

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

Институт «Архитектурно-строительный»

Кафедра «Градостроительство, инженерные сети и системы»

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

Главный инженер проекта  
ООО «Магстрой»

\_\_\_\_\_ Н.И. Скутин  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Д.В. Ульрих  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

«Выбор оптимального варианта реконструкции линии  
пневмотранспорта помола нефтяного кокса для Электродного  
завода, г. Челябинск»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ – 13.03.01.2017.174.02. ПЗ ВКР

Руководитель проекта:

доцент

\_\_\_\_\_ Л.Г. Старкова  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор проекта:

студент группы АС-261

\_\_\_\_\_ А.А. Каширская  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтролер:

старший преподаватель

\_\_\_\_\_ Ю.В. Кунгурцева  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

Челябинск 2017

## АННОТАЦИЯ

Каширская А.А. Выбор оптимального варианта реконструкции линии пневмотранспорта помола нефтяного кокса для Электродного завода, г. Челябинск. – Челябинск: ЮУрГУ, МТ; 2017, 67 с., библиогр. список – 25 наим., 3 листа чертежей Ф. А1.

Изучены закономерности скорости витания частиц помола нефтяного кокса и экспериментально проверена методика расчета этого параметра.

Выполнено два варианта реконструкции существующей системы Электродного завода в г. Челябинск с частичной и полной заменой компонентов системы, осуществлен подбор необходимого оборудования.

Произведено экономическое сравнение двух вариантов реконструкции систем с учетом капитальных и эксплуатационных затрат.

						13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Зав. каф.	Ульрих				Выбор оптимального варианта реконструкции линии пневмотранспорта помола нефтяного кокса для Электродного завода, г. Челябинск	Стадия	Лист	Листов
Н.контр.	Кунгурцева					ДП	7	67
Руководит.	Старкова					ЮУрГУ		
Консульт.	Старкова					Кафедра ГИСС		
Дипломни	Каширская							

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕЛЯБИНСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ЗАВОДА (ОАО «ЭНЕРГОПРОМ-ЧЭЗ»)	12
1.1 Общая информация.....	12
1.2 Сырье для изготовления анодных блоков. ....	12
1.3 Технология подготовки сырья .....	14
1.4 Линия транспортировки помола нефтяного кокса в сортировочный бункер.....	15
2 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	19
2.1 Анализ литературы .....	22
2.2 Теория витания частицы .....	26
2.3 Определение скорости витания расчетным путем .....	28
2.4 Описание эксперимента по определению скорости витания частицы помола нефтяного кокса .....	29
3 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПНЕВМОТРАНСПОРТА .....	36
3.1 Реконструкция системы пневмотранспорта. Вариант № 1.....	37
3.1.1 Расчет материалопровода.....	37
3.1.2 Расчет и подбор циклона-разгрузителя .....	44
3.1.3 Расчет и подбор фильтра.....	45
3.1.4 Расчет и подбор воздухоудовки. ....	47
3.2 Реконструкция системы пневмотранспорта. Вариант № 2.....	49
3.2.1 Расчет материалопровода.....	49

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

3.2.2 Расчет и подбор циклона-разгрузителя .....	53
3.2.3 Расчет и подбор фильтра.....	54
3.2.4 Расчет и подбор вентилятора.....	55
4 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	58
4.1 Анализ технических характеристик реконструируемой системы .....	58
4.2 Экономическое сравнение вариантов реконструкции .....	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	64
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	65

## ВВЕДЕНИЕ

Транспортирование различных сыпучих и кусковых материалов (зерна, песка, угля, цемента, муки, опилок, продуктов размола и т.д.) воздушным потоком называется пневматическим транспортом. Пневматическим транспортом можно перемещать материалы по различным направлениям в неподвижных и герметичных трубопроводах. Производительность пневматических установок различна и может достигать сотни тонн, длина транспортирования достигает нескольких километров, а высота подъема – более 100 м.

Пневматический транспорт по сравнению с механическим является более совершенным способом перемещения сыпучих продуктов. Перемещение сыпучих материалов в трубопроводе в смеси с воздухом осуществляется путём переноса твердых частиц материала во взвешенном состоянии обтекающим их потоком воздуха или насыщением материала воздухом, в результате чего материал приобретает текучесть [6].

Использование пневмотранспорта в настоящее время широко распространено, благодаря ряду преимуществ:

- перемещение материала по трассам любой сложности и высокой протяженности;
- экологичность данного вида транспорта;
- возможность организации транспорта из труднодоступных мест в труднодоступные места;
- сопутствующие технологические преимущества (обогащение материала воздухом, сушка транспортируемого материала до 0,5% от общей массы, возможность совмещения с обеспыливанием);

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- возможность существенного упрощения операций загрузки и разгрузки с железнодорожного и водного транспорта;

- возможность полной автоматизации процессов (бесшумность, отсутствие движущихся частей).

Наряду с вышеперечисленными преимуществами использования пневмотранспорта, существуют некоторые существенные недостатки, которые препятствуют использованию данного вида транспорта:

- высокая взрывоопасность систем;

- повышенная энергоемкость процесса;

- недостаточно высокая надежность системы;

- быстрая изнашиваемость отдельных частей оборудования (материалопровод в точке перегиба и приемно-питающее устройство);

- повреждение перемещаемого материала;

- трудность перемещения материалов, обладающих различной дисперсностью.

Эффективная и безопасная работа аспирационных и пневмотранспортных установок во многом определяется грамотно выполненным проектированием.

В данной работе рассмотрена задача расчета и выбора пневмотранспортных установок для Электродного завода, возникшая в связи с расширением объемов выпускаемой продукции в существующих производственных условиях.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

# 1 ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕЛЯБИНСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ЗАВОДА (ОАО «ЭНЕРГОПРОМ-ЧЭЗ»)

## 1.1 Общая информация

Челябинский электродный завод (ЧЭЗ) основан в 1954 году и расположен в промышленном регионе Урала, на границе Европы и Азии. Его производственные подразделения занимают территорию общей площадью 91 га (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Территория ОАО «Энергопром – ЧЭЗ».

Челябинский Электродный завод производит анодные блоки для выплавки алюминия, изготовления ферросплавов, кремния, абразивов в металлургической промышленности и в химической промышленности [24].

## 1.2 Сырье для изготовления анодных блоков.

Анодная масса представляет собой смесь различных углеродистых материалов. Под воздействием выделяющегося в ванне тепла масса спекается в сплошной блок, который и является анодом. Рецепт анодной массы подбирается таким образом, чтобы анод получался монолитным, механически

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

прочным, без трещин, обладал хорошей электропроводностью, малой пористостью и окисляемостью.

Для изготовления анодной массы применяют твердые материалы и связующие вещества. Твердые материалы представляют собой основу будущего анода, а связывающие, коксуясь при высокой температуре, связывают частицы твердых материалов в монолитный блок. В качестве твердых материалов применяют нефтяной и пековый коксы, а роль связывающего вещества играет каменноугольный пек.

Нефтяной кокс является твердым остатком вторичной переработки нефти или нефтепродуктов, получаемый при коксовании нефтяного сырья. Внешне гранулы кокса имеют неправильную форму и представляют собой черные комочки (или частицы) с металлическим блеском. Кокс имеет пористую структуру, его основным составляющим элементом является углерод (более 80%), остальное составляет водород, кислород, азот, сера и металлические элементы (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Нефтяной кокс до размола и после.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13



Нефтяной кокс обладает уникальными физико-химическими и механическими свойствами. Нелетучий углерод, который является тепловой частью сам по себе, летучие вещества и минеральные примеси (сера, соединения металлов, вода, зола и т.д.) - все эти показатели определяют химические свойства кокса [24].

### 1.3 Технология подготовки сырья

Технология подготовки сырья для электродной продукции сложна и многоступенчата. Поступающие материалы подвергают дроблению до кусков размером не более 70 мм и направляют на прокалку в прокалочную печь. Основная задача предварительного прокаливания материалов заключается в достижении возможно большого постоянства их структурных и физико-химических свойств. При поступлении прокаленного кокса его подвергают сушке. Затем кокс дробят на дробилках до частиц размером не более 6-8 мм, а часть измельчают в шаровых мельницах. Раздробленный кокс классифицируют, то есть рассеивают на несколько фракций, и направляют в сортовые бункеры. В отдельный бункер помещают пылевую фракцию, полученную в шаровой мельнице (рисунок 1.3.).

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

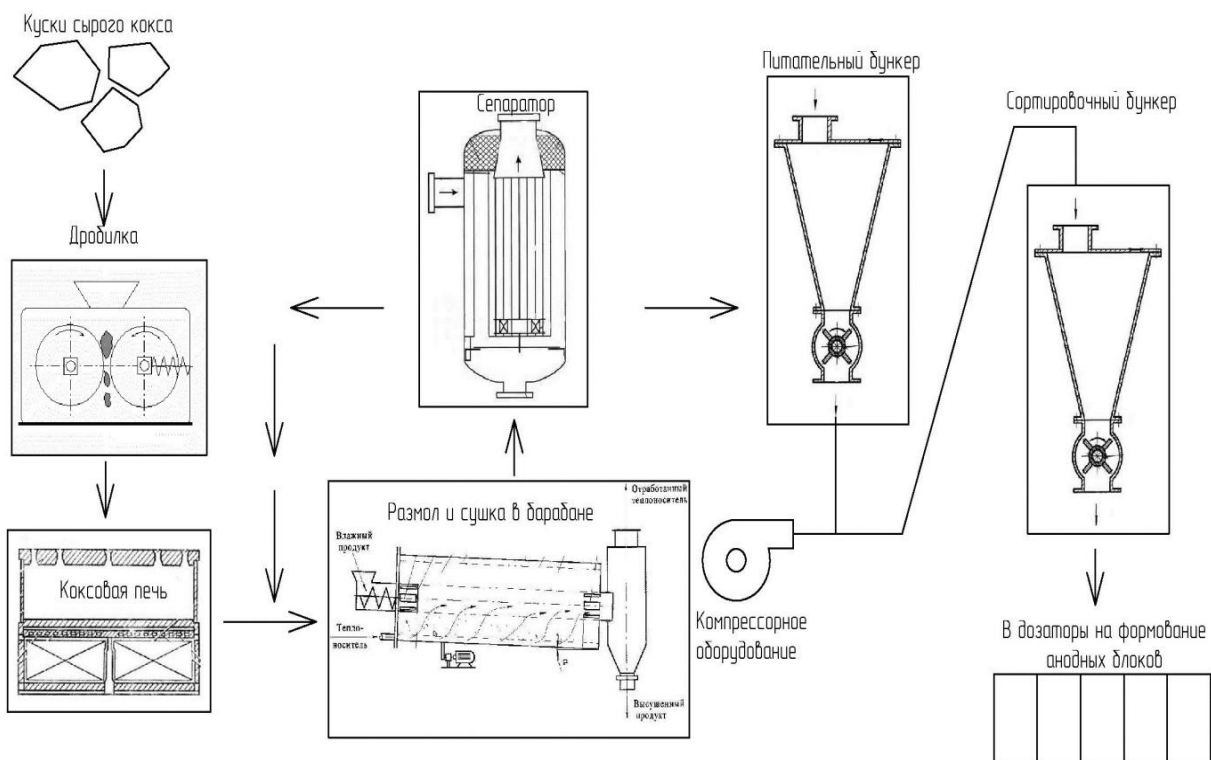


Рисунок 1.3 – Технология подготовки сырья для производства анодных блоков.

Для получения анодной массы из сортовых бункеров автоматическими дозаторами собирают шихту, перемешивают, подогревают и отправляют в смесители. Поступающий каменноугольный пек, который используют как связующее вещество при производстве электродной продукции, обезвоживают, нагревают, дозируют и сливают в смеситель. Дозировка - одна из самых ответственных операций, качество массы сильно зависит от крупности помола материалов. Всегда составляют смесь с частицами различной крупности. Затем подогретую коксовую шихту смешивают с пеком до образования однородной массы. Из смесителя готовая анодная масса выдавливается через фильеры в виде брикетов различной формы [24].

#### 1.4 Линия транспортировки помола нефтяного кокса в сортировочный бункер

После технологических операций дробления, сушки и сепарирования готовое сырье для формования анодной массы из питательного бункера

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

сжатым воздухом транспортируется по трубопроводу в сортировочный бункер (рисунок 1.4)

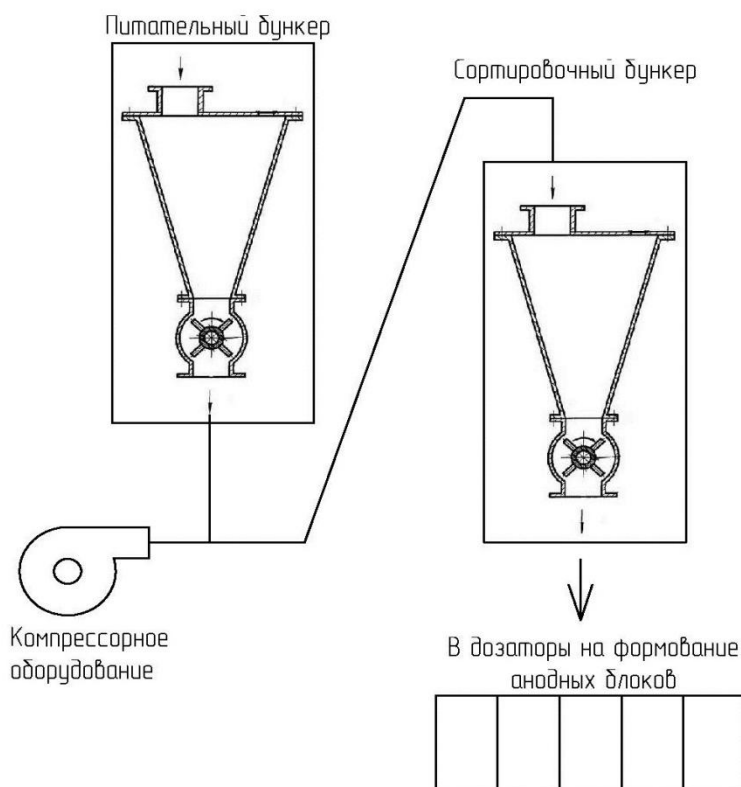


Рисунок 1.4 – Схема транспортировки помола нефтяного кокса в сортировочный бункер.

Из сортировочного бункера помол нефтяного кокса поступает в дозаторы для дальнейшего формования анодных блоков.

Существующая система пневмотранспорта имеет ряд существенных недостатков:

1. Воздух в рабочей зоне не соответствует нормам [2].

Отсутствие циклона-разгрузителя перед сортировочным бункером приводит к взмучиванию продукта и высокому уровню запыленности воздуха в цехе. Рабочие вынуждены использовать индивидуальные средства защиты (рисунок 1.5).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Рисунок 1.5 – Работник цеха в респираторе.

## 2. Пожароопасность.

Нефтяной кокс является горючим веществом и по опасности воспламенения и взрыва в помещениях относится к IV классу группы Б [1].

Согласно [5] наибольшую опасность представляют загрязненные стены, потолки и другие конструкции ограждений, т.к. даже самый тонкий слой пыли, осыпавшись с них, может образовать пылевоздушную смесь взрывоопасной концентрации.

Предотвратить возможность возникновения на предприятии взрывоопасной ситуации – одна из важнейших задач обслуживающего персонала.

## 3. Потери продукта.

Негерметичная система пневмотранспорта несет за собой не только запыленность воздуха, но и потерю продукта, что немаловажно для повышения объемов производства.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

#### 4. Увеличение производительности.

На крупных предприятиях объемы производства постоянно растут и возникает необходимость увеличивать объемы производства при минимальных затратах. Большие эксплуатационные затраты обусловлены внушительным энергопотреблением компрессионной установки на выработку сжатого воздуха для транспортировки продукта.

Все перечисленные выше проблемы создают необходимость реконструкции данной системы пневмотранспорта и выбора оптимальных решений. Так как методическая литература в достаточном количестве отсутствует, то было принято решение провести технико-экономическое изыскание.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

## 2 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первым этапом послужило ознакомление с производством и существующей технической документацией [24]. В результате были определены следующие исходные данные:

1. ОАО «Энергопром-ЧЭЗ»; цех подготовки сырья для производства анодных блоков; линия транспортировки помола нефтяного кокса в сортировочный бункер.
2. Объект исследования: система пневмотранспорта;
3. Производительность линии пневмотранспорта – 1,5 т/ч;
4. Транспортируемый материал: помол нефтяного кокса;
5. Фракция частиц помола: 0 - 0,071мм (71 мкм);
6. Насыпная плотность материала: 800 кг/м<sup>3</sup>;
7. Объем частицы:  $5,276 \times 10^{-7}$  см<sup>3</sup>;
8. Масса частицы:  $4,75 \times 10^{-7}$  грамм;
9. Выгрузка производится из одного бункера;
10. Требуемая производительность пневмотранспорта - 5 т/ч;
11. На участке имеется система подачи сжатого воздуха с давлением 1,8 – 4 атм.;
12. Протяженность трассы 65 м.;
13. Диаметр существующего материалопровода: 89х6 мм;
14. Схема воздухообмена – рециркуляционная.
15. А также графические материалы (рисунок 2.1; 2.2; 2.3)

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

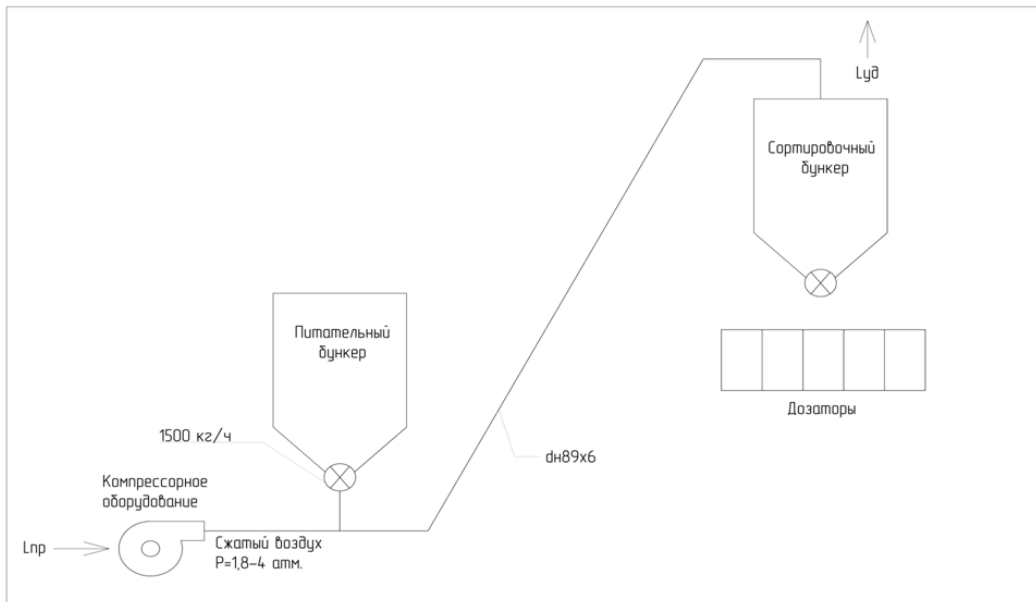


Рисунок 2.1 – Технические данные существующей системы пневмотранспорта.

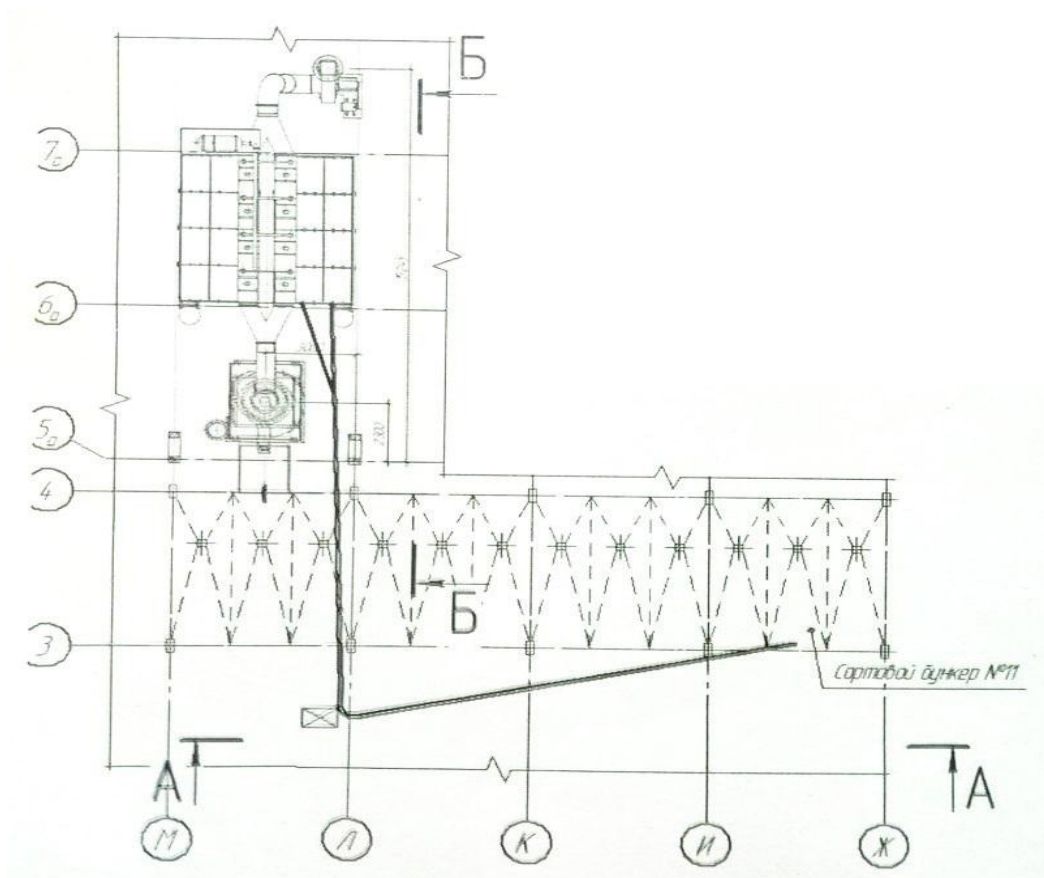


Рисунок 2.2 – План существующей системы пневмотранспорта.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР

Лист

20

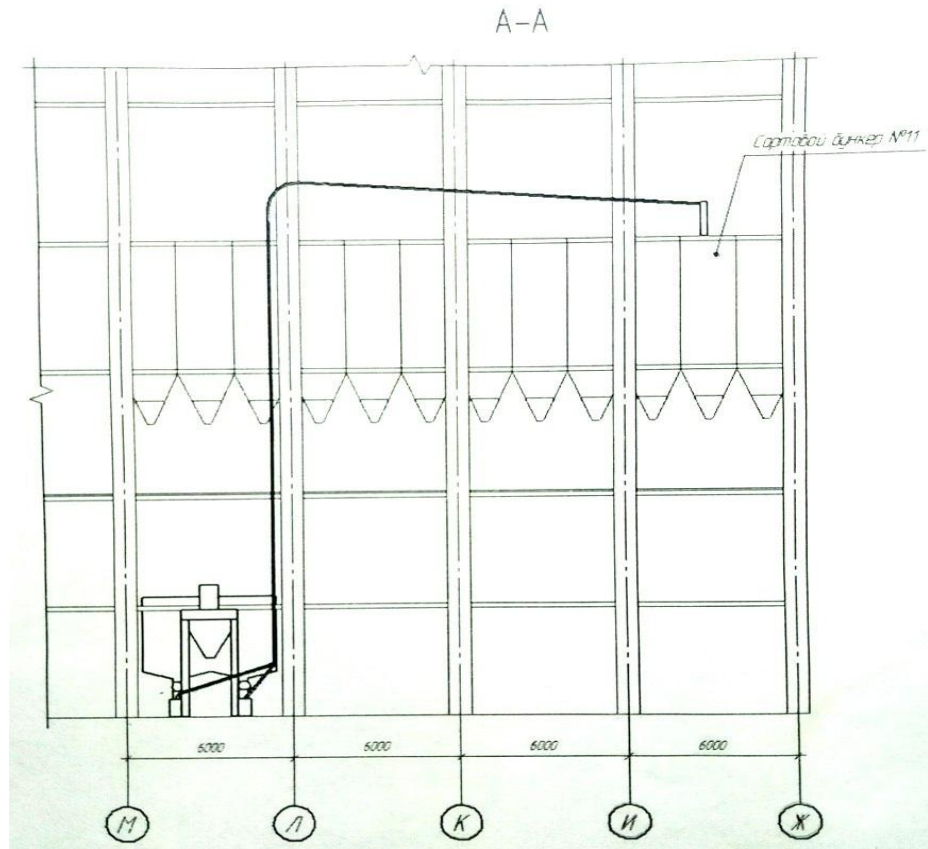


Рисунок 2.3 – Разрез А-А.

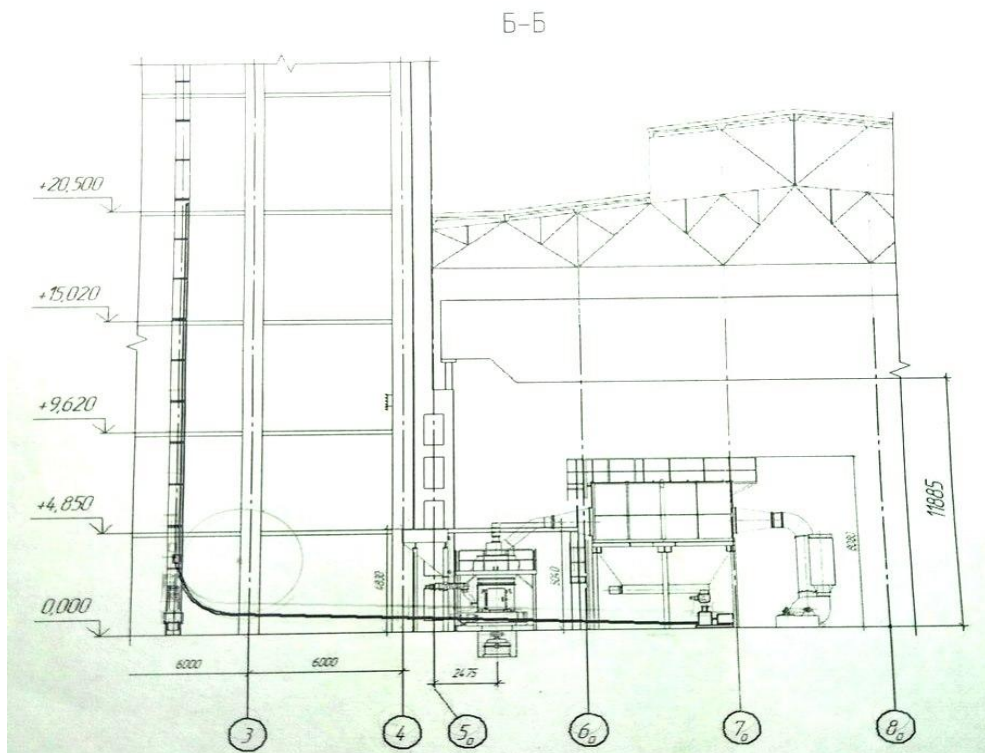


Рисунок 2.4 – Разрез Б-Б.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР



Задача исследования заключается в решении выперечисленных проблем и повышение производительности системы пневмотранспорта.

Для решения поставленной выше задачи исследования составлен план мероприятий, каждый пункт которого решен и раскрыт в данной работе.

Алгоритм пути решения задачи исследования будет выглядеть следующим образом:

- анализ литературы и поиск методики расчета системы пневмотранспорта помола нефтяного кокса;
- экспериментальная проверка достоверности методики расчета;
- расчет системы пневмотранспорта по выбранной методике;
- поиск экономически целесообразных и энергосберегающих решений;
- анализ полученных результатов и возможность последующего внедрения в производство.

## 2.1 Анализ литературы

Пневматический способ перемещения сыпучих материалов внедрялся долгое время ввиду отсутствия научного обоснования процесса пневматического транспортирования, на основе которого можно было бы производить расчет и конструирование подобных установок. Опытные материалы, проверенные в процессе эксплуатации, хранились фирмами в секрете и не публиковались ими [12].

Между тем потребность в применении систем пневмотранспорта сыпучих материалов росла в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве и транспорте. Достоинствами данного вида транспорта являются не только надежные санитарно-гигиенические условия и небольшие габариты, но и возможность использования его в сочетании с различными массообменными и технологическими процессами, в частности:

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

охлаждением, сушкой, размолом, сепарацией, очисткой от газов и пылей транспортируемых материалов и т.д.

Дальнейшее развитие и совершенствование пневматического транспорта вызывает необходимость изыскания и разработки средств и методов расчета и проектирования данных систем.

Первой классической работой, посвященной экспериментальному исследованию пневмотранспорта зерновых материалов, является работа немецкого инженера И. Гастерштадта, выполненная им в 1922-1923 гг., в которой впервые установлена линейная зависимость между падением давления и концентрацией материала для участков сети со стабилизовавшимся режимом транспортирования. В результате на основе исследований этого ученого была получена известная формула Дарси-Вейсбаха для определения потерь давления в местных сопротивлениях [8, 12].

Со временем появились различные гипотезы движения частиц [10]:

–Гипотеза о прямолинейном движении частиц в горизонтальном направлении под действием силы воздушного потока без учета силы тяжести частицы (гипотеза И. Гастерштадта и Е. Трефта);

–Гипотеза о движении частицы с учетом силы воздушного потока и силы тяжести;

–Гипотеза о движении частицы во взвешенном состоянии по гармоническому закону;

–Гипотеза о винтовом движении частицы во взвешенном состоянии, и др.

Доказательства вышеперечисленных гипотез могли быть получены лишь экспериментальными данными и последующим описанием закономерностей в виде математической модели.

Возникшие впоследствии методики расчета пневмотранспортных установок, рекомендуемые в печатных изданиях, предусматривают

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

определение диаметра трубопровода, расхода воздуха, общей потери давления, а также мощности воздуходувной машины. Анализ методов расчета систем пневмотранспорта показал, что общие потери давления представляют собой сумму потерь давления на ввод материала в трубопровод, потерь на подъём продукта, линейных потерь и потерь в местных сопротивлениях, потерь на выгрузку через разгрузочное устройство.

Известно, что скорость перемещения сыпучих материалов всегда меньше скорости транспортирующего воздуха. Четкой методики по определению отставания твердых частиц от потока воздуха нет. Каждый автор, исследуя конкретный материал исходит из своих положений.

Соотношения  $\frac{v_M}{v_B}$  рядом авторов при разных режимах потока воздуха получены для различных материалов весьма приближенно, причем наблюдения проводились главным образом в вертикальном трубопроводе при движении частиц в потоке воздуха сверху вниз.

Обоснование движения твердых частиц материала в потоке воздуха в горизонтальном трубопроводе так же остается не изученным до конца (калинушкин, Смолдырев, Евстифеев, Успенский)

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

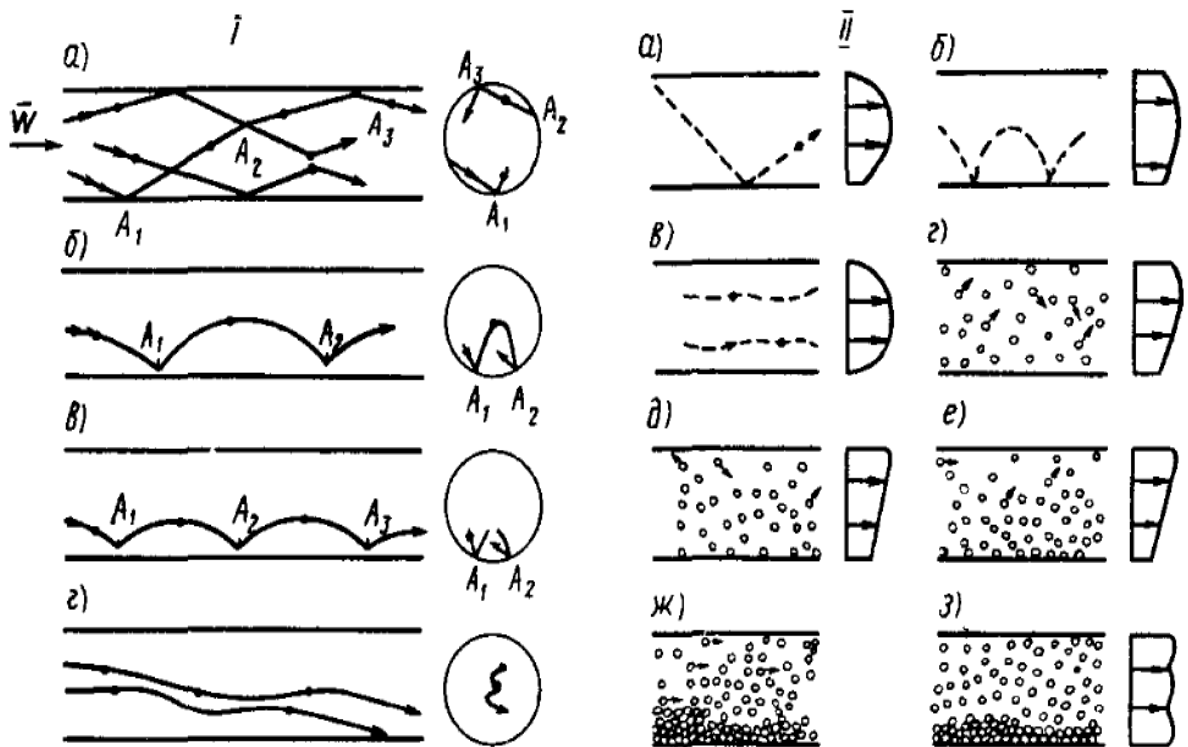


Рисунок 2.5 – Возможные состояния пневмотранспорта сыпучих материалов:

I – Траектории частиц при летящем и скачкообразном транспортировании по П. Шухарту: а – пневматическое транспортирование летящих частиц; б, в – скачкообразное транспортирование; г – гидравлическое и пневматическое транспортирование очень мелких частиц; II – траектории частиц по Г. Вельшофу: а, б – крупнозернистые и мелкие частицы при больших скоростях (60 м/с и выше); в, г – крупнозернистые и мелкие частицы при небольших скоростях (40-50 м/с); д, е – мелкие частицы при увеличении концентрации; ж, з – мелкие частицы при дальнейшем увеличении концентрации.

Анализ теоретических положений движения твердых частиц в горизонтальных трубопроводах постоянного сечения показал, что процессы движения потоков сыпучих материалов исследованы недостаточно и слабо отражают физико-механические свойства и динамику сыпучих материалов. Решение этих вопросов требует математического обоснования выдвинутых исследователями гипотез, проверки их в экспериментальных и производственных условиях для последующей корректировки и применения в расчетах пневмотранспортных установок.

Реальный же процесс транспортировки дисперсного материала, как показали исследования [7] сопровождается колебательными явлениями концентрации, давления, скоростей частиц и газа, что приводит к потере устойчивости систем. Это вызывает завалы и гребни, перекрывающие поперечное сечение трубы.

Нормативных документов, регламентирующих проектирование, изготовление и эксплуатацию систем пневмотранспорта на различных предприятиях в настоящее время не существует, поэтому при проектировании данных систем приходится руководствоваться литературой, которая имеет лишь рекомендательный характер [4].

## 2.2 Теория витания частицы

Скорость движения воздуха в материалопроводе является основным показателем при проектировании пневмотранспортной установки. Следует учитывать, что с увеличением скорости воздуха возрастает необходимая мощность (примерно в третьей степени от скорости воздуха), происходит дробление транспортируемого материала, увеличивается износ материалопровода, отделителей, пневмосепараторов и снижается эффект работы оборудования. Поэтому желательно, чтобы скорость воздуха при транспортировании материала была как можно меньше. Однако работа пневмотранспортных установок с предельно допустимой малой скоростью воздуха может привести к завалам материалопроводов. Определение надежно транспортирующих скоростей воздуха для транспортирования различных материалов основано пока на опытных данных и результатах многочисленных испытаний действующих пневмотранспортных установок.

Рассмотрим положение частицы в вертикальном материалопроводе, в котором действует выровненный восходящий воздушный поток (рисунок 2.6.).

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

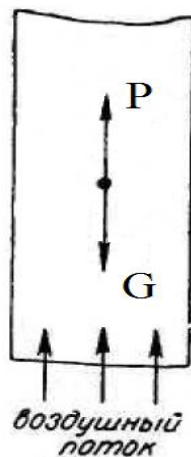


Рисунок 2.6. – Силы, действующие на частицу в воздушном потоке.

Как видно из рисунка, на частицу действуют две противоположно направленные силы: сила тяжести  $G$  и аэродинамическая сила давления воздуха  $P$ .

В зависимости от аэродинамической силы давления воздуха  $P$  могут быть три случая:

Частица опускается, когда  $G > P$ ;

Частица поднимается, когда  $G < P$ ;

Частица находится в относительном равновесии, колеблется около какого-то среднего положения, когда  $G = P$ . Скорость воздушного потока, при которой частицы материала будут находиться во взвешенном состоянии, называется скоростью витания.

Скорость витания зависит от веса частицы, площади миделевого сечения (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную к оси воздушного потока), удельного веса воздуха и коэффициента сопротивления, характеризующего форму тела, состояние его поверхности и режим потока, определяемый числом Рейнольдса. Скорость витания можно в общем виде определить расчетным путем. Но на практике при проектировании системы пневмотранспорта используют величину скорости витания для каждого вида пыли, полученную эмпирическим путем.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

## 2.3 Определение скорости витания расчетным путем

Скорость витания является основным критерием, характеризующим аэродинамические свойства частиц и возможность их пневматического транспортирования [6].

Во время анализа литературы было установлено, что для помола нефтяного кокса отсутствуют данные эмпирических значений скорости витания частиц. Поэтому величину скорости витания для данной пыли возможно определить только расчетным путем, далее подтвердив полученные значения экспериментом.

Величину аэродинамической силы давления воздуха можно определить по формуле:

$$P = KF_M(\vartheta_B - \vartheta_M)^2, \text{кГ} \quad (2.1)$$

Где  $F_M$  - площадь миделевого сечения в  $\text{м}^2$ , для шара  $F_M = \frac{\pi d^2}{4}$ ;

$\vartheta_B$  - скорость движения воздуха, м/с;

$\vartheta_M$  - скорость движения материала, м/с;

$K$  - коэффициент сопротивления.

При теоретическом определении величины сопротивления частиц неправильной формы их условно заменяют «эквивалентным шаром», имеющим тот же объем и вес. Для частиц шаровидной формы  $K = 0,24 \frac{\rho_B}{g}$ .

Величину силы тяжести для тел, имеющих форму шара, определяют по формуле:

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \rho_M, \quad (2.2)$$

Где  $d$  – диаметр частицы;

$\rho_M$  - удельный вес материала.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

Учитывая, что витание частиц наблюдается при  $G = P$ , когда  $\vartheta_M = 0$ , а  $\vartheta_B = \vartheta_{\text{ВИТ}}$  и, подставляя вместо  $G$  и  $P$  их значения, получаем равенство:

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_M = KF_M (\vartheta_B - \vartheta_M)^2$$

$$\text{или } \frac{\pi d^3}{6} \rho_M = 0,24 \frac{\rho_B}{g} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \vartheta_{\text{ВИТ}}^2,$$

$$\vartheta_{\text{ВИТ}} = 5,3 \sqrt{d \frac{\rho_M}{\rho_B}}. \quad (2.3)$$

Таким образом для помола нефтяного кокса значение скорости витания будет равно:

$$\vartheta_{\text{ВИТ}} = 5,3 \sqrt{0,071 \cdot 10^{-3} \frac{800}{1,2}} = 1,15 \text{ м/с}$$

#### **2.4 Описание эксперимента по определению скорости витания частицы помола нефтяного кокса**

В расчете системы пневмотранспорта основным критерием для определения скорости транспортирования в материалопроводе является скорость витания частицы.

Аэродинамическую характеристику частиц возможно определить путем опытного измерения скорости частицы (рисунок 2.7).



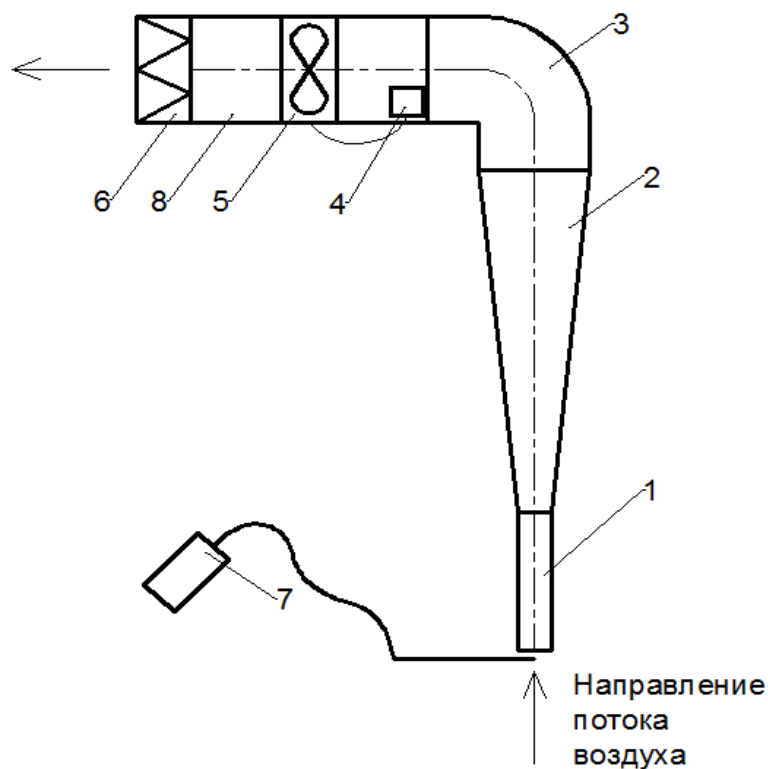


Рисунок 2.7 – Экспериментальная установка по определению скорости витания частицы: 1 – всасывающий патрубок; 2 – коническая труба из орг. стекла; 3 – отвод; 4 – частотное регулирование вентилятора; 5 – вентилятор; 6 – фильтр кассетный; 7 – анемометр; 8 – воздуховод.

Основной рабочей частью экспериментальной установки является коническая труба (конусностью  $5^\circ$ ), выполненная из органического стекла. Воздух в трубу поступает через коллектор, входная часть которого выполнена по лемнискате, и через систему воздуховодов и компенсационную камеру направляется к вентилятору (рис. 2.8).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Рисунок 2.8 – Фотография экспериментальной установки по определению скорости витания частиц помола нефтяного кокса.

Скорость витания определяется следующим образом. Исследуемая частица помещается в коллектор (рис. 2.9), и фиксируются ее зависающие положения относительно сечения конической трубы ( $x_i$ ) (рис. 2.10). Учитывая наличие пульсаций, для повышения точности, производили  $N$  отсчетов расстояний  $x$ . С каждым расчетом и при различных режимах вентилятора анемометром замерялась скорость в сечении всасывающего патрубка (рис. 2.11). Скорость витания находилась как среднее значение от  $N$  измерений.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Рисунок 2.9– Помещение частиц помола нефтяного кокса в коллектор экспериментальной установки.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

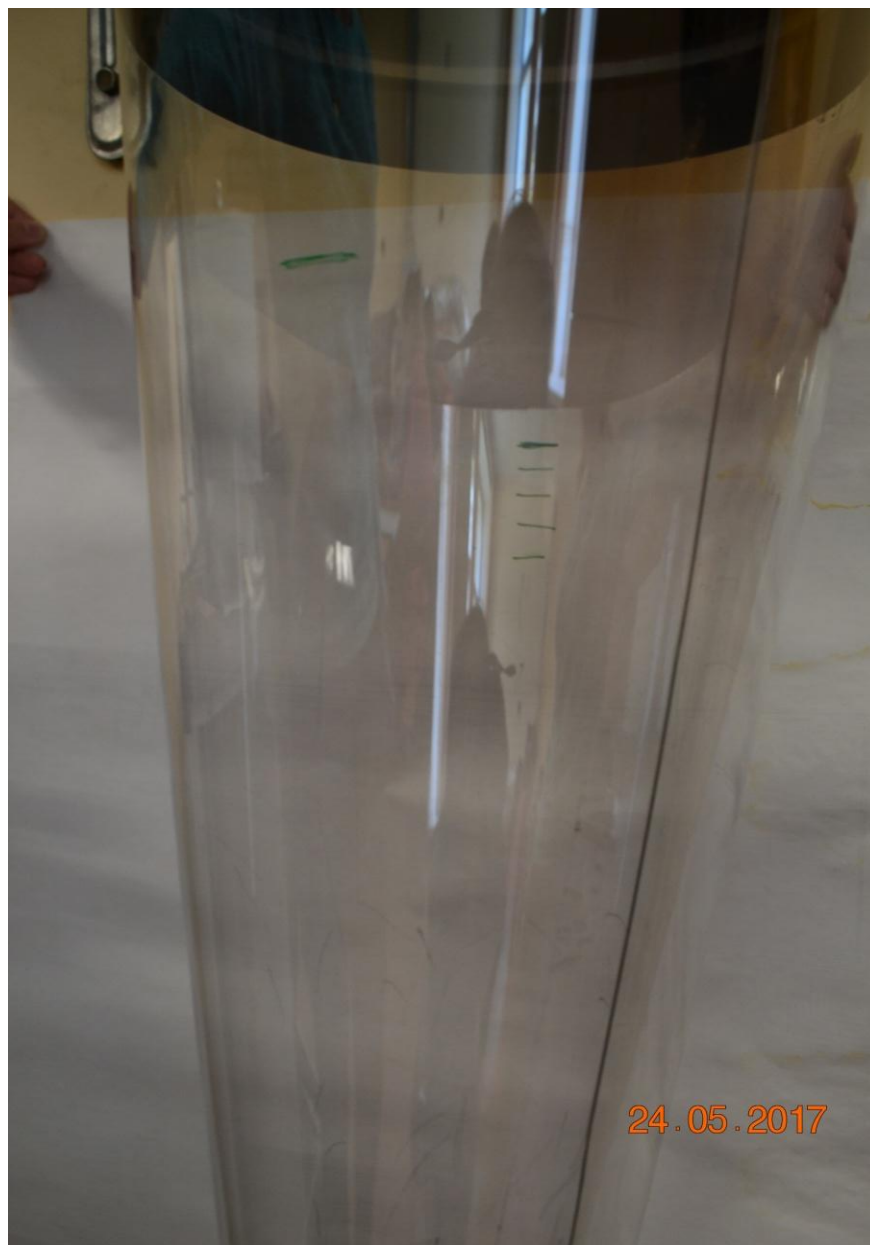


Рисунок 2.10 – Отметки зависания частиц относительно конической трубы.



Рисунок 2.11 – Измерение скорости во всасывающем патрубке экспериментальной установки с помощью термоанемометра «Актаком» АТТ-1004.

Исходные измерения при различных режимах вентилятора отражены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. – Измерения скорости воздуха во всасывающем патрубке при различных режимах работы вентилятора.

d всас, м	F всас, м <sup>2</sup>	Режим частотного регулирования	V всас, м/с	G, м <sup>3</sup> /ч
0,063	0,003117	1	10	112,221
0,063	0,003117	2	11	123,443
0,063	0,003117	3	12,3	138,032
0,063	0,003117	4	13,6	152,620
0,063	0,003117	5	14,2	159,354
0,063	0,003117	6	14,4	161,598
0,063	0,003117	7	14,7	164,965
0,063	0,003117	8	15,2	170,576
0,063	0,003117	9	15,1	169,453

Примечание: Цветом выделен режим, при котором производились измерения.

По итогам эксперимента было произведено 10 измерений скорости воздуха во всасывающей трубке и высот частиц помола относительно основания конуса при режиме № 1 частотного регулирования вентилятора (таблица 2.6).

Таблица 2.6. – Результаты измерений

№ п/п	Высота конуса, м	d сеч, м	Fсеч, м2	Vвит, м/с	Vвит(теор), м/с	Погрешность измерений
1	0,60	0,200	0,031416	0,99		
2	0,59	0,197	0,030481	1,02		
3	0,57	0,193	0,029255	1,07		
4	0,58	0,195	0,029865	1,04		
5	0,59	0,198	0,030791	1,01		
6	0,50	0,190	0,028353	1,10		
7	0,58	0,196	0,030172	1,03		
8	0,59	0,197	0,030481	1,02		
9	0,53	0,188	0,027759	1,12		
10	0,58	0,194	0,029559	1,05		
				1,05	1,15	-8,96

В результате эксперимента проверено, что в методике расчета скорости витания частицы определена верно. Погрешность составила -8,96 %, что является допустимым значением. Следовательно методика достоверна и применима в расчетах транспортирования помола нефтяного кокса.

### 3 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПНЕВМОТРАНСПОРТА

Задачами реконструкции являются такие недостатки существующей системы как ненормируемые параметры микроклимата воздуха рабочей зоны, пожароопасность в цехе, потери продукта из-за негерметичности системы и расширение объёмов производства. Основные характеристики существующей системы пневмотранспорта помола нефтяного кокса приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. – Характеристики системы пневмотранспорта до реконструкции.

Характеристика	Ед. изм.	Значение параметра
Производительность системы	кг/час	1500
Массовая концентрация, $\frac{G_m}{G_B}$	-	8,3
Количество воздуха	м3/час	150
Потери давления	Па	1 800 000-4 000 000
Электрическая мощность оборудования	кВт	30
Внутренний диаметр материалопровода	мм	77

Рекомендовано реконструкцию системы произвести двумя путями:

- Повышение производительности системы с сохранением существующей сети трубопроводов. Это достигается повышением концентрации материала по отношению к количеству воздуха и ведет к замене только вентиляционного оборудования.

- Повышение производительности системы с полной заменой компонентов системы. При этом увеличено сечение материалопровода с увеличением количества воздуха, транспортирующего материал, и уменьшение весовой концентрации.

Основными характеристиками для расчета систем пневмотранспорта является скорость витания, количество воздуха и массовая концентрация материала по отношению к воздуху.



Для расчета системы пневмотранспорта была выбрана методика расчета из методических указаний ГОУ ВПО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова» за 2011 г. [11]

### 3.1 Реконструкция системы пневмотранспорта. Вариант № 1.

При расчёте пневмотранспортных установок определяют расчетные нагрузки и скорости воздуха в материалопроводах, диаметры материалопроводов воздухопроводов, потери давления в элементах установок, размеры шлюзовых затворов и циклонов-разгрузителей с устройством для регулирования скорости воздуха, подачу и давление воздуходувки, мощность электродвигателя воздуходувки.

Данный расчет производится для проверки возможности повышения производительности системы с существующим материалопроводом (рисунок 3.1).

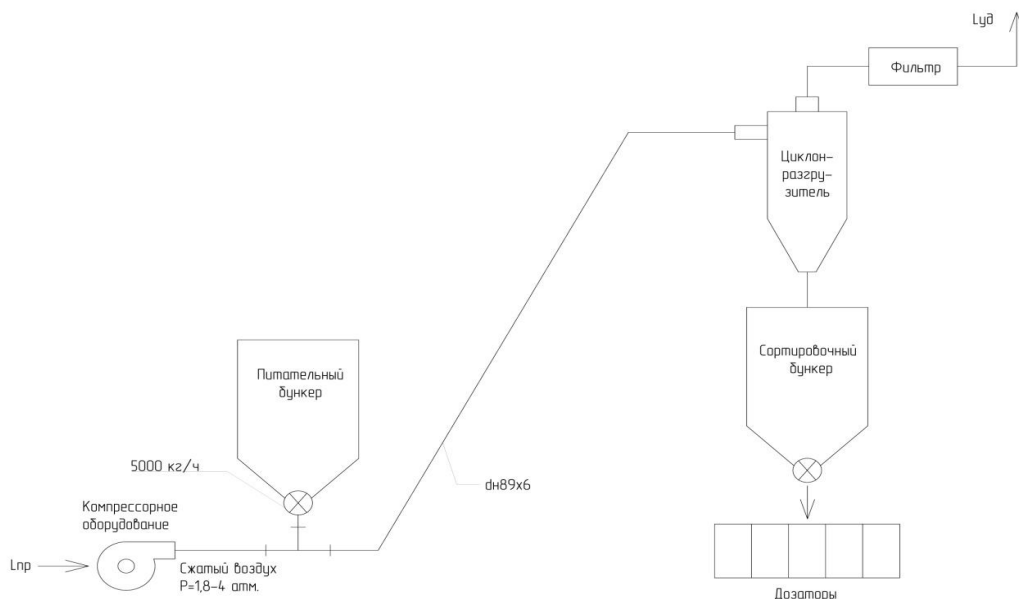


Рисунок 3.1 – Схема расчета системы пневмотранспорта № 1.

#### 3.1.1 Расчет материалопровода

Для расчета материалопроводов обязательно предварительное определение или выбор основных исходных величин:

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37



- расчетной производительности простой установки или нагрузок на материалопроводы сложной пневмоустановки  $G$  (т/сут, кг/с);
- скоростей витания транспортируемых продуктов  $v_{\text{ВИТ}}$  (м/с);
- расчетной длины материалопроводов  $l$  (м), высоты подъема продукта  $h$ , в том числе суммы коэффициентов местных сопротивлений  $\sum \xi$  в материалопроводах;
- коэффициентов концентрации  $\mu$ ;
- надежно транспортирующих скоростей воздуха,  $v$  (м/с).

Расчётная нагрузка известна и она равна  $G = 5000 \text{ кг/ч} = 1,39 \text{ кг/с}$ .

Скорость витания:

$$v_{\text{ВИТ}} = 5,3 \sqrt{d \cdot \frac{\rho_M}{\rho_B}}, \quad (3.1)$$

Где  $d$  - диаметр частицы, мм;

$\rho_M$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>. В расчетах пневмотранспорта допускается принимать плотность стандартного воздуха  $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$

$$v_{\text{ВИТ}} = 5,3 \sqrt{d \cdot \frac{\rho_M}{\rho_B}}, \quad (3.2)$$

$$v_{\text{ВИТ}} = 5,3 \sqrt{0,071 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{800}{1,2}} = 1,15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Скорость трогания:

$$v_T = 1,3 \sqrt[3]{\rho_M}, \quad (3.3)$$

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

$$v_T = 1,3\sqrt[3]{800} = 12,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Расчетная скорость воздуха в материалопроводе:

$$v = K_3(10,5 + 0,57 \cdot v_{\text{ВИТ}})G, \quad (3.4)$$

Где  $K_3$  – коэффициент запаса, обеспечивающий устойчивое транспортирование при колебаниях нагрузки на пневмотранспортёр (таблица П.2 [1]).

$$v = 1,5(10,5 + 0,57 \cdot 1,15)1,39 = 24 \text{ м/с}$$

Количество воздуха:

$$Q_{\text{возд}} = 3600 \cdot F \cdot v = 3600 \cdot 0,0047 \cdot 24 = 406,1 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}, \quad (3.5)$$

Где  $F = 0,0047 \text{ м}^2$  – площадь сечения трубы сечением 89х6 мм.

Определяем весовую концентрацию аэросмеси:

$$\mu = \frac{1,15 \cdot G}{\rho_v \cdot Q_{\text{возд}}} \quad (3.6)$$

$$\mu = \frac{1,15 \cdot 5000}{1,2 \cdot 406,1} = 11,8$$

Потери давления в пневматическом приемном устройстве типа «тройник»:

$$H_{\text{пр}} = \xi_{\text{пр}} \cdot \rho_v \cdot \frac{v_{\text{пр}}^2}{2}, \quad (3.7)$$

$$H_{\text{пр}} = 1,5 \cdot 1,2 \cdot \frac{1,8^2}{2} = 2,92 \text{ Па}$$

Где  $v_{\text{пр}}$  – скорость воздуха в приемном устройстве.

$$v_{\text{пр}} = \frac{v \cdot F}{F_{\text{пр}}}, \quad (3.8)$$

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

Где  $F_{пр}$  - принято в зависимости от габаритов шлюзового затвора (250x250 мм). Характеристики шлюзового затвора см. прил. 1.

$$v_{пр} = \frac{24 \cdot 0,0047}{0,0625} = 1,8 \frac{м}{с}$$

Потери давления на сообщение скорости продукту при  $G = 1$  т/ч:

$$i = \frac{M \cdot v}{D^2}, \quad (3.9)$$

$$i = \frac{0,35 \cdot 24}{0,077^2} = 1417 \text{ Па}$$

Где  $M = 0,35$  для мягких продуктов;

$D$  – диаметр материалопровода, м.

Потери давления на разгон всего продукта при  $G = 5$  т/ч:

$$H_{разг} = 1417 \cdot 5 = 7085 \text{ Па}$$

Потери на восстановление скорости продукта:

$$H_{вост} = \Delta y \cdot i \cdot G, \quad (3.10)$$

$$H_{вост} = 0,4 \cdot 1417 \cdot 5 = 2834 \text{ Па},$$

Где  $\Delta y$  - коэффициент, зависящий от величины угла отвода, отношения радиуса отвода к диаметру материалопровода и длины прямолинейного участка за отводом (таблица 1, [1]).

Потери давления от трения при движении аэросмеси в прямолинейных вертикальных и горизонтальных участках материалопровода определяют по формулам:

$$H_{пр.в} = H_{ч}(1 + K_{в}\mu); \quad (3.11)$$

$$H_{пр.г} = H_{ч}(1 + K_{г}\mu); \quad (3.12)$$

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

Где  $H_{\text{ч}}$  - потери давления от трения при движении в материалопроводе чистого воздуха, Па;

$K_{\text{в}}, K_{\text{г}}$  - экспериментальные коэффициенты.

Потери давления от трения при движении чистого воздуха в материалопроводе определяют по формуле:

$$H_{\text{ч}} = R_{\text{п.м}} \cdot l, \quad (3.13)$$

Где  $R_{\text{п.м}}$  - потери давления на трение на 1 м материалопровода при движении чистого воздуха,  $\text{Па} \cdot \text{м}^{-1}$ ;

$l$  - длина прямолинейных участков материалопровода, м.

Величину  $R_{\text{п.м}}$  определяют по формуле:

$$R_{\text{п.м}} = \frac{\lambda}{D} \rho \frac{v^2}{2}, \quad (3.14)$$

Где  $\lambda$  - опытный коэффициент трения.

Коэффициент  $\lambda$  определяют по формуле Никурадзе:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,75 + 2 \lg \frac{D}{2\delta}\right)^2}, \quad (3.15)$$

Где  $\delta$  - высота выступов шероховатости, м.

При расчете материалопроводов для продуктов размола  $\delta = 0,2 \cdot 10^{-3}$  м.

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,75 + 2 \lg \frac{0,077}{2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}\right)^2} = 0,025$$

$$R_{\text{п.м}} = \frac{0,025}{0,077} \cdot 1,2 \cdot \frac{24^2}{2} = 112,21 \text{ Па/м}$$

$$H_{\text{ч}} = 112,21 \cdot 65 = 7294 \text{ Па}$$

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

Экспериментальный коэффициент  $K_B$  для продуктов размола определяют по формуле:

$$K_B = \frac{A_B(D - 0,04)}{\varrho^{1,33}}, \quad (3.16)$$

$$K_B = \frac{160(0,077 - 0,04)}{24^{1,33}} = 0,086$$

Где  $A_B = 160$  - для мягких продуктов.

Экспериментальный коэффициент  $K_r$  для продуктов размола определяют по формуле:

$$K_r = \frac{A_r \cdot D}{\varrho^{1,25}}, \quad (3.17)$$

$$K_r = \frac{110 \cdot 0,077}{24^{1,25}} = 0,159$$

Где  $A_r = 110$  для мягких продуктов.

В итоге линейные потери в материалопроводе равны:

$$H_{\text{пр.в}} = 7294(1 + 0,86 \cdot 11,8) = 14696 \text{ Па}$$

$$H_{\text{пр.г}} = 7294(1 + 0,159 \cdot 11,8) = 20979 \text{ Па}$$

Потери давления в отводе  $H_{\text{отв}}$  определяют по формуле:

$$H_{\text{отв}} = H_{\text{отв.ч}}(1 + K_{\text{отв}} \cdot \mu), \quad (3.18)$$

Где  $H_{\text{отв.ч}}$  - потери давления в отводе при движении чистого воздуха, Па;

$K_{\text{отв}}$  - коэффициент сопротивления при движении продукта в отводе.

$$K_{\text{отв}} = \frac{B \cdot E}{\varrho^{1,25} \left(\frac{r}{D}\right)^m}, \quad (3.19)$$

Где  $r$  - радиус закругления отвода, м;

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$V, m, E$  - экспериментальные коэффициенты, зависящие от расположения отвода в пространстве и типа транспортируемого продукта, определяются по таблице 2.3, [11].

$$H_{\text{отв.ч}} = \Delta_{\text{отв}} \cdot \xi_{\text{отв}} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3.20)$$

Где  $\Delta_{\text{отв}}, \xi_{\text{отв}}$  - экспериментальные коэффициенты, зависящие от диаметра материалопровода и радиуса отвода, определяемые по таблицам 2.4 и 2.5, [11].

Потери в отводах с чистым воздухом:

$$H_{\text{отв.ч}}^1 = 1 \cdot 1,18 \cdot \frac{1,2 \cdot 24^2}{2} = 408 \text{ Па}$$

$$H_{\text{отв.ч}}^2 = 1 \cdot 0,9 \cdot \frac{1,2 \cdot 24^2}{2} = 311 \text{ Па}$$

$$K_{\text{отв}}^1 = \frac{400 \cdot 1,15}{24^{1,25} \left( \frac{2,462}{0,077} \right)^{0,15}} = 5,922$$

$$K_{\text{отв}}^2 = \frac{320 \cdot 1,41}{24^{1,25} \left( \frac{1,385}{0,077} \right)^{0,23}} = 4,370$$

$$H_{\text{отв}}^1 = 408 \cdot (1 + 5,922 \cdot 11,8) = 28919 \text{ Па}$$

$$H_{\text{отв}}^2 = 311 \cdot (1 + 4,370 \cdot 11,8) = 16348 \text{ Па}$$

Потери давления на подъем продукта по вертикали:

$$H_{\text{под}} = 1,2 \cdot \mu \cdot S \cdot g = 1,2 \cdot 11,8 \cdot 20,5 \cdot 9,81 = 2848 \text{ Па}$$

Общие потери в материалопроводе:

$$\begin{aligned} H_{\text{общ}}^{\text{мат}} &= H_{\text{пр}} + H_{\text{разг}} + H_{\text{вост}} + H_{\text{пр.в}} + H_{\text{пр.г}} + H_{\text{отв}}^1 + H_{\text{отв}}^2 + H_{\text{под}} \\ &= 2,92 + 7085 + 2834 + 14696 + 20979 + 28919 + 16348 \\ &\quad + 2848 = 93712 \text{ Па} \end{aligned}$$

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

### 3.1.2 Расчет и подбор циклона-разгрузителя

Циклон – разгрузитель подбирают по количеству поступающего в него воздуха  $Q_{ц,р}$ , м<sup>3</sup>/ч и скорости воздуха  $v_{ц,р}$  м/с во входном патрубке циклона – разгрузителя.

Поперечное сечение входного патрубка циклона – разгрузителя:

$$F_{ц,р} = \frac{Q_{ц,р}}{3600v_{ц,р}}, \quad (3.21)$$

$$F_{ц,р} = \frac{406,1}{3600 \cdot 17} = 0,007 \text{ м}^2$$

Где  $Q_{ц,р}$  - количество воздуха, поступающего в циклон-разгрузитель, м<sup>3</sup>/ч;

$v_{ц,р}$  - скорость во входном патрубке циклона – разгрузителя.

Для циклона УЦМ-38-350 (для продуктов размола)  $v_{ц,р} = 14 - 20$  м/с (рисунок 3.2.)

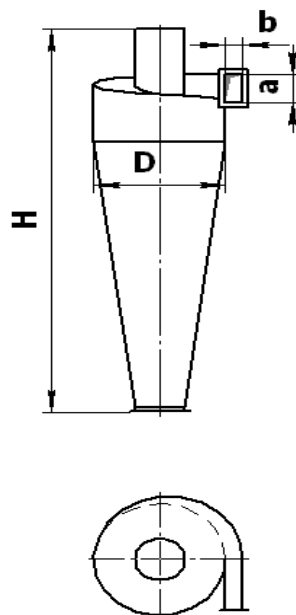


Рисунок 3.2. – Циклон УЦМ-38 – 350.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

Потери давления в циклоне-разгрузителе составят:

$$H_{ц,р} = \xi_{ц,р} \cdot \rho_{ц,р} \cdot \frac{v_{ц,р}^2}{2}, \quad (3.22)$$

$$H_{ц,р} = 7 \cdot 1,2 \cdot \frac{17^2}{2} = 1214 \text{ Па}$$

Таблица 3.2 – Основные технические параметры циклона УЦМ-38-350.

Производительность, м3/час	D, мм	H, мм	Axb, мм	Вес, кг
340-400	350	1135	88x105	22

### 3.1.3 Расчет и подбор фильтра

На промышленных предприятиях в качестве второй ступени очистки воздуха используются рукавные фильтры.

Рукавные фильтры рассчитывают в следующем порядке.

Необходимая площадь фильтрации определяется по формуле (3.19):

$$S = \frac{Q}{q_B}, \quad (3.23)$$

Где  $Q$  - расход очищаемого воздуха, м3/ч;

$q_B$  - удельная воздушная нагрузка, м3/(м2·ч), при отсутствии данных можно принять  $q_B = 50$  м3/(м2·ч).

$$S = \frac{406,1}{50} = 8,12 \text{ м}^2$$

Требуемое число рукавных фильтров определяют по формуле (3.20):

$$n_p = S/S_1, \quad (3.24)$$



Где  $S_1$  - суммарная площадь ткани рукавов в одном фильтре, м<sup>2</sup> (см. табл. 3.3)

Таблица 3.3 – Технические характеристики рукавного фильтра ФТНС-4.

Марка фильтра	Площадь поверхности фильтрации		Число элементов			Диаметр рукава, мм	Длина рукава, мм	Масса фильтра, кг	Потери давления, Па
	общая	рабочая	секций	рукавов секций	рукавов в фильтре				
ФТНС-4	12	12	1	4	4	385	2500	950	490

По характеристике площади поверхности фильтрации выбран рукавный фильтр ФТНС-4 (рис. 3.3).

Количество фильтров, шт, равно:

$$n_p = 8,12 / 12 = 1$$

Фактическая воздушная нагрузка на ткань, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч), определяется по формуле (3.21):

$$q_\phi = \frac{Q}{(S_1 n_p)}, \quad (3.25)$$

$$q_\phi = \frac{406,1}{(12 \cdot 1)} = 33,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

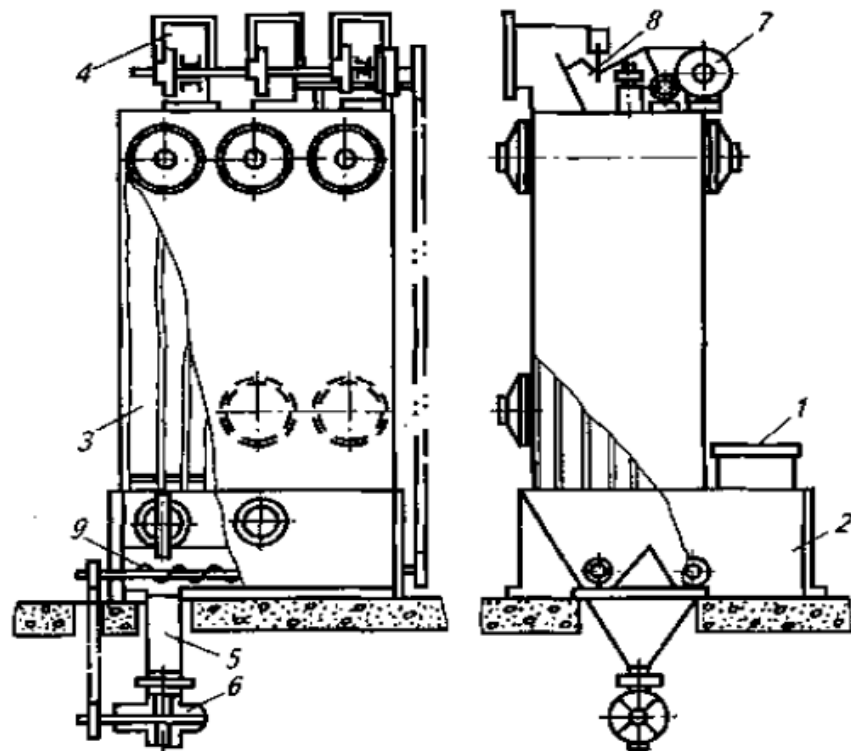


Рисунок 3.3 – Самовстряивающийся рукавный фильтр ФТНК-4:

1 - входной патрубок; 2 – корпус; 3 – фильтрующий рукав; 4 – клапанная коробка; 5 – пылесборник; 6 – выпускной клапан; 7 – встряхивающее устройство; 8 – клапан; 9 – шнек.

### 3.1.4 Расчет и подбор воздуходувки.

Общие потери в системе составят:

$$H = H_{\text{общ}}^{\text{мат}} + H_{\text{ц.р}} + H_{\text{ф}}, \quad (3.26)$$

$$H = 93712 + 1214 + 490 = 95416 \text{ Па}$$

Характеристика воздуходувки принимается с запасом 10 %:

$$H = 95416 \cdot 1,1 = 104958 \text{ Па}$$

По полученным характеристикам производителем воздуходувок и компрессорного оборудования «Atlas Copco» была подобрана винтовая воздуходувка ZS18 (рис. 2.9), характеристики которой отражены в таблице 3.3.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------



Таблица 3.4 – Основные технические параметры воздуходувки ZS18.

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Величина
1.	Производительность при рабочем давлении 110000 Па, параметр на всасе	м3/час	438
2.	Максимальное эффективное рабочее давление, избыточное	Па	120000
3.	Минимальное эффективное давление, избыточное	Па	60000
4.	Температура воздуха на выходе при давлении 110000 Па, не более	°С	129
5.	Установленная мощность привода	кВт	18
6.	Температура воздуха на входе в воздуходувку	°С	-20...+40
7.	Температура окружающей среды в месте установки	°С	0...40
8.	Габаритные размеры без упаковки Д/Ш/В	мм	1610/1610/ 1248
9.	Масса оборудования	кг	686

В результате расчета варианта № 1 реконструкции системы пневмотранспорта увеличена производительность с 1500 кг/час до 5000 кг/час без замены существующего трубопровода. Концентрация материала в транспортирующем воздушном потоке увеличена в 1,42 раза. Количество воздуха в системе увеличено в 2,7 раз, а электрическая мощность

оборудования уменьшена в 1,6 раз. На основе полученных характеристик подобраны воздуходувка, циклон-разгрузитель и фильтр.

### **3.2 Реконструкция системы пневмотранспорта. Вариант № 2**

#### **3.2.1 Расчет материалопровода**

В варианте № 2 реконструкции системы пневмотранспорта увеличен диаметр материалопровода, увеличено количество воздуха и уменьшена концентрация.

При выборе наибольшего диаметра материалопровода предложены рекомендации, согласно которым, ряд стандартных диаметров, по которым следует принимать внутренний диаметр материалопровода для внутрицеховых систем пневмотранспорта составляет: 56, 60, 66, 72, 76, 81, 85, 91, 98, 103, 108, 115, 119, 125, 133, 144, 150, 163, 173, 182, 192 мм [6,11].

Для расчета принят наибольший возможный внутренний диаметр материалопровода - 192 мм. Расчетная схема № 2 будет выглядеть следующим образом (рисунок 3.4):

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

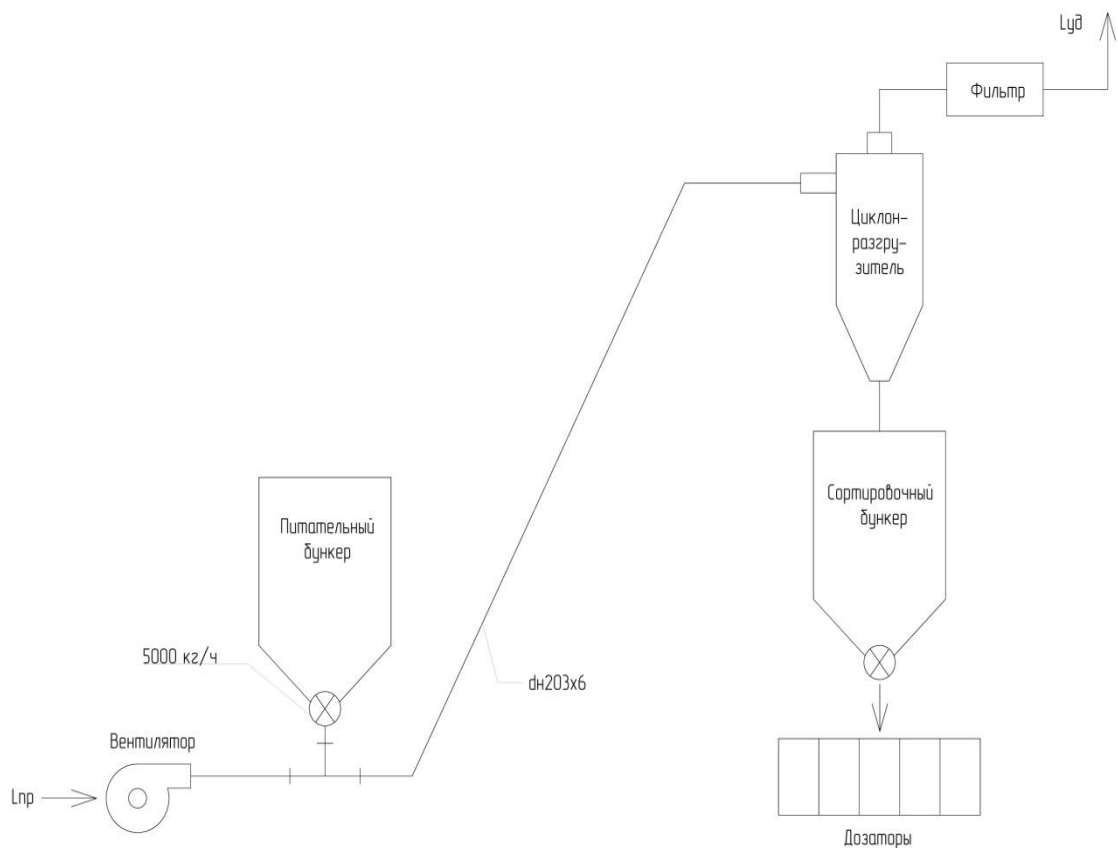


Рисунок 3.4 – Расчетная схема № 2.

Количество воздуха при заданной скорости витания 1,15 м/с и транспортирующей скорости 24 м/с:

$$Q_{\text{возд}} = 3600 \cdot F \cdot v, \quad (3.27)$$

$$Q_{\text{возд}} = 3600 \cdot 0,029 \cdot 24 = 2505,6 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Где  $F = 0,029 \text{ м}^2$  – площадь сечения трубы с внутренним диаметром 192 мм.

Определяем весовую концентрацию аэросмеси по (3.6):

$$\mu = \frac{1,15 \cdot 5000}{1,2 \cdot 2505,6} = 1,9$$

Потери давления в пневматическом приемном устройстве типа «тройник» по (3.7):

									Лист
									50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР				

$$H_{\text{пр}} = 1,5 \cdot 1,2 \cdot \frac{11,1^2}{2} = 110,9 \text{ Па}$$

Где  $\vartheta_{\text{пр}}$  – скорость воздуха в приемном устройстве (3.8).

$$\vartheta_{\text{пр}} = \frac{24 \cdot 0,029}{0,0625} = 11,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Потери давления на сообщение скорости продукту при  $G = 1 \text{ т/ч}$  (3.9):

$$i = \frac{0,35 \cdot 24}{0,192^2} = 228 \text{ Па}$$

Потери давления на разгон всего продукта при  $G = 5 \text{ т/ч}$  (3.10):

$$H_{\text{разг}} = 228 \cdot 5 = 1140 \text{ Па}$$

Потери на восстановление скорости продукта (3.11):

$$H_{\text{вост}} = \Delta y \cdot i \cdot G = 0,4 \cdot 228 \cdot 5 = 456 \text{ Па}$$

Находим линейные потери в вертикальных и горизонтальных участках (3.12;3.13;3.14):

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,75 + 2lg \frac{0,192}{2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}\right)^2} = 0,020$$

$$R_{\text{п.м}} = \frac{0,020}{0,192} \cdot 1,2 \cdot \frac{24^2}{2} = 36 \text{ Па/м}$$

$$H_{\text{ч}} = 36 \cdot 65 = 2340 \text{ Па}$$

Экспериментальный коэффициент  $K_{\text{в}}$  для продуктов размола определяют по формуле (3.15):

$$K_{\text{в}} = \frac{160(0,192 - 0,04)}{24^{1,33}} = 0,355$$

Где  $A_{\text{в}} = 160$  - для мягких продуктов.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

Экспериментальный коэффициент  $K_r$  для продуктов размола определяют по формуле (3.16):

$$K_r = \frac{110 \cdot 0.192}{24^{1.25}} = 0,398$$

Где  $A_r = 110$  для мягких продуктов.

В итоге линейные потери в материалопроводе равны (3.17;3.18):

$$H_{пр.в} = 2340(1 + 0,355 \cdot 1,9) = 3918 \text{ Па}$$

$$H_{пр.г} = 2340(1 + 0,398 \cdot 1,9) = 4110 \text{ Па}$$

Потери давления в отводах (3.20; 3.21; 3.22; 3.23; 3.24; 3.25):

$$H_{отв.ч}^1 = 1 \cdot 0,45 \cdot \frac{1,2 \cdot 24^2}{2} = 156 \text{ Па}$$

$$H_{отв.ч}^2 = 1 \cdot 0,35 \cdot \frac{1,2 \cdot 24^2}{2} = 121 \text{ Па}$$

$$K_{отв}^1 = \frac{400 \cdot 1,15}{24^{1,25} \left(\frac{2,462}{0,192}\right)^{0,15}} = 5,905$$

$$K_{отв}^2 = \frac{320 \cdot 1,41}{24^{1,25} \left(\frac{1,385}{0,192}\right)^{0,23}} = 5,391$$

$$H_{отв}^1 = 156 \cdot (1 + 5,905 \cdot 1,9) = 1906 \text{ Па}$$

$$H_{отв}^2 = 121 \cdot (1 + 5,391 \cdot 1,9) = 1360 \text{ Па}$$

Потери давления на подъем продукта по вертикали (3.26):

$$H_{под} = 1,2 \cdot 1,9 \cdot 20,5 \cdot 9,81 = 459 \text{ Па}$$

Общие потери в материалопроводе (3.27):

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

$$\begin{aligned}
 H_{\text{общ}}^{\text{мат}} &= H_{\text{пр}} + H_{\text{разг}} + H_{\text{вост}} + H_{\text{пр.в}} + H_{\text{пр.г}} + H_{\text{отв}}^1 + H_{\text{отв}}^2 + H_{\text{под}} \\
 &= 110,9 + 1140 + 456 + 3918 + 4110 + 1906 + 1360 + 459 \\
 &= 13460 \text{ Па}
 \end{aligned}$$

### 3.2.2 Расчет и подбор циклона-разгрузителя

Поперечное сечение входного патрубка циклона – разгрузителя (3.28):

$$F_{\text{ц.р}} = \frac{2505,6}{3600 \cdot 14} = 0,050 \text{ м}^2$$

Для циклона-разгрузителя ЦРк-650  $v_{\text{ц.р}} = 14 - 20 \text{ м/с}$  ( рисунок 3.5)

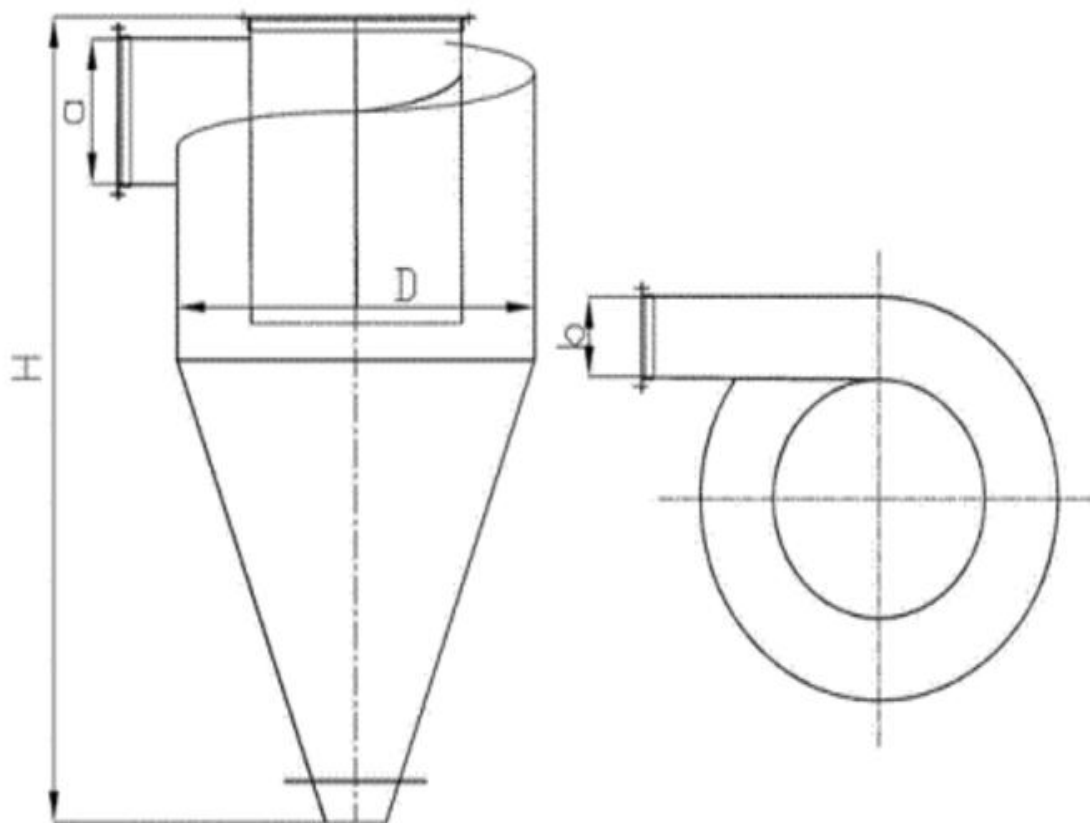


Рисунок 3.5 – Циклон ЦРк-650.

Потери давления в циклоне-разгрузителе (ЦРк-650) составят (3.29):

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



$$H_{ц,р} = 3,7 \cdot 1,2 \cdot \frac{14^2}{2} = 436 \text{ Па}$$

Таблица 3.5 – Основные технические параметры циклона ЦРК-650.

Производительность, м3/час	D, мм	H, мм	Axb, мм	Вес, кг
955-1910	650	1300	267x171	46,5

### 3.2.3 Расчет и подбор фильтра

Необходимая площадь фильтрации определяется по формуле (3.23):

$$S = \frac{2505,6}{50} = 50,11 \text{ м}^2$$

Требуемое число рукавных фильтров определяют по формуле (3.24).

По характеристике площади поверхности фильтрации выбран рукавный фильтр ФТНС-4 (рисунок 3.6; таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Технические характеристики рукавного фильтра ФРКИ-60.

Марка фильтра	Площадь поверхности фильтрации, м2	Число элементов			Диаметр рукава, мм	Длина рукава, мм	Потери давления, Па
		секций	рукавов секций	рукавов в фильтре			
ФРКИ-60	60	2	36	72	135	2000	640

Количество фильтров, шт, равно (3.24):

$$n_p = 50,11 / 60 = 1$$

Фактическая воздушная нагрузка на ткань, м3/(м2·ч), определяется по формуле (3.25):

$$q_{\phi} = \frac{2505,6}{(60 \cdot 1)} = 41,76 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

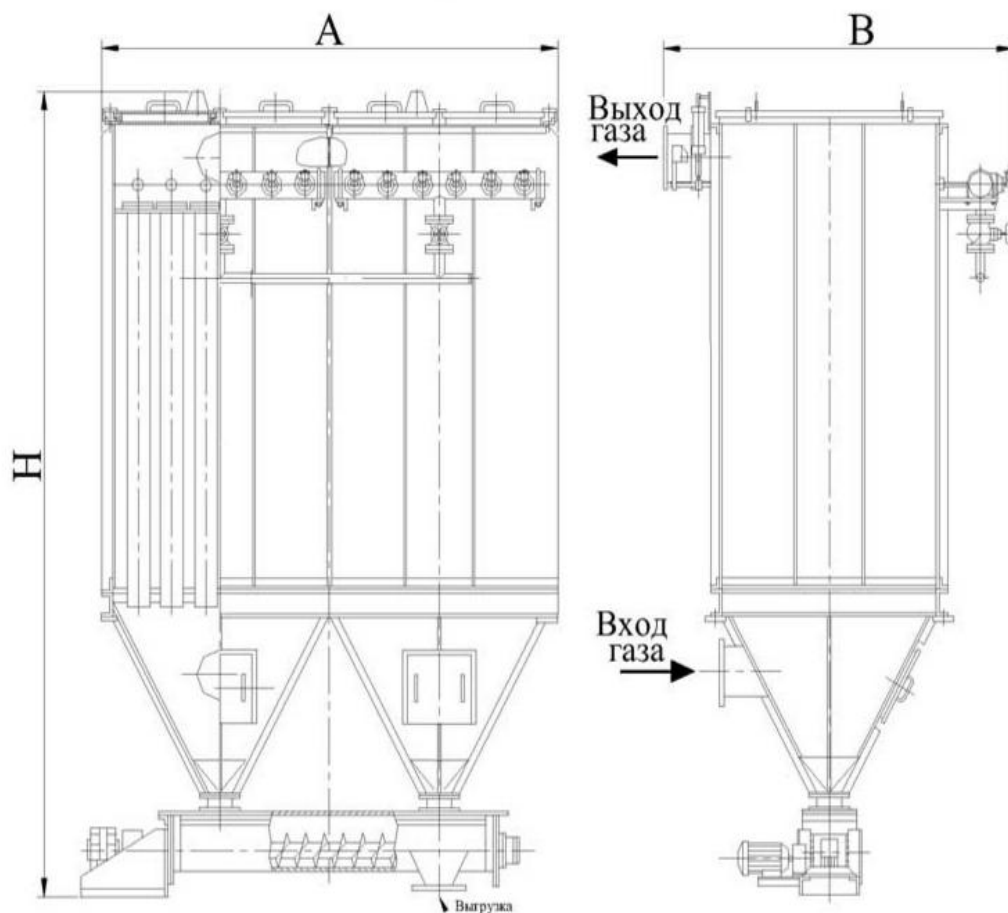


Рисунок 3.6 – Рукавный фильтр ФРКИ-60: А=2910 мм; В=1950 мм;  
Н=3600 мм.

### 3.2.4 Расчет и подбор вентилятора

Общие потери в системе составят (3.26):

$$H = 13460 + 436 + 640 = 14536 \text{ Па}$$

Характеристика вентилятора принимается с запасом 10 %:

$$H = 14536 \cdot 1,1 = 15990 \text{ Па}$$

Для системы с получившимися характеристиками достаточно подобрать вентилятор высокого давления (высоконапорный вентилятор) марки HRD 7 FUK-105/15,5 (рисунок 3.7) который при 50 м<sup>3</sup>/мин способен развивать

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР

Лист

55

давление до 16 000 Па. Основные технические характеристики приведены в таблице 2.4.



Рисунок 3.7 – Вентилятор HRD 7 FUK-105/15,5.

Таблица 3.7. – Основные технические параметры вентилятора высокого давления HRD 7 FUK-105/15,5.

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Величина
1.	Производительность	м3/час	3000
2.	Полное давление	Па	16000
3.	Напряжение	В	400
4.	Частота	Гц	105
5.	Установленная мощность привода	кВт	15
6.	Частота вращения электродвигателя	об/мин	6250
7.	Габаритные размеры без упаковки Д/Ш/В	мм	700/625/ 602
8.	Масса оборудования	кг	131

В результате расчета варианта № 2 реконструкции системы пневмотранспорта увеличена производительность с 1500 кг/час до 5000 кг/час

с полной заменой компонентов системы. Концентрация материала в транспортирующем воздушном потоке уменьшена в 4,4 раза. Количество воздуха в системе увеличено в 16,7 раз, а электрическая мощность оборудования уменьшена в 2 раза. На основе полученных характеристик подобраны все необходимое оборудование.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

## 4 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате двух расчетов были решены различные задачи по компоновке системы пневмотранспорта, где в первом случае присутствует частичная замена компонентов системы, а во втором случае - полная замена оборудования. Для расчета варианта № 1 подобрана мощная воздуходувка, а для варианта № 2 высоконапорный вентилятор.

### 4.1 Анализ технических характеристик реконструируемой системы

Сравнительная таблица характеристик систем пневмотранспорта до и после реконструкции приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики системы пневмотранспорта помола нефтяного кокса до и после реконструкции.

Характеристика	Ед. изм.	До реконструкции	После реконструкции. Вариант № 1	После реконструкции. Вариант № 2
Производительность системы	кг/час	1500	5000	5000
Массовая концентрация, $\frac{G_M}{G_g}$	-	8,3	11,8	1,9
Количество воздуха	м3/час	150	406,1	2505,6
Потери давления	Па	1 800 000-4 000 000	104 958	15 990
Электрическая мощность оборудования	кВт	30	18	15
Внутренний диаметр материалопровода	мм	77	77	192

В варианте № 1 реконструкции система пневмотранспорта имеет меньшие габариты, но для обслуживания воздуходувки требуется специальный персонал для постоянного контроля ее работы.

В варианте № 2 реконструкции система пневмотранспорта имеет меньшие потери давления, следовательно трубопроводы в меньшей степени

подвержены истиранию и нагреву в них материала. Наименьшая электрическая мощность позволит в большей степени сэкономить эксплуатационные затраты.

#### 4.2 Экономическое сравнение вариантов реконструкции

Возможность применения различных пневмотранспортных установок определяется не только техническими, но и технико-экономическими показателями.

Таблица 4.2 – Стоимость оборудования схем, полученных в ходе двух вариантов расчета.

Наименование компонента системы	Ед. изм	Кол-во	Вариант № 1	Вариант № 2	Дельта, руб.
			Стоимость в рублях	Стоимость в рублях	
Вентиляционное оборудование	шт.	1	1 118 235	215 102	
Материалопровод	м	65	39 915	153 377	
Циклон-разгрузитель	шт.	1	16 785	50 260	
Фильтр рукавный	шт.	1	165 000	559 180	
<b>Итого:</b>			<b>1 191 435</b>	<b>977 919</b>	<b>213 516</b>

Капитальные затраты составляют [18]:

$$Z_k = 3 \cdot 1,2, \quad (4.1)$$

Для варианта реконструкции № 1:

$$Z_k = 1191435 \cdot 1,2 = 1\,429\,722 \text{ руб.}$$

Для варианта реконструкции № 2

$$Z_k = 977919 \cdot 1,2 = 1\,173\,503 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные затраты составляют [18]:

$$Z_{\text{э}} = Z_{\text{з.п.}} + Z_{\text{рем.}} + Z_{\text{эл.}} + Z_{\text{с.м.}}, \quad (4.2)$$

Где  $Z_{з.п.}$  - заработная плата рабочих, занятая обслуживанием машин, руб.;

$Z_{рем.}$  - затраты на ремонт, руб.;

$Z_{эл.}$  - затраты на электроэнергию, руб.;

$Z_{с.м.}$  – затраты на смазочные материалы, руб.;

Зарботная плата рабочих, занятая обслуживанием машин определяется по формуле (4.3):

$$Z_{з.п.} = K_p \cdot K_{пр} \cdot T \cdot B \cdot C, \quad (4.3)$$

Где  $K_p$  – районный коэффициент к тарифной ставке,  $K_p = 1,15$ ;

$K_{пр}$  – коэффициент, учитывающий премии,  $K_{пр} = 1,2$ ;

$T$  - число часов работы машины в году, ч,  $T = 8040$ ;

$B$  - количество рабочих, занятых обслуживанием машины, чел.,  $B = 1$ ;

$C$  – часовая тарифная ставка рабочего, обслуживающего установку, руб./час.,  $C = 145$

Для варианта реконструкции № 1 заработная плата рабочих, занятая обслуживанием установки:

$$Z_{з.п.} = 1,15 \cdot 1,2 \cdot 3800 \cdot 2 \cdot 120 = 1\,258\,560 \text{ руб/год}$$

Для варианта реконструкции № 2 заработная плата рабочих, занятая обслуживанием установки:

$$Z_{з.п.} = 1,15 \cdot 1,2 \cdot 3800 \cdot 2 \cdot 100 = 1\,048\,800 \text{ руб/год}$$

Затраты на ремонт установки определяются по формуле (4.4):

$$Z_{рем.} = \frac{K_э \cdot A_{к.р.} \cdot Z_k}{100}, \quad (4.4.)$$

Где  $K_э$  - коэффициент, учитывающий эксплуатацию установки,  $K_э = 1,1$ ;

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$A_{к.р.}$  – отчисления на капитальный ремонт, %, принимается  $A_{к.р.} = 20$ ;

$Z_k$  - капитальные затраты, определяемые по формуле (4.1).

Для варианта реконструкции № 1 затраты на ремонт:

$$Z_{рем.} = \frac{1,1 \cdot 20 \cdot 1\,429\,722}{100} = 314\,539 \text{ руб.}$$

Для варианта реконструкции № 2 затраты на ремонт:

$$Z_{рем.} = \frac{1,1 \cdot 20 \cdot 1\,173\,503}{100} = 258\,171 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию определяются по формуле (4.5):

$$Z_{эл.} = C_{эл.} \cdot K_{пот} \cdot N \cdot K_{э.д.} \cdot T, \quad (4.5)$$

Где  $C_{эл.}$  – стоимость 1 кВт · ч электроэнергии (2,04 руб.);

$K_{пот}$  – коэффициент, учитывающий потери электроэнергии в сети.  
Принимается равным 1,15.;

$N$  - установленная мощность оборудования, кВт;

$K_{э.д.}$  - коэффициент использования электродвигателя по мощности;

$T$  - то же, что в формуле (4.3).

Для варианта реконструкции № 1 затраты на электроэнергию составят:

$$Z_{эл.} = 2,04 \cdot 1,15 \cdot 18 \cdot 0,9 \cdot 7200 = 273\,637 \text{ руб.}$$

Для варианта реконструкции № 2 затраты на электроэнергию составят:

$$Z_{эл.} = 2,04 \cdot 1,15 \cdot 15 \cdot 0,9 \cdot 7200 = 228\,031 \text{ руб.}$$

Затраты на смазочные материалы  $Z_{с.м.}$  принимаются в размере 10-15 % от стоимости электроэнергии (4.6)

$$Z_{с.м.} = 0,15 \cdot Z_{эл.}, \quad (4.6)$$

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Для варианта реконструкции № 1 затраты на смазочные материалы составят:

$$Z_{\text{с.м.}} = 0,15 \cdot 273\,637 = 41\,046 \text{ руб.}$$

Для варианта реконструкции № 2 затраты на смазочные материалы составят:

$$Z_{\text{с.м.}} = 0,15 \cdot 228\,031 = 34\,205 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные затраты для варианта реконструкции № 1 составляют:

$$Z_{\text{э}} = 1\,258\,560 + 314\,539 + 273\,637 + 41\,046 = 1\,887\,782 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные затраты для варианта реконструкции № 2 составляют:

$$Z_{\text{э}} = 1\,048\,800 + 258\,171 + 228\,031 + 34\,205 = 1\,569\,207 \text{ руб.}$$

Итоги расчетов капитальных и эксплуатационных затрат за календарный год отражены на рисунке 4.1.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

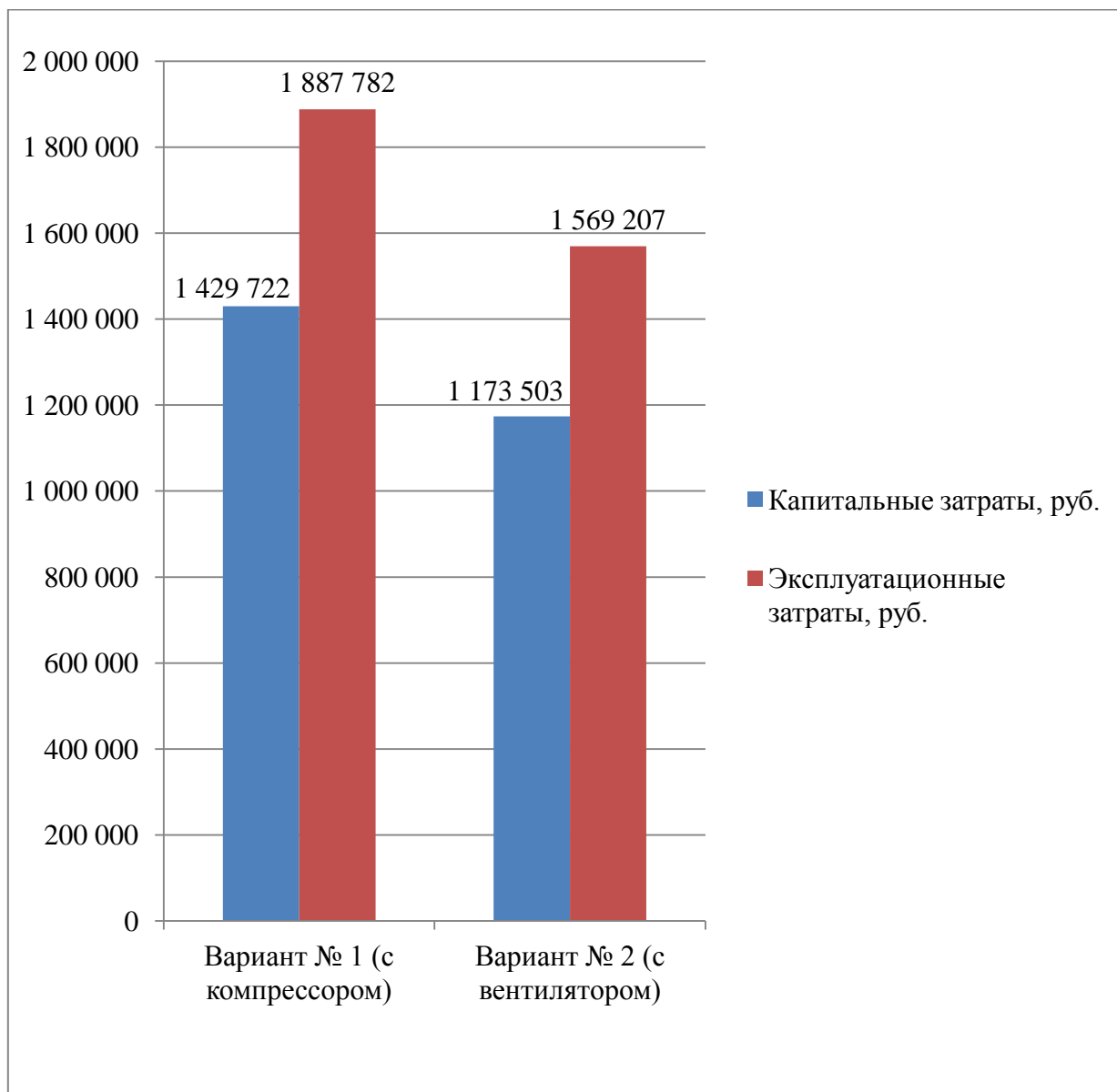


Рисунок 4.1 – Годовые капитальные и эксплуатационные затраты для двух вариантов реконструкции системы пневмотранспорта помола нефтяного кокса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке новых установок для трубопроводного транспорта сыпучих материалов воздушным потоком, а также эффективная эксплуатация новых и существующих машин важным условием является правильно определение и управление параметрами пневматического транспортирования сыпучих материалов по трубопроводам.

В результате данной работы было доказано, насколько важно рассматривать возможность конструирования материалопроводов с применением различного оборудования в системах пневмотранспорта. Экспериментально подтверждена справедливость расчетного определения скорости витания частиц помола нефтяного кокса – основной характеристики системы пневмотранспорта.

Произведено экономическое сравнение по капитальным и эксплуатационным затратам двух вариантов реконструкции систем пневмотранспорта. Наибольшие затраты эксплуатационные и капитальные достигаются при внедрении варианта № 1 реконструкции системы пневмотранспорта. Вариант реконструкции № 2 дешевле, но занимает больше рабочего пространства из-за рассчитанного на большее количество воздуха оборудование очистки воздуха.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 22898-78 Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5, 6).
2. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
3. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01.2003.
4. Александров А.Н. Пневмотранспорт и пылеулавливающие сооружения на деревообрабатывающих предприятиях / А.Н. Александров, Г.Ф. Козориз; под ред. А.Н. Александрова. – М.: Лесн. пром-сть, 1998. – 248 с.
5. Алешковская В.В. Вентиляционные и аспирационные установки / В.В. Алешковская, Б.А. Краюшкин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 150 с.
6. Вайсман М.Р. Вентиляционные и пневмотранспортные установки / М.Р. Вайсман, И.Я. Грубиян. – М.: Изд-во «Колос», 1969. – 256 с.
7. Василевский М.В. Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов: Монография / М.В. Василевский, В.И. Романдин, Е.Г. Зыков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 288 с.
8. Гастерштадт И. Пневматический транспорт. Экспериментальное исследование / И. Гастерштадт; пер. с нем. под ред. П.С. Козьмина. – Л.: Изд-во Сев.-Зап. обл. промбюро ВСНХ, 1927. – 116 с.
9. Дроздов Б.С. Некоторые закономерности и особенности процесса перемещения материалов по транспортному трубопроводу при реализации поршневого режима пневмотранспорта / Б.С. Дроздов, А.А. Баталов, В.Н.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

Мочалов // Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы. – 2015. – Серия: Естественные и технические науки № 3/4. – С. 18-34.

10. Евстифеев В.Н. Трубопроводный транспорт пластичных и сыпучих материалов в строительстве / В.Н. Евстифеев. – М.: Стройиздат, 1989. – 248 с.

11. Зарницына Э.Г. Вентиляционные установки и пневмотранспорт: учебное пособие / Э.Г. Зарницына, О.Н. Терехова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. – 228 с.

12. Клячко Л.С. Пневматический транспорт сыпучих материалов / Л.С. Клячко, Э.Х. Одельский, Б.М. Хрусталеv. – Мн.: Наука и техника, 1983. – 216 с.

13. Кузнецов В.С. Пневматический транспорт на деревообрабатывающих предприятиях. Внешние пневмотранспортные установки / В.С. Кузнецов, С.В. Денисов. – Братск: БрГУ, 2007. – 67 с.

14. Логачев И.Н. Аэроинамические основы аспирации: Монография / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. – СПб.: Химиздат, 2005 – 659 с.

15. Малис А.Я. Пневматический транспорт для сыпучих материалов / А.Я. Малис, М.Г. Касторных. – М.: Агропромиздат, 1985. – 344 с.

16. Нор Е.В. Расчет устройств для очистки воздуха от пыли: метод. указания к выполнению практической работы по дисциплине «Производственная санитария и гигиена труда» для студентов специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств» / Е.В. Нор, О.А. Колесник. – Ухта: УГТУ, 2007. – 27 с.

17. Офенгенден Н.Е. Промышленный трубопроводный транспорт / Н.Е. Офенгенден. – М.: Стройиздат, 1976. – 117 с.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

18. Пневмотранспортное оборудование / М.П. Калинушкин [и др.]; под ред. М.П.Калинушкина. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 286 с.
19. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов / И.М. Разумов. – М.: Изд-во «Химия», 1972. – 240 с.
20. Слуцкий Н.Г. Исследование гидравлического удара в трубах при пневмотранспорте сыпучих материалов / Н.Г. Слуцкий // ХГЗ «Паллада». – 2009. – С. 246-254.
21. Смолдырев А.Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле / А.Е. Смолдырев. – М.: Изд-во «Металлургия», 1967. – 367 с.
22. Соболев А.А. Движение частиц в воздушном потоке / А.А. Соболев, П.А. Мельников, А.О. Тютюник // Вектор науки ТГУ. – 2011. - № 3 (17). – С. 82-86.
23. Шишкин С.Ф. Пневмотранспорт в плотном слое / С.Ф. Шишкин, А.В. Катаев, А.С. Шишкин // Цветные металлы. – 2013. - № 8. – С. 198-200.
24. Сайт группы ЭНЕРГОПРОМ [Электронный ресурс]. – М.: АО «ЭНЕРГОПРОМ МЕНЕДЖМЕНТ», 2013 - . – Режим доступа: <http://www.energoprom.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
25. Сайт промышленной компании «ЭНЕРГОМАШ» [Электронный ресурс]. – Сумы.: Промышленная компания «ЭНЕРГОМАШ», 2007 - . – Режим доступа: <http://www.energo-mash.com>, свободный. – Загл. с экрана.

					13.04.01.2017.174.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67