin M. P., Koppel' M. A., Seryakov B. C., Shapunov M. M. *Pnevмотransportnoe oborudovanie. Spravochnik* [Pneumatic transportation equipment. Reference book]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986, 286 p.
5. Kramskoy V. F., et al. *Osnovy rascheta pnevматического transporta* [Basics of pneumatic transport calculation]. Tyumen, Tyumen SIUT Publ., 1999, 106 p.
6. Malevich I. P. *Mashiny i oborudovanie dlya pnevматического transportirovaniya tsementa na zavodakh sbornogo zhelezobetona* [Machines and equipment for pneumatic conveying of cement at the plants producing precast concrete]. Moscow, TsNITEhstroy mash Publ., 1982, 44 p.
7. Seryakov V. S. *Issledovanie soprotivleniy ehlementov pnevмотransportnykh tsementoprovodov s tsel'yu utochneniya metodiki rascheta. Diss. kand. tekhn. nauk* [Research of resistance of elements of pneumatic cement conveying lines for the calculation procedure specification. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1974, 180 p.
8. Shapunov M. M. *Issledovanie i sozdanie pnevматических razgruzchikov tsementa. Diss. kand. tekhn. nauk* [Research and creation of pneumatic cement air-lift unloaders. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1980, 171 p.
9. Shimanova A. A. *Metodika opredeleniya parametrov zabornogo ustroystva dlya pnevмотransportirovaniya slezhavshikhsya sypushikh stroitel'nykh materialov. Diss. kand. tekhn. nauk* [Technique of determining the parameters of the collection device for pneumatic transportation of sticky dry granular construction materials. PhD in Sci. Tech. diss.]. Saint-Petersburg, 2013, 124 p.