

С.А. Евтюков, А.А. Шиманова

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО РАЗРЫХЛЕНИЯ СЛЕЖАВШИХСЯ СЫПУЧИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Введение

Высокие темпы развития строительной отрасли требуют инновационного совершенствования и повышения надежности средств, связанных с транспортировкой и механизацией погрузочно-разгрузочных работ сыпучих строительных материалов (ССМ).

К наиболее прогрессивным видам транспорта, с успехом применяющимся в различных технологических процессах, относится пневматический способ транспортирования ССМ. Однако, его широкое использование сдерживается рядом объективных причин, таких как высокие затраты энергии на его осуществление, низкая производительность при перегрузке слежавшихся ССМ [1].

Все ССМ, за исключением сухой золы, относятся к слеживающимся материалам. Поэтому при хранении и транспортировке ССМ не всегда удается избежать их слеживаемости [2]. Несмотря на то, что слеживаемость часто встречающееся состояние ССМ, его особенности не учитываются ни в технологическом процессе перегрузки материала пневмотранспортными установками (ПТУ), ни в методиках их расчета. За длительный период применения пневмотранспорта разработаны и апробированы на практике различные способы и устройства, позволяющие повысить эффективность пневмотранспортного процесса. Однако, достаточно эффективных устройств для пневмотранспортирования слежавшихся ССМ, функциональные возможности которых позволяли бы без нарушения существующего технологического процесса сочетать наряду с забором материала и разрушение слежавшегося слоя ССМ, и аэрацию, пока не создано. Для интенсификации процесса забора слежавшегося ССМ, уменьшения затрат электроэнергии, улучшения условий труда операторов всасывающих пневмотранспортных систем специалистами кафедры НТТМ СПбГАСУ при участии автора были проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса пневматического разрыхления

слежавшихся ССМ и разработана конструкция всасывающего заборного устройства пневматической транспортной установки (полезная модель № 115340 от 27.04.2012).

Основная часть

Непосредственно на процесс разгрузки ССМ из ёмкости оказывают наибольшее влияние подвижность и связность частиц, слеживаемость материала.

Слеживаемость это свойство сыпучих материалов при длительном хранении или при воздействии вибрации терять подвижность частиц, которое заключается в том, что с течением времени возрастают силы связи частиц между собой (силы аутогезии) и силы связи со стенками емкости (силы адгезии) до значения превышающего силу тяжести частиц [3]:

$$\sum_{i=1}^n F_{CB} \geq m \cdot g \quad (1)$$

где: n - число контактов (точек соприкосновения частиц), m - масса частицы, g - ускорение свободного падения.

Адгезия - явление соединения приведенных в контакт поверхностей (взаимодействие частиц сыпучего материала со стенками емкости). Адгезия обуславливает прилипание и удержание частиц на поверхности. Чем больше адгезия, тем больше прилипают частицы материала к технологическому оборудованию.

Аутогезия - частный случай адгезии - сцепление одинаковых по составу и строению частиц. Понятие аутогезии охватывает все виды и формы связи между частицами независимо от числа и свойств взаимодействующих частиц, природы сил, обуславливающих это взаимодействия, причин и условий их возникновения.

Силу аутогезии можно представить в виде суммы нескольких составляющих: сил Ван-дер-Ваальса и сил когезионного взаимодействия, имеющих молекулярную природу, а также сил электрических, механического сцепления частиц и капиллярных (для влажных сыпучих материалов) [3].

Адгезионное и аутогезионное взаимодействия направлены перпендикулярно площади контакта. Прочность материалов определяется характером контактов между частицами и пропорциональна их числу на единицу площади сечения материала и средней прочности индивидуальных контактов. Число контактов определяется размером частиц и плотностью их упаковки.

Если предположить, что материал монодисперсен, а частицы шарообразной формы одинокого диаметра, то можно представить их расположение в слое следующим образом (рис. 1).

Частицы перемещаются, расстояние между их центрами уменьшаются, число точек контакта увеличивается, сцепление увеличивается, силы ауто-

гезионного взаимодействия увеличиваются. Следовательно, чем больше плотность, тем больше силы аутогезионного взаимодействия.

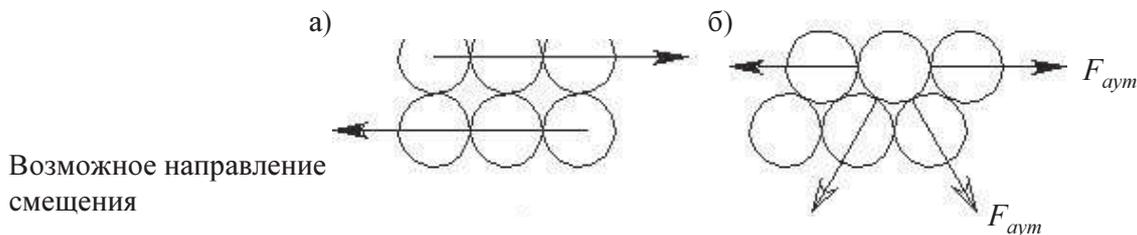


Рис. 1. Упаковка частиц материала в слое: а) в разрыхленном состоянии, б) в слежавшемся состоянии

Аутогезия материалов при технологических процессах может оказывать как положительное, так и отрицательное действие. Так, при процессах гранулирования и прессования ее действие положительно, при хранении и транспортировке порошков - отрицательное, приводящее к:

- слеживаемость,
- прилипаемость к поверхностям оборудования и тары (адгезия),
- уменьшение текучести (сыпучести).

Отсюда - затруднение технологических процессов: смешения, дозировки, транспортировки, перегрузки и т.д.

Уплотнение материалов способствует также изменению некоторых других их свойств. Наибольшее изменение при этом у многих сыпучих материалов претерпевает величина начального сопротивления сдвигу [3].

Анализ производственной информации показал, что при перегрузке слежавшихся ССМ всасывающая способность заборных устройств ПТУ в зависимости от степени уплотненности материала падает до нуля. Следовательно метод интенсификации процесса всасывания слежавшегося сыпучего материала должен быть направлен на ослабление и разрушение структурных связей между частицами сыпучего материала.

На основании анализа способов механического разрыхления слежавшегося ССМ было установлено, что наиболее перспективным способом совершенствования процесса пневмотранспорта слежавшихся ССМ является применение при заборе таких материалов энергии сжатого воздуха для разрушения структурных связей в массиве слежавшегося материала. Другими словами - пневматического разрыхления, оказывающего прямое воздействие на физико-механические свойства слежавшихся ССМ, тем самым улучшающего состояние самого транспортируемого материала, условия всасывания материала в зоне забора и обеспечивающего стабильность работы всасывающей линии. Пневматическое разрыхление посредством разрушения сплошности слежавшегося ССМ струями сжатого воздуха, направленного действия, обеспечивает интенсификацию процесса забора материала. При этом снижаются потери давления в заборном устройстве, стабилизируется разрежение перед насосом, повышаются концентрация аэросмеси и производительность.

На основании проведенного анализа теоретических исследований в области теории струй и исследований взаимодействия свободной затопленной струи с поверхностью было установлено, что процесс разрушения слежавшегося ССМ струей сжатого воздуха, формируемой соплом, характеризуется следующими параметрами (рис. 2):

u_0 — скорость истечения воздуха из насадки;

d_0 — диаметр выходного отверстия насадки;

i_s — удельный импульс силы на фронте разрушения;

R_s — радиус струи;

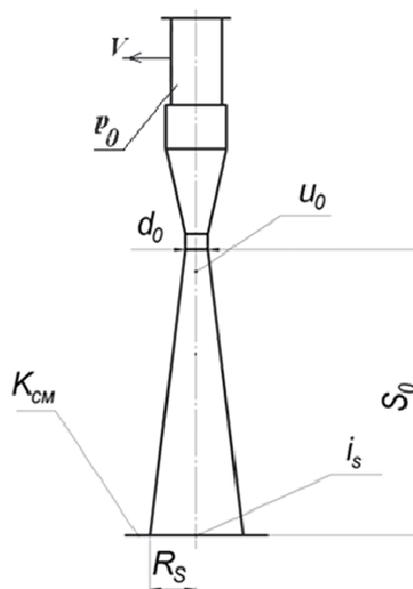
S_0 — расстояние от среза сопла до поверхности разрушения;

K_{CM} — коэффициент сопротивления слежавшегося сыпучего;

строительного материала смятию;

Γ — скорость перемещения сопла;

p_0 — давления воздуха перед насадком.



$$Q = f(K_{CM}, S_0, d_0, \Gamma, p_0)$$

Рис. 2. Схема взаимодействия затопленной струи воздуха, формируемой разрушающим соплом, со слежавшимся сыпучим строительным материалом

Одним из основных показателей, характеризующих эффективность любого процесса, является его производительность. Для определения оптимальных параметров и оценки эффективности процесса пневматического разрыхления слежавшегося сыпучего строительного материала необходимо определить зависимость производительности данного процесса от основных факторов, влияющих на него. На основании проведенных теоретических исследований установили, что производительность, Q , процесса пневматического разрыхления слежавшегося ССМ, есть функция:

$$Q = f(K_{CM}, S_0, d_0, V, p_0) \quad (2)$$

Ввиду сложности описания данного процесса теоретически процесс был исследован экспериментально.

Оптимальные параметры процесса пневматического разрыхления слежавшегося материала на основании опытов определялись с использованием теории планирования эксперимента. Для этого был реализован ЦКП Бокса, который позволяет сократить количество проводимых экспериментов [4]. В качестве ядра плана реализуется линейный ПФЭ $2^4 = 16$, затем к этим точкам

добавляем еще 8 звездных точек и 1 центральную точку, т.о. получаем количество экспериментов равное 25.

Параметром оптимизации (откликом) является производительность Q , м³/с, процесса разрыхления материала (рис. 3) [5].

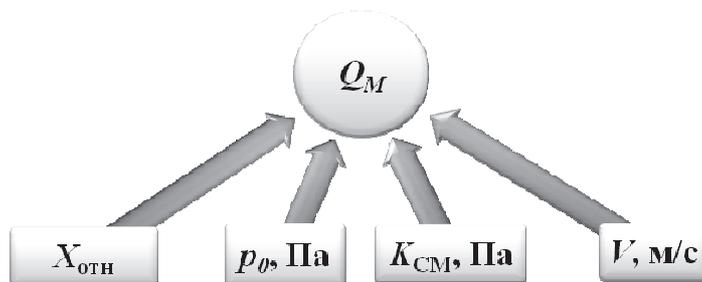


Рис. 3. Зависимость производительности от параметров процесса пневматического разрыхления: $X_{отн}$ - относительное расстояние от среза сопла; p_0 - давление воздуха перед соплом, Па; K_{CM} - коэффициент сопротивления материала смятию, Па; V - скорость перемещения сопла, м/с

По критериям значимости были отобраны 4 основных фактора влияющих на исследуемый процесс. Факторы варьировались на трех уровнях. Значения уровней факторов принимались исходя из характеристик применяемых ПТУ и теоретических исследований процесса. Кодирование факторов представляет таблица 1 [5].

ТАБЛИЦА 1

Кодирование факторов для проведения эксперимента

Характеристики плана	Факторы эксперимента			
	p_0 [10 ⁶ Па]	$X_{отн}$	K_{CM} [10 ⁵ Па]	V [м/с]
Кодовое обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4
Основной уровень (0)	0,2	15	2	0,25
Интервал варьирования	0,1	10	1,5	0,15
Нижний уровень (-)	0,1	5	0,5	0,10
Верхний уровень (+)	0,3	25	3,5	0,40

В эксперименте производительность Q определялась, через размеры траншеи. Размеры траншеи замерялись непосредственно после каждого прохода сопла [5].

Для построения математической модели процесса пневматического разрыхления слежавшегося сыпучего строительного материала разрушающим соплом, формирующим струю сжатого воздуха полученные экспериментальные данные аппроксимировались уравнением регрессии (ыражение (3)) (полиномом второго порядка) [5]:

$$Q = 0,0035 + 0,125(X_1)^2 - 0,0027(X_2)^2 - 0,4907(X_3)^2 - 0,9554(X_4)^2 - 0,00087 X_1 X_2 - 0,00026 X_1 X_3 + 0,00042 X_1 X_4 + 0,00022 X_2 X_3 \quad (3)$$

Оценка адекватности полученного уравнения выполнялась по F-критерию (критерию Фишера). Так как $F_{эксн} = 1,18$, не превышает табличное значение $F_{0,05} = 2,08$, взятое с параметрами $m_1 = 9$, $m_2 = 48$ и доверительной вероятностью 0,98 гипотеза об адекватности описания полученным уравнением регрессии результатов эксперимента подтверждена.

По уравнению регрессии были определены оптимальные значения скорости перемещения сопла и относительного расстояния от сопла до поверхности, соответствующие максимуму производительности:

$$V = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}, X_{опт} = 8,4, Q = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Для наглядности построены зависимости Q процесса разрыхления материала вблизи зоны оптимальной работы от различных факторов (рис. 4).

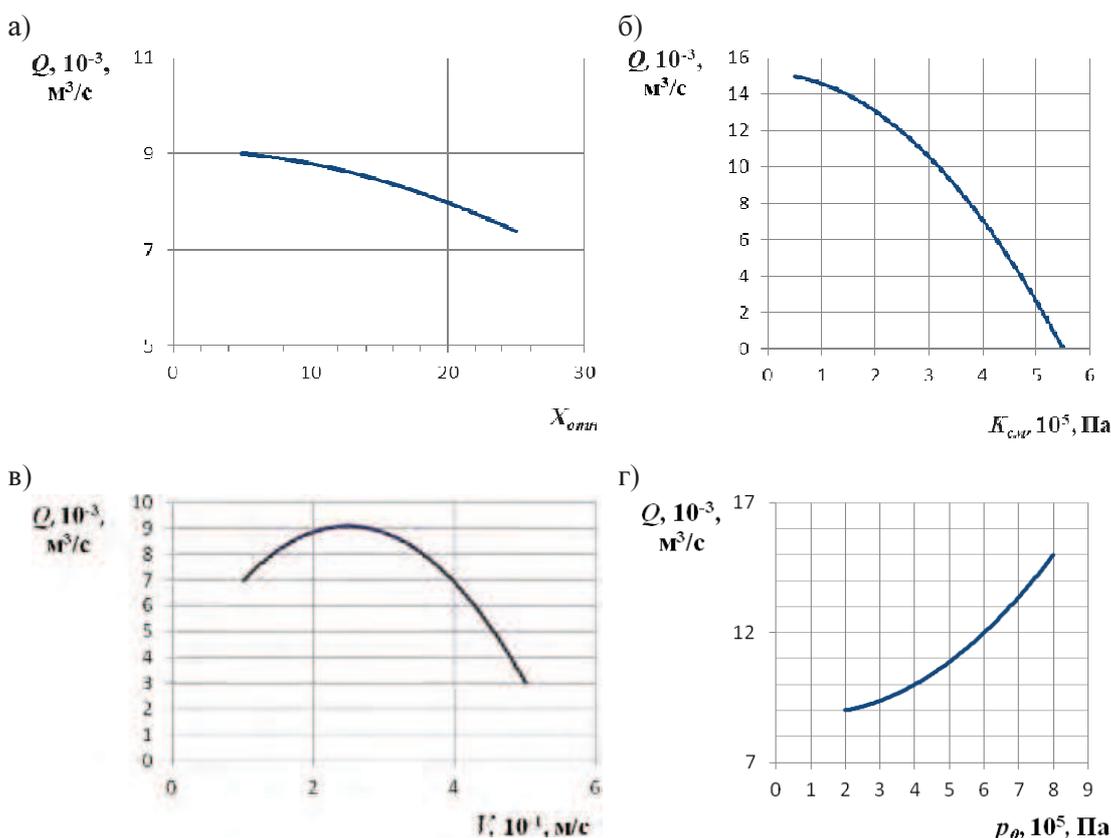


Рис. 3. Графики зависимости производительности процесса $Q, 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с}$, пневматического разрыхления слежавшихся сыпучих строительных материалов от: а) относительного расстояния от среза сопла до поверхности, $X_{опт}$ при $K_{CM} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $p_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $V = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}$; б) коэффициента сопротивления материала смятию, K_{CM} , Па при $p_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $V = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}$; $X_{опт} = 8,4$; в) скорости перемещения сопла V , м/с при $K_{CM} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $p_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $X_{опт} = 8,4$; г) начального давления перед соплом, p_0 , Па при $K_{CM} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $V = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}$; $X_{опт} = 8,4$

Аналогично были определены параметры при др. исходных данных, они представлены в таблице 2 [5].

ТАБЛИЦА 2

Оптимальные параметры процесса разрыхления слежавшихся ССМ с помощью разрушающей системы всасывающего заборного устройства

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

Проведенные исследования позволяют обосновать оптимальные параметры процесса пневматического разрыхления слежавшихся ССМ для перечня материалов наиболее часто транспортируемых пневматическим способом.

На основании всего выше изложенного можно сделать вывод, что эффективная работа заборных сопел без пневморазрыхлителей возможна только при заборе легкообрушающихся, несслежавшихся, неуплотненных сыпучих материалов. При транспортировке и хранении сыпучих строительных материалов за частую не получается избежать их слеживаемости. Забор уплотненных материалов становится возможным при условии механического воздействия заборного сопла на материал. В результате возрастает сопротивление перемещению заборного сопла, снижаются концентрация и производительность. Или при предварительном механическом разрыхлении слежавшегося ССМ, что приводит к потерям энергии, затрачиваемой на разрушение межчастичных связей и разгон, сообщаемый частицам материала при предварительном разрыхлении слежавшегося ССМ специализированным, ручным инструментом.

Эффективность заборного сопла в этих условиях можно существенно повысить пневматическим рыхлением материала. При этом снижаются потери давления в заборном устройстве, повышается концентрация смеси и производительность.

Литература

- [1] Евтюков С.А., Шапунов М.М., Пневмотранспортное оборудование в строительной индустрии и строительстве, ООО «Издательство ДНК», СПб.: 2005, 360 с.
- [2] Евтюков С.А., Шапунов М.М., Справочник по пневмокомплексам и пневмотранспортному оборудованию, ООО «Издательство ДНК», СПб.: 2005, 456 с.

- [3] Зимон Д.А., Адгезия пыли и порошков, Химия, М.: 1976, 432 с.
- [4] Львовский Е.Н., Статистические методы построения эмпирических формул, Высш. Шк., М.: 1988, 240 с.
- [5] Шиманова А.А., Методика определения параметров заборного устройства для пневмотранспортирования слежавшихся сыпучих строительных материалов, Дисс. канд. техн. наук, Санкт-Петербург 2013, 124 с.

Racjonalizacja parametrów pneumatycznego zmniejszenia zagęszczenia materiałów sypkich

Streszczenie

Transport pneumatyczny jest jednym z najbardziej postępowych środków mechanizacji i automatyzacji transportu materiałów sypkich. Jest on stosowany w przemyśle aluminiowym, chemicznym, spożywczym, tekstylnym, budownictwie i innych branżach. Jednak szerokie zastosowanie transportu pneumatycznego jest ograniczone przez niepełne informacje na ten temat. W artykule opisano metody intensyfikacji procesów pneumatycznych sprasowanych materiałów budowlanych luzem i przedstawiono uzasadnienie dla optymalnych parametrów procesu pneumatycznego rozpadu tych materiałów.

Słowa kluczowe: transport pneumatyczny, materiały sypkie

Rationale for the parameters of pneumatic loosening of compacted loose materials

Abstract

Pneumatic transport is one of the most progressive means of mechanization and automation of loose goods transportation. It is used in aluminum, chemical, food, textile, construction and other industries. However, wide use of pneumatic transport is limited by the incomplete information on this subject. This article describes the method of process intensification of pneumatic compacted bulk construction materials and provides the rationale for optimum process parameters for pneumatic disintegration of these materials.

Keywords: pneumatic transport, loose materials