

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ТРАНСПОРТНОМУ ТРУБОПРОВОДУ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОРШНЕВОГО РЕЖИМА ПНЕВМОТРАНСПОРТА

Дроздов Б. С.,

к. т. н., доцент,

Баталов А. А.,

Мочалов В. Н.,

к. х. н.,

ООО «Пневмотранспорт», Москва

Аннотация. ООО «ПНЕВМОТРАНСПОРТ» разработано и запатентовано «Устройство для пневмотранспорта порошкообразных и зернистых материалов из бункеров» №2534667. Устройство работает по принципу поршневого пневмотранспорта. В статье показана возможность транспортировки широкого спектра порошкообразных, зернистых и кусковых материалов органической и неорганической природы, а также продуктов питания в большом диапазоне часовой производительности и расстояния подачи. Разработаны методы адаптации установки к любому оборудованию в различных технологических схемах. Представлены результаты экспериментального определения технологических параметров процесса пневмотранспорта материалов на трех промышленных установках. На основе экспериментальных и расчетных данных предложен метод расчета технологических параметров и их взаимозависимость для установок, работающих с использованием принципа поршневого пневмотранспорта. Приведено сравнение технологических параметров процессов транспортировки различного типа пневмотранспортного оборудования.

Ключевые слова: пневмотранспорт, поршневой и пневмоимпульсный транспорт, пневмотранспорт для сыпучих материалов, проектирование пневмотранспорта, расчет технологических параметров процесса транспортировки, пневмотранспортные системы.

SOME REGULARITIES AND SINGULARITIES OF THE MATERIAL MOVEMENT PROCESS FLOWING IN THE TRANSPORT PIPE-LINE WHEN REALIZING THE PISTON MODE OF THE PNEUMATIC SYSTEMS

Drozdzov B. S.,

Candidate of Technical Sciences, associate professor,

Batalov A. A.,

Mochalov V. N.,

Candidate of chemical sciences,

JSC «Pneumotransport», Moscow

Abstract. «PNEUMATIC TRANSPORT» Co Ltd «Installation for pneumatic transport intended for powder and discrete materials taken from bunkers» №2534667 has been developed and patented. The installation operates applying the principle of piston pneumatic transport.

The possibility to transport a broad spectrum of powder, discrete and lump materials of organic and nonorganic origin, and food products in a wide range of output per hour and delivery distance has been demonstrated in the paper. The adaptation procedures of the installation to any equipment in different flowsheets have been developed. The results of experimental determination of the process variables of the transportation process, realized on three production units are presented here. The computing method of the process variables based on the experimental and calculation data and their interdependence for the units applying the principle of piston pneumatic transport is put forward. Comparison between the process variables of different transportation processes is given in the paper.

Keywords: pneumatic transport, piston and pneumoimpulsive transport, pneumatic transport for loose materials, designing of pneumatic transportation, calculation of the transportation process variables, pneumatic transport systems.

В настоящее время в различных отраслях промышленности используется большое число пневмотранспортных систем, отличающихся широким спектром конструкционных решений







и технологических параметров. Однако работа всех этих систем базируется на одном из шести известных принципов перемещения материала по транспортному трубопроводу.

В таблице 1 представлены качественные характеристики и некоторые технологические параметры режимов потока при пневмотранспорте [1].

материалы по трубопроводам достаточно сложной конфигурации и на значительные расстояния.

Если скорость газа - носителя уменьшается, то при определенном ее значении начинается оседа-

Таблица 1

Качественная картина режима транспортировки	Наименование режима	Скорость м/с		Параметры потока	
		Воздуха V	Материала C	Расходная концентрация смеси M/кг/кг	Потеря давления ΔP МПа/ 100 п.м
	Транспорт во взвешенном состоянии (зернистый, порошковый материал, $l > 1$ мм)	15-30	$(0,7-0,8)V$	10-30	0,01-1,0
	Транспорт в осажденном состоянии ($d < 1$ мм)	5-20	$(0,8-0,9)V$	10-100	0,1-0,3
	Транспорт с осаждением и дюнами ($d < 1$ мм)	5-15	$(0,8-0,9)V$	10-100	0,1-0,5
	Транспорт сплошным потоком (порошковый материал)	3-10	$C=V$	100-500	$>0,5$
	Транспорт в импульсно-поршневом режиме (порошковый материал)	3-10	$C=V$	30-250	0,03-0,5
	Транспорт в поршневом режиме (порошковый, зернистый и кусковой материал 0-15 мм)	20-100	$C=V$	10-250	0,2

Режим транспортировки материала во взвешенном состоянии осуществляется при достаточно высоких скоростях потока. В данном случае все частицы твердого материала находятся во взвешенном состоянии и достаточно равномерно распределены по сечению трубопровода. В этом режиме можно транспортировать порошковые, зернистые и мелкокусковые

частицы на дно трубопровода. При этом основная часть материала движется в придонной части в виде густого облака или подвижного слоя. Дальнейшее снижение скорости потока приводит к образованию на дне трубопровода неподвижного слоя, а материал начинает перемещаться по трубе в виде дюн или поршней. Для осуществления данного режима необ-

ходимо предусмотреть специальную конструкцию транспортного трубопровода. Однако организация такого режима достаточно сложна и он практически не применяется.

Возможна транспортировка материала с большой расходной концентрацией (более 100 кг твердого / кг газа) и при скоростях потока

3 – 10 м / сек. Это, так называемый, транспорт “сплошным потоком” или транспорт “азрированным потоком”. В этом режиме возможна транспортировка порошковых и мелкодисперсных материалов.

Разновидностью транспорта “сплошным потоком” является “импульсно-поршневой” транспорт. Разделение сплошного потока на поршни дает возможность увеличить длину транспортного трубопровода. Причем, чем больше воздушные промежутки между поршнями, тем больше дальность транспортирования. Такой режим организуется специальным образом с применением соответствующего оборудования [1].

Транспорт “сплошным потоком”, наряду с “импульсно – поршневым” транспортом, имеет лучшие технико-экономические показатели по сравнению с другими описанными выше режимами, так как здесь из-за низких скоростей потока и высоких концентраций значительно сокращаются энергозатраты процесса.

Одной из разновидностей импульсно-поршневого транспорта является транспорт в поршневой режиме.

Разработанная ООО “Пневмотранспорт” установка “Пневмопушка” представляет собой пневмоимпульсную систему, работающую по принципу пневмопочты. В этом случае по трубопроводу перемещаются не отдельные, непрерывно формируемые поршни (длиной до 2 м), а один компактный поршень (длиной 1 - 10 м). На рисунке 1 представлена принципиальная схема установки.

Система включает в себя три основных узла: блок загрузки, узел подачи сжатого воздуха и блок управления. Блок загрузки материала устанавливается непосредственно на транспортном трубопроводе, что приводит не только к существенному упроще-

нию конструкции и резкому снижению габаритных размеров, но и к изменению принципа перемещения материала по трубопроводу. Вместо пылевоздушной смеси, содержание твердого материала в которой не превышает 2,5 - 5,0%, по трубопроводу перемещается «поршень» материала, сформированный узлом загрузки, что обуславливает существенное снижение расхода сжатого воздуха. За один цикл работы установки расход воздуха (норм. куб.м) составляет не более 1,0-1,2 объема транспортного трубопровода.

Работа установки циклична и включает в себя следующие этапы:

1. Дисперсный материал через блок загрузки самотеком подается из расходной емкости в транспортный трубопровод и заполняет его начальный участок, формируя «поршень» материала.
2. После заполнения начального участка транспортного трубопровода клапан блока загрузки перекрывает подачу материала и в транспортный трубопровод через электромагнитный клапан подается сжатый воздух.
3. Сжатый воздух начинает перемещать сформированный компактный «поршень» материала, толкая его перед собой, по транспортному трубопроводу, пока он не достигает осадителя циклонного типа, установленного на приемной емкости. После этого цикл повторяется (загрузка материала – подача сжатого воздуха – транспортировка материала). Время цикла работы устанавливается при помощи блока управления. Время цикла варьируется в диапазоне 3 -12 сек., в зависимости от производительности, величины коэффициента трения материала и расстояния его транспортировки. При возникновении аварийной ситуации или запланированной остановке процесса структура уплотненного слоя «поршня» материала не нарушается, что позволяет возобновить процесс пневмотранспорта в штатном режиме.

За последние семь лет накоплен большой опыт использования «Пневмопушки» на предприятиях различных отраслей промышленности по транспор-

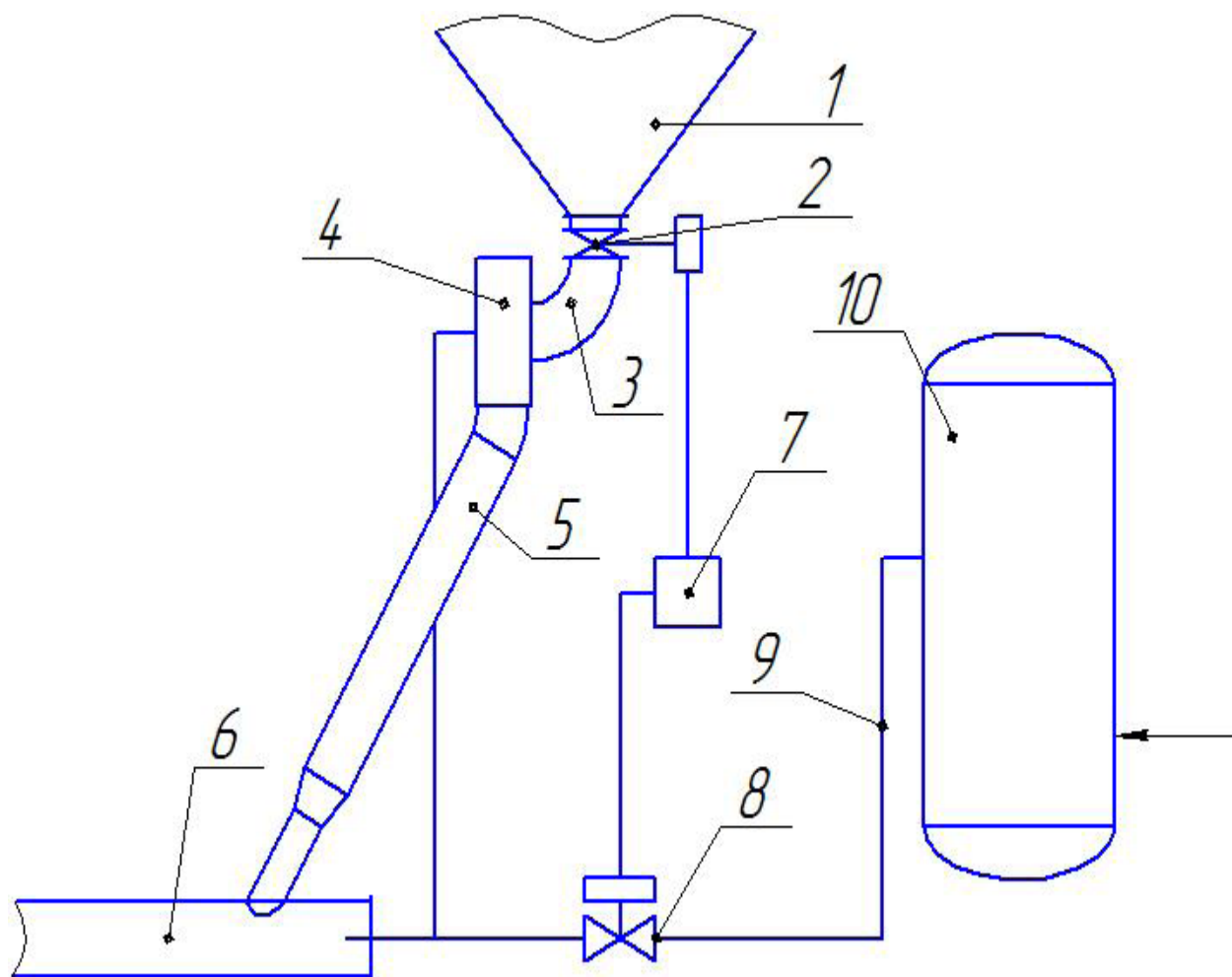


Рис. 1. Схема установки

1- Бункер; 2- Затвор; 3- Загрузочный патрубок; 4- Блок загрузки; 5- Начальный участок; 6- Транспортный трубопровод; 7-Блок управления; 8- Клапан электромагнитный; 9- Подвод сжатого воздуха; 10- Ресивер.

тировке цемента, кварцевого песка, песчано-цементной смеси, сахарного песка, гороха, пищевой глины, молотой и дробленой извести (0-25 мм), мела, гипса, шамота, стеклянного шрота, медьсодержащего порошка, порошкообразной окиси алюминия, гранулированного (2-10 мм) алюмохромового катализатора.

Технические характеристики «Пневмопушки»:

- Гранулометрический диапазон транспортируемых материалов 0 – 15 мм.
- Производительность 0,005 – 100 т/час
- Дальность подачи материала до 400 м.
- Высота подачи материала до 100 м.
- Расход сжатого воздуха на тонну материала (в зависимости от производительности, дальности подачи и высоты подъема) 1 – 7 м³ при рабочем давлении 3 – 6 атм.
- Рабочее давление 3 – 6 атм.
- Габаритные размеры блока загрузки L x B x H = 670 x 500 x 965 мм с двумя отводами. (Возможно более компактное исполнение блока загрузки).
- Масса узла загрузки 120 кг.
- Напряжение 220 в.

- Частота 50 Гц.

Описываемая пневмотранспортная система используется для транспортировки индивидуальных веществ и многокомпонентных смесей широкого гранулометрического состава в различных отраслях промышленности для:

- разгрузки хопперов;
- подачи материалов из технологического оборудования или силоса (бункера) в другие бункеры, силосы, автоматериаловозы, и т.д.
- одновременной подачи нескольких компонентов из отдельных бункеров с использованием пневможелоба оригинальной конструкции и одном блоке загрузки по одному транспортному трубопроводу в технологическое оборудование или при отгрузке в авто- или ж/д транспорт.
- загрузке нескольких накопительных или расходных емкостей с использованием одного транспортного трубопровода.

Получен патент №2534667 “Устройство для пневмотранспорта порошкообразных и зернистых материалов из бункеров”.

По сравнению с другими типами пневмотранспортного оборудования система обеспечивает:

- **возможность использования** малопроизводительного компрессорного оборудования;
- **адаптацию** системы к действующему оборудованию **в условиях стесненных производственных помещений**;
- **упрощение конструкции**, резкое снижение материалоемкости и габаритных размеров;
- повышение, вследствие простоты конструкции и конструктивных особенностей, **ремонтпригодности**, упрощение **обслуживания** и текущего ремонта;
- **снижение стоимости** оборудования;
- **снижение эксплуатационных расходов**;
- **повышение износостойкости и срока службы** транспортных трубопроводов за

счет снижения абразивного износа его внутренних поверхностей вследствие изменения принципа перемещения материала;

- существенное **снижение пылеобразования** в месте выгрузки материала из транспортного трубопровода и, как следствие, **увеличение срока службы** штатных аспирационных систем без очистки и замены фильтрующих элементов.

Кроме того, специалистами фирмы разработан метод расчета параметров пневмотранспорта “Пневмопушка”: производительности, расхода сжатого воздуха, давления в транспортном трубопроводе, скорости поршня по длине трубопровода и т.д. Метод разрабатывался на основе расчетно-теоретического анализа с привлечением данных действующих промышленных установок. Ниже приведены результаты расчетов различных параметров процесса пневмотранспорта и результаты полученных экспериментальных данных.

Расчет технологических параметров установки для трубопроводов без поворотов

1. Параметры потока без отключения воздуха до момента полного прохождения транспортного трубопровода поршнем

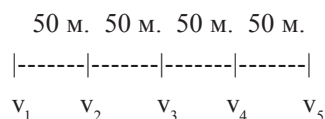
Исходные данные:

Масса поршня – 100 кг.

Диаметр трубопровода – 0,15 м.

Длина трубопровода – 200 м.

Трубопровод условно делится на участки длиной по 50 м.



где: V_1, V_5 – скорость поршня в начале и в конце трубопровода, м/с,

V_2, \dots, V_4 – скорость поршня на границах участков, м/с.

1.1. Ускорение поршня

$$a = F / m, \text{ м/с}^2$$

где m – масса поршня, кг.

F – равнодействующая сила на поршень, н.

$$F = P \times 0,785 \times D^2 - m \times g \times f_{\text{тр}} = 2 \times 10^5 \times 0,785 \times 0,15^2 - 100 \times 9,8 \times 1,0 = 2533 \text{ н.}$$

где: P – давление перед поршнем (изб.), Па

f – коэффициент трения поршня по стенке трубопровода (f = 0,5 – 1,0)

$$a = 2533 / 100 = 25,33 \text{ м/с}^2$$

Скорость поршня

$$V_{i+1} = \sqrt{2 \times a \times s + V_i^2}, \text{ м/с.}$$

где: s – длина участка трубопровода, м.

например: $V_2 = \sqrt{2 \times 25,33 \times 50 + 0^2} = 50,33 \text{ м/с}$

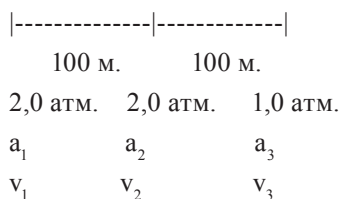
В табл. 1 представлены результаты расчета значений скорости поршня по длине трубопровода.

Таблица 1

V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V _{ср}	
0	50,33	71,17	87,17	100,6	61,8	

2. Расчет параметров потока с отключением воздуха при достижении поршнем 1/2 длины транспортного трубопровода

Трубопровод условно делится на участки длиной по 100 м.



где: 2,0; 1,0 – давление в начале, на 1/2 длины и в конце трубопровода, м/с.

a₁, a₂, a₃ – ускорение поршня в начале, на 1/2 длины и в конце трубопровода, м/с²

V₁, V₂, V₃ – скорость поршня в начале, на 1/2 длины и в конце трубопровода, м/с.

2.1. Равнодействующая сила F₃

$$F_3 = P_3 \times 0,785 \times D^2 - F_{\text{тр.}} = 1,0 \times 10^5 \times 0,785 \times 0,15^2 - 100 \times 9,8 \times 1,0 = 766 \text{ н.}$$

2.2. Ускорение a₃ = 766 / 100 = 7,66 м/с²

2.3. Скорость V₃ ~ $\sqrt{2 \times a_{\text{ср}} \times 100 + V_2^2} \sim \sqrt{2 \times 16,5 \times 100 + 71,17^2} \sim 91,5 \text{ м/с,}$

где: a_{ср} = (a₂ + a₃) / 2 = (25,33 + 7,66) / 2 = 16,5 м/с²

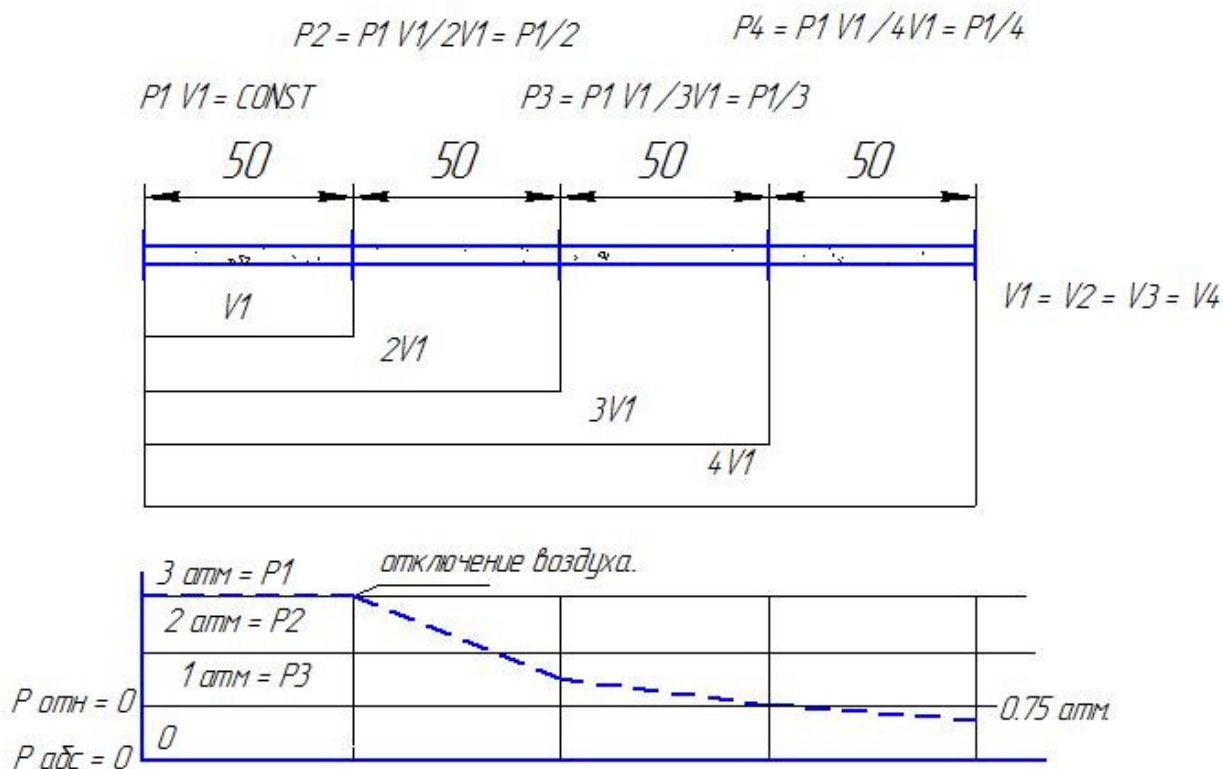
В табл. 2 приведены результаты расчетов с отключением воздуха при достижении поршнем 1/2 длины трубопровода.

Таблица 2

a ₁	a ₂	a ₃	
25,33	25,33	7,66	
V ₁	V ₂	V ₃	V _{ср}
0,0	71,17	91,5	54

3. График изменения давления сжатого воздуха при отключении его подачи в случае достижения поршнем 1/4 длины транспортного трубопровода

Из графика следует, что для прямолинейных трубопроводов возможен процесс транспортировки при отключении подачи сжатого воздуха в случае достижения поршнем 1/4 длины трубопровода и снижение его расхода практически на 50%.



4. Расчет технологических параметров системы в зависимости от длины транспортного трубопровода

Диаметр трубопровода 0,15 м.,
 масса поршня 150 кг,
 средняя скорость потока 20 м/с,
 время загрузки 5 сек.

Параметры	Длина трубопровода, м.		
	100	200	400
Время транспорта, сек.	5	10	20
Время цикла, сек.	10	15	25

Параметры	Длина трубопровода, м.		
	100	200	400
Число циклов в час	360	240	144
Производительность, т / ч	54	36	21
Расход воздуха, м ³ /мин	10,6	12,5	17,3
Удельный расход воздуха, м ³ /тн.	12,0	24,0	42
Расходная концентрация смеси, кг. тв./ кг. возд.	70,8	35	17,5

Результаты расчетов представлены на рис.2.

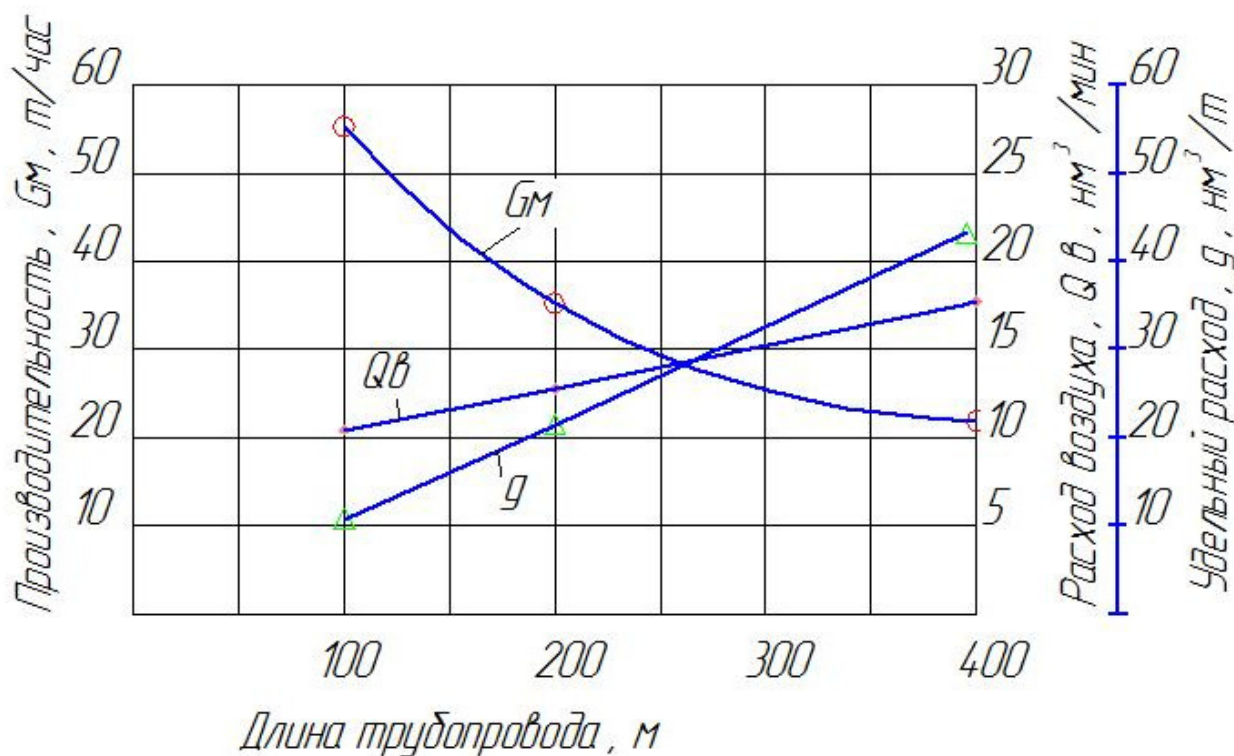


Рис. 2. Зависимость производительности G_m , расхода воздуха Q_v , удельного расхода воздуха q от длины транспортного трубопровода.

5. Расчет технологических параметров процесса транспортировки в зависимости от диаметра транспортного трубопровода с отключением воздуха при достижении поршнем 1/2 длины трубопровода.

Исходные данные:

- диаметры трубопровода, м - 0,100; 0,125; 0,150; 0,200.
- дальность подачи, м - 100
- длина поршня, м - 10
- скорость средняя, м/сек - 25

1. Масса поршня $G_n = 0,785 \cdot L_n \cdot D^2 \cdot \rho_n$, кг.

где: L_n , D – длина и диаметр поршня, м

ρ_n – насыпная плотность поршня, кг/м³ (принято 1000)

2. Давление, необходимое на перемещение поршня

$$P_{тр.} = (G_n / 0,785 \times D^2) \times f_{тр.}$$

где: $f_{тр.}$ – коэффициент трения поршня по стенке трубопровода

($f_{тр.} \sim 1,0$)

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

D, м.	0,100	0,125	0,150	0,200
G_n , кг	78,5	122	176,6	314
$P_{тр.}$, атм	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 3

3. Время транспорта $\tau_{тр} \sim L_{тр} / V_{ср} \sim 100 / 25 \sim 4$ сек.
4. Время загрузки $\tau_3 \sim 5$ сек
5. Число циклов $n_{ц} = 3600 / (4 + 5) \sim 360$ циклов/час (6 циклов/мин)
6. Производительность $G_m = G_n * n_{ц}$
Результаты расчета приведены в табл.2.

Таблица 2

D, м.	0,100	0,125	0,150	0,200
G _м , т/ч	28,3	44,0	63,6	113

D, м.	0,100	0,125	0,150	0,200
L _{нач} , м	2,5	7,35	5,8	10
G _м , т/ч	28,3	3,9	63,6	113
Q _в , нм ³ /ч	282,6	44,0	636	1130
Q _в , нм ³ /мин	4,7	441,	10,6	18,8
q, нм ³ /т	10,0	10,0	10,0	10,0

7. Расход воздуха $Q_v = 0,785 * D^2 * L_{тр} * n_{ц}$, нм³ / ч

где: L_{нач} – длина начального (загрузочного) участка транспортного трубопровода при Ду200 м
q, нм³/т – удельный расход воздуха

Результаты расчета приведены в табл. 3.

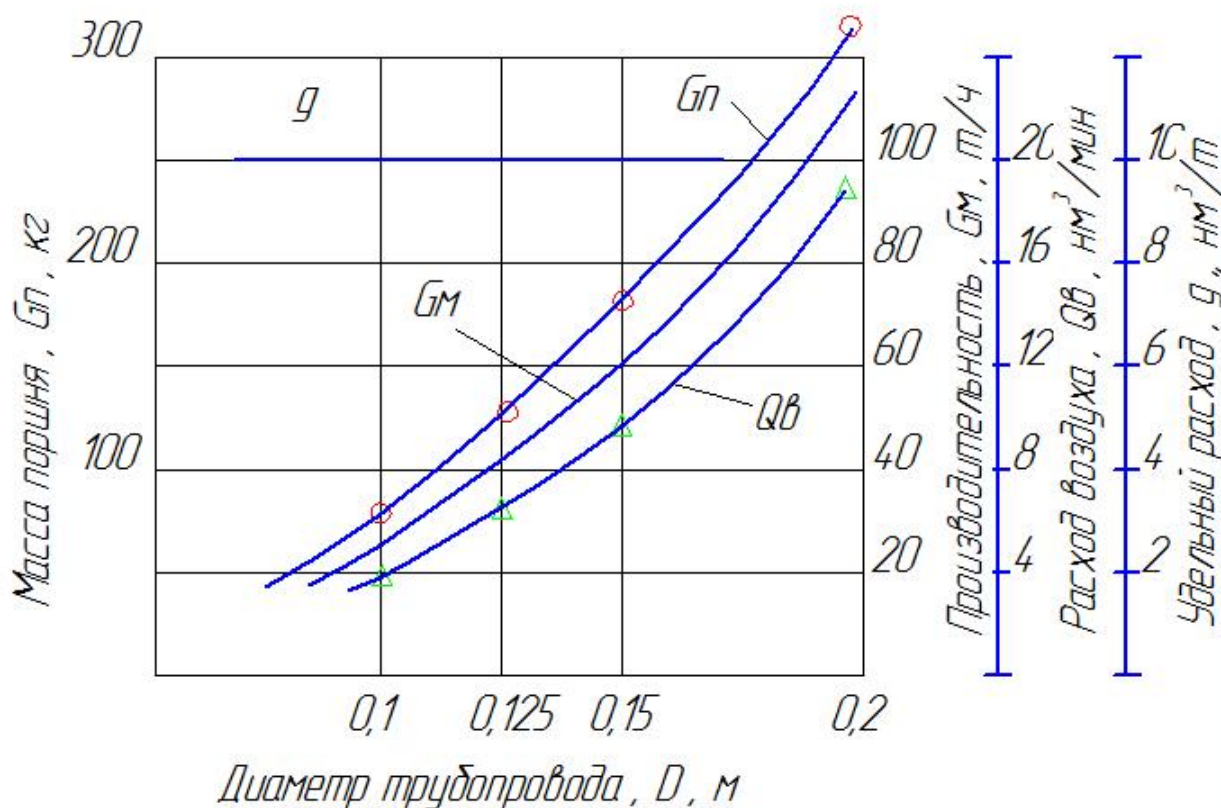


Рис. 3. Производительность, масса поршня, расход воздуха, удельный расход в зависимости от диаметра транспортного трубопровода.

Таблица 1

Диаметр отверстия, мм	20	40	60	65	80
Расход воздуха, м ³ /ч	340	1356	3060	3580	5424

Приведенные данные носят информационный характер и позволяют произвести предварительную оценку конструкционных параметров создаваемой установки.

5. Расчет технологических параметров процесса транспортировки в зависимости от диаметра проходного сечения воздушного электромагнитного клапана

Расход воздуха при звуковом истечении из отверстия в атмосферу

На рис. 4 представлены графики расхода воздуха Q_v , производительности системы G_m , удельного расхода воздуха q в зависимости от диаметра проходного сечения электромагнитного клапана. При расчете принято:

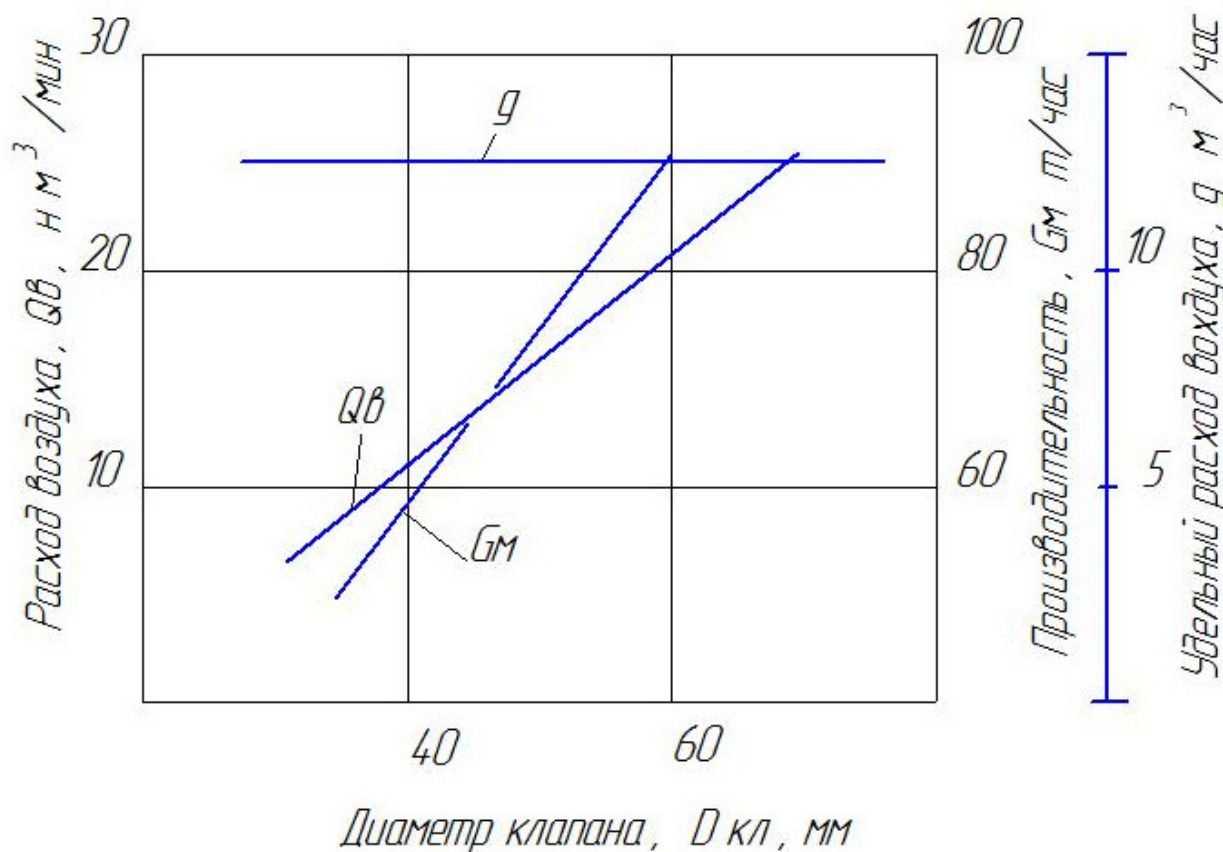


Рис. 4. Зависимости расхода воздуха Q_v , производительности G_m и удельного расхода воздуха q от диаметра проходного сечения электромагнитного клапана

диаметр транспортного трубопровода 150 мм.,
длина трубопровода 100 м.,
расход воздуха принят по среднему значению времени цикла.

1. Сравнение технологических параметров пневмокамерного насоса и системы «Пневмопушка» в зависимости от объема камеры насоса и массы поршня пневмоимпульсной системы

Таблица 1

Пневмокамерный насос	1	2
Исходные данные:		
-диаметр трубопровода, м	0,15	0,15
-объем камеры, м ³	1,5	0,3
-загрузка камеры, т.	1,2	0,2
-средняя скорость потока, м/с	11,0	11,0
-расход воздуха (при скорости в конце трубопровода 18 м/с), м ³ /ч	1200,0	1200,0
-время загрузки камеры (расчетное), сек.	40,0	6,7
1. Длина трубопровода, м	100,0	100,0
2. Транспортная производительность (расчетная), т/ч	164	164
3. Время транспорта, сек	26	4,3
4. Время продувки трубопровода, сек	9,1	9,1
5. Время цикла, включая: загрузку+транспорт+продувку, сек	75,1	20,1
5. Число циклов, 1/ч	48	179
6. Производительность, т/ч	57,6	35,8
7. Средний расход воздуха, м ³ /ч	560	800
8. Уд. расход воздуха, м ³ /т	9,72	22,4
9. Концентрация смеси, кг/кг	85,7	37,3

Таблица 2

Система «Пневмопушка»		
Исходные данные:	1	2
-Масса поршня, кг.	100	150
-Диаметр трубопровода, м	0,15	0,15
-Время загрузки, сек.	5	5
-Скорость поршня, м/сек	20	20
-Дальность подачи, м	100	100
1. Время транспорта, сек	5	5
2. Время цикла, сек	10	10
3. Число циклов, 1/ч	360	360
4. Производительность, т/ч	36	54
5. Объем трубопровода, м ³	1,8	1,8
6. Расход воздуха за цикл, м ³ /ц	1,8	1,8
7. Средний расход воздуха, м ³ /мин	10,8	10,8
8. Уд. расход воздуха, м ³ /т	18	12
9. Расходная концентрация, кг.тв./кг.возд.	46,3	69,45

Как следует из данных, представленных в таблицах 1 и 2, при транспортировке на расстояния до 100-150 м предпочтительно применение системы «Пневмопушка» вместо камерных насосов с малым рабочим объемом камеры. В этом случае обеспечивается более высокая производительность оборудования и меньший расход сжатого воздуха.

Для подтверждения достоверности полученных расчетных данных процесса пневмотранспорта, было проведено несколько экспериментов на системах «Пневмопушка», установленных на различных предприятиях. При этом расчетные данные сравнивались с экспериментально полученными.

7. Влияние поворотов и их количества на характер изменения скорости поршня цемента по длине транспортного трубопровода (ООО “Промтехнологии цемента” г. Клин).

Фактические параметры системы:	
- длина транспортного трубопровода, м	77,0,
в т.ч. вертикальный подъем, м	22,5
- количество поворотов под углом 90°	3
- диаметр транспортного трубопровода, мм	150
- время загрузки, сек.	4,0
- время транспорта, сек.	5,0
- масса поршня, кг.	~160
- длина поршня, м	~9,0
- производительность системы, т/ч - давление в начале транспортного трубопровода, МПа	63,0 0,2.

На рис. 5 представлена схема транспортного трубопровода.

1. Масса поршня

$$G_n = 0,785 \times D_n^2 \times L_n \times \rho_n = 0,785 \times 0,2^2 \times 5,0 \times 1000 = 157 \text{ кг.}$$

где: $0,785 = \pi / 4$;

D_n, L_n – диаметр, длина начального участка, м.

2. Длина поршня в транспортном трубопроводе

$$L_n = G_n / 0,785 \times D_{тр}^2 \times \rho_n = 157 / 0,785 \times 0,15^2 \times 1000 = 9 \text{ м.}$$

3. Сила трения при движении поршня в прямолинейном участке

$$F_{тр.л.} = G_n \times f \times g = 157 \times 0,65 \times 9,8 = 1000 \text{ н.}$$

где f – коэффициент трения цемента по стали (определено экспериментально)

4. Давление на преодоление силы трения

$$P_{тр.} = F_{тр.л.} / 0,785 \times D_{тр}^2 = 1000 / 0,785 \times 0,15^2 = 0,566 \times 10^5 \text{ Па.}$$

5. Масса материала в поворотном колене под углом 90°

$$\text{Длина колена } L_k = 6R / 4 = 6 \times 0,5 / 4 = 0,75 \text{ м.}$$

где R – радиус поворота колена, м.

$$G_{м.кол.} = 0,785 \times D_{тр}^2 \times L_k \times \rho_n = 0,785 \times 0,15^2 \times 0,75 \times 1000 = 13,25 \text{ кг}$$

6. Расчет величины ускорения поршня на первоначальном участке длиной 5м (см. схему, рис.2)

$$a_1 = F_{пр} / m_n, \text{ м/сек}^2$$

где m_n – масса поршня, кг.

$F_{пр}$ – равнодействующая сила на поршень на прямолинейном участке, н.

$$F_{пр} = 0,785 \times D_{тр}^2 \times (P_1 - P_2) - F_{тр.л.}$$

где P_1, P_2 – давления (абс.) перед и за поршнем по ходу потока, Па.

$$F_{пр} = (3 \times 10^5 - 1 \times 10^5) \times 0,785 \times 0,15^2 - 1000 = 2532 \text{ н.}$$

$$a_1 = 2532 / 157 = 16,55 \text{ м/сек}^2$$

7. Скорость поршня перед коленом 1.

$$V_1 = \sqrt{2a_1 L_1 + V_0^2} = \sqrt{2 \times 16,55 \times 5} = 12,86 \text{ м/сек.}$$

где: L_1 – длина участка разгона.

8. Центробежная сила, действующая на поршень в колене 1.

$$F_{ц1} = m_k V_1^2 / R = 13,25 \times 12,86^2 / 0,5 = 4382 \text{ н.}$$

где m_k – масса материала в колене, кг.

9. Сила трения в колене 1

$$F_{тр.к.1} = F_{ц1} \times f = 4382 \times 0,65 = 2849 \text{ н.}$$

10. Равнодействующая сила при прохождении поршня через колено $F_{к.1} = (P_1 - P_2) 0,785 D_{тр}^2 - F_{тр.л.} - F_{тр.к.1} = 2 \times 10^5 \times 0,785 \times 0,15^2 - 1000 - 2849 = -317 \text{ н.}$

11. Ускорение в колене 1

$$a_2 = -F_{к.1} / m_n = -317 / 157 = -2,0 \text{ м / сек}^2$$

12. Скорость поршня после прохождения колена 1

$$V_2 = \sqrt{-2a_2 L_{II} + V_1^2} = \sqrt{-2 \times 2,0 \times 9,0 + 12,86^2} = 11,4 \text{ м/сек}$$

... Дальнейший расчет по длине трубопровода производится по аналогии.

На рис. 6 представлен график изменения скорости при прохождении поршня через колено 2 (см. схему)

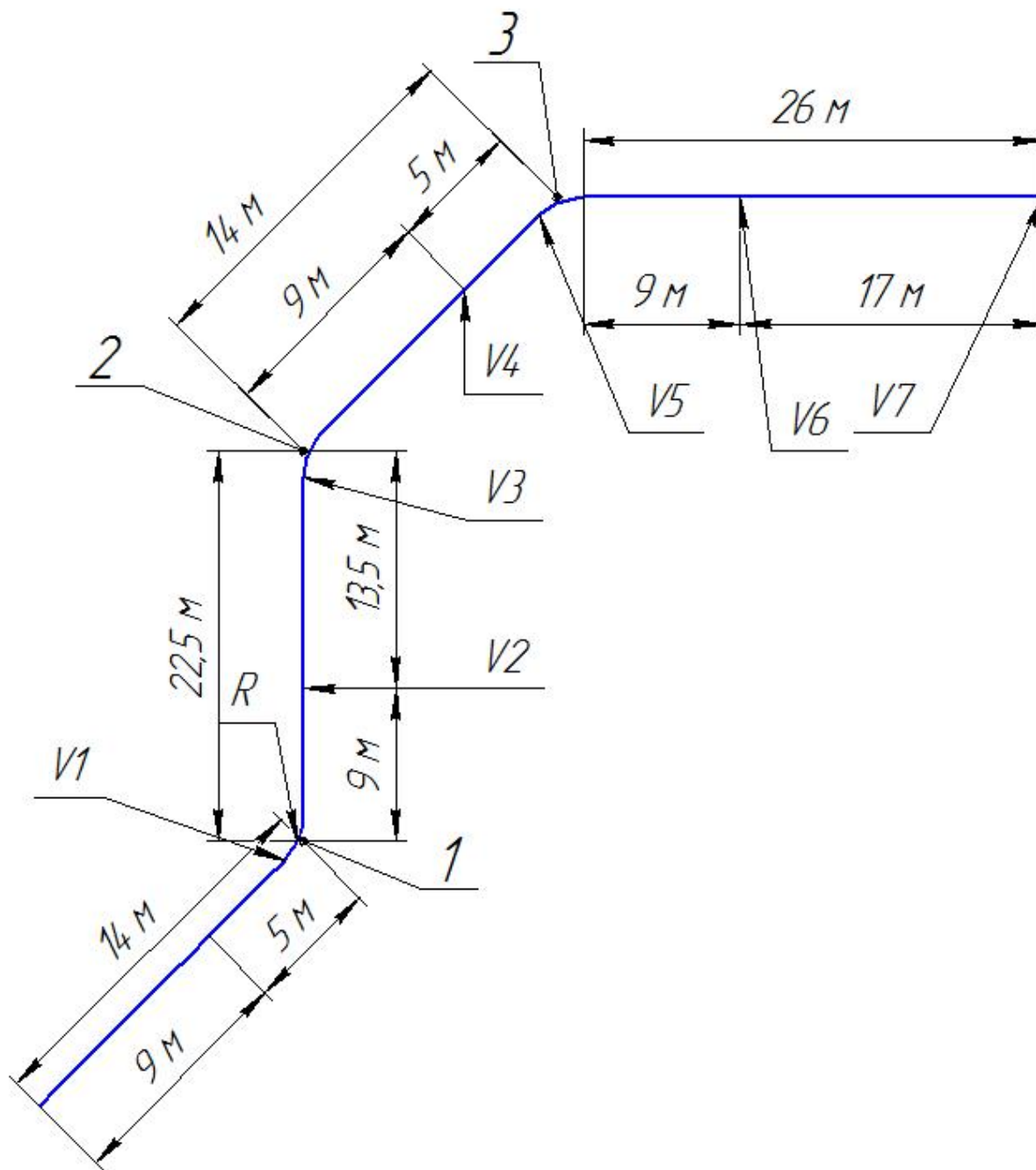


Рис. 5. Схема транспортного трубопровода

Поршень подходит к повороту со скоростью 23 м/сек, а при прохождении поворота, учитывая длину поршня 9 м., его скорость падает до 13 м/сек.

На рисунке 7 показано изменение скорости поршня вдоль транспортного трубопровода.

Из графика видно, что при прохождении поршня через поворот его скорость падает в сред-

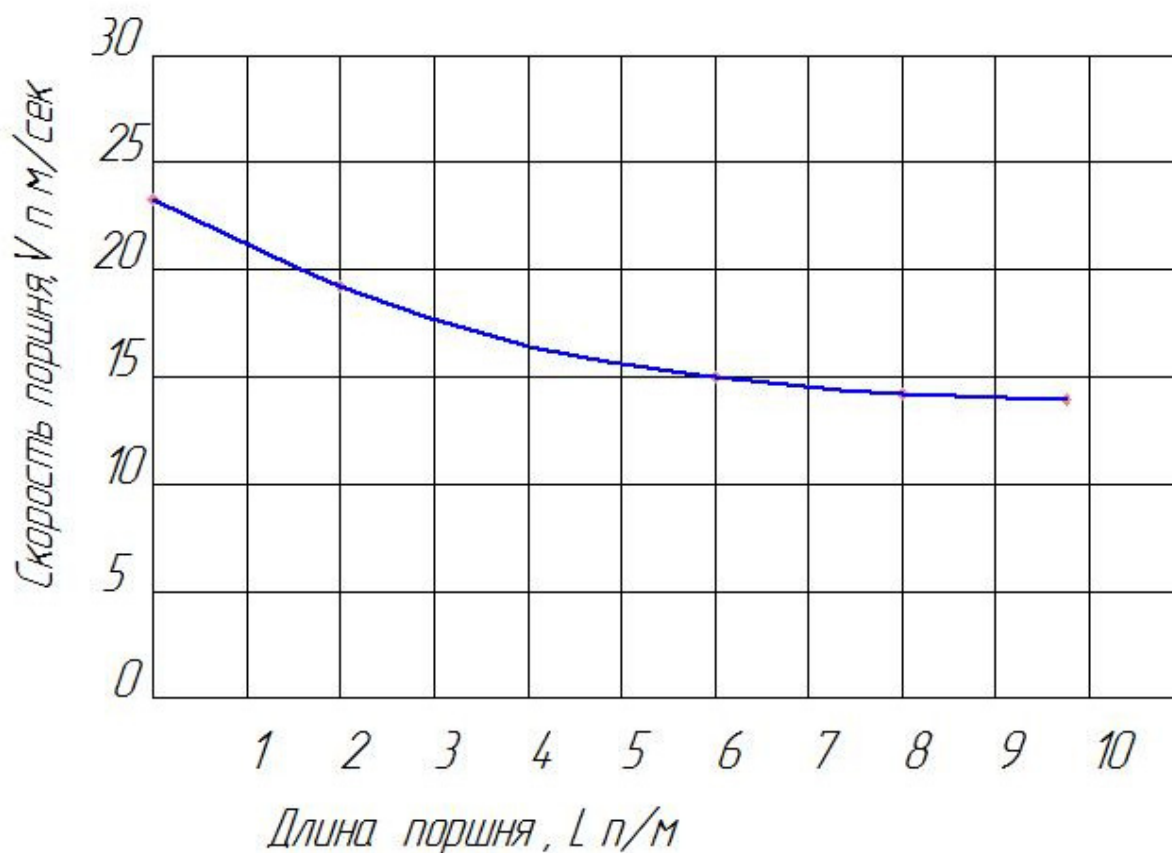


Рис. 6. Скорость поршня при прохождении через колено 2. (см. схему)

нем на 50%, однако, после поворота скорость восстанавливается.

Средняя скорость поршня, рассчитанная по данным графика на рис.7 составляет 14,3 м/сек.

Средняя скорость поршня по фактическим данным на действующей установке составляет ~ 15,3 м/сек.

Разница не превышает 7%, что вполне приемлемо для инженерной практики.

На рис. 8 представлен график изменения скорости поршня вдоль транспортной магистрали для гранулированного полиэтилена. Транспортный трубопровод имеет 2 поворота. В этом случае производили замеры фактической скорости поршня на опытной установке в Институте прикладной математики и механики Томского Гос. университета [2].

Проведенные исследования показали, что гранулированные материалы могут успешно транспортироваться с малыми скоростями в виде поршней.

Графики на рис.7, 8 имеют аналогичный характер, что является подтверждением правильности предлагаемого метода расчета параметров поршневого пневмотранспорта.

8. Определение расхода сжатого воздуха, необходимого для перемещения поршня за один цикл работы системы (ОАО «БИРСС», г. Москва)

1) В процессе пуско-наладочных работ был проведен эксперимент по определению расхода сжатого воздуха для подачи цемента из силоса прирель-



Рис. 7. Скорость поршня по длине трубопровода.

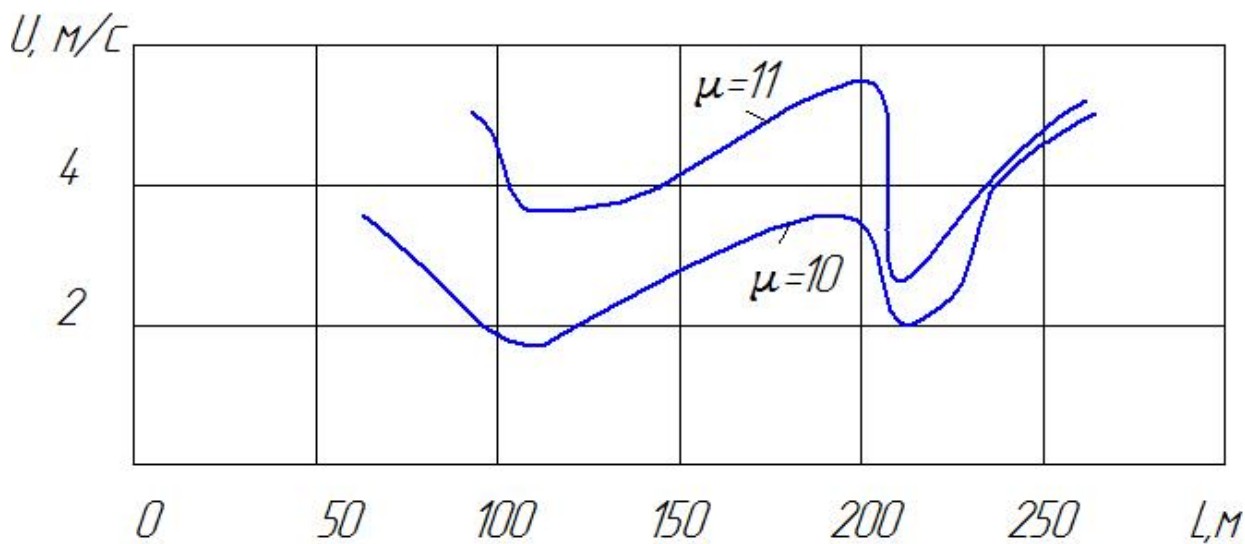


Рис. 8. Распределение скорости движения поршня материала вдоль транспортной магистрали.

сового склада в расходный силос бетоносмесительного узла (БСУ). Использовалась модель установки «Пневмопушка» с принудительным закрыванием блока загрузки

Производительность установки - 35 т/час

Расстояние транспортировки – 300 м, в том числе высота около 18 м

Общий объем двух воздушных ресиверов $V = 2 \text{ м}^3$

Начальное давление в ресиверах $P = 6 \text{ атм.}$

При открывании электромагнитного клапана для подачи сжатого воздуха в транспортный трубопровод в начальный момент его давление поднималось до $P = 4 \text{ атм.}$

Цикл подачи материала состоял из 4 стадий:

- загрузка цемента - 5 сек.;

- задержка (учитывая время хода штока пневмоцилиндра) – 0,5 сек.

- время срабатывания электромагнитного клапана и подачи сжатого воздуха в транспортный трубопровод – 2,7 сек.;

- задержка для прохождения пробкой транспортного трубопровода 4 сек.

Таким образом, рабочий цикл составлял $t = 12,2 \text{ сек.}$

2) 1 Для определения расхода сжатого воздуха за 1 цикл работы насоса ресиверы отключали от линии подачи сжатого воздуха, поступающего из компрессорной.

За время открытия воздушного электромагнитного клапана давление в ресиверах падало на 1,8 атм. (с $P = 6,0 \text{ атм.}$ до $P = 4,2 \text{ атм.}$).

Первоначальный объем воздуха в ресиверах составлял $V_{\text{нач.}} = 2 \text{ м}^3 \times 6 \text{ атм.} = 12 \text{ м}^3 \text{ норм. воздуха.}$

Окончательный объем воздуха составлял

$V_{\text{кон.}} = 2,0 \text{ м}^3 \times 4,2 \text{ атм.} = 8,4 \text{ м}^3 \text{ норм. воздуха.}$

Расход за один цикл $Q = 12 - 8,4 = 3,6 \text{ м}^3 \text{ норм. воздуха}$ или $0,6 \text{ м}^3 \text{ сжатого до 6 атм. воздуха.}$

2. За 1 минуту было произведено 60 сек.: $12,2 \text{ сек.} = 4,92 \text{ цикла.}$

3. Расход сжатого воздуха за 1 минуту составлял $Q = 4,92 \times 0,6 = 2,95 \text{ м}^3 \text{ сжатого воздуха.}$

Таким образом, из эксперимента следует, что при объеме транспортного трубопровода 4,5 норм.

куб.м, расход воздуха на один цикл составляет 3,6 норм. куб. м, что подтверждает вышеприведенные расчеты.

9. Повторное определение минимального количества сжатого воздуха, необходимого для перемещения поршня за один цикл работы (ООО «СК «Стройбетон», г. Москва).

Исходные данные:

- транспортируемый материал – цемент, насыпной вес 1000 кг/м^3

- длина трубопровода ~ 112 м., в том числе вертикальный подъем – 17 м.

- число поворотов – 4

- диаметр транспортного трубопровода - 0,15 м.

- диаметр загрузочного участка - 0,2 м.

- длина загрузочного участка - 1,7 м.

- объем ресивера - $0,9 \text{ м}^3$

- время загрузки - 5 сек.

- время подачи воздуха - 2 сек.

- время прохождения поршня по трубопроводу - 4 сек.

1. Расход воздуха при транспорте с закрытым вентилем перед ресивером.

$Q_v = \Delta P_{\text{рес.}} \times V_{\text{рес.}} = 2,0 \times 0,9 = 1,8 \text{ нм}^3 \text{ за цикл.}$

где $\Delta P_{\text{рес}}$ – падение давления в ресивере при транспорте с 6,0 до 4,0 атм.

$V_{\text{рес}}$ – объем ресивера, м^3 .

2. Объем транспортного трубопровода $V_{\text{тр}} \sim 0,785 \times 0,15^2 \times 112 \sim 1,97 \text{ м}^3$

3. Средняя скорость поршня $W_{\text{ср}} \sim 112 / 4 \sim 28 \text{ м/с}$

4. Скорость потока через расход воздуха

$W_{\text{пот.}} \sim 1,8 / 4 \times 0,785 \times 0,15^2 \sim 25,5 \text{ м/с}$

Последнее значение скорости, полученное через расход воздуха, отличается всего лишь на 8,9% от значения средней скорости поршня, что вполне приемлемо для инженерной практики.

Выводы

Разработанные специалистами ООО «Пневмотранспорт» методы расчета параметров систем поршневого пневмотранспорта существенно облегчают работу при их проектировании. Приведенные графические зависимости позволяют произвести предварительную оценку для такой работы.

Представленные выше расчетные данные с высокой степенью достоверности коррелируют с практическими технологическими параметрами систем «Пневопушка», смонтированных более, чем на 50 предприятиях. Авторы надеются, что предложенный метод расчета будет с успехом использован как проектными организациями, так и специалистами, исследующими процессы транспортировки различных материалов в импульсном режиме.

Список литературы

1. Вишня Б.Л., Дроздов Б.С., Стефаненко В.Т. «Пневмотранспорт. Расчеты, схемы, оборудование», изд-во «Сократ», Екатеринбург, 2010 г.
2. Смолвик В.А., Егоров В.М., Мельник Л.Ф. «Импульсный пневмотранспорт гранулированных материалов». Вопросы прикладной аэродинамики и тепломассообмена, изд-во Томского Гос. университета. Томск, 1983 г., с.92-95.