

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**М.В. Василевский, В.И. Романдин, Е.Г. Зыков**

**ТРАНСПОРТИРОВКА И ОСАЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ  
В ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ  
ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Монография

Издательство  
Томского политехнического университета  
2013

УДК 661.182  
ББК 24.6  
В19

**Василевский М.В.**

**В19**      Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов: монография / М.В. Василевский, В.И. Романдин, Е.Г. Зыков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 288 с.

ISBN 978-5-4387-0325-9

В монографии проведен анализ состояния дисперсных сред, потоков, характеристик средств транспортировки частиц с несущими, волоочильными элементами, несущей средой. Рассмотрены факторы пылеобразования при переводе дисперсного материала в подвижное состояние. Рассмотрены вопросы концентрирования частиц в вихревых камерах и образование слоя. Представлен метод определения состояния слоя на пористой подложке газоочистительного фильтра.

Предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся разработкой и эксплуатацией систем переработки дисперсных материалов. Будет полезна преподавателям и студентам.

**УДК 661.182  
ББК 24.6**

*Рецензенты*

Доктор технических наук  
ведущий научный сотрудник НИИ ПММ ТГУ  
*П.Н. Зятиков*

Кандидат технических наук  
заведующий отделом НИИ ПММ ТГУ  
*А.А. Демиденко*

**ISBN 978-5-4387-0325-9**

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013  
© Василевский М.В., Романдин В.И.,  
Зыков Е.Г., 2013  
© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТОЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД И ПОТОКОВ В СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ</b> .....	<b>10</b>
1.1. Характеристики подвижности слоя частиц .....	10
1.1.1. Идеальный и связный дисперсный материал .....	10
1.1.2. Агрегация частиц .....	14
1.1.3. Пылеобразование при струйном движении гетерогенного потока .....	18
1.2. Характеристика газовзвеси .....	22
1.2.1. Дисперсный состав .....	22
1.2.2. Время релаксации частицы в потоке газа .....	22
1.2.3. Диффузия частицы .....	23
1.2.4. Взаимодействие частиц .....	24
1.2.5. Устойчивость агломератов .....	26
1.3. Характеристика потоков в трубопроводном транспорте частиц .....	29
1.3.1. Одномерная модель движения гетерогенной среды .....	32
1.3.2. Пневматический транспорт крупнозернистых материалов .....	37
1.3.3. Транспорт с высокими концентрациями частиц .....	46
<b>ГЛАВА 2. ПРИМЕРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПЕРЕРАБОТКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	<b>55</b>
2.1. Схемы с применением механических средств транспортировки дисперсных грузов .....	55
2.1.1. Транспортировка и хранение зерна .....	55
2.1.2. Производство строительных материалов .....	58
2.1.3. Пылеприготовление на тепловых электростанциях .....	66
2.1.4. Химическая промышленность .....	69
2.2. Схемы с применением пневматических средств транспортировки дисперсных грузов .....	71
2.2.1. Каталитический крекинг нефти .....	71
2.2.2. Переработка цемента .....	72
2.2.3. Схемы с применением вихревых аппаратов .....	73
<b>ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЧАСТИЦ</b> .....	<b>79</b>
3.1. Ленточные конвейеры .....	79
3.1.1. Загрузочные устройства .....	81

3.1.2. Разгрузочные устройства.....	83
3.1.3. Параметры перегрузочных устройств.....	85
3.1.4. Мощность приводного двигателя.....	90
3.1.5. Обеспыливание воздуха на конвейерах.....	90
3.1.6. Обеспыливания воздуха в конвейерных системах цементного производства.....	96
3.2. Скребокковые конвейеры.....	102
3.2.1. Характеристики конвейеров.....	102
3.2.2. Мощность приводного двигателя.....	106
3.3. Винтовые конвейеры.....	106
3.3.1. Характеристика конвейеров.....	106
3.3.2. Гибкие шнеки или спирально-винтовые конвейеры.....	111
3.4. Элеваторы.....	113
3.4.1. Аспирационные системы в механических элеваторных установках.....	117

## **ГЛАВА 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЧАСТИЦ..... 123**

4.1. Пневмотранспорт взвесью.....	124
4.1.1. Транспорт под разрежением.....	124
4.1.2. Транспорт под напором.....	128
4.1.3. Камерные питатели.....	134
4.1.4. Комбинированные системы пневмотранспорта.....	138
4.1.5. Закрытые и полужакрытые системы.....	140
4.1.6. Схемы полужакрытых нагнетательных систем.....	140
4.1.7. Оценки транспортирующей способности потока.....	143
4.1.8. Гидравлические характеристики транспортных систем... ..	147
4.1.9. Устойчивость систем.....	151
4.1.10. Высоконапорные системы с пневмонасосами.....	152
4.1.11. Влияние воздухоочистительных устройств.....	159
4.1.12. Низконапорные транспортные системы.....	163
4.2. Системы транспортирования дисперсных материалов с низкими скоростями и высокими концентрациями.....	171
4.2.1. Характеристика систем транспортирования дисперсных материалов с низкими скоростями и высокими концентрациями.....	171
4.2.2. Характеристики дисперсных сред в поршневых структурах.....	187
4.2.3. Расчетные оценки параметров потоков.....	203
4.2.3. Движение дисперсной среды в виде слоя.....	217
4.3. Выделение дисперсной фазы из газовых потоков в фильтрах ..	226

4.3.1. Тканевые фильтры.....	228
4.3.2. Оценки характеристик слоя на фильтре .....	236
<b>ГЛАВА 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ С ЧАСТИЦАМИ В ВИХРЕВЫХ КАМЕРАХ И КРИВОЛИНЕЙНЫХ КАНАЛАХ...</b>	<b>246</b>
5.1. Камеры сгорания горючих частиц и обжига руд .....	246
5.1.1. Струйные измельчители .....	249
5.2. Аппараты с криволинейными каналами и вихревые сушилки....	251
5.2.1. Пневмосушилки с плоским спиральным каналом .....	251
5.2.2. Циклонные сушилки .....	253
5.3. Извлечение примеси из зерновых и гранулированных материалов .....	256
5.4. Оценки параметров потоков .....	258
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>268</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>271</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Переработка дисперсных материалов является основным процессом в производствах горнодобывающей, металлургической, химической, строительной, энергетической, пищевой и других промышленности. Транспортировка и осаждение частиц являются основными процессами в технологиях переработки дисперсных материалов. Системы непрерывного транспорта на любом предприятии являются своего рода кровеносной системой. Поэтому правильный выбор подъемно-транспортного оборудования является решающим фактором нормальной работы и высокой продуктивности производства. При проектировании транспортных установок ставится задача наиболее рационального выбора машин, обеспечивающих наибольший технический эффект в работе производства. При этом определяются капитальные затраты, эксплуатационные расходы, служащие основным критерием при выборе оптимального варианта со следующими показателями: расход энергии, расход материалов на ремонт, число штатных единиц персонала, обслуживающих установку. Однако вопросам безопасности, воздействия на окружающую среду уделяется мало внимания. Пылеобразование – сопутствующий фактор транспортировки дисперсного материала, который влияет на характеристики дисперсной среды в элементах транспортеров и который требует необходимых мер по извлечению частиц из воздушной среды. При транспортировке гранулированных, зерновых материалов происходит их загрязнение мелкодисперсной примесью, что требует необходимых мер по извлечению примеси из материала. При сжигании твердых топлив образуются шлак, зола, которые подлежат улавливанию, транспортированию, складированию.

По принципу действия подъемно-транспортные машины делятся на две группы: периодического и непрерывного действия. К первым относятся грузоподъемные краны всех типов, лифты, средства напольного транспорта (тележки, тягачи, погрузчики), подвесные рельсовые и канатные дороги периодического действия, скреперы и другие подобные машины; ко вторым (их также называют машины непрерывного транспорта или транспортирующие машины) – конвейеры различных типов, устройства пневматического и гидравлического транспорта. На рис. П. 1 представлена классификация машин непрерывного действия [3]. Механические элеваторы являются подъемниками вертикального действия и служат для вертикального и крутонаклонного (под углом  $60^{\circ}$ – $82^{\circ}$ ) перемещения насыпных и штучных грузов без промежуточной загрузки и разгрузки. Применение механических элеваторов в качестве междуэтажного транспортного средства даёт возможность иметь компактные транспортные схемы, занимающие малые площади.



Рис. П.1. Классификация транспортирующих машин непрерывного действия

Ковшовые элеваторы применяют во многих отраслях промышленности. В пищевой промышленности они транспортируют зерно, муку и другие продукты помола, в котельных – уголь и торф. В химической и металлургической промышленности, а также промышленности строительных материалов элеваторы перемещают пылевидные, зернистые и кусковые грузы [3, 71, 111, 112].

Преимущества механических элеваторов заключаются в сохранности транспортируемого материала, большой высоте подачи груза (60–75 м), большом диапазоне производительности (5–500 м<sup>3</sup>/час), простоте конструкции, надежности при эксплуатации, возможности создания герметичного и звукоизолирующего кожуха, обеспечивающего охрану окружающей среды от шума.

Недостатками являются большие габаритные размеры по сравнению с конвейерами сплошного волочения, износ и выход из строя ковшей при перемещении абразивных грузов, необходимость их аспирирования из-за больших перетоков пыли в подающий транспортер при подъеме дисперсных материалов. В элеваторных помещениях образуются значительные выделения вредных веществ в рабочую зону помещений, что оказывает отрицательное воздействие на здоровье работающих, а также на срок службы оборудования и качество выпускаемой продукции. В этой части требуется усовершенствование аспирационного оборудования и самой схемы аспирирования.

Установки, транспортирующие насыпной груз во взвешенном состоянии в потоке воздуха, разделяют на всасывающие (вакуумные), нагнетательные (напорные) и комбинированные [85, 89, 104, 122, 184].

Всасывающие установки используются там, где требуется забирать насыпной груз из нескольких пунктов и передавать его в один приемный пункт. Нагнетательные установки удобны в тех случаях, когда груз, получаемый из одного пункта, необходимо распределить по нескольким приемным точкам. Пневмоустановка комбинированного типа забирает груз из нескольких загрузочных мест и подает одновременно в несколько приемных пунктов. Существует большое разнообразие пневмотранспортных установок, которое определяется свойствами транспортируемого дисперсного материала и требованием сохранности и незагрязненности. Существуют проблемы повышения надежности работы этих установок. Наиболее перспективными установками являются установки пневмотранспорта с высокой концентрацией частиц и малой скоростью движения дисперсного материала. Сдерживающим обстоятельством повсеместного распространения этих установок является отсутствие базовых моделей механики гетерогенных потоков, которые бы учитывали особенности структурирования дисперсных сред в элементах пневмотранспортных систем, поэтому разработка установок для конкретных

условий опирается на экспериментальные и эксплуатационные наработки. Имеются многочисленные публикации, где даются характеристики потоков при заданных свойствах структур [53, 184, 195, 128, 89].

Вихревые камеры применяются для интенсификации физико-химических процессов. В теплоэнергетике вихревые камеры используются как топки и предтопки [91, 66] для улучшения сгорания топлива, в металлургии – для интенсификации процессов плавки руды; используются в реакторах, процессах измельчения, сушки, классификации частиц, обеспыливания газов в химических технологиях и. т. д.

В аппаратах обеспыливания газов транспортировка частиц сопровождается концентрированием частиц и образованием слоя частиц. Нами проведены работы по созданию аппаратов для извлечения примеси из зерновых и гранулированных материалов, а также работы по их усовершенствованию применительно к очистке дымовых газов от золы и обеспыливания воздуха в системах транспортировки дисперсных материалов.

Применение фильтров зачастую оказывается неэффективным из-за трудностей их эксплуатации. В данной работе приведены методы оценки поведения слоя пыли на подложке фильтра, позволяющие определить необходимые режимы фильтрации газов или его поверхность.

Вопросы пылеподавления с применением воды, пены, электростатических полей при добыче полезных ископаемых, транспортировке дисперсных материалов, а также вопросы извлечения токсичных газовых примесей при термообработке дисперсных материалов (обжиг, возгонка, сушка) требуют отдельного рассмотрения [1, 93, 127, 175].

Авторы настоящей работы имеют многолетний опыт исследования, конструирования, испытаний промышленных образцов транспортеров, пылеуловителей и представляет свое отношение к проблеме транспортировке частиц и обеспыливания газов. Авторы полагают, что данная книга будет полезна инженерно-техническим и научным работникам занимающимися разработкой и эксплуатацией систем переработки дисперсных материалов, студентам, преподавателям, а также лицам, занимающимся вопросами охраны труда и защиты окружающей среды от загрязнений. В подготовке материалов принимали участие старший преподаватель ТПУ Разва А.С. – разделы 4, 5; студент ТПУ Додонова И.В. – разделы 2, 4., младший научный сотрудник НИИПММ ТГУ Полюшко В.А. – раздел 4. Авторы выражают им благодарность, а также благодарность доц. ТГУ Смоловику В.А. за внимание и обсуждение ряда вопросов данной работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-08-00059).

# ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТОЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД И ПОТОКОВ В СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ

В системах переработки дисперсный материал переводится из неподвижного состояния в подвижное. Состояние неподвижного слоя зависит от условий его формирования и историей частиц, из которых состоит этот слой. Существующая механика сыпучих материалов позволяет дать оценки подвижности слоя.

В процессе выделения пыли из газонесущего потока дисперсная среда из аэрозольного состояния с порозностью  $\varepsilon > 0,999$  переходит в состояние насыпного слоя с  $0,95 > \varepsilon > 0,4$ . Порозность – это отношение объема газа к выделенному объему, занимаемому двухфазной средой. Для порозности, близкой к единице, полагают, что присутствие частиц не влияет на движение газа. Движение частиц определяется воздействием массовых и поверхностных сил со стороны несущего газа. Величина  $\varepsilon$  для дисперсной среды в насыпном состоянии зависит от размеров частиц, свойств газа и поверхности частиц: толщины адсорбированной газовой оболочки, величины поверхностного электрического заряда частиц, капиллярных взаимодействий и т. д.

## 1.1. Характеристики подвижности слоя частиц

При оценке подвижности насыпного тела определяющее значение имеют величины сдвиговых напряжений [6, 70, 71]. По закону Кулона предельное сопротивление сыпучего материала сдвигу  $\tau$  пропорционально нормальному давлению на плоскость скольжения  $\sigma_n$ . Нормальное давление определяется внешней нагрузкой или массой частиц.

### 1.1.1. Идеальный и связный дисперсный материал

Частицы, между которыми проходит плоскость скольжения при сдвиге, испытывают еще и взаимное притяжение под действием сил аутогезии. Эта сила численно равна прочности на разрыв  $T$ . При нулевом значении нормального давления, в плоскости скольжения продолжает действовать сжимающее напряжение, численно равное прочности на разрыв  $T$ . Это напряжение, в отсутствие нормального давления, создает сопротивление сдвигу, называемом сцеплением  $C$ . Закон Кулона для связных материалов имеет вид  $\tau = C + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}\varphi_T$ , где  $\operatorname{tg}\varphi_T = f$  – коэффициент внутреннего трения,  $\varphi_T$  – угол внутреннего трения для сыпучего,  $C = T \cdot \operatorname{tg}\varphi_T$ . Однако для тонкодисперсных материалов применимо другое

выражение  $(\tau / C)^n = (\sigma_n / T) + 1$ , где  $n$ -индекс сдвига  $n = 1 \div 2$ . Последнее уравнение позволяет упростить процедуру сдвиговых испытаний.

Во многих руководствах, по расчету аккумулирующих и транспортирующих устройств для насыпных грузов безоговорочно принимается, что коэффициент внутреннего трения равен тангенсу угла естественного откоса. Это характерно для идеальной сыпучей среды. Для связных насыпных грузов угол внутреннего трения меньше угла естественного откоса [6]. Угол естественного откоса определяется несколькими способами: способом насыпания, при котором откос образуется скользящими частицами; способ обрушения, при котором откос (обрушения) образуется в толще груза при внезапном открытии нижнего отверстия и его высыпании с образованием угла естественного откоса в засыпке; постепенным подъемом и удалением воронки с материалом от плоскости соприкосновения. В последнем варианте образуется конус из высыпающегося материала [6], причем скорость поступления материала в засыпку регулируют скоростью подъема воронки. Для связных материалов вводят понятия коэффициента сопротивления сдвигу, угла сопротивления сдвигу

$$f_\sigma = (\tau / \sigma) = \operatorname{tg} \varphi_\sigma = f + (C / \sigma_n). \quad (1.1)$$

При возрастании  $\sigma_n, f_\sigma \rightarrow f$ .

Любой полидисперсный материал можно рассматривать как монодисперсный, включающий более крупные частицы. За исходную монодисперсную структуру принимается достаточно узкая фракция самых мелких частиц. Крупные частицы рассматриваются как включения в исходную структуру. Число контактов в сечении разрыва и прочность реального сыпучего тела можно найти, рассчитав число контактов и прочность для исходной монодисперсной структуры [73]. Задача определения прочности полидисперсной структуры сводится к выбору исходной местной структуры с размером частиц  $d_n$ , плотности упаковки  $\varphi_n$  и прочности индивидуальных контактов  $F_1$ . Если содержание мелких частиц  $a$ , а общая степень заполнения объема полидисперсного материала  $\varphi$ , то объем мелких частиц  $a\varphi$ , крупных частиц  $(1-a)\varphi$ , объем структуры, в котором размещены только мелкие частицы  $1-(1-a)\varphi$ , а степень заполнения исходной структуры  $\varphi_n = a\varphi / [1 - (1-a)\varphi]$ .

Прочность сыпучего материала определяется по формуле

$$T = abK \left\langle \frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{S}_q}{\bar{V}_q} \cdot \frac{\rho}{\rho_q} \right\rangle f \left[ H_0 - \frac{\bar{d}}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \right], \quad (1.2)$$

здесь  $a$  – коэффициент с линейной размерностью, отражающий распределение частиц в объеме,  $b$  – коэффициент пропорциональности между площадью контакта частицы и ее общей поверхностью,  $K$  – координационное число, определяющее число контактов, приходящееся на каждую частицу,  $\bar{d}$ ,  $\bar{S}_ч$ ,  $\bar{V}_ч$  – средние эффективные диаметр, площадь поверхности, объем частицы, определенные с учетом распределения частиц по размерам,  $H_0$ ,  $\rho_0$  – предельное расстояние между частицами и плотность сыпучего материала, при которой прочность стремится к нулю.

Прочность монодисперсного сыпучего зависит от прочности индивидуальных контактов частиц  $F$ , координационного числа  $K$ , пористости  $\Pi$ , а также размера исходных частиц  $d$  [73]. Для большинства монодисперсных материалов  $K\Pi = 3,1 \approx \pi$  и

$$T = (1 - \Pi) \cdot \frac{F}{d^2} / \Pi. \quad (1.3)$$

Таким образом, можно провести оценку возможного предельного состояния пылевого слоя.

Зависимость прочности контактов от силы поджима  $N_1$  можно представить в виде  $F_1 = BN_1^p$ , где  $B$  и  $p$  – опытные коэффициенты [74]. Увеличение аутогезионного взаимодействия в отдельных контактах затрудняет переупаковку частиц при уплотнении слоя и тем самым сдерживает число контактов. В результате прочность всей структуры может не только не увеличиться, но и даже уменьшиться. Реально прочность слоя в отложении определяется аутогезионными свойствами и условиями его формирования. Существующие приборы для измерения прочности уплотненных образцов применимы только в лабораторных условиях. Для оценки слипаемости пыли проводят уплотнение пыли под нагрузкой 50 КПа. При меньших нагрузках на прочность слоя влияет степень агрегированности, а более высокие не характерны для пылеулавливания [6].

В условиях длительного хранения на воздухе порошкообразные и особенно гигроскопические материалы проявляют склонность к слеживаемости, вызывающей изменение сыпучести и прочности таких материалов. В [185] проведено исследование структурно – механических свойств порошка нитрата аммония при относительной влажности воздуха 30–90 %. При переходе от 30 % к 40 % прочность образцов увеличилась в несколько раз. При переходе от 30 % к 50 % прочность увеличилась на порядок при хранении порошка в течении 24 часов. Поэтому в пылеулавливающих системах при скоплении пыли в бункерах – накопителях часто возникают затруднения с выгрузкой пыли в транспортные средства.

### Адгезия частиц

При адгезии важное значение приобретает скорость в процессе контакта частиц с поверхностью, при которой происходит их адгезия [73]. Основными факторами, влияющими на удержание частиц, являются размеры и скорость частиц, а также упругие свойства материалов контактирующих тел. Для оценки адгезии исследуют зависимости числа частиц, осевших на поверхности образцов, от их скорости при обтекании поверхности аэрозолем, содержащим частицы определенных размеров. Различают первую и вторую критические скорости минимального осаждения частиц. При скорости потока, меньшей первой критической, происходит упругая деформация зоны контакта, которая восстанавливается после отрыва частиц. Для мелких частиц силы веса, лобовые силы в пограничном слое ничтожно малы по сравнению с силами адгезии и условие отрыва можно записать в виде  $F_{\text{упр}} > F_{\text{адг}}$ .  $F_{\text{упр}} = K_{\text{упр}} \cdot r^2 \cdot v^{6/5}$ .  $K_{\text{упр}}$  – константа, зависящая от упругих свойств материала;  $r$ ,  $v$  – радиус и скорость частиц соответственно. Сила адгезии определяется природой сил ее обуславливающую [72]. Каждая составляющая силы адгезии зависит от размеров частиц табл. 1.1.

Таблица 1.1

*Зависимость составляющих сил адгезии от размеров частиц*

Наименование сил	Кулонов-ская	Электриче-ская	Молекулярная	Капиллярная
Зависимость от радиуса	$1/r^2$	$r^{2/3}$	$r$	$r(1 - r^{x-1})$

Различают медианную и среднюю силу адгезии частиц разного размера, причем различают силу адгезии слоя порошка  $F_c$ , приходящегося на  $1 \text{ см}^2$ , и силу адгезии собственно частицы.  $\lg F_c = B \lg(1/d) + \lg C$ , где  $B$  и  $C$  – эмпирические постоянные в конкретных условиях. Например для адгезии окиси алюминия к кварцу,  $F_c = 2,6d^{-0.7}$ , где  $d$  выражена в см., сила – в динах (0.001 г.).

Первая критическая скорость возникает при условии, когда силы упругого отталкивания определяют максимальный отскок частиц. Отношение  $F_{\text{адг}} / F_{\text{упр}} \sim 1/r^3$  зависит как от условий обтекания препятствий, так и от упругих свойств поверхности. Минимальное прилипание частиц к поверхности наблюдается в некотором интервале скоростей. Вторая критическая скорость возникает, когда частицы преодолевают упругие свойства поверхности. В диапазоне между этими скоростями адгезия минимальна. Энергию адгезии рассчитывают по уравнению

$E_{ад} = 6\pi\epsilon_{ад}Hr + \pi\epsilon r_k^2$ , где  $\epsilon_{ад}$  – энергия адгезии на единицу площади контакта;  $H$  – расстояние между контактирующими телами;  $r$  – радиус частицы пыли;  $r_k$  – радиус площади контакта. Если прочность материала частиц значительно превышает прочность подложки и деформацией частицы при контакте можно пренебречь, площадь контакта будет пропорционально  $Hd$ , где  $H$  – глубина внедрения. Это приводит к увеличению силы адгезии.

Другой причиной увеличения адгезии является движение частиц в неравномерно нагретой среде в направлении противоположном температурному градиенту из зоны с высокой температурой в зону с низкой температурой (термофорез). В большинстве случаев образования отложений силы аутогезии меньше сил адгезии. Поэтому определяющим фактором является взаимодействие между частицами в отложениях и в насыпном состоянии.

### 1.1.2. Агрегация частиц

В сгустках объемная концентрация увеличивается в десятки и сотни тысяч раз по сравнению с исходной. В жгутах присутствуют частицы различных размеров. В [186] показано, что в присутствии частиц менее 10 мкм возможна активная агломерация частиц за счет молекулярных сил. Вводится понятие критического размера частиц из условия соизмеримости сил сцепления между ними в структурной сетке и их весом, если рассматривается агломерация в поле сил тяжести. Граница между грубодисперсными и микрогетерогенными системами определяется характерным размером частиц  $\delta_c$ , при котором вес частицы уравновешивается силами сцепления между ними. Если полагать, что сцепление определяются атомными контактами, то  $mg = SF_c$ , где суммирование ведется по всем контактам,  $F_c$  – сила сцепления в контакте,  $m$  – масса частицы. Если полагать, что площадь единичного точечного контакта соизмерима с площадью кристаллической решетки ( $S_c \approx 10^{-19} \text{ м}^2$ ), можно считать, что прочность контакта соизмерима с прочностью межатомных связей  $P_c \approx 10^{10} \div 10^{11}$  Па. Контакты между частицами реализуются, как правило, по микровыступам, площадь которых соизмерима с площадью кристаллической решетки. В качестве характеристики склонности дисперсных систем к самопроизвольному агрегированию вводится величина  $\chi = \frac{\overline{F_c}}{mg}$ , при этом объемная концентрация частиц должна

быть достаточной для возникновения структуры. Величину  $\chi$  определяют в зависимости от расстояния  $H$  между частицами: контакт атомный, если расстояние  $H \approx 5 \cdot 10^{-10}$  м; контакт коагуляционный, если расстояние соответствует их фиксации в положении «ближнего» минимума потенциальной энергии взаимодействия  $H \approx 10^{-8}$  м; контакт коагуляционный при фиксации частиц в положении дальней потенциальной ямы  $H \approx 10^{-7}$ . В каждом конкретном случае прочность элементарных контактов между частицами и соответственно прочность возникающих из них структур зависит от физических свойств и химической природы поверхности твердой фазы, состава и свойств дисперсионной среды и соответственно зависит критический размер частиц. В [186] приводятся расчетные значения критических размеров частиц. В [186] приведены оценки прочности дисперсных пористых структур и определено влияние некоторых физико – химических условий на прочность возникающих контактов. В [73] приведены результаты исследования по влиянию адсорбированных газовых пленок на поверхности частиц на механические характеристики порошковых материалов. Определялись углы обрушения, углы откоса для пылевидного песка и стеклянных шаровых частиц размером 10–30 мкм. Вычислялись углы внутреннего трения, сцепление между частицами. Выяснено, что при температурах 400 °С и глубоком вакууме  $10^{-8}$  мм. рт. ст. внутреннее трение и сцепление резко возрастают, что позволило сделать вывод о том, что механические свойства дисперсных материалов определяются не только размерами и поверхностными свойствами отдельных частиц, но и в значительной степени толщиной адсорбированных пленок.

В ряде случаев частицы получают электрический заряд в результате дробления или распыления материала при движении в потоке газа из-за трения частиц между собой и о стенки аппарата, а также при обработке материалов в раскаленном состоянии вследствие термоионной и фотоэлектрической эмиссии электронов. Частицы также могут заряжаться в результате химических реакций, под действием ультразвука, рентгеновского и радиоактивного излучений и электромагнитной индукции. Число положительных и отрицательных частиц может быть одинаково и в этом случае агломерация частиц резко интенсифицируется.

Агрегаты, поступающие в пылеуловитель с потоком газа, имеют различную природу образования и соответственно прочностные характеристики. *При срыве отложений с поверхностей технологического оборудования* в поток поступают более уплотненные агломераты пыли.

Отложения на технологическом оборудовании [72] разделяют по следующим признакам: месту возникновения, химическому составу и структуре. По месту возникновения отложения разделяют на натрубные, настенные (стенки топки), дымоходные, подовые. По химическому составу разделяют отложения алюмосиликатные, щелочносвязные, сульфитные, фосфатные, которые обладают клеящими свойствами. По структуре сформированный слой можно классифицировать как сыпучий (золовой) и плотный (спекшийся и сцементированный). Например, отложения на поверхностях котельного агрегата при сжигании воркутинского угля состоят из 3-х слоев: из липкого слоя толщиной менее 0,5 мм, содержащих частицы менее 1 мкм, второй промежуточный – рыхлый состоит из частиц со средним размером 1,5 мкм толщиной 0,2–0,3 мм, третий – слой из спекшихся частиц толщиной 1–3 мм. Плотным отложениям сопутствуют сыпучие и наоборот. При обтекании труб со скоростью 8–11 м/с на фронтальной и кормовой частях образуются рыхлые отложения; при скорости обтекания более 11 м/с на фронтальной части образуются плотные отложения, в кормовой – рыхлые. Количество осевшей золы зависит от скорости потока и концентрации частиц. Скорости потока, при которых происходит отрыв частиц, определяются распределением сил адгезии и размеров частиц. Количественно отрыв прилипших частиц определяется медианной скоростью отрыва [72]. В реальных процессах, в производственных условиях все элементы энергетических агрегатов подвержены вибрационным нагрузкам. Отложения подвергаются воздействию крупных частиц. Происходит периодический срыв отложений с поверхностей и их пополнение. Таким образом, в потоке на входе в золоуловитель присутствуют не только исходные золовые частицы, но и агрегаты из частиц, причем с переменной их концентрацией.

В аспирационных системах при транспортировке пыли частицы размером 2–5 мкм увлекаются мелкомасштабными высокочастотными пульсациями и подвержены турбулентной миграции к ограждающей поверхности. По мере их накопления частиц на поверхности происходит их срыв за счет различных возмущений помимо потока: вибрации стенок оборудования при внешних воздействиях на них сил акустической или другой природы, воздействия крупных частиц, разрушающих связи между частицами. Оторвавшиеся от поверхности под воздействием потока агломераты частиц имеют отличные от исходных частиц адгезионные и аутогезионные свойства.

В системах аспирации термодинамические параметры потоков не постоянны. Особенно это проявляется в средах с изменяющейся влажностью.

Тела обладают поверхностной свободной энергией. При взаимодействии с водяными парами, содержащимися в воздухе, свободная поверхностная энергия уменьшается за счет работы смачивания. Поверхностная удельная свободная энергия жидкости есть поверхностное натяжение.

Поверхность раздела представляет слой, соизмеримый по величине с межмолекулярным расстоянием в объеме жидкости. В этом слое молекулы непрерывно переходят в паровую фазу и обратно в жидкость (конденсация и парообразование). Таким образом, поверхность раздела представляет турбулизированный слой, в котором в полной мере проявляются межмолекулярные взаимодействия. Поэтому поверхностное натяжение зависит от температуры насыщенного пара или от его давления. Термодинамическое состояние определяется поверхностными свойствами частиц, содержанием влаги в газовой фазе, температурных градиентов. Расчет состояния ведется из условия термодинамического равновесия слоя.

В насыпном состоянии частицы связаны между собой контактными взаимодействиями (аутогезионными силами), которые определяют подвижность частиц. Во взвешенном состоянии эти силы меньше гидродинамических сил, разъединяющих частицы. Аутогезионные силы смоченных частиц оказываются больше гидродинамических за счет большой поверхности взаимодействия.

В процессе агломерирования материалов [6] в наибольшей мере проявляется присутствие адсорбционно – и капиллярно-связанной воды. При соприкосновении паров воды с гидрофильной поверхностью частицы происходит ее гидратация, т. е. адсорбция молекул воды. Наиболее прочно связанная вода имеет толщину  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  мм. Адсорбированная вода отличается по свойствам от обычной: ее плотность в 1,5–2 раза выше обычной, вязкость также выше, теплоемкость и способность растворять твердые вещества ниже обычной.

Влажность, при которой все частички сыпучего материала покрыты слоем адсорбированной воды максимальной толщины, называют максимальной молекулярной влагоемкостью (ММВ).

Если поверхности соседних частичек разделены пленкой воды толщиной менее  $10^{-5}$  мм, то такая вода находится в адсорбированном состоянии и взаимодействие называют молекулярным. Величина ММВ связана с удельной поверхностью и отражает энергетическое состояние агломерируемого материала.

Капиллярная вода по физическим свойствам относится к обычной свободной воде. Вода в капиллярном состоянии обладает отрицательным давлением, в результате которого и возникают стягивающие капиллярные силы.

В зависимости от количества влаги в сыпучем материале возможны разновидности капиллярного состояния воды. Влажность, при которой все капилляры пористого (сыпучего) тела заполнены водой, называется максимальной капиллярной влагоемкостью (МКВ). МКВ связана с распределением частиц по размерам и является структурным параметром [6, 73]. Методы определения ММВ, МКВ приведены в [73, 6].

Таким образом, агломераты из мелких частиц, в зависимости от условий их образования, могут иметь различную прочность и размеры при транспортировке их несущей средой в пылеуловитель.

### **Отложения**

В двухфазных потоках происходят процессы образования и распада структур дисперсной среды. В закрученных потоках, которые формируются в вихревых камерах различного назначения, структурирование, диспергация дисперсной фазы определяют устойчивость и эффективность технологических процессов. Следует различать первичные и вторичные структуры дисперсной фазы. Первичные – это структуры из частиц, вводимые вместе с потоком в камеру для формирования вихря. Вторичные – это структуры образующиеся в самой камере, в основном в результате приграничных эффектов вблизи криволинейных поверхностей, формирующих вихревое течение газа. В пылевой технике стабильная работа газоочистной аппаратуры осуществляется, если отложение на поверхностях не образуются, а напряжения в дисперсном материале в насыпном состоянии оказываются предельными.

#### **1.1.3. Пылеобразование при струйном движении гетерогенного потока**

Движение материала в самотечных коробах, пересыпках осуществляется в виде блоков, сгустков и отдельных частиц.

На рис. 6, 7 показаны фотографии пробы частиц улова и уноса цементной пыли из циклона [51] с увеличением 300. Видно, что унос выглядит как совокупность агрегатов, а улов – как совокупность отдельных частиц.

Таким образом, материал, при пересыпках движется в виде струи или сгустками. Однако диспергация происходит и некоторая часть дисперсного материала в воздухе находится в виде индивидуальных мелких частиц. Пыление в узлах пересыпки зависит от степени диспергируемости дисперсных материалов. Методы определения диспергируемости

порошковых материалов приведены в [6]. Существуют рекомендации по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов [114, 127].

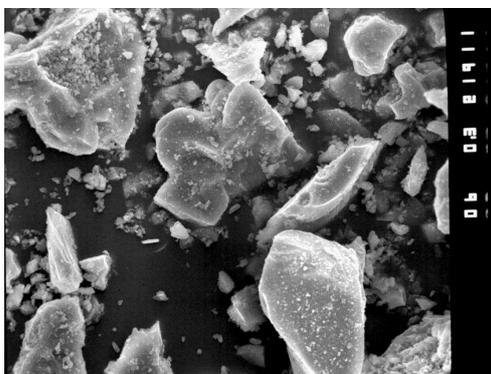


Рис. 1.1. Цемент улов –  
увеличение 300

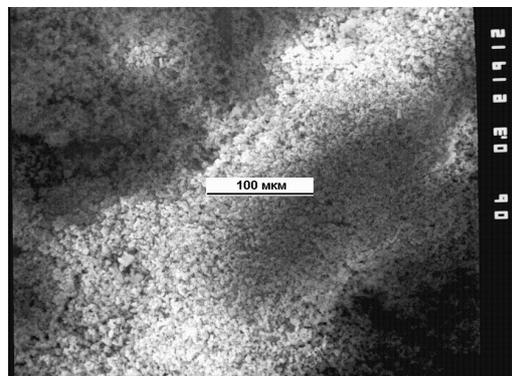


Рис. 1.2. Цемент унос –  
увеличение 300

Интенсивными неорганизованными источниками пылеобразования являются пересыпки материала, погрузка материала в открытые вагоны, ссыпка материала открытой струей в склад и так далее. Объемы пылевыделений от всех этих источников могут быть рассчитаны по формуле [114]:

$$M_{гр} = K_1 \cdot K_2 \cdot G_{ч} \cdot 10^6 / 3600, \text{ г/с} \quad (1.4)$$

где  $K_1$  – весовая доля пылевой фракции в материале (табл. 1.2). Определяется путем отмывки и просева средней пробы с выделением фракции пыли размером от 0 до 200 мкм;  $K_2$  – доля пыли (от всей весовой пыли), переходящая в аэрозоль (табл. 1.2). Проверка фактического дисперсного состава пыли и уточнение значения  $K_2$  производится отбором проб запыленного воздуха на границах пылящего объекта (склада, хвостохранилища) при скорости ветра 2 м/с, дующего в направлении точки отбора пробы.  $B$  – коэффициент, учитывающий высоту пересыпки, принимается по данным таблицы Руководства [114];  $G_{ч}$  – суммарное количество перерабатываемого материала в час, т/час. Определяется главным технологом предприятия.

*Влажность* частиц влияет на их адгезионные и аутогезионные свойства. Повышение влажности пыли часто объясняется ее гигроскопичностью, то есть способностью поглощать влагу из воздуха. Если для сухого способа очистки гигроскопичность пыли является отрицательным фактором (происходит налипание пыли в аппарате), то при мокром способе очистки, наоборот, в последнем случае необходимо учитывать свойство слипаемости частиц.

Таблица 1.2

Значение коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  для определения выбросов пыли  
(фрагмент)

п/п	Наименование материала	Плотность материала, г/см <sup>3</sup>	Весовая доля пылевой фракции $K_1$ в материале	Доля пыли, переходящая в аэрозоль, $K_2$
1	Огарки	3,9	0,04	0,03
2	Клинкер	3,2	0,01	0,003
3	Цемент	3,1	0,04	0,03
4	Известняк карьерный	2,7	0,03	0,01
5	Известняк дробленый	2,7	0,04	0,02
6	Мергель карьерный	2,7	0,03	0,01
7	Мергель дробленый	2,7	0,05	0,02
8	Известь комовая	2,7	0,04	0,02
9	Известь молотая	2,7	0,07	0,05
10	Гранит карьерный	2,8	0,01	0,003
11	Гранит дробленный	2,8	0,02	0,04
32	Графит	2,2–2,7	0,03	0,04
33	Уголь	1,3	0,03	0,02
34	Зола	2,5	0,06	0,04
35	Диатомит	2,3	0,03	0,02
36	Перлит карьерный	2,4	0,04	0,01
37	Перлит готовая продукция	2,4	0,04	0,06

*Слипаемость* пыли, особенно тонкодисперсной, повышается с увеличением влажности, что обусловлено силами межмолекулярного взаимодействия соприкасающихся пылинок. Молекулы на границе пылинки с воздухом имеют свободную энергию, что обуславливает силы поверхностного натяжения.

По степени слипаемости пыль можно разделить на четыре группы:

1. Неслипающаяся (шлаковая, доломитовая пыль, кварцевая пыль, сухая пыль).
2. Слабослипающаяся (сланцевая зола, коксовая пыль, слипающаяся зола, апатитовая пыль, доменная пыль).
3. Среднеслипающаяся (торфяная зола, металлическая пыль, колчеданы, сухой цемент, сажа).
4. Сильнослипающаяся (цементная пыль; любая пыль с максимальным размером частиц 10 мкм).

Слипаемость пыли, в значительной мере определяет эксплуатационную надежность работы пневмотранспорта, пылеуловителей, в частности полное или частичное забивание аппаратов осажденной пылью.

*Электрические свойства пыли:* удельное электрическое сопротивление определяется при прохождении через слой пыли электрического тока. Оно существенно влияет на работу пневмотранспорта, пылеуловителей, электрофильтров и сильно зависит от температуры и влажности пыли [22].

Электрическая заряженность частиц пыли зависит от ее химического состава, способа ее получения.

Решающими факторами, объясняющими явления электризации частиц пыли в естественных условиях, следует считать силы трения и адсорбцию ионов поверхностью самих частиц.

Напряженность электрического поля при электризации трением зависит от физико-химического состояния частиц, площади и формы ее поверхности и скорости движения относительно среды. Особенность данного вида электризации состоит в том, что частицы пыли, имеющие одни физико-химические свойства, должны приобретать один знак заряда. Это предположение соответствует фактам, взятым из опытов с макротелами (например, натирание эбонитовой или стеклянной палочки) и хорошо подтверждается практикой.

Ионы и молекулы на поверхности твердого тела адсорбируются в результате взаимодействия ненасыщенных силовых полей поверхностных атомов твердого тела с ионными и силовыми полями молекул окружающей среды. Это взаимодействие сопровождается конденсацией ионов на поверхности твердого тела, что является причиной появления электрического заряда. Так как причиной наличия заряда является поверхностное силовое поле, которое в результате химической неоднородности может принимать оба знака, результирующий знак частицы будет зависеть, прежде всего, от преобладающего по величине знака силового поля, а так же от соотношения в пространстве положительных и отрицательных ионов.

Наличие в пылевом облаке разноименных зарядов способствует явлению агрегации пылевого аэрозоля. В этом случае высокодисперсные частицы пыли, соединяясь и увеличиваясь в своем весе, теряют способность к броуновскому движению и оседают из воздуха.

Электрические свойства пыли используют для их коагуляции при осаждении в поле силы тяжести и центробежных сил, в электрофильтрах, а также при магнитных методах очистки.

## 1.2. Характеристика газозвеси

### 1.2.1. Дисперсный состав

Он определяется массовым содержанием частиц меньше заданного размера в отобранной из потока пробе. Интегральная функция  $\Phi(x)$  для частиц с логарифмически-нормальным распределением имеет следующие значения [174]:

$x$	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5
$\Phi(x) \%$	0,62	2,28	6,68	15,87	30,85	50	69,1	84,1	93,3	97,7	99,4

Здесь  $x = \lg(\delta / \delta_m) / \lg \sigma$ ,  $\sigma = \delta_m / \delta_{16}$ ,  $\delta_m$  – медианный размер, меньше которого вес частиц составляет 50 % от веса пробы. По физическому смыслу интегральная функция представляет функцию проходов при рассеивании пробы из частиц газозвеси: через сито с большим размером ячейки пройдет большая относительная масса дисперсного материала. Т. е.  $\delta_m$  – это размер ячейки сита, через которое прошло 50 % материала пробы,  $\delta_{16}$  – это размер ячейки сита, через которое прошло 16 % пробы,  $\delta_2$  – это размер ячейки сита, через которое прошло 2 % пробы. Величина  $\delta_m / \delta_2 = \sigma^2$  является показателем крупности мелкой части частиц, т. е. во сколько раз размер ячейки, соответствующий двухпроцентному проходу в пробе, будет меньше размера ячейки, соответствующего медианному значению. Аналогично  $\delta_m / \delta_{0,1} = \sigma^3$ .

Определим количество частиц в  $\text{см}^3$  при концентрации  $c = 1 \text{ г/м}^3$  ( $10^{-6} \text{ г/см}^3$ ).

Если рассмотреть монодисперсный газозоль с одинаковыми частицами и плотностью  $2 \text{ г/см}^3$ , то в зависимости от размера их количество  $n$  будет определяться формулой  $mn = c$ , расстояние между частицами  $l = (1/n)^{1/3}$ , где  $m$  – масса, значения  $n$  и  $l$  представлены в табл. 1.3

Таблица 1.3  
Число частиц и расстояние между частицами в см.

Размер частицы мкм	1	10	100
$n$	$10^6$	$10^3$	1
$l$	0,01	0,1	1

Следовательно, счетное количество мелких частиц в одном и том же объеме в большинстве случаев оказывается большим, чем крупных, хотя их массовое количество может составлять менее процента.

### 1.2.2. Время релаксации частицы в потоке газа

Это время, в течении которого частица, попавшая в поток, последует за потоком. Изменение скорости течения газа приводит к тому, что частица либо ускоряется, либо замедляется, приспособляясь к несущему

ее потоку. Поэтому сила инерции  $F_{ин}$  может быть приближенно определена как скорость относительного движения  $\Delta U$ , умноженного на массу  $m$  и деленная на время релаксации  $\tau$ ,  $F_{ин} \sim m\Delta U / \tau$ .

Увлекающая сила потока (сила сопротивления, действующая на частицу со стороны потока газа) равна  $f = 0,5\Psi S_m r_o \Delta U^2$ . Приравняв эти силы, получим выражение для времени релаксации:  $\tau = 2m / S_m r_o \Psi \Delta U$ . Для сферических частиц со стоксовским характером обтекания внешним потоком газа имеет вид  $\tau = \rho_\delta \delta^2 / \rho_o 18\nu$ . В этих формулах  $S_m$  – эффективная площадь сечения частицы,  $\Psi$  – коэффициент сопротивления,  $\rho_\delta$ ,  $\rho_o$  – плотности частиц и газа,  $m$ ,  $\delta$  – масса и диаметр частицы,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости газа. Коэффициент сопротивления зависит от режима обтекания частицы потоком и определяется числом Рейнольдса  $Re_\delta = \delta \Delta U / \nu$ . Зная порядок величины времени релаксации, выясняют характер поведения твердой частицы в турбулентном потоке газа. Если время релаксации значительно больше времени жизни турбулентного моля, то данный моль на движение частицы практически не влияет. Если время релаксации меньше времени жизни турбулентного моля, то частица увлекается в движение этим молем. Таким образом, время релаксации должно сравниваться с характерным временным масштабом турбулентного образования.

### 1.2.3. Диффузия частицы

Механизм переноса количества движения и массы в турбулентном потоке идентичен, поэтому коэффициент турбулентной диффузии газа принимают равным коэффициенту турбулентной вязкости  $\epsilon$ . В [113] проводятся оценки коэффициента диффузии для частиц. Рассматриваются спектры частот вихрей разных масштабов. Выделяется три интервала частот. В первом интервале низких крупных энергоемких вихрей совершается отбор энергии от осредненного движения газа, т. е. производство турбулентности; во втором интервале частот (инерционный интервал) происходит передача энергии вдоль по спектру – от низких частот к высоким. В третьем интервале частот (высокочастотный интервал) происходит рассеяние механической энергии в тепло. Для потока в цилиндрической трубе коэффициент турбулентной диффузии частиц определяется диффузией энергоемких вихрей, частота пульсаций которых пропорциональна скорости потока и обратно пропорциональна размеру потока (радиусу трубы).

Общее выражение для коэффициента диффузии имеет вид  $\epsilon \sim \Delta y^2 / t$ , где  $\Delta y$  – длина диффузионного шага, а  $t$  – время затраченное на этот шаг. Для периодических колебаний шагом является масштаб (амплитуда)

пульсаций  $A$ , а затраченное время-период пульсаций –  $T$ . Амплитуда пульсационной среды связана со скоростью пульсационного движения соотношением  $A = V' / \omega$ , где  $V'$  – амплитуда скорости пульсаций,  $\omega$  – частота пульсаций среды. Такое же соотношение связывает амплитуду пульсаций взвешенной частицы с амплитудой ее пульсационной скорости  $A_p = V'_p / \omega = \overline{\mu}_p (V' / \omega)$ , где  $\overline{\mu}_p$  – осредненная степень увлечения частицы турбулентными пульсациями;  $\overline{\mu}^2 = \overline{u_p^2} / \overline{u^2} = 1 / (1 + \omega_E \tau)$ , где  $u_p$ ,  $u$  – пульсационные скорости частиц и газа,  $\omega_E$  – частота пульсаций энергоемких вихрей среды. Для потока в трубе  $\omega_E = u^* / l_E \approx u^* / 0.1R$ , где  $R$  – радиус трубы,  $u^*$  – динамическая скорость (скорость трения). Нижний предел частоты турбулентных пульсаций принадлежит наиболее крупным вихрям  $\omega_0 \sim u_m / D$ , где  $u_m$  – расходная скорость потока,  $D$  – диаметр трубы  $\omega_E = 20\omega_0 (\lambda / 8)^{1/2}$ , где  $\lambda$  – коэффициент трения. Часто для частиц различной крупности их коэффициент турбулентной диффузии приравнивается коэффициенту турбулентной вязкости. Однако для большей точности расчетов необходимо вводить поправку на инерционность частиц  $\varepsilon_p = \varepsilon / (1 + \omega_E \tau)$  [113]. При осаждении частиц под воздействием сил тяжести и под влиянием пульсационного обтекания газом частиц сила сопротивления осаждению возрастает, кроме того, из-за больших значений «подвижных» концентраций в молях газа возникают восходящие диффузионные потоки, которые уравнивают гравитационные [113]. В этом случае алгебраическая сумма нисходящих гравитационных потоков и восходящих диффузионных равна нулю [113] (условие невыпадения частиц на дно).

#### 1.2.4. Взаимодействие частиц

Поступающий в систему газоочистки дисперсный материал состоит из совокупностей первичных частиц, агрегированных частиц, и представляет вместе с несущей средой аэрозоль. В другом состоянии он находится в виде отложений или представляет насыпное тело.

Агломераты образуются в результате турбулентной коагуляции, при срыве потоком отложений с поверхностей, при пересыпках материалов, при сегрегации частиц в результате его транспортировки в различных устройствах.

*Турбулентная коагуляция аэрозолей* рассмотрена в [98]. Рассматриваются частицы, размер которых мал по сравнению с внутренним масштабом турбулентности  $\lambda_0$ . Такие частицы будут полностью увлекаться

крупномасштабными ( $\lambda > \lambda_0$ ) пульсациями, но обтекаться мелкомасштабными ( $\lambda < \lambda_0$ ) пульсациями.

Ускорение пульсаций масштаба  $\lambda < \lambda_0$  равно

$$\omega_{0y} = \frac{dv_0}{dt} \sim \frac{\varepsilon^{\frac{3}{4}}}{v^{\frac{1}{4}}},$$

где  $\varepsilon \sim (\Delta V)^3 / L$  – мощность, диссипируемая в единице массы газа, Вт/кг ( $\text{м}^2/\text{с}^3$ ),  $\Delta V$  и  $L$  – скорость и масштаб крупномасштабных пульсаций.

Очевидно, что на частицу радиуса  $R$  попадают за 1 сек. все частицы радиуса  $r$ , которые лежат в цилиндре радиуса  $(R+r)$  и высотой, пропорциональной  $(R^2 - r^2)$ . Число встреч в единицу времени в  $1 \text{ см}^3$  (число актов коагуляции) пропорционально квадрату счетной концентрации:

$$N_{\omega_0} = \pi \cdot \overline{(R+r)^2 \cdot (R^2 - r^2)} \cdot \left(\frac{2}{9}\right) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot \left(\omega_{0y} \cdot \frac{c_0^2}{v}\right),$$

где усреднение производится по распределению частиц аэрозоля по размерам. Для вычисления этого среднего задаются функции распределения по размерам.

При любой функции распределения  $\overline{(R+r)^2 \cdot (R^2 - r^2)} = \beta \bar{R}^4$ , где  $\bar{R}$  – средний размер частиц и  $\beta$  – числовой коэффициент. Поэтому

$$N_{\omega_0} = \left(2\pi \cdot \frac{\beta}{9}\right) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot \left(\frac{\bar{R}^4}{v}\right) \cdot \omega_{0y} \cdot c_0^2 \approx \left(2\pi \cdot \frac{3^{0,5}\beta}{9}\right) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot \left(\bar{R}^4 \cdot \varepsilon^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{c_0^2}{v^{\frac{5}{4}}}\right).$$

Число актов коагуляции растет со средней скоростью  $V_0$  потока как  $V_0^{\frac{9}{4}}$ .

Соотношение числа актов коагуляции в  $1 \text{ см}^3$  в 1 сек., обусловленных турбулентным перемешиванием и броуновской диффузией (последнее дается известной формулой Смолуховского) выражено в виде

$$\begin{aligned} \frac{N_{\omega_0}}{N_D} &= \left(2\pi \cdot \frac{3^{0,5}\beta}{9}\right) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot \frac{\left(\bar{R}^4 \varepsilon^{\frac{3}{4}} \frac{c_0^2}{v^{\frac{5}{4}}}\right)}{4\pi R D c_0^2} \approx \\ &\approx \left(\frac{3^{0,5}}{18}\right) \cdot \beta \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \left(\frac{\bar{R}^3 \cdot \varepsilon^{\frac{3}{4}}}{v^{\frac{5}{4}} \cdot D}\right) \sim \beta \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{\bar{R}^4}{\lambda_0^3}\right). \end{aligned}$$

При этом учтено, что  $\frac{v_{\lambda_0} \cdot \lambda_0}{v} \sim 1$  и  $D \sim v \cdot \left(\frac{\bar{R}}{d}\right)^{-1}$ , где  $d$  – величина порядка молекулярных размеров. В обычных условиях размешивания

$\lambda_0 \sim 10^{-1} - 10^{-5}$  см. Поэтому это соотношение пригодно для частиц, размер которых превышает  $5 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$  см.

Если сравнивать число актов коагуляции взвешенных частиц в турбулентном потоке газа  $N_{\omega 0}$  и жидкости  $N_{D_{\text{турб}}}$ , то при  $\lambda_0 \sim 10^{-1} - 10^{-2}$ ,  $N_{\omega 0} > N_{D_{\text{турб}}}$  для частицы размером  $\bar{R} > 10^{-4} - 10^{-5}$ . Поэтому для таких аэрозольных частиц разработанный в [98] механизм встреч обеспечивает основное число актов коагуляции.

Коагуляция зависит от многих факторов: свойств материала пыли, концентрации и дисперсного состава частиц, в значительной степени от электрического заряда частиц. Основное значение имеет молекулярная агломерация.

### 1.2.5. Устойчивость агломератов

Прочность агломератов зависит от прочности индивидуальных контактов частиц  $F$ , координационного числа, пористости  $\Pi$ , а также размера исходных частиц  $d_{\text{ч}}$  [73, 6].

$$T = (1 - \Pi) \cdot \frac{F}{d^2} / \Pi.$$

Агломерат в виде шара, состоящий из множества частиц, обтекаемый потоком, испытывает раздавливающее воздействие перепада давления в лобовой части. Возникающие при этом боковые усилия способствуют разъединению частиц, причем напряжения разъединения пропорционально перепаду давления, поскольку частицы связаны аутогезионными силами. При обтекании агломерата более мелкими частицами возможно эрозийное разрушение его тела или, наоборот, захват мелких частиц агломератом.

Соппротивление крупной частицы в автомоделной области обтекания определяется

$$P = \xi_x \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \rho \frac{W^2}{2},$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления,  $W$  – скорость газа относительно агломерата на бесконечности,  $\rho$  – плотность газа.

Коэффициент сопротивления шара в диапазоне чисел Рейнольдса 500–100 000 имеет значения, находящиеся в интервале 0,6–0,4; для диапазона 1000–100 000 этот коэффициент принимается равным 0,44; а сила сопротивления прямо пропорциональна скоростному напору [103]. Распределение давления по поверхности агрегата показано на рис. 1.3. В области 0–40° давление избыточно (положительно), при 40° это давле-

ние равно нулю, в области 40–180° избыточное давление отрицательно. Поскольку перепад давления на агломерате является действующей нагрузкой, то эта нагрузка должна определяться интегралом давления по поверхности. Однако средний перепад определяется лобовым сопротивлением  $P$ .

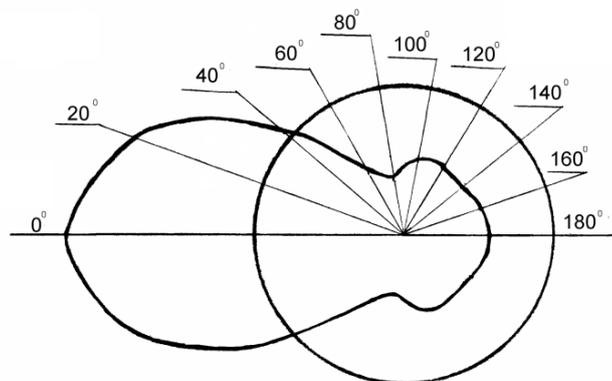


Рис.1.3 Распределение давления по поверхности агрегата

Эта действующая распределённая нагрузка определяет возникающее напряжение внутри агрегата. При импульсном воздействии мелких частиц на агломерат напряжения в теле его возникают в виде волны, причем деформации, ведущие к перекладке частиц, необратимы. Скорость распространения волн деформаций в поперечном и продольном направлениях в грунтовых материалах находятся в диапазоне 100–300 м/с соответственно [193]. Характер кривой разгрузки в материалах после импульсного воздействия зависит не только от свойств материала, но и частоты воздействия импульса. Однако сравнение времени воздействия нагрузки и времени распространения волны, позволяет считать, что находится при постоянном воздействии нагрузки.

В реальных потоках агрегаты из мелких частиц находятся под воздействием переменных аэродинамических сил со стороны транспортирующего их потока.

При движении одиночной крупной частицы-агломерата в восходящем потоке уравнение имеет вид [40]:

$$\frac{dU}{dt} = g \cdot \left[ \left( \frac{\omega - U}{U_B} \right)^n - 1 \right], \quad (*)$$

где  $U$  – скорость частицы,  $U_B$  – скорость витания,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\omega$  – скорость газа,  $n = 1 - 2$  зависит от режима обтекания частицы газом. Интегрирование (\*) позволяет получить зависимость пути, пройденного частицей от его скорости при  $n = 2$  (автомодельная область сопротивления).

пройденного частицей от его скорости при  $n=2$  (автомодельная область сопротивления).

$$L_p = \frac{U_B}{g} \cdot \left[ (\omega - U_B) \cdot \ln \frac{\omega - U_B}{\omega - U - U_B} + (\omega + U_B) \cdot \ln \frac{\omega - U + U_B}{\omega + U_B} \right],$$

при условии, что  $U_0 = 0$  – начальная скорость частицы. Если за масштаб скорости принять  $\omega$ , то последнее выражение можно выразить в безразмерном виде:

$$\bar{L}_p = \bar{U}_0 \cdot \left[ (1 - \bar{U}_B) \cdot \ln \frac{1 - \bar{U}_B}{1 - \bar{U} - \bar{U}_B} + (1 + \bar{U}_B) \cdot \ln \frac{1 - \bar{U} + \bar{U}_B}{1 + \bar{U}_B} \right], \quad (**)$$

где  $\bar{L}_p = \frac{L_p \cdot 2g}{\omega^2}$ ;

Таблица 1.4

$$\bar{U}_B = \frac{U}{\omega}; \quad \bar{U}_B = \frac{U}{\omega}.$$

Кривые по (\*\*\*) на рис.1.4 позволяют определить скорость на каждой длине пробега частицы.

Для малых чисел  $\bar{L}_p$  зависимость  $\bar{U} = f(\bar{L}_p, \bar{U}_B)$  приведена в табл. 1.4.

Значение  $\bar{U}$

$\bar{L}_p \cdot 10^4$	$\bar{U}_B$			
	0,05	0,1	0,2	0,3
1	0,18	0,1	–	–
5	0,33	0,19	0,075	–
10	0,42	0,25	0,1	–
20	0,57	0,38	0,2	0,05

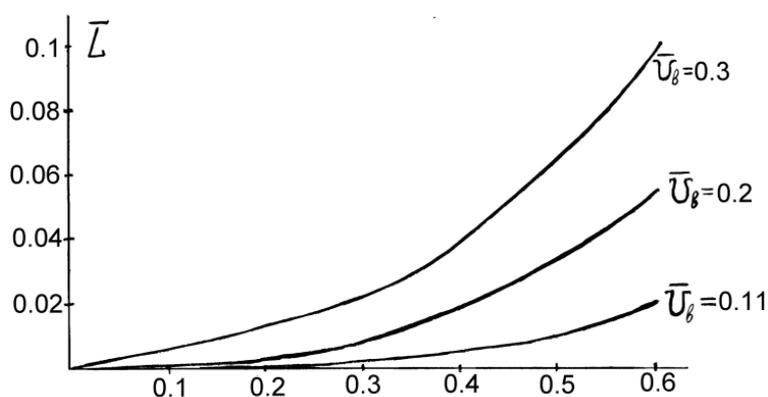


Рис. 1.4. Зависимость безразмерной длины пробега частицы от безразмерной скорости

Скорость витания  $U_B$  находится из зависимости:

$$\text{Re}_B = \frac{U_B \cdot d_{\text{ч}}}{\nu} = \frac{Ar}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar}}; \quad Ar = \frac{g \cdot d_{\text{ч}}^3 \cdot \rho_{\text{ч}}}{\nu^2 \cdot \rho}; \quad \text{при } \text{Re}_B > 700,$$

$$U_B = 1.71 \cdot \left[ \frac{d_{\text{ч}} \cdot g \cdot \rho_{\text{ч}}}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Расчеты показывают, что для крупных агломератов  $U_B \approx 6 - 12$  м/с, для мелких агломератов  $U_B = 1 - 5$  м/с; для мелких частиц  $U_B < 0,01$  м/с. Если агломерат образовался за счет влаги, то можно теоретически определить его прочность. Прочность агломерата зависит от диаметра исходных частиц, поверхностного натяжения связующего, количества связующего  $W$ , угла смачиваемости частиц связующим  $\theta$ . Прочность гранул в зависимости от диаметра исходных частиц приведены в следующей таблице: ( $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>,  $\theta = 0$ ).

Разрушение определяется величиной и длительностью воздействия нагрузки. Это связано со скоростью перераспределения волн деформаций в агломерате. С другой стороны, величина силы воздействия определяется разностью скоростей потока и частицы. На малых расстояниях пробега частицы, сопоставимых с размером частиц, при начальной нулевой скорости ввода, нагрузка будет определяться разностью скоростей потока и частицы. Скорость частицы определяется из табл. 1.2. Примем значение скорости частицы при безразмерном перемещении частицы, равным 0,0001. Сравнение данных позволяет сделать вывод, что при скоростях потока больше 40 м/с агрегаты могут разрушаться. При умеренных скоростях агрегаты из мелких частиц более устойчивы к нагрузкам, которые характерны при осуществлении процессов в производственных газоочистных аппаратах. Поступающие в аппарат агломераты взаимодействуют с поверхностями, деформируются, образуют отложения в виде полос.

Метод транспортирования и пылеулавливания выбирают в зависимости от физико-химических свойств пылей, анализ которых позволяет наиболее рационально выбрать метод транспортирования и пылеулавливания и его аппаратное оформление.

### 1.3. Характеристика потоков в трубопроводном транспорте частиц

В трубопроводном транспорте параметры движения определяются величиной начального давления и степенью влияния сжимаемости несущей среды, величиной концентрации и степенью дисперсности транспортируемого материала, а также специфическими особенностями физических свойств этих материалов [195, 89]. Существенное значение имеют структурные особенности двухфазного потока, проявляющиеся в неравномерности распределения концентрации примесей по поперечному сечению и по длине трубопровода, связанные с характером диффузионных

Таблица 1.5  
Значения  $T$ (Па)

$W$ %	$d_{ч}$ , мкм		
	1	5	10
0,27	38000	7700	3800
3,7	37000	7400	3700

процессов в потоке и расширением несущей среды. Влияние сжимаемости несущей среды при достаточно больших перепадах давления приводит к газодинамическому режиму движения двухфазной среды и появлению критических условий истечения, отличающихся от критических условий для сжимаемой гомогенной среды. Силовое взаимодействие между частицами твердых примесей и газом, при относительном их движении, в основном проявляется в виде поверхностных сил сопротивления и, в какой-то мере, в виде сил Магнуса при вращении частиц. Уменьшение размера частиц соответствует увеличению коэффициента сопротивления последней и одновременно возрастает площадь поверхности частиц, приходящихся на единицу их массы, что приводит к увеличению поверхностных сил взаимодействия с несущей средой и достигается более высокая однородность движения смеси. Значительное отличие в плотности несущей среды и твердых частиц служит причиной существенного различия в инерционных силах, возникающих при ускорении потока, что вызывает относительное движение несущей среды и примесей. В условиях турбулентного движения несущей среды приведенные выше свойства силового взаимодействия между частицами и потоком являются основной причиной различной интенсивности вовлечения твердых частиц в пульсационное движение в зависимости от их размеров и плотности. Увеличение размеров частиц приводит к относительному ослаблению поверхностных сил, вовлекающих их в пульсационное движение, и одновременно за счет увеличения массы возрастает инерционное сопротивление этому движению. Обратное влияние примесей на интенсивность крупномасштабной турбулентности сводится к уменьшению интенсивности турбулентности в связи с тем, что энергетический баланс пульсационного движения и необходимая эффективность турбулентных напряжений устанавливаются в соответствии с увеличением средней плотности массы среды, участвующей в пульсационном движении, которая возрастает с повышением концентрации примеси твердых частиц. Характерной особенностью при формировании пылегазового потока в трубах и каналах переменного сечения является возникающее отставание частиц примесей от несущего потока по скорости и температуре. Отставание по скорости определяется условием взаимодействия массовых, поверхностных и инерционных сил, возникающих при ускорении потока и одновременно при наличии тормозящих движение эффектов, вызванных присутствием твердых стенок. Различие по температуре имеет место при понижении температуры несущей среды в результате расширения газа, причем отличие в температурах существенно зависит при этом от интенсивности теплообмена. Теплообмен между компонентами смеси, особенно при больших

концентрациях примесей, может оказывать весьма заметное влияние на характер процесса расширения газа и, следовательно, на динамические характеристики всего потока.

Представления о движении двухфазной среды могут быть получены в некоторых предельных случаях. При пневматическом транспорте крупнозернистых материалов с ограниченными концентрациями мала вероятность столкновения отдельных частиц друг с другом и вследствие большой массы частиц исключается влияние турбулентных пульсаций на их движение. Вследствие этого оказывается возможным детальное исследование движения отдельных зерен в несущем потоке под действием сил со стороны последнего при одновременном действии гравитационных сил и ударном взаимодействии зерен со стенками трубы, возникающим в процессе движения. В этом случае представляется возможным получить данные, касающиеся поступательной и угловой скорости зерен, условий столкновения их со стенкой трубы. И на этой основе установить энергетические затраты в связи с потерями при ударе о стенку или эквивалентные, при установившемся течении, затраты энергии на восстановление скорости зерен после удара, что в конечном счете определяет дополнительное гидравлическое сопротивление при пневмотранспорте.

Другой случай представляет высоконапорный пневматический транспорт тонко диспергированных материалов при относительно высоких концентрациях и осуществляемый в настолько интенсивном турбулентном режиме, что можно предполагать равномерное распределение концентрации твердых примесей по поперечному сечению трубопровода. В этом случае для изучения особенностей газодинамических режимов течения сжимаемой двухфазной среды используются допущения об идеальных свойствах несущей среды, лишенной вязкости, а взаимодействие последней с твердыми частицами примесей предполагается осуществляющимся за счет их сопротивления при относительном движении в потоке в соответствии с опытными данными. Причем дополнительное сопротивление трения за счет взаимодействия примесей со стенкой учитывается также на основании опытных данных. На такой основе могут быть установлены для потока сжимаемой гетерогенной среды интегральные условия сохранения непрерывности, импульса и энергии в замкнутой форме относительно неизвестных параметров потока. Однако переход к дифференциальной форме уравнений встречает трудности, связанные с гетерогенной структурой среды.

### 1.3.1. Одномерная модель движения гетерогенной среды

Наиболее доступные методы решения задачи движения гетерогенных потоков в трубах основываются на одномерной модели, когда рассматриваются изменения осредненных по сечению параметров потока в направлении течения и не учитывают изменения скорости в поперечном направлении последней [195]. Влияние твердых стенок учитывается введением эмпирических коэффициентов в уравнение движения. Силовое взаимодействие между частицей и газом учитывается коэффициентом сопротивления, который зависит от режима обтекания частицы газом. Для упрощения пренебрегается взаимодействие между частицами.

В общем случае движущаяся среда сжимаема, имеет место различие в поведении несущей среды и твердых примесей. Уравнения движения потока с твердыми частицами одинакового размера имеют вид [195]:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon\rho v)}{\partial x} = 0; \\
 & \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F - \frac{\varepsilon_\delta \rho_\delta}{\varepsilon \rho} Z; \\
 & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_\delta} \frac{\partial p}{\partial x} + F_\delta + Z; \\
 & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{v^2}{2} + h \right) + v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v^2}{2} + h \right) + \frac{\varepsilon_\delta \rho_\delta}{\varepsilon \rho} \left[ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{u^2}{2} + \ell_\delta \right) + u \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u^2}{2} + \ell_\delta \right) \right] - \\
 & \frac{1}{\varepsilon \rho} \frac{\partial P}{\partial t} - (Q + Fv) - \frac{\varepsilon_\delta \rho_\delta}{\varepsilon \rho} (Q_\delta + F_\delta u) = 0; \\
 & \frac{\partial \Theta}{\partial t} + u \frac{\partial \Theta}{\partial x} = -6St \frac{c_p \rho (v - u)}{c_\delta \rho_\delta \delta} (\Theta_s - T); \\
 & p = \rho RT; \\
 & \varepsilon + \varepsilon_\delta = 1; \\
 & Z = \frac{3}{4} \frac{\xi_\delta}{\delta} \frac{\rho}{\rho_\delta} (v - u)^2,
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

где  $v, u$  – скорости газа и частиц;

$\rho, \rho_\delta$  – плотности газа и частиц;

$p$  – давление газа;

$\varepsilon, \varepsilon_\delta$  – объемные концентрации газа и частиц;

$T$  – температура газа;

$\Theta$  – средняя температура частицы;

$\Theta_s$  – температура поверхности частицы;

$h = c_p T$  – энтальпия газа на единицу массы;

$\ell_\delta = c_\delta \Theta$  – внутренняя энергия частиц на единицу массы;

$Q_\delta$  – количество тепла, переданное излучением в единицу времени на единицу массы;

$\delta$  – диаметр частицы;

$c_p, c_\delta$  – теплоемкости газа и частицы;

$\xi_\delta$  – коэффициент сопротивления частицы;

$$St = \frac{Nu_\delta}{Re_\delta Pr} = \frac{\alpha_\delta}{(v-u)\rho c_p} - \text{обобщенное число Стентона, } Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda_t},$$

$$Re_\delta = \frac{(v-u)\delta\rho}{\eta}, \quad St = \frac{2}{Re_\delta Pr} + 0,495 Re_\delta^{-0,45} Pr^{-0,67};$$

$\eta$  – динамическая вязкость газа,  $\lambda_t$  – коэффициент теплопроводности;

$F = \mp g \cos \gamma - \frac{\lambda}{2D} v^2$ ;  $F_\delta = \mp g \cos \gamma - \frac{\lambda_m}{2D} u^2$ ,  $\gamma$  – угол наклона трубопровода;

$\lambda, \lambda_m$  – коэффициенты трения газа и материала о стенки трубопровода.

Для установившегося несжимаемого течения и отсутствие теплообмена уравнения (1.5) после преобразований будут иметь следующий вид.

$$\begin{aligned} \varepsilon \rho \cdot v S &= G; \\ \varepsilon_\delta \rho_\delta u S &= G_\delta = \mu G; \\ \rho v \frac{dv}{dx} &= -\varepsilon \frac{dp}{dx} - \varepsilon \rho g \cos \gamma - \frac{\lambda}{2D} \varepsilon \rho v^2 - \varepsilon_\delta \rho_\delta Z; \\ \rho_\delta u \frac{du}{dx} &= -\varepsilon_\delta \frac{dp}{dx} - \varepsilon_\delta \rho_\delta g \cos \gamma - \frac{\lambda_m}{2D} \varepsilon_\delta \rho_\delta u^2 + \varepsilon_\delta \rho_\delta Z; \\ \varepsilon + \varepsilon_\delta &= 1; \\ Z &= \frac{3}{4} \frac{\hat{\xi}}{\delta} \frac{\rho}{\rho_\delta} (v-u)^2 = C_m (v-u)^2; \end{aligned} \quad (1.6)$$

$S$  – площадь сечения трубы;  $G, G_\delta$  – массовые расходы газа и частиц;  $\hat{\xi}$  – средний коэффициент сопротивления частиц. Значения  $\lambda, \lambda_\delta, \hat{\xi}$  считаются известными из экспериментальных данных.

*При течении несжимаемой двухфазной среды в трубах выделяется начальный участок потока, в пределах которого осуществляется стабилизация течения, приводящая в конце этого участка к равновесному соотношению скоростей и объемных концентраций несущей среды и примесей. Степень неустойчивости двухфазного потока при входе в трубу*

определяется мерой отклонения входных параметров потока от параметров равновесного течения. В [195] приложено решение системы уравнений (1.6) На рис 1.5. показано изменение параметров двухфазной гетерогенной среды в процессе стабилизации в пределах начального участка трубы.

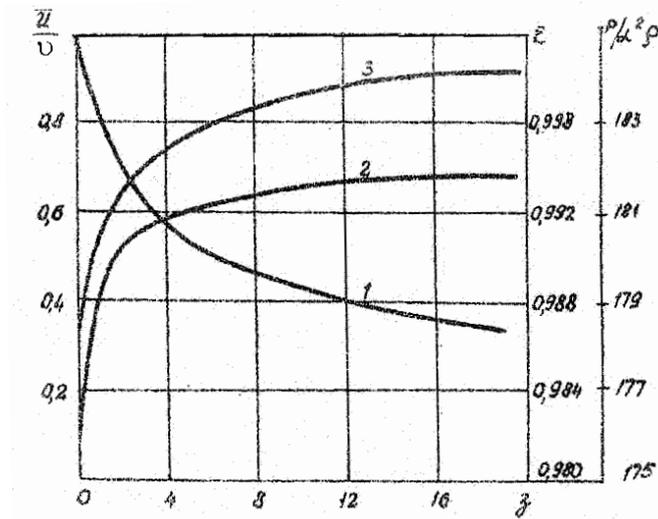


Рис. 1.5. Изменение параметров двухфазной гетерогенной среды в процессе стабилизации в пределах начального участка трубы:

1 – изменение безразмерной величины давления  $p/a^2\rho$ ; 2 – изменение истинной объемной концентрации несущей среды  $\epsilon$ ; 3 – изменения отношения скорости твердых примесей к скорости несущей среды в зависимости от безразмерной координаты. Здесь  $\alpha = \rho G = \epsilon v$ ,  $\xi = x/D$ ,  $x$  – координата участка,  $D$  – диаметр трубопровода

Для установившегося течения сжимаемой пылегазовой среды в трубах рассматривается система уравнений в безразмерной форме, где в качестве масштаба температуры  $T_0$  и  $\Theta_0$  в начальном сечении трубы, величина  $a_* = \sqrt{\chi RT_0}$ , скорость звука в чистом газе, отвечающей начальной температуре  $T_0$ . В результате преобразования системы (1.5) получено соотношение, которое указывает на существование критических значений энтальпии, скорости потока, длины трубы. При относительно малых скоростях воздуха и примеси в начальном сечении, когда критическая длина оказывается большой, влияние начального участка не существенно. В области основного течения наблюдается увеличение скорости несущей среды в связи с расширением последней, причем скорость частиц также увеличивается, но вместе с тем растет и отставание от скорости воздуха. Значение величины отставания по скорости определяется инерционными силами при ускорении частиц и силой сопротивления трения. Наибольшее отставание по скорости достигается

в конце трубы, где скорость несущей среды принимает критическое значение, близкие к скорости звука в гомогенной газовой среде, но при температуре, отвечающей условиям истечения гетерогенной среды. Значение скорости частиц твердой фазы в выходном сечении вследствие непрерывного отставания оказывается ограниченным по сравнению со скоростью несущей среды. Изменение статического давления и плотности несущей среды по длине трубы зависит от характера изменения коэффициентов трения в зависимости от скорости, но в основной части течения на значительной длине трубопровода это изменение имеет почти линейный характер. Однако резкое уменьшение давления возникает вблизи выходного сечения в соответствии с ростом скорости несущей среды. Характер изменения всех параметров концевой части трубы при критическом истечении определяется влиянием сжимаемости несущей среды [195]. На рис. 1.5 показаны изменения параметров потока. На рис. 1.6 показана зависимость безразмерной скорости  $u/v_*$  частиц от безразмерной скорости газа  $v/v_*$  при разных расходных концентрациях  $\mu$ . При увеличении расходной концентрации увеличивается отставание частиц по скорости и, в том числе критические значения. Критическая длина трубопровода  $l_*$  зависит от начальной скорости, концентрации  $\mu$  и степени дисперсности.

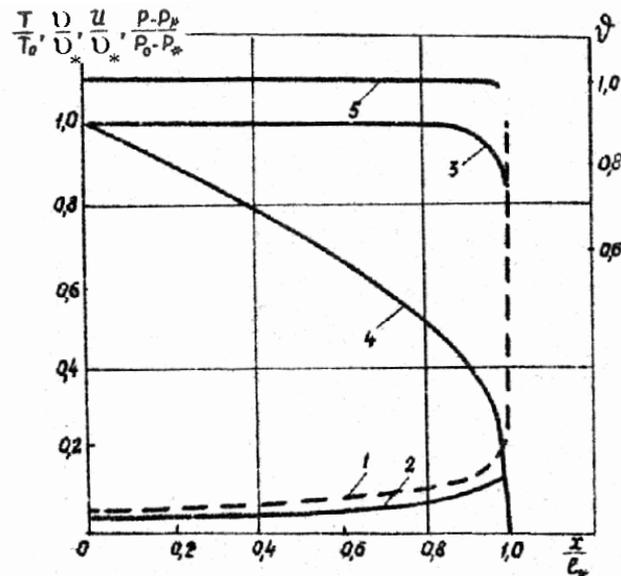


Рис. 1.6. Изменение параметров сжимаемой двухфазной гетерогенной среды при течении в трубе: 1 – безразмерная скорость газа  $v/v_*$ ; 2 – безразмерная скорость твердых примесей  $u/v_*$ ; 3 – безразмерная температура газа; 4 – безразмерная величина статического давления  $(p - p_*)/(p_0 - p_*)$ ; 5 – безразмерная температура твердых примесей  $v = \Theta/\Theta_0$

На рис. 1.7 приведена зависимость критической длины  $l_*$  от концентрации  $\mu$ , свидетельствующая об интенсивном уменьшении величины  $l_*$  с увеличением расходной концентрации. На рис. 1.8 показана зависимость критической длины  $l_*$  от среднего диаметра частиц, которая свидетельствует об увеличении критической длины с увеличением диаметра частиц.

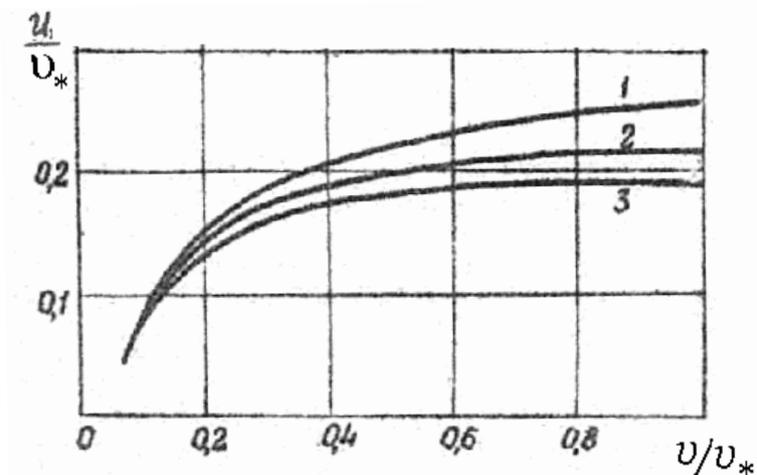


Рис. 1.7. Зависимость безразмерной скорости твердых примесей  $u/v_*$  от безразмерной скорости газа  $v/v_*$  при различных концентрациях  $\mu$ :  
 1 —  $\mu = 20$ ; 2 —  $\mu = 40$ ; 3 —  $\mu = 60$

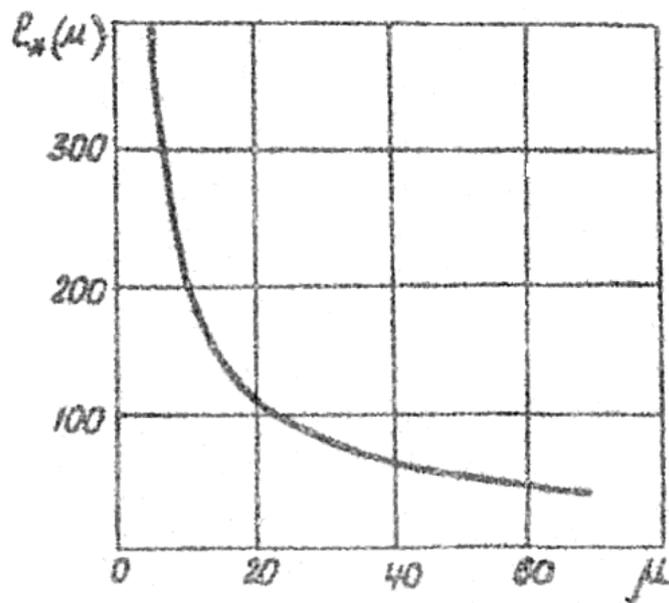


Рис. 1.8 Зависимость критической длины трубопровода от расходной концентрации твердых примесей

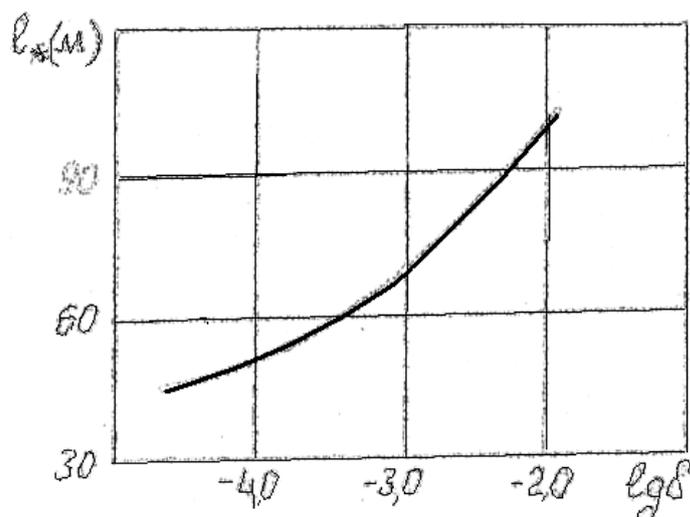


Рис. 1.9. Зависимость критической длины трубопровода от среднего диаметра твердых частиц

### 1.3.2. Пневматический транспорт крупнозернистых материалов

Пневматический транспорт крупнозернистых материалов в горизонтальных трубах с ограниченными перепадами давления и сравнительно небольшими расходными концентрациями характеризуется определенным механизмом движения частиц и условиями их взаимодействия с несущим потоком и стенками трубы [195]. В процессе пневматического транспортирования взвешивание и перенос частиц материала по трубопроводу начинает осуществляться при соответствующих скоростях несущего потока и условиях их ударного взаимодействия со стенкой.

Общая характеристика процесса движения твердых частиц при пневмотранспорте в горизонтальных трубах сводится к следующему. Движение частиц определяется силами сопротивления, возникающими при отставании частиц от несущего потока, и действием гравитационного поля в направлении, нормальном к потоку. В связи с этим возникает движение частиц под некоторым углом к стенке трубы. При ударе частицы о стенку имеет место не вполне упругий удар, в результате которого вертикальная составляющая скорости движения частицы частично восстанавливается в соответствии с величиной коэффициента восстановления  $k$ . Значение и характер изменения горизонтальной составляющей скорости зависят от того, в какой области лежит значение угла падения частицы на стенку. При малых углах между направлением падения и стенкой имеет место скользящий удар с потерями энергии на трение, а в области больших значений угла падения наблюдается нескользящий удар. В обоих случаях возникает затрата энергии поступательного движения частицы.

Суммарная затрата энергии от ударов всех частиц определяет дополнительное сопротивление трения при пневмотранспорте. Вращательное движение частицы, возникающее после удара, при относительном движении в потоке несущей среды является причиной возникновения силы Магнуса, величина которой в некоторых случаях может превышать вес частицы. При сравнительно ограниченной скорости несущего потока движение частиц происходит скачкообразно над нижней поверхностью трубы по траекториям с максимальной высотой, меньшей ее диаметра. Вследствие потерь энергии, возникающих за счет взаимодействия частиц со стенкой трубопровода, процесс их движения носит затухающий характер с постепенным сокращением высоты и длины траекторий и уменьшением скорости частиц. Одностороннее действие подъемной силы на восходящей и нисходящей частях траектории в некоторых случаях не компенсирует потерь скорости при ударе о нижнюю стенку трубы. Устойчивое, незатухающее движение частиц становится возможным при более высокой скорости несущего потока, когда высота траекторий обеспечивает взаимодействие частиц с верхней стенкой. В этом случае направление подъемной силы на нисходящей части траектории, после удара о верхнюю стенку и изменения направления вращения частицы, будет совпадать с направлением силы тяжести. Это условие может оказаться достаточным для восстановления вертикальной составляющей скорости частицы и возникновения её устойчивого движения.

Следовательно, установившийся процесс пневмотранспорта для крупных частиц может иметь место в области режимов скачкообразного движения с ударами о нижнюю и верхнюю поверхности трубы. При установившемся режиме движения потери энергии, возникающие вследствие ударов о стенку, и скорость частиц непрерывно восстанавливаются до среднего уровня за счет энергии несущей среды, обеспечивающей их ускорение. Для установившегося скачкообразного режима движения важным обстоятельством является тот факт, что затраты энергии потока на ускорение частиц становятся равными потерям энергии, возникающим при вполне упругих ударах о стенку. Таким образом, падение давления на участке трубопровода эквивалентно сопротивлению трения, состоящему из сопротивления трения несущей среды и потерь энергии от взаимодействия частиц со стенкой. Исходя из рассмотренного механизма пневмотранспорта крупных частиц, с учетом сделанных допущений, проекции уравнения движения сферической частицы в горизонтальном плоском канале могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}
m \frac{du_x}{dt} &= -F_x + P_x; \\
m \frac{du_y}{dt} &= -F_y + P_y \mp mg; \\
F_x &= \frac{1}{2} \hat{\xi} \rho f_a |\nu - u_x| (\nu - u_x); \\
F_y &= \frac{1}{2} \hat{\xi} \rho f_a |\nu - u_x| u_y; \\
P_x &= \frac{1}{2} \hat{\xi} \rho f_a \omega r u_y; \\
P_y &= \frac{1}{2} \hat{\xi} \rho f_a \omega r (\nu - u_x),
\end{aligned} \tag{1.7}$$

где  $m, f_a$  – масса и миделево сечение частицы,  $\omega$  – угловая скорость частицы,  $r = (\delta/2)$  – радиус частицы. Начальные значения скоростей частицы  $u_{x0}, u_{y0}$  в момент времени  $t = 0$ .

Потери кинетической энергии на единицу длины транспортируемого трубопровода и единицу массы транспортируемого материала определяются зависимостью

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{(u_{xi}^2 - u_{0x}^2) + (u_{yi}^2 - u_{0y}^2) + 0,1\delta^2(\omega_i^2 - \omega_0^2)}{2l_i}. \tag{1.8}$$

Сопоставляя потерянную энергию с работой касательного напряжения частиц  $\tau_m$  на стенке канала прямоугольного сечения высотой  $h_1$  и шириной  $h_2$  на единицу его длины, получим

$$G_m E = 2t_m u_x (h_1 + h_2). \tag{1.9}$$

Из условия равновесия на участке канала длиной  $L$  также имеем

$$\Delta p_m h_1 h_2 = 2t_m (h_1 + h_2). \tag{1.10}$$

Учитывая, что массовый расход  $G_m = \mu G_B$  и исключая из (1.9) и (1.10) значение  $\tau_m$  получим

$$\Delta p_m = (1 - \varepsilon_\delta) E \mu \rho L (\nu / u_x). \tag{1.11}$$

Значение  $\Delta p_m$  определяется также зависимостью

$$\Delta p_m = \frac{\lambda_m L}{2D} (1 - \varepsilon_\delta) \rho_m u_x^2. \tag{1.12}$$

Из сопоставления зависимостей (1.11) и (1.12), учитывая, что  $\frac{\varepsilon_\delta}{1 - \varepsilon_\delta} = \mu r \nu / \rho_m u_x$ , получим значение коэффициента дополнительного гидравлического сопротивления в следующей форме [195]:

$$\lambda_m = \frac{2ED}{u_x^2} = \frac{2ED}{v^2} \left( \frac{v}{u} \right)^2. \quad (1.13)$$

Проведенные эксперименты по транспортировке резиновых гранул и численные расчеты позволили для малых расходных концентраций использовать формулу

$$\lambda_m = \left( \frac{2D\Delta p}{\rho v^2} - \lambda \right) \frac{v}{\mu u_x}. \quad (1.14)$$

На основании измеренных значений  $\Delta p$  были определены значения коэффициента сопротивлений  $\lambda_m$  для указанных выше трех диаметров трубопровода и построены обобщенные зависимости  $\lambda_m$  от параметра  $Fr = v^2 / gD$  для диапазона расходной концентрации  $\mu$  от 0,2 до 5 кг/кг и значений критерия  $\sqrt{Fr}$  от 20 до 60 с учетом влияния величины  $u_x / v$ .

Коэффициент  $\lambda_m$  в исследованном диапазоне параметров пневмотранспорта с переходом от больших чисел Фруда в область их малых значений возрастает.

Быстрый рост коэффициента  $\lambda_m$  соответствует числам Фруда, при которых нарушается установившийся характер движения гранул с равномерным их распределением по сечению трубопровода [195]. Гранулы начинают осаждаться на дно трубопровода и образовывать завалы, ведущие к прекращению движения транспорта. При сопоставлении данных экспериментального исследования с расчетами по теоретическим зависимостям (рис. 1.10) получено совпадение результатов исследований для области устойчивых режимов пневмотранспорта  $\sqrt{Fr} > 25$ . В области больших скоростей несущего потока наблюдается близкий к линейному характер зависимости коэффициента дополнительного сопротивления  $\lambda_m$  от критерия Фруда и независимость его от величины расходной концентрации при изменении её от 0,2 до 5 кг/кг.

Имеющий место разброс экспериментальных точек в зоне  $\sqrt{Fr} < 25$  объясняется тем, что расчетный режим движения с ударным взаимодействием гранул с верхней и нижней поверхностью трубы не может быть реализован из-за уменьшения высоты траекторий гранул и изменения характера их скачкообразного движения, происходящего без удара о верхнюю поверхность трубы.

Визуальные наблюдения за движением гранул и построение профилей скоростного поля потока транспортируемой смеси по результатам выполненных замеров установили для области  $\sqrt{Fr} < 25$  нарушение равномерности распределения гранул по высоте потока. Основной поток гранул с уменьшением в данной области сосредоточивается

в нижней половине трубы, В дальнейшем наблюдаются волочение части гранул, значительная деформация при этом профиля скорости двухфазного потока и постепенное образование на дне трубопровода неподвижного слоя с прогрессирующим его ростом по высоте [195]. Отклонение опытных точек от теоретической зависимости в зоне значений  $\sqrt{Fr} < 25 - 30$  объясняется также влиянием расходной концентрации на величину коэффициента  $\lambda$ . Резкое увеличение коэффициента  $\lambda_m$  относится к области режимов, близких к прекращению) транспортировки гранул, которое с ростом концентрации возникает при более высоких значениях  $\sqrt{Fr}$ . Влияние диаметра трубопровода на величину коэффициента дополнительного сопротивления  $\lambda_m$  оказывается таким, что при одинаковых значениях расходной концентрации, по мере увеличения размера трубы» устойчивые режимы пневмотранспорта с равномерным распределением гранул по сечению потока наблюдаются при более высоких скоростях несущей среда с увеличением  $\lambda_m \sim \sqrt{D}$ .

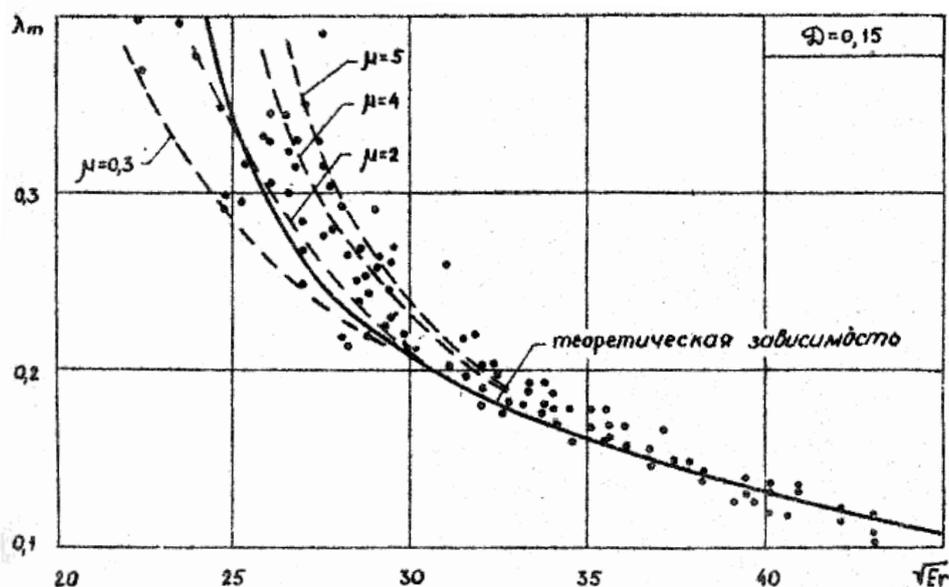


Рис. 1.10. Сравнение теоретической зависимости с опытными данными по пневмотранспорту резиновых гранул

Изучение движения резиновых гранул в стальных горизонтальных трубопроводах позволило установить характер изменения скорости гранул от параметров потока и концентраций транспортируемой смеси. Исследования показали, что с увеличением скорости несущего потока наблюдается рост величины относительной скорости  $v - u_x$  и отношения  $u_x / v$ , а по мере увеличения расходной концентрации величина  $u_x / v$  уменьшается (рис. 1.11).

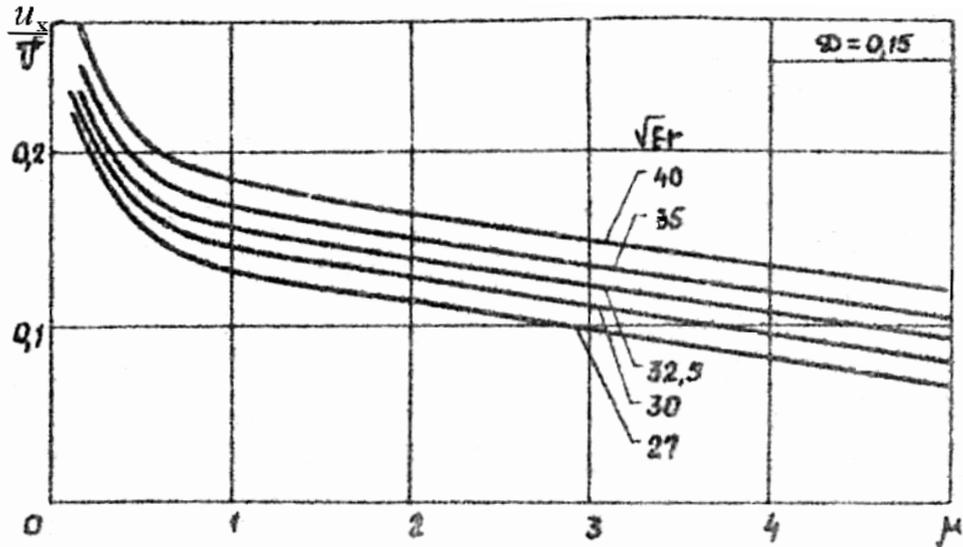


Рис. 1.11. Зависимость средней безразмерной составляющей скорости гранул от величины расходной концентрации

Особенно значительное её изменение наблюдается в зоне низких расходных концентраций  $\mu < 1,5$ , далее градиент изменения  $u_x/v$  стабилизируется и для концентраций  $\mu > 2,0$  становится небольшим [195].

На рис. 1.12 представлены результаты расчетов средней скорости резиновых гранул, отнесенной к скорости несущего потока в функции от  $\sqrt{Fr}$ . Там же нанесены опытные точки, полученные при пневмотранспортировке резиновых гранул. Расположение опытных точек относительно теоретической зависимости говорит о соответствии результатов расчетов с экспериментом при достаточно низком значении расходной концентрации. Аналогично тому, как и для резиновых гранул, получено удовлетворительное совпадение теоретических, расчетных величин с опытными данными по пневмотранспорту гороха, пшена и пшеницы в зоне малых расходных концентраций к установившимся режимов транспортирования.

«Взвешенный» пневматический транспорт в горизонтальных трубах представляет вариант низконапорного пневмотранспорта с весьма ограниченной дальностью транспортирования и также ограниченными расходными концентрациями, что связано с относительно большими удельными расходами воздуха. Решение проблемы повышения дальности и эффективности транспортирования возможно лишь при больших начальных давлениях транспортирующего воздуха, что приводит к необходимости использования высоконапорного пневматического транспорта, при котором в механизме движения двухфазной среды существенным образом проявляется сжимаемость несущей среды.

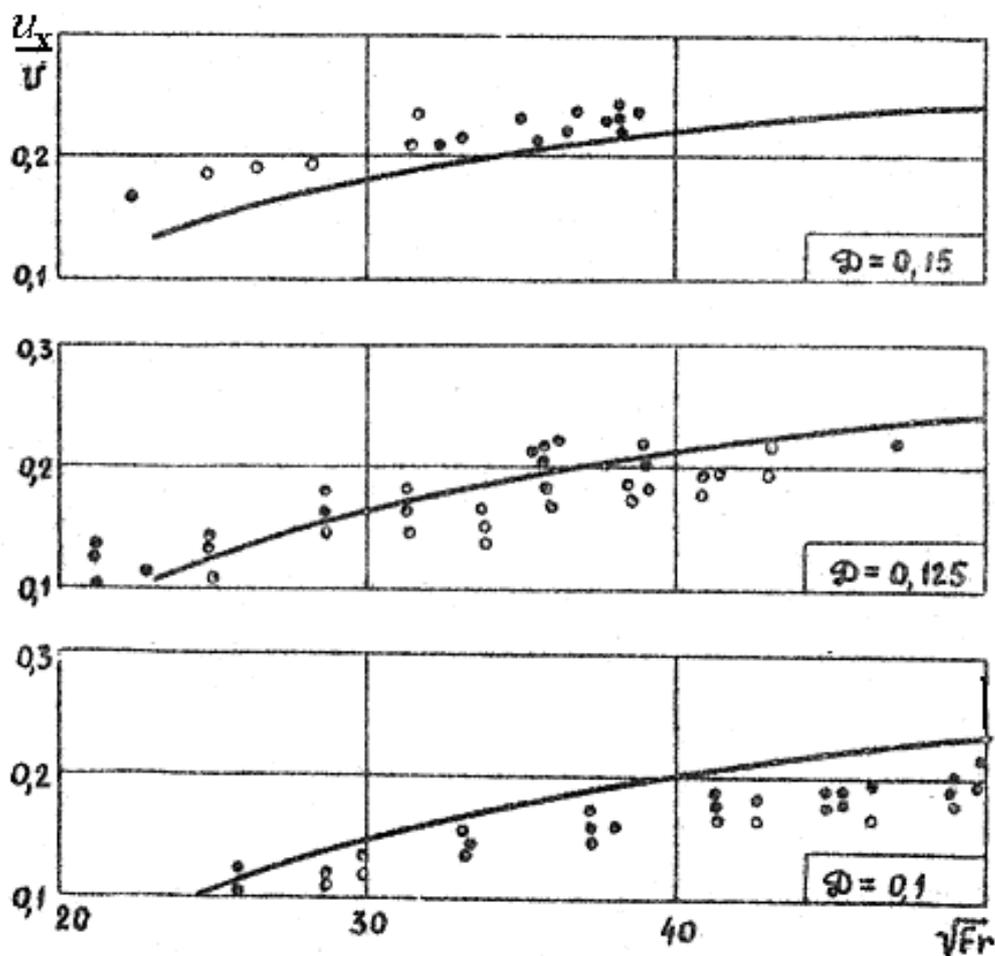


Рис. 1.12. Сопоставление расчетных зависимостей с опытными данными, полученными при пневмотранспорте резиновых гранул

Явление сжимаемости связано с расширением несущей среды в процессе движения по трубам и, следовательно, скорость этой среды непрерывно возрастает до некоторого предельного значения, соответствующего критической скорости истечения для двухфазной среды. Кроме того, при критическом истечении возможная длина трубы, соответствующая максимальной дальности транспортирования, имеет строго определенное критическое значение. Расширение несущей среды приводит к различным результатам в оценке транспортирующих способностей потока в зависимости от структуры распределения частиц примесей в потоке. В том случае, когда организация приемов пневматического транспортирования совпадает с методами низконапорного пневмотранспорта в горизонтальных трубах и предполагается движение твердых частиц примесей во взвешенном состоянии в случае сжимаемого потока (высоконапорный транспорт), выявляется следующая, не удовлетворяющая техническим требованиям, обстановка. Начальные

скорости воздуха во входном сечении трубопровода должны быть обязательно выше тех значений, которые необходимы для взвешенного транспортирования материала и только в этом случае представляется возможным сохранить структуру потока со взвешенными частицами без их осаждения. В этом варианте движение при достаточно больших расходных концентрациях скорость несущей среды (воздуха) быстро увеличивается и достигает на выходе из трубы критического значения. Причем увеличение скорости частиц примесей имеет относительно очень слабый темп, что приводит к существенному отставанию примесей от скорости потока, достигающему на выходе из трубы значительной величины и тем большей, чем больше значение расходной концентрации. Кроме того, критическая длина трубы, в пределах которой возможно существование сжимаемого двухфазного потока, существенно лимитируется величиной расходной концентрации и степенью дисперсности материала. При больших расходных концентрациях расширение несущей среды идет более высокими темпами и критическая длина трубы уменьшается. Аналогично при увеличении дисперсности материала и, следовательно, при более высоких коэффициентах сопротивления частиц расход энергии газа и процесс расширения газа ускоряются, а критическая длина трубы уменьшается. Полученные результаты приводят к тому, что высоконапорный транспорт мелкодисперсных материалов в режиме взвешенного транспортирования не представляется возможным осуществить на большие расстояния вследствие относительно малых критических длин трубопроводов, имеющих место в этом случае. Кроме того, при этом транспорт осуществляется с большими, скоростями несущей среды и значительным отставанием частиц по скорости, что существенно завышает энергетические затраты на транспорт. Непригодность таких условий для использования при высоконапорном пневмотранспорте исправляется самой природой механизма движения двухфазной среды. Если горизонтальный трубопровод оказывается достаточно длинным, то при условии критического истечения несущей среда значение входной скорости может сказаться ниже допустимого предела, обеспечивающего взвешенное транспортирование частиц материала. В связи с этим во входном участке трубопровода возникает осаждение материала с последующим образованием «пробок». Следствием пробкообразования является полная реконструкция всего механизма движения. В результате стихийного образования «пробок», разных по величине и возникающих неравномерно по времени, проявляется резко выраженная нестационарность течения, не имеющая установившейся периодичности. Измерения статического давления свидетельствуют о нерегулярной и весьма значительной пульсации последнего.

Одним из характерных признаков «пробкового» режима движения является очень слабая или полностью исчезающая фильтрация несущей среды через образующиеся уплотнения транспортируемого материала, что приводит к выравниванию скоростей несущей среды и примесей и, кроме того, наблюдается уменьшение критической скорости в выходном сечении и существенное увеличение критической длины трубы. Однако нерегулярность, стихийность процесса образования пробок исключают возможность уверенного транспортирования материала и неизбежно приводят к аварийным закупоркам.

Основной вывод теоретических и экспериментальных исследований высоконапорного пневматического транспорта показывает, что единственно возможный путь организации процесса транспортирования должен представлять упорядочение естественно возникающего неорганизованного поршневого режима движения транспортируемого материала. Решение этого вопроса получено при строго регулярном периодическом подводе транспортируемого материала и сжатого воздуха в постоянной дозировке, при этом в транспортирующем трубопроводе устанавливается строго регламентированный режим движения, подчиняющийся регулированию путем изменения дозировки массы воздуха и транспортируемого материала, а также периода времени их подачи. Применение этой системы транспортирования обеспечивает организацию вполне устойчивого режима движения при соответствующем начальном движении и заданной производительности. Максимально возможная эффективность регулярного поршневого режима движения определяется тем, что при этом способе транспортирования обеспечивается полное использование энергии расширяющегося воздуха и одновременно достигаются высокие расходные концентрации, обеспечивающих возможность транспортирования на более значительные расстояния при использовании повышенных начальных давлений сжатого воздуха [195].

Регулярный поршневой режим транспортирования осуществляется при периодическом импульсном подводе сжатого воздуха, и в связи с этим, этот способ транспортирования получил название «импульсного высоконапорного пневмотранспорта». Широкие возможности регулирования поршневого режима движения смеси при пневмотранспорте обеспечивают возможность выбора устойчивого режима, в котором энергетические затраты сжатого воздуха вполне соответствуют затратам энергии на сопротивление трения и инерционное сопротивление. При этом, однако, следует отметить, что значительное уменьшение расхода воздуха и чрезмерное увеличение расхода материала с энергетической точки зрения должно привести также к очень ограниченным по дальности

возможностям транспортирования. В пределе, когда расход воздуха определяется лишь объемом пор в плотной укладке сыпучего материала, дальность транспортирования уменьшается до минимальных пределов. Последний случай соответствует транспортированию в так называемом «плотном слое». Очевидно, что при наперед заданной производительности установки и длине транспортирующей магистрали в случае высоконапорного импульсного пневматического транспорта всегда оптимальным образом могут быть выбраны начальное давление, расходная концентрация и диаметр трубопровода в полном соответствии с балансом энергетических затрат.

### **1.3.3. Транспорт с высокими концентрациями частиц**

На рис. 1.13 *a* приведена схема установки, в которой порционирование при подаче транспортируемого материала осуществляется механическим способом [195]. Установка состоит из закрытого бункера в котором может быть обеспечено заданное давление сжатого воздуха, снабженного герметически закрывающимся загрузочным устройством 1 и клапаном 3 с механическим или пневматическим приводом 4 для периодического пропуска материала в транспортирующий трубопровод 6. Сжатый воздух по трубопроводу 5 подводится к бункеру в верхней части и обеспечивает при транспортировании материала заданное давление в бункере, а также за счет подвода воздуха в нижнем поясе бункера обеспечивается необходимая аэрация материала при выпуске. Воздух, поступающий в трубопровод, подводится через клапан 9, который периодически закрывается после завершения пропуска транспортируемого материала через клапан 3. Таким образом, клапаны 3 и 9, управляемые при помощи реле времени, обеспечивают последовательный строго периодический подвод материала и сжатого воздуха. В конце транспортирующей магистрали 6 находится приемный бункер 7, в верхней части которого устанавливается пылеулавливающее устройство 8, в качестве которого используется эффективно работающий центробежный, безнапорный пылеотделитель с самостоятельным механическим приводом.

На рис. 1.13, *б* приводится принципиальная схема установки импульсного пневмотранспорта, отличающаяся от первого только тем, что механическое устройство для порционирования при подаче транспортируемого материала заменено пневматическим. В этой схеме транспортируемый материал под давлением свободно проходит через открытый клапан 3 в трубопровод 6 до места, где подводится сжатый воздух через клапан 4, управляемый специальным реле времени.



Для обеспечения непрерывного процесса пневматического транспортирования используются два бункера 2, представляющие собой специализированный двухкамерный насос с устройствами для регулярного периодического подвода в транспортирующий трубопровод сжатого воздуха и транспортируемого материала, причем загрузка каждой камеры осуществляется во время работы другой.

Предложенная теория пневмотранспорта при поршневом режиме движения двухфазной среды опирается на положение, что использование высоких и повышенных начальных давлений сжатого воздуха определяет газодинамический процесс движения двухфазной среды по длине трубы. Эффективность пневматического транспорта при таком движении зависит от степени использования энергии сжатого воздуха, причем максимальная эффективность достигается при условии равенства скоростей несущей среды и транспортируемого материала. Эти условия могут быть осуществлены при поршневом режиме движения транспортируемого материала в соответствии со схемой рис. 1.13. в. Практически осуществление этого режима возможно при строго периодическом вводе в транспортирующий трубопровод сжатого воздуха и транспортируемого материала непосредственно или в специальных цилиндрических контейнерах.

Для экономического сопоставления трубного пневмотранспорта с другими способами транспорта при многосторонней оценке его рентабельности существенную роль имеют: возможная дальность транспортирования, эффективность, определяемая достигаемой расходной концентрацией, общая производительность установок и удельные энергетические затраты на транспорт.

Пневматический транспорт при регулярном, периодическом подводе сжатого воздуха и транспортируемых масс можно рассматривать как газодинамический гетерогенный поток в трубе с повторяющимся периодически по ее длине распределением объемных концентраций двухфазного потока. Причем область повышенной объемной концентрации твердой фазы условно характеризуется как «поршневая масса», а общий период времени подвода компонент смеси является постоянной величиной, равной  $t_0$ . Движение центра тяжести поршневой массы соответствует неменяющемуся по времени процессу, что упрощает исследование поставленной задачи. Для исследования движения в одномерной постановке задачи пользуются системой уравнений установившегося движения гетерогенной среды, учитывающей сопротивление прения на стенках трубы на основании опытных данных [195].

Имеем следующую систему уравнений

$$\begin{aligned}
 \frac{t}{t_0} \int_0^{t_0} \varepsilon \rho S dt &= G = \frac{M}{t_0}; \\
 \frac{t}{t_0} \int_0^{t_0} \varepsilon_\delta \rho_\delta S dt &= G_\delta = \frac{m}{t_0}; \\
 \varepsilon \rho v \frac{dv}{dt} + \rho_\delta \varepsilon_\delta u \frac{du}{dx} &= \\
 &= -\frac{dp}{dx} \mp (\varepsilon \rho + \varepsilon_\delta \rho_\delta) g \cos \gamma - \frac{\lambda}{2D} \varepsilon \rho v^2 - \frac{\lambda_m}{2D} \varepsilon_\delta \rho_\delta u^2; \\
 v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v^2}{2} + h \right) + \frac{\varepsilon_\delta \rho_\delta}{\varepsilon \rho} \left[ u \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u^2}{2} + \ell_\delta \right) \right] &= \left( \frac{\varepsilon_\delta \rho_\delta}{\varepsilon \rho} u + v \right) g \sin \gamma; \\
 p &= \rho RT; \\
 u \frac{\partial \Theta}{\partial x} &= \frac{\alpha \sigma}{c_\delta m_\delta} (\Theta_s - T); \\
 \varepsilon + \varepsilon_\delta &= 1.
 \end{aligned} \tag{1.15}$$

Здесь  $t_0$  – период времени цикла;  $M$ ,  $m$  – масса газа и частиц,  $\Theta_s$  – температура поверхности частицы;  $h = c_p T$  – энтальпия газа на единицу массы;  $\ell_\delta = c_\delta \Theta$  – внутренняя энергия частиц на единицу массы;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\sigma$  – площадь поверхности частицы.

Сопротивление трения учитывается на основании зависимостей

$$\begin{aligned}
 -\left( \frac{dp}{dx} \right)_{\text{тр}} &= \frac{\lambda}{2D} \varepsilon \rho u^2; \\
 -\left( \frac{dp}{dx} \right)_{\delta, \text{тр}} &= \frac{\lambda_m}{2D} \varepsilon_\delta \rho_\delta u^2.
 \end{aligned} \tag{1.16}$$

Решение системы уравнение проводится разностным методом. Записывается система уравнений для  $i$ -го элемента. При этом фильтрация не учитывается.

*Результаты численного анализа.* Характер течения сжимаемого двухфазного потока в трубе при условии равенства скоростей несущей среды и транспортируемого материала – случай, отвечающий поршневой структуре течения, имеет качественную аналогию с гомогенным сжимаемым потоком. Однако предельные критические скорости на выходе из трубы существенно меньше скорости звука гомогенного потока и уменьшаются с увеличением концентрации транспортируемого

материала. При расходных концентрациях  $\mu = 40\text{--}50$  кг/кг значение критической скорости не превышает 15 % от скорости звука. Среднее значение скорости пневматического транспорта не превышает значения 20–25 м/с. Характер изменения статического давления при наблюдении в некотором определенном сечении трубопровода имеет пульсирующий, скачкообразный характер» соответствующий падению давления на длине поршневой массы транспортируемого материала. Однако если регистрируется статическое давление только при прохождении переднего фронта поршневой массы или какого-нибудь другого определенного сечения проходящего элемента потока периодической структуры, можно наблюдать установившийся характер изменения статических давлений по длине трубы. Существенное изменение статических давлений возникает вблизи выходного сечения трубопровода, где величина скорости возрастает до критического значения.

Примерный характер влияния расходной концентрации  $\mu$  при критическом режиме течения двухфазной среды и поршневой структуре потока на относительную длину трубопровода, удельную производительность  $G_m/S$ , относительную критическую температуру  $T^*/T_0$  и относительное критическое давление  $p^*/p_0$  для случая равновесного по температурам течения и в случае отсутствия межфазового теплообмена показан на рис. 1.14. Следует отметить сильное влияние  $\mu$  на длину транспортирования в области  $\mu < 10$  и весьма ограниченное влияние при больших значениях  $\mu$ . Влияние интенсивности процесса теплообмена между компонентами смеси проявляется очень слабо на критической длине трубопровода и также на критических значениях температуры и давления.

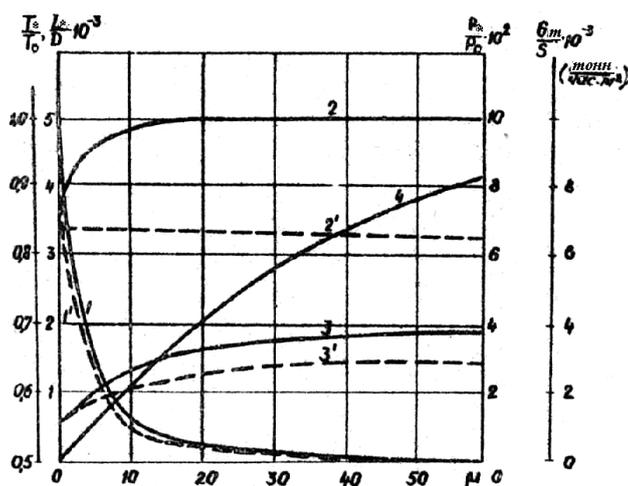


Рис. 1.14. Изменение относительных параметров при равновесном течении от  $\mu$ : 1 –  $L^*/D$ ; 2 –  $T^*/T_0$ ; 3 –  $p^*/p_0$ ; 4 –  $G_m/S$ . 1', 2', 3' – при отсутствии межфазового теплообмена

Необходимо отметить существенное, но имеющее противоположный характер, влияние начальной скорости  $v_0$  на относительную длину транспортирующего трубопровода  $L/D$  и удельную производительность  $G_m/S$ , которое иллюстрируется на рис. 1.15.

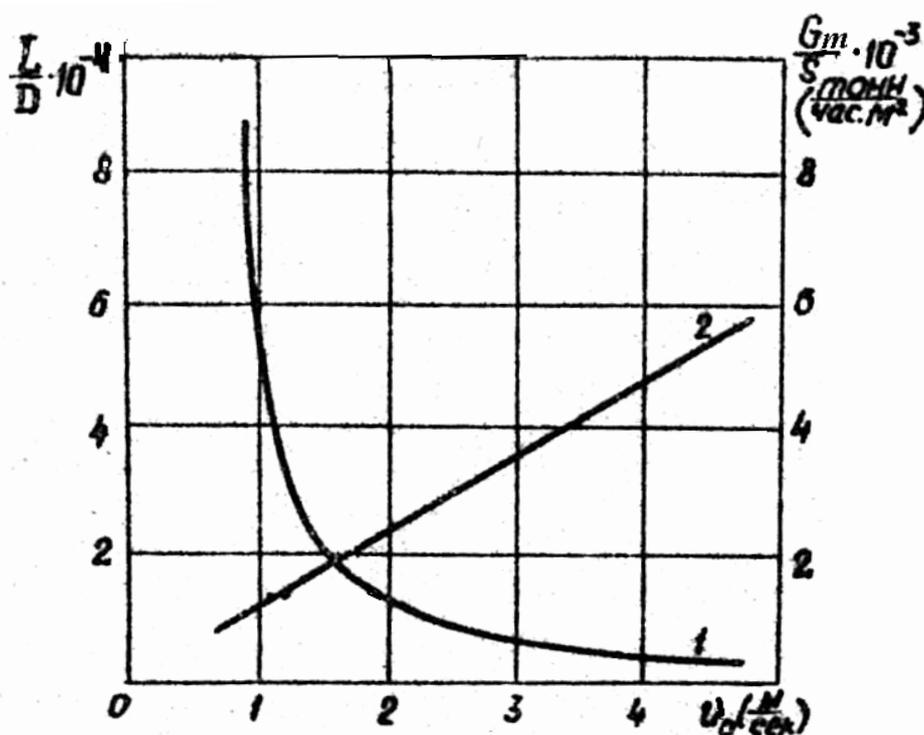


Рис. 1.15. Изменение относительных параметров от  $v_0$ :  
1 -  $L/D$ ; 2 -  $G_m/S$

Существенное влияние на дальность транспортирования имеет коэффициент сопротивления трения транспортируемого материала  $\lambda_m$ , причем уменьшению  $\lambda_m$  соответствует почти пропорциональное увеличение дальности транспортирования. На рис. 1.16 показана зависимость длины трубопровода  $L$  от коэффициента сопротивления  $\lambda_m$  для одних и тех же начальных условий ( $p_0 = 10$  ата,  $v_0 = 2$  м/с,  $\mu = 60$  кг/кг,  $\rho_m = 1400$  кг/м<sup>3</sup>) и для двух различных диаметров трубопровода  $D = 100$  мм и  $D = 500$  мм. На рис. 1.16 видно, что с увеличением диаметра трубопровода следует ожидать существенное увеличение дальности транспортирования.

На рис. 1.17 и 1.18 показана зависимость длин транспортирующего трубопровода от расходной концентрации и коэффициента сопротивления  $\lambda_m$  для различных скоростей  $v_0$  в частном случае трубопровода диаметром 36,5 мм.

Из обзора полученных результатов следует, что достаточная достоверность расчетов высоконапорного пневмотранспорта должна основываться на знании коэффициентов сопротивления материала  $\lambda_m$ , величиной которых непосредственно определяется дальность транспортирования. Экспериментальное исследование сопротивления трения материала в специфических условиях импульсного пневматического транспорта представляет определенные трудности и связано также со значительным объемом работы вследствие большого разнообразия свойств транспортируемых материалов. Выполненные работы по исследованию сопротивления трения основываются на двух различных методах. Первый из них имеет основой измерение статических давлений по длине трубопровода. Для любого сечения трубопровода наблюдается регулярный пульсирующий характер изменения давления при проходе поршнеобразных масс. Однако для некоторого определенного сечения элементов потока, периодически следующих друг за другом, например, для переднего сечения поршневой массы, в определенном сечении трубопровода достигается одно и то же значение статического давления. Регистрация этого мгновенного значения давления позволяет найти закономерность установившегося изменения статического давления по длине трубы. Формальное определение коэффициентов сопротивления  $\lambda_m$ , устанавливается зависимостью (1.16).

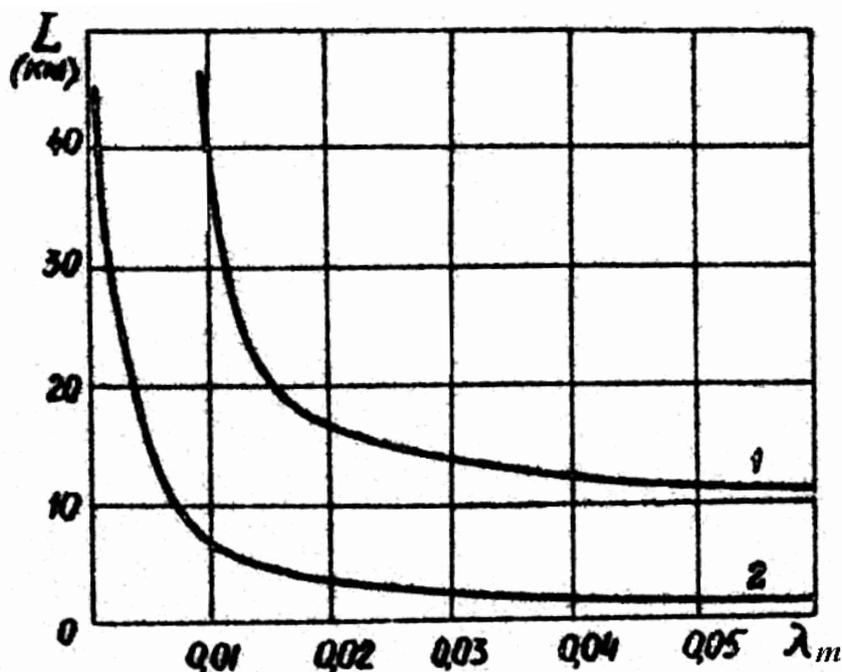


Рис. 1.16. Зависимость длины трубопровода  $L$  от коэффициента, сопротивления трения материала  $\lambda_m$ : 1 –  $D = 500$  мм; 2 –  $D = 100$  мм

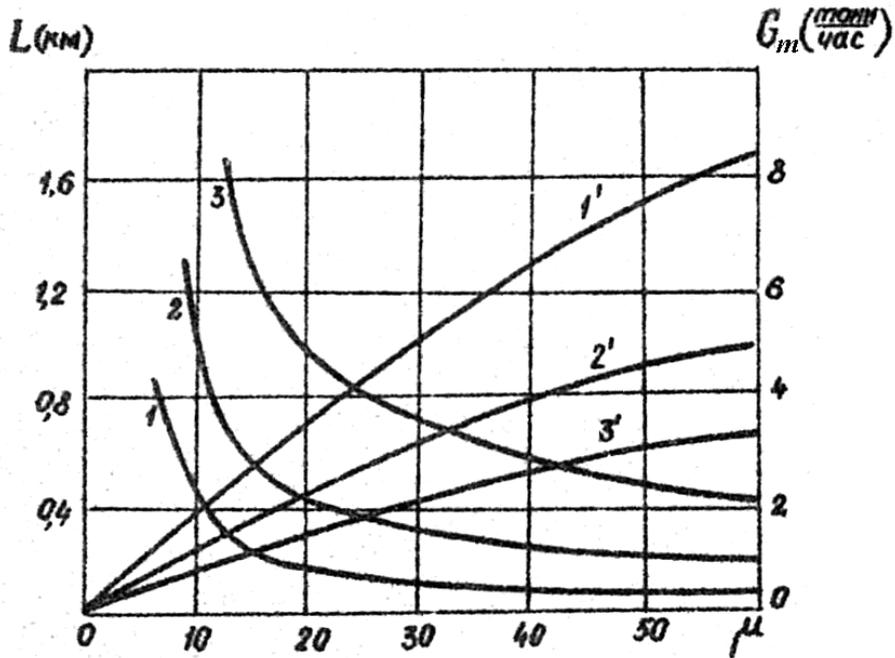


Рис. 1.17. Зависимость длины транспортирующего трубопровода  $L$  ( $D = 36,5$  мм) и производительности  $G_m$  от расходной концентрации  $\mu$  при различных начальных скоростях  $v_0$ : 1, 2, 3 –  $L$  при  $v_0 = 5$  м/с, 3 м/с, 2 м/с; 1', 2', 3' –  $G_m$  соответственно при  $v_0 = 5$  м/с, 3 м/с, 2 м/с

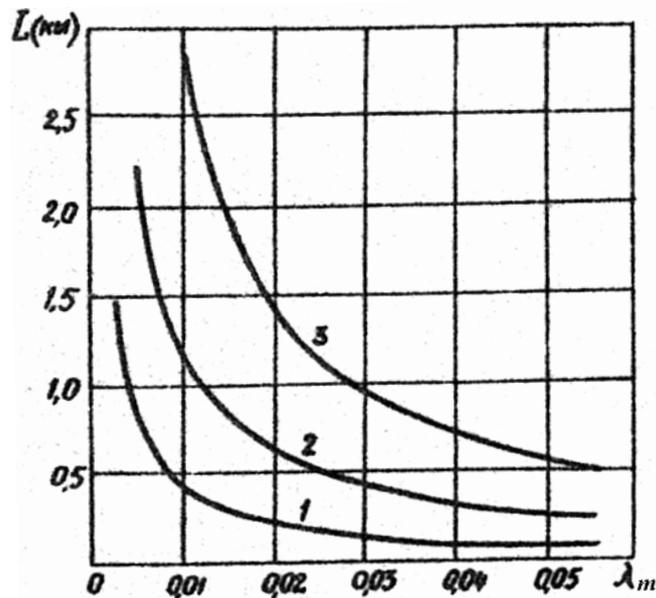


Рис. 1.18. Зависимость  $L$  от коэффициента сопротивления  $\lambda_m$ , при различных начальных скоростях:  $v_0 = 5$  м/с, 3 м/с, 2 м/с при диаметре трубопровода 36,5 мм.

В табл. 1.6 приведены некоторые данные по результатам исследований при начальном давлении воздуха не выше 5 ати.

Таблица 1.6

*Результаты экспериментального исследования установок  
импульсного пневмотранспорта*

Наименование материала	Длина трубопровода	Полученная расходная концентрация	Диам. трубопровода	Достигнутая производительность т/час
Каолин	114–250	50–60	36–38	6–9
Сера молотая	114	50	38	4–6
Неозон Д	114	40	38	3–4
Альтакс	114	25	38	2,5–3
Магнезия	114	20	38	2–2,5
Сажа ламповая	114	25	38	2–3
Сажа ПМ-50	114	25	38	2–3
Хлористый калий	250	40	36	3,3–4
Угольная пыль	250	50	36	5–6
Цемент	250	50	36	6–7
Хлористый калий	150	40	38	5,5

Из приведенной таблицы видно, что для различных по своим свойствам материалов достигаются достаточно высокие расходные концентрации в пределах 20–60 кг/кг и соответственно значительные производительности при диаметрах трубопровода всего 36 мм и 38 мм, что обеспечивает компактность и простоту монтажа транспортирующего трубопровода.

Устойчивые и наиболее эффективные режимы транспортирования достигаются обычно в тех случаях, когда скорости несущей среды и транспортируемого материала совпадают, что может иметь место, когда фильтрация воздуха через поршневые массы материала максимально ограничена. С этой целью поршневая масса и, следовательно, её длина при движении в трубопроводе должна быть надлежащим образом подобрана опытным путём.

## **ГЛАВА 2. ПРИМЕРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПЕРЕРАБОТКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Высокая потребность в использовании средств транспортировки дисперсных материалов в промышленности определяется необходимостью в перемещении больших количеств самых различных сыпучих материалов, и в том числе цемента, угольной пыли, золы, сажи, фрезерного торфа, диспергированных горных пород, сыпучих ингредиентов различных смесевых продуктов химических производств, различных продуктов пищевой и сельскохозяйственной промышленности и т. д. При проектировании транспортных установок ставится задача наиболее рационального выбора машин, обеспечивающих наибольший технический эффект в работе производства. При этом определяются капитальные затраты, эксплуатационные расходы, служащие основным критерием при выборе оптимального варианта со следующими показателями: расход энергии, расход материалов на ремонт, число штатных единиц персонала, обслуживающих установку. При этом должно выполняться требование полной механизации и автоматизации процесса транспортирования при полном исключении трудоемких перегрузочных операций и обеспечении наиболее благоприятных санитарных условий для обслуживающего персонала.

### **2.1. Схемы с применением механических средств транспортировки дисперсных грузов**

#### **2.1.1. Транспортировка и хранение зерна**

Основные запасы хлебных продуктов хранятся и транспортируются в зерне, так как оно более стойко при хранении, чем мука и крупа. Элеватор является наиболее совершенным типом зернохранилища [61]. Элеватор как сооружение (см. рис. 2.1) состоит из рабочей башни 5, силосного корпуса 1, зерносушильного отделения 21, приемных 19 и отпусковых 22 устройств. Элеватор строят из железобетона в монолитном исполнении или из сборных железобетонных конструкций. Рабочая башня представляет собой центр, с которым связаны все операции, проводимые в элеваторе с зерном. В ней размещаются норрии 6, весы 9, сепараторы 13 и триеры 14 для очистки зерна, распределительные трубы 10, оперативные бункера 15, приводные или натяжные станции под силосных 17 и надсилосных 3 – транспортеров, аспирационное оборудование, распределительная подстанция, пульт управления. Силосный корпус предназначен для хранения зерна – силосах круглого или прямоугольного сечения. Приемные и отпусковые устройства элеватора предназначены для внешних операций (прием прибывшего зерна и отпуск его потребителям) и связаны с автомобильным, железнодорожным и водным транспортом.

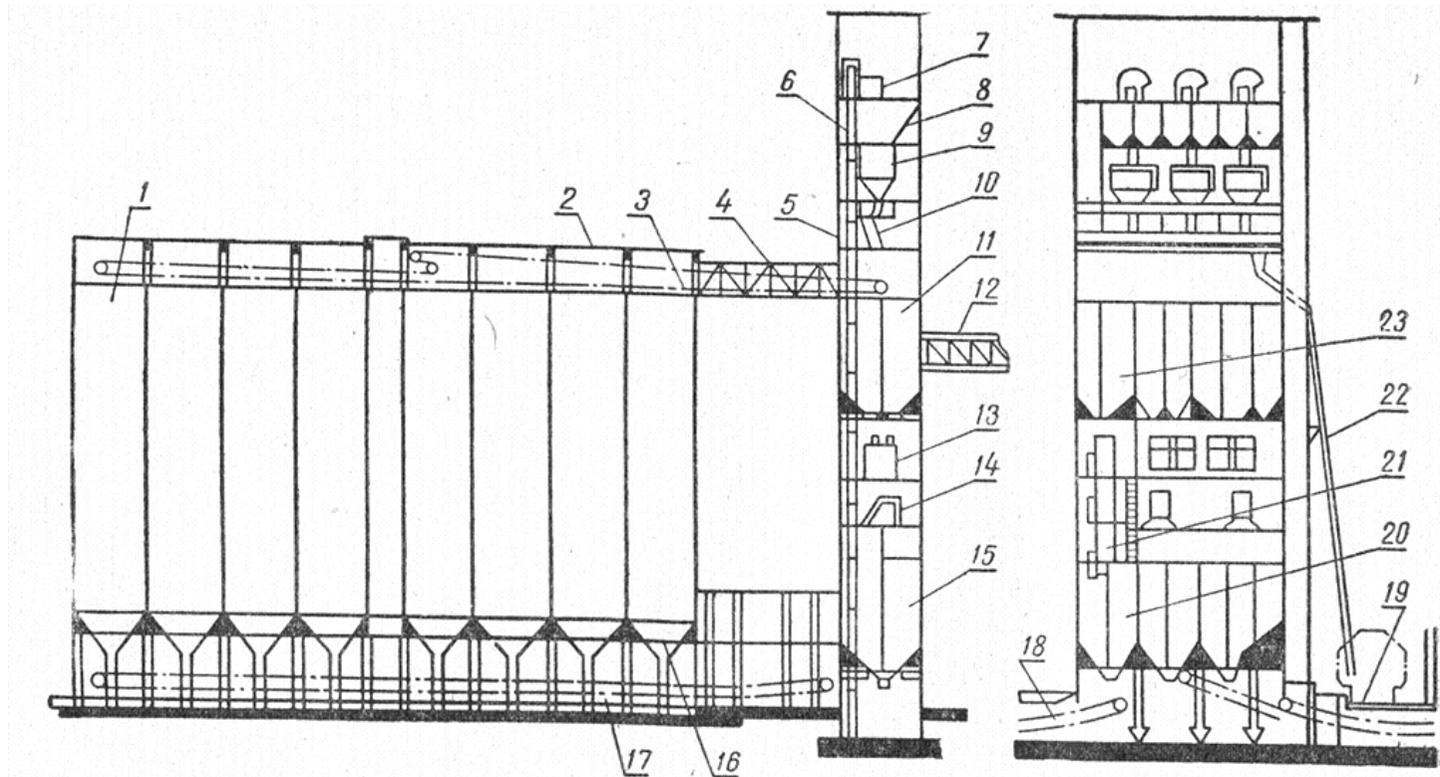


Рис. 2.1 Схематический разрез элеватора:

1 – силосный корпус; 2 – надсилосная галерея; 3 – надсилосный транспортер с разгрузочной тележкой; 4 – содинительная галерея; 5 – рабочая башня; 6 – норш; 7 – электропривод норши; 8 – надвесовые бункера; транспортная галерея; 9 – весы; 10 – распределительные трубы; 11 – надсепараторные бункера; 12 – транспортная галерея; 13 – сепараторы; 14 – триеры; 15 – оперативные бункера; 16 – выпускная воронка; 17 – подсилосный транспортер; 18 – транспортер приема с автотранспорта; 19 – железнодорожный прием; 20 – подсушительные бункера; 21 – зерносушилка; 22 – отпусные трубы; 23 – надсушительные бункера

Каждое зернохранилище должно обеспечивать проведение следующих операций с зерном: прием, обработка (очистка и сушка), хранение, внутренние перемещения, отпуск. Все элеваторы, независимо от их типов и назначений, работают по следующей принципиальной схеме. Зерно на элеваторы поступает автомобильным, железнодорожным и водным транспортом. Разгружают зерно специальными разгрузочными устройствами. Для разгрузки зерна из автомобилей сооружают подземные бункера, соединенные нижней транспортерной галереей с нориями рабочей башни элеватора.

Для разгрузки зерна из железнодорожных вагонов оборудуются приемные точки выносного типа с бункерами, соединенными транспортерными лентами с нориями рабочей башни. Вагоны разгружают механическими лопатами.

На крупных элеваторах с нориями производительностью 350 т/ч в последнее время применяют инерционные вагоноразгрузчики, при помощи которых вагоны разгружаются в течение 12–15 мин. Вагон устанавливают на специальной платформе с наклонным участком пути и закрепляют на ней. Платформа совершает качательные движения, во время которых зерно по наклонному полу вагона через открытую дверь высыпается в приемный бункер. Применяют саморазгружающиеся вагоны. Эти вагоны выпускают зерно через нижние люки в днищах.

Из речных и морских судов зерно выгружают при помощи пневматических установок.

Все поступающее на элеватор зерно обязательно взвешивают. Для этого применяют автомобильные и вагонные платформенные весы. Зерно, поступающее водным транспортом, взвешивают на ковшовых весах элеватора.

### **Подготовка зерна к помолу**

1-е сепарирование: очистка от коротких примесей, очистка от длинных примесей;

1-я очистка поверхности зерновок: обоечная машина с металлическим цилиндром, обоечная машина с абразивным цилиндром;

2-е сепарирование: сепаратор воздушно-ситовой.

Мойка и 1-е кондиционирование зерна:

2-я очистка поверхности зерновок: обоечная машина с абразивным цилиндром или щеточная машина;

3-е сепарирование: сепаратор воздушно-ситовой.

Отделение минеральных примесей: камнеотделительная машина:

2 – холодное кондиционирование: аппарат для увлажнения, закрыта для отволаживания;

3-я очистка поверхности зерна: щеточная машина.

Аспирирование: пневмоаспиратор.

Увлажнение зерна перед 1-й драной системой: аппарат распыливающего действия, бункер.

Все перемещения зерна сопровождаются пылеобразованием, поэтому элеваторное хозяйство снабжено многочисленными аспирационными системами. В процессе очистки и вентилирования зерна оно многократно транспортируется по различным маршрутам, что инициирует непрерывное образование пыли и делает необходимым обеспечивать качественную работу аспирационных установок (см. рис. 2.2).

### **2.1.2. Производство строительных материалов**

Еще одним примером перемещения твердых веществ является производство строительных материалов. Самыми крупными из них являются цементные заводы, известковые печи, установки по производству магнезита, меньшие по масштабу – это печи обжига кирпича, карьеры, производства изоляционных материалов (огнеупорной глины и т. д.), керамические заводы и установки по производству асфальта. Они имеют главным образом местное значение.

Производство цемента, алебаstra и асбестоцемента носит название производства строительных вяжущих. При этом выделяются в основном твердые загрязняющие вещества. Серьезной проблемой для районов, окружающих цементные заводы, являются большие количества выбрасываемой ими пыли [24]. Высокая запыленность характерна как для самого технологического процесса, так и для работ с сыпучим материалом. Для производства 1 т цемента необходимо раздробить, размолоть, обжечь и перевезти почти 3 т исходного кускового или грубо измельченного материала, который в процессе производства полностью превращается в мелкую пыль. Сырье для производства цемента – это известняк, силикаты, алюминаты кальция, сланец, мергель, доменный шлак, клинкер, зола, гипс, угольная пыль, кокс и руда. При обжиге (как правило, во вращающихся печах) размолотых кальциевых мергелей и известняка, грунта, карбоната кальция и других добавок (угольной пыли, кокса и т. д.) получают цементный клинкер, причем либо сухим методом, либо после флотации в воде (мокрый способ). На старых предприятиях клинкер обжигают в шахтных печах, а затем охлаждают, размалывают и смешивают с различными количествами добавок (доменный шлак, алебастр и т. д.) для получения цемента различных марок (портландцемента, шлакового, портланд-шлакового или железопортланд, шлако-портланд, а также доменно-печного цемента). Твердые загрязнения от цементных заводов и известковых печей по химическому составу большей частью представляют собой смесь карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), оксида кальция (известки –  $\text{CaO}$ ) и ряда других соединений.

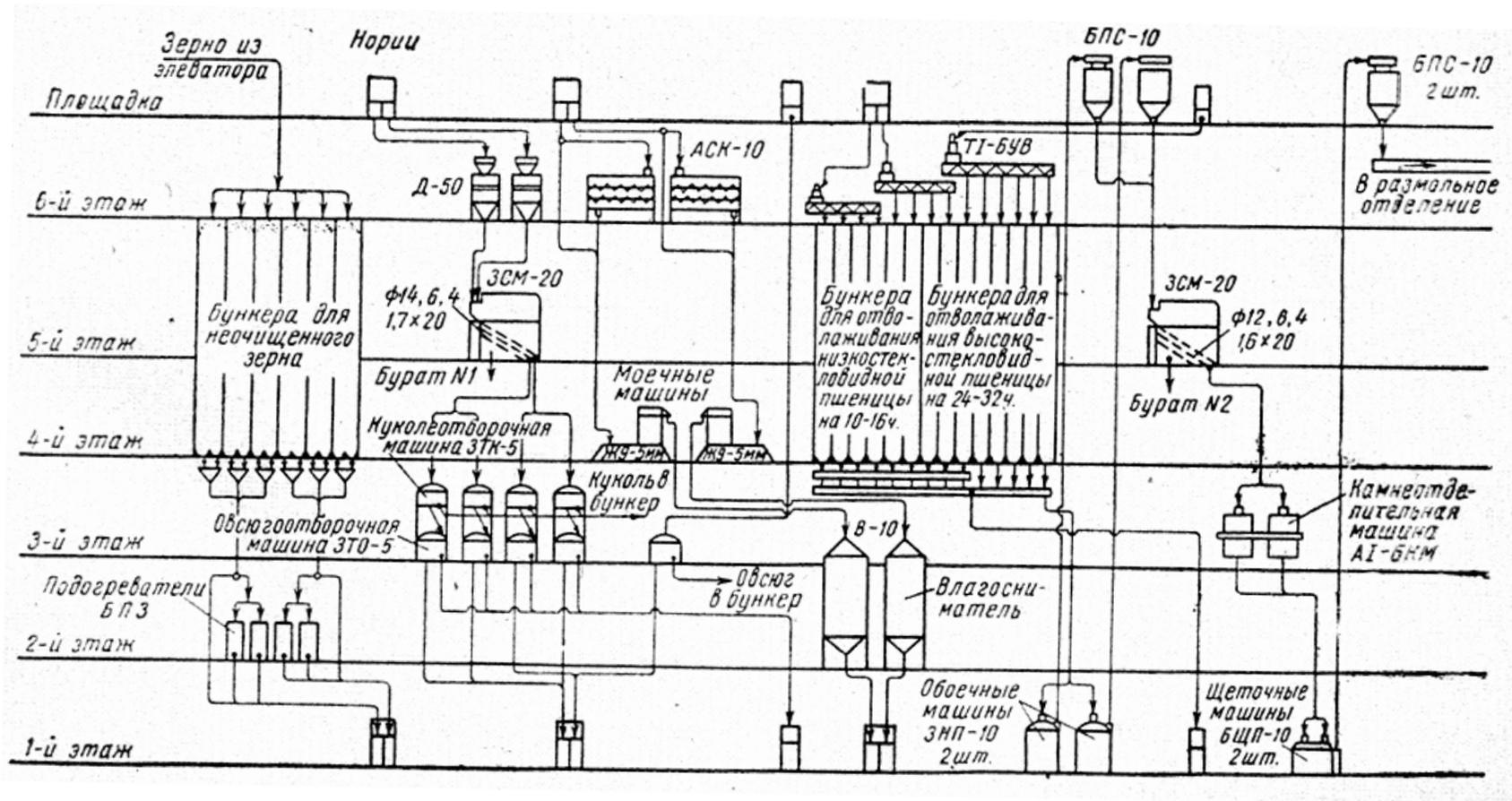


Рис. 2.2. Типовая схема очистки зерна

На цементных предприятиях имеются следующие источники загрязнения воздуха (по стадиям производства):

- подготовка сырья:
  - 1) дробилки;
  - 2) барабанные сушилки сырья;
  - 3) мельницы для сырья;
  - 4) система транспортировки сырья;
  - 5) хранилища сырья;
  - 6) стадия грануляции;
- обжиг клинкера:
  - 7) сушка угля;
  - 8) размол угля;
  - 9) вращающиеся печи;
  - 10) шахтные печи;
  - 11) охладители клинкера;
  - 12) система транспортировки клинкера;
  - 13) хранилища клинкера;
- производство цемента:
  - 14) подготовка гипса;
  - 15) цементные мельницы;
  - 16) система транспортировки цемента;
- отгрузка:
  - 17) хранилища цемента;
  - 18) фасовочные машины;
  - 19) склады;
  - 20) система транспортировки мешков;
  - 21) известковая печь.

Производство цемента может быть организовано по «сухой», «мокрой» или смешанной технологическим схемам. Очевидно, что более крупным источником пылевых выбросов является сухая схема. Гораздо более благоприятна для эффективного пылеотделения мокрая схема, дающая вследствие увлажненности материалов меньшие концентрации пылевых выбросов и значительно меньший суммарный уровень выбросов. Однако более экономичным, производительным и, следовательно, чаще применяемым (особенно на новых предприятиях) является сухой способ. На рис. 2.3 изображена технологическая схема производства цемента по мокрому способу. В принципе основные технологические стадии сухого способа аналогичны, за исключением отсутствия подачи воды на размол сырья и замены пульпохранилища силосом сухого сырья. Во всех ситуациях для обеспечения снижения пылевых выбросов (даже в случае выброса воздуха из хранилищ в окружающую среду

через обыкновенные низкие вентиляционные металлические трубы) удаление пыли осуществляется во вращающихся коллекторах или рукавных фильтрах, иногда устанавливаемых после механического сепаратора.

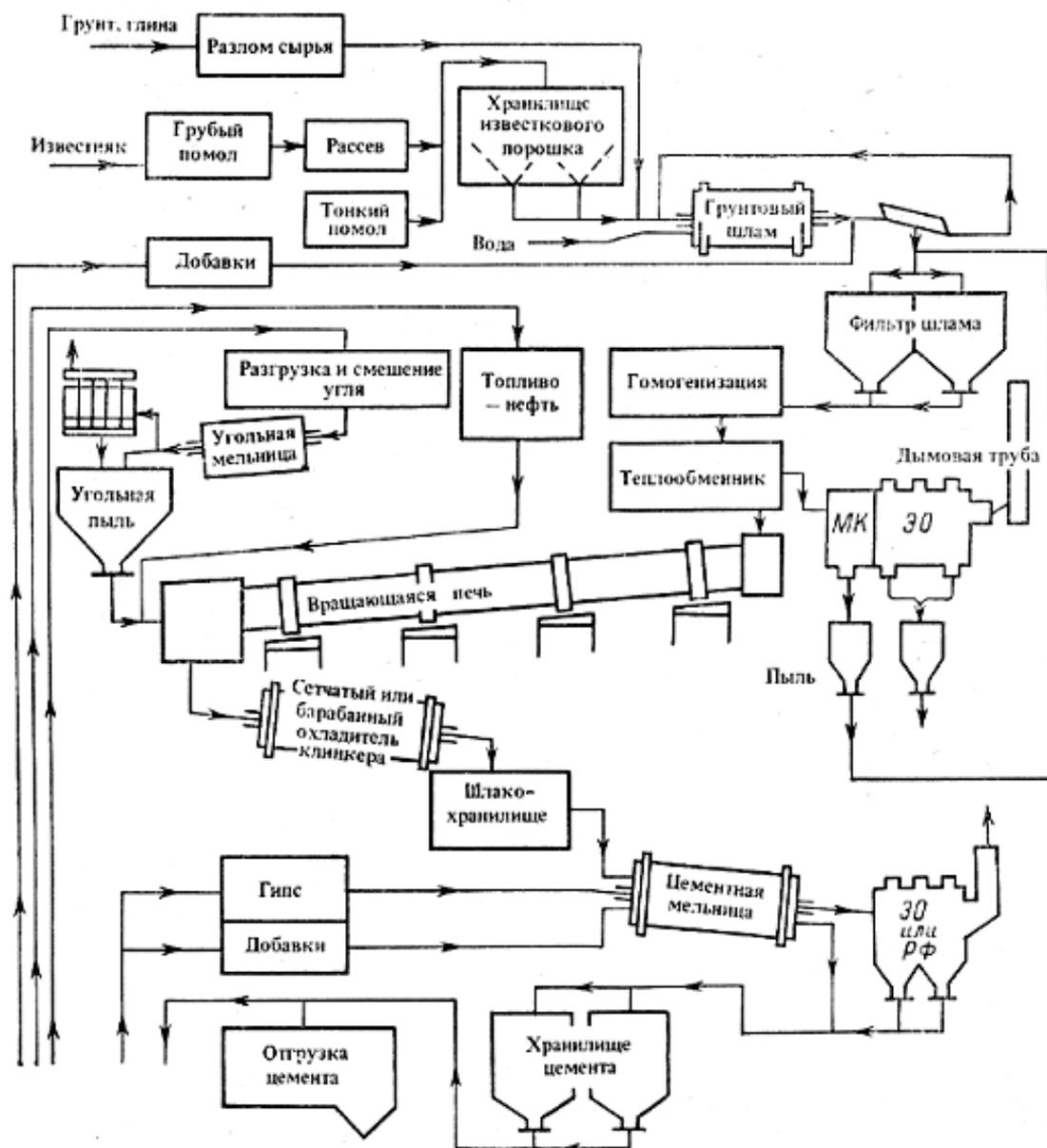


Рис. 2.3. Источники пыли в производстве цемента мокрым способом и применяемые сепараторы пыли: МК – механический коллектор (пылесборник); РФ – рукавный фильтр; ЭО – электроосадитель

Производство извести, алебаstra и асбестоцемента (плиты, изготовленные из волокон асбеста и цемента), также создает ряд проблем. Аналогично цементной промышленности пыль необходимо удалять

из выбросов в производстве магнезита, из которого изготовляют огнеупорный кирпич и цементные блоки для стенок химически щелочной печи. Из всех прочих упомянутых технологий существенными источниками пылевых выбросов являются производства магнезита и негашеной извести.

На цементных предприятиях сырье, поступившее из карьера, подвергается дроблению. Количество образующейся при этом пыли зависит от вида материала, а также от его крупности и влажности. Пыль из воздуха обычно удаляют с помощью высокоэффективных циклонных сепараторов или рукавных фильтров. Если обрабатывается влажный материал, то выбросы пыли невелики, но возрастает, особенно в холодные дни с повышенной влажностью, опасность забивки циклонов и фильтров. Следовательно, стадия разделения должна быть полностью изолирована, либо, по крайней мере, расположена в закрытом помещении. В мельницах и сушилках сырье и уголь подвергаются размолу и сушке горячим воздухом. Существуют различные конструкции этого оборудования. В зависимости от особенностей конструкций варьируется концентрация пыли в газе, но в целом она довольно высока (в сушилках – до  $200 \text{ г/м}^3$ ). Как правило, для удаления пыли используют рукавные фильтры, но иногда применяют и циклонные сепараторы. Поскольку температура газа, выходящего из мельниц, обычно составляет около  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , то нет опасности снижения ее до точки росы, соответственно создаются хорошие условия для эксплуатации рукавных фильтров и при тщательном соблюдении технологических параметров нет опасности их забивки. Тем не менее, во избежание падений температуры в зимнее время необходимо изолировать питающие трубопроводы и сепаратор. Иногда вместо рукавных фильтров применяют электроосадители.

В мокром способе производства цемента пульпа, содержащая сырье, подается в печь по трубопроводу и диспергируется в зоне предварительного нагрева с помощью цепей или иных пересекающихся отражательных перегородок либо впрыскивается в нее под давлением через большое количество форсунок. В зоне кальцинации выделяется диоксид углерода и материал обжигается с образованием клинкера.

Пыль, уносимая из печи отходящими газами (концентрация пыли около  $30 \text{ г/м}^3$ , но иногда и более  $100 \text{ г/м}^3$ ), как правило, отделяется в электроосадителях после пылеулавливающей камеры (часть печи) или в циклонном коллекторе. Гранулометрический состав пыли существенно меняется в зависимости от равномерно по всей площади печи. Содержание пыли в отходящих газах зависит от фильтрующей способности увлажненного слоя комков или гранул, лежащих выше зоны обжига.

Отходящие газы меньших по размерам печей очищаются с использованием высокоэффективных циклонов со степенью отделения более 90 %. Если можно установить примерно постоянную температуру отходящих газов, то возможна эксплуатация электроосадителей или рукавных фильтров, хотя вследствие повышенной влажности отходящих газов все же придется применять стабилизатор.

Обожженный во вращающихся или шахтных печах клинкер охлаждается в барабанных или решетчатых охладителях. Часть отведенного из них воздуха добавляется в печь как вторичный воздух, а остальное используется для сушки, а затем очищается в сепараторах, в сушилке. Температура газов, выходящих из охладителя, находится в пределах от 200 до 250 °С. Концентрация пыли после них существенно колеблется в зависимости от размера частиц клинкера, температуры и количества воздуха, пропускаемого через охладитель. Рукавные фильтры, с помощью которых можно было бы полностью удалить всю пыль в охладителе, применяются лишь изредка, поскольку при нормальных условиях фильтрующий материал быстро изнашивается от воздействия горячей грубодисперсной пыли. Кроме того, температура газов, выходящих из охладителя, также существенно колеблется. Соответственно для удаления пыли из охладителей клинкера применяют высокоэффективные механические сепараторы; как правило, это коллекторы со слоем гранул либо аналогичные, но более старые типы аппаратов, такие как МВ-фильтры. Клинкер размалывают в мельницах (обычно в трубчатых), причем с добавлением либо 3 % гипса (при получении портландцемента), либо гипса и доменного шлака (при получении шлако-цемента). Обычно после мельницы устанавливают сортирующее сито. Для удаления пыли из воздуха, выводимого из зоны работы мельниц, обычно применяют рукавные фильтры. В случае использования электроосадителей необходимо подавать очищаемый газ со впрыском воды, чтобы повысить его влажность и обеспечить полноту парообразования. Вследствие высоких концентраций пыли необходимо, как правило, перед рукавным фильтром или электроосадителем устанавливать циклонный коллектор.

На цементных предприятиях существует множество локальных источников пыли. В их число входит все оборудование для транспортировки размолотых или других пылесодержащих материалов: ковшовые элеваторы, шнековые и цепные транспортеры, пневмотранспорт, наклонные эстакады и перепады конвейеров. Вокруг этого оборудования необходимо осуществлять вытяжку и очистку воздуха. При отгрузке цемент либо автоматически фасуется в мешки, либо перевозится в контейнерах.

Силосы для пылящего или молотого материала часто находятся под небольшим избыточным давлением. Следовательно, затворы и аэрационные люки должны быть снабжены простейшими фильтрующими рукавами для предотвращения попадания пыли в окружающий воздух. Для силосов с пневматической загрузкой и оборудования для смешения и транспортировки порошковых материалов необходимо использование коллекторов. Погрузочные бункера и хранилища предназначены для хранения клинкера, доменного шлака, сырьевых материалов и угля. Если происходит интенсивное выдувание содержащейся в этих материалах пыли, как, например, из клинкера шахтных печей, то полезно соорудить над хранилищем крышу, а в процессе работы с пылящими продуктами осуществлять из этой зоны вытяжку воздуха для очистки в коллекторе, что обеспечит в ней удовлетворительные условия для работы. Во всех этих ситуациях для обеспечения снижения пылевых выбросов (даже в случае выброса воздуха из хранилищ в окружающую среду через обыкновенные низкие вентиляционные металлические трубы) удаление пыли осуществляется во вращающихся коллекторах или рукавных фильтрах, иногда устанавливаемых после механического сепаратора.

Производство извести, алебастра и асбестоцемента (плиты, изготовленные из волокон асбеста и цемента), также создает ряд проблем. Аналогично цементной промышленности пыль необходимо удалять из выбросов в производстве магнезита, из которого изготовляют огнеупорный кирпич и цементные блоки для стенок химически щелочной печи. Из всех прочих упомянутых технологий существенными источниками пылевых выбросов являются производства магнезита и негашеной извести.

Негашеную известь получают при обжиге природного карбоната кальция (известняка). Аналогичным образом магнезит получают при обжиге природного карбоната магния  $MgCO_3$ . В обоих случаях применяют шахтные и вращающиеся печи. Промышленное оборудование для подготовки сырья, его обжига и дальнейшей переработки аналогично оборудованию на цементных предприятиях и требует индивидуального подбора для оптимизации средств ограничения выбросов от индивидуальных источников.

Система шнековых механизмов 5 (см. рис. 2.4) используется для разгрузки цемента на строительстве [63]. Из железнодорожных вагонов 1 материал передвижными винтовыми пневмонасосами 2, направляемыми в вагоны с разгрузочной платформы 3, подается в цементопровод 4 и силосы с системой шнеков.

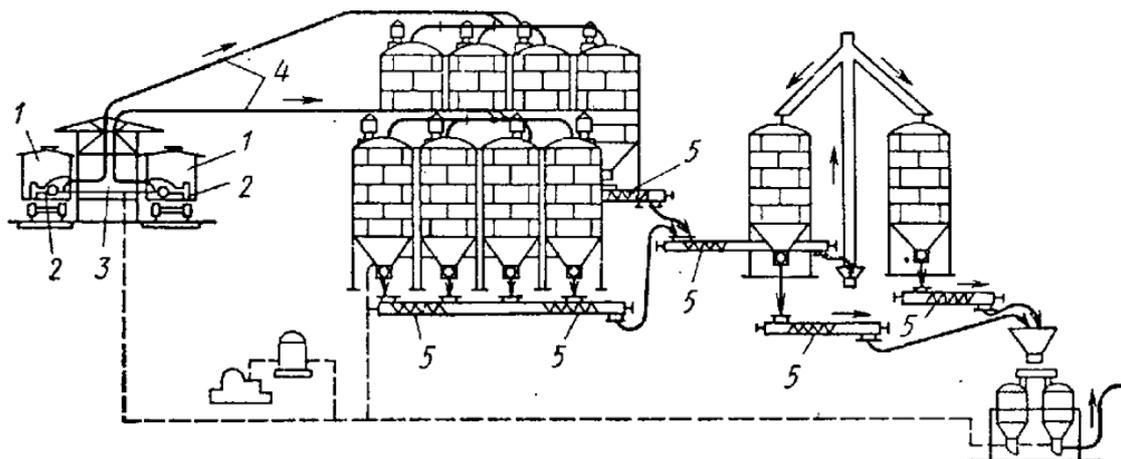


Рис. 2.4. Система винтовых конвейеров в комплексной установке

В универсальной схеме выгрузки цемента из вагонов применен пневмомеханический разгрузчик (рис. 2.5), производительностью 60–100 т/ч. Из открытого вагона 1 цемент подается разгрузчиком 2 по цементопроводу 3 в аэробункер 6 и промежуточный бункер 7. Из бункера цемент поднимается пневмоподъемником 8 по трубопроводу 9 в силосные башни 10. Затем шнеком 11 цемент подается к пневмоподъемнику 8 и через емкость 12 к складу. Рассмотренная схема имеет некоторые недостатки: не обеспечивает непосредственной перегрузки цемента из крытых вагонов в склад и нет устройств, предотвращающих прорыв сжатого воздуха из аэрационной камеры через шнек 11. Из саморазгружающихся вагонов цементовозов 4 и 5, сырье через нижние люки вагона высыпается непосредственно в аэробункер 6.

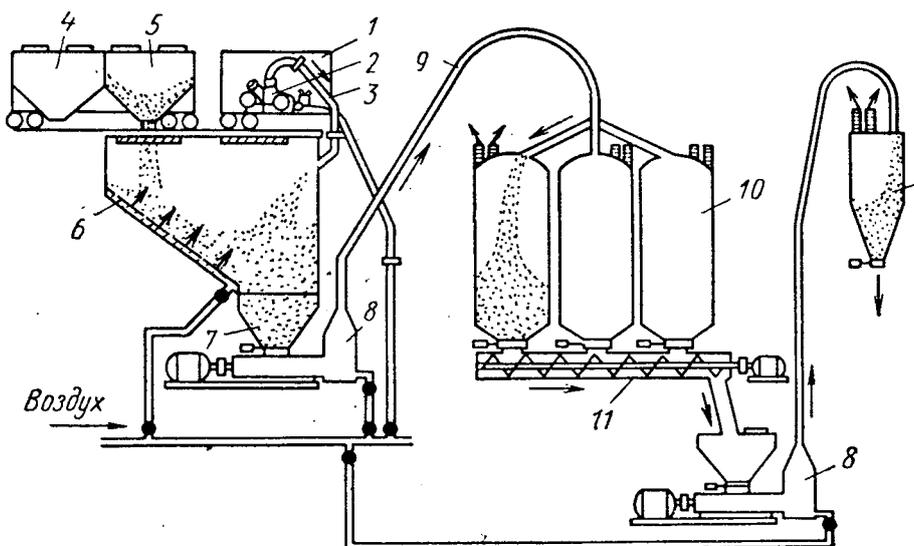


Рис. 2.5. Универсальная схема выгрузки сыпучих материалов из вагонов

### **2.1.3. Пылеприготовление на тепловых электростанциях**

Система топливоподачи ТЭС представляет собой комплекс сооружений, вспомогательных систем, машин, механизмов и устройств, предназначенный для приема, хранения и обеспечения своевременной и бесперебойной подачи подготовленного твердого топлива в бункеры сырого угля котельного отделения. Несмотря на разнообразие характеристик сжигаемого на ТЭС твердого топлива, схемы топливоподачи имеют общую компоновку, предусматривающую наличие узла приема и разгрузки, размораживающего устройства, дробильного корпуса, склада и вспомогательных устройств.

Тракт топливоподачи [121] представляет собой технологическую систему последовательно расположенных машин, устройств и механизмов, установленных в соответствующих зданиях и сооружениях (это могут быть узлы пересыпки, галереи и др.). При транспортировке топлива по тракту топливоподачи осуществляются его очистка от посторонних включений (древесины, металла и т. п.) и дробление до заданного фракционного состава. Кроме того, в тракте топливоподачи могут выполняться подсушка и смешение различных марок топлива в заданной пропорции.

Часовая производительность каждой нитки топливоподачи определяется по суточному расходу топлива на электростанции, исходя из 24-часовой работы с 10 %-ным запасом.

Движение твердого топлива по тракту топливоподачи происходит следующим образом (см. рис. 2.6). Состав с топливом подается локомотивом к приемным бункерам, которые могут быть оборудованы вагоноопрокидывателями 7. Затем локомотив отцепляется и дальнейшее продвижение вагонов производится маневровым устройством 5 приемных бункеров.

При поступлении в зимнее время смерзшегося топлива вагоны подаются в специальные размораживающие устройства 3 – тепляки. Топливо из вагонов выгружается в бункеры, из которых с помощью питателей поступает в дробилки предварительного дробления 11, а затем на ленточные конвейеры 13, транспортирующие уголь в первый подземный узел пересыпки 14. Отсюда топливо ленточными конвейерами 31 подается на расходный склад 35 или в дробильный корпус 16. В дробильном корпусе оно ссыпается в один общий бункер, имеющий внизу несколько выходных отверстий к дробилкам 18. Ниже бункера установлены ленточные питатели, которые подают топливо на грохоты, отделяющие мелочь. Крупные куски с грохотов поступают в молотковые дробилки 18, где они дробятся до размера, требуемого условиями его

размола в пылеприготовительном отделении, а отсеянная мелочь направляется на ленточные транспортеры второго подъема 21, подающие топливо на бункерную галерею и далее в бункеры сырого угля 29 котельного отделения. На эти же конвейеры поступает топливо, прошедшее через дробилки. Перед дробилками происходит очистка его от металлических предметов с помощью металлоискателей и электромагнитных сепараторов 19, являющихся одновременно приводными барабанами ленточных питателей [121].

Узлы пересыпки представляют собой сооружения, предназначенные для пересыпки топлива с одного конвейера на другой.

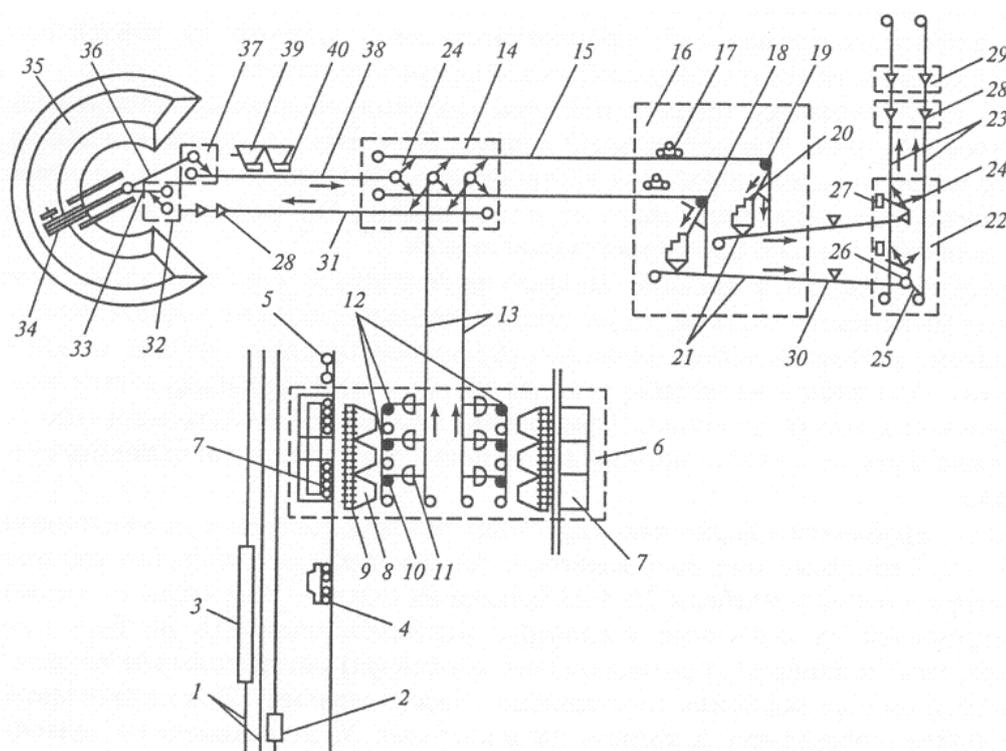
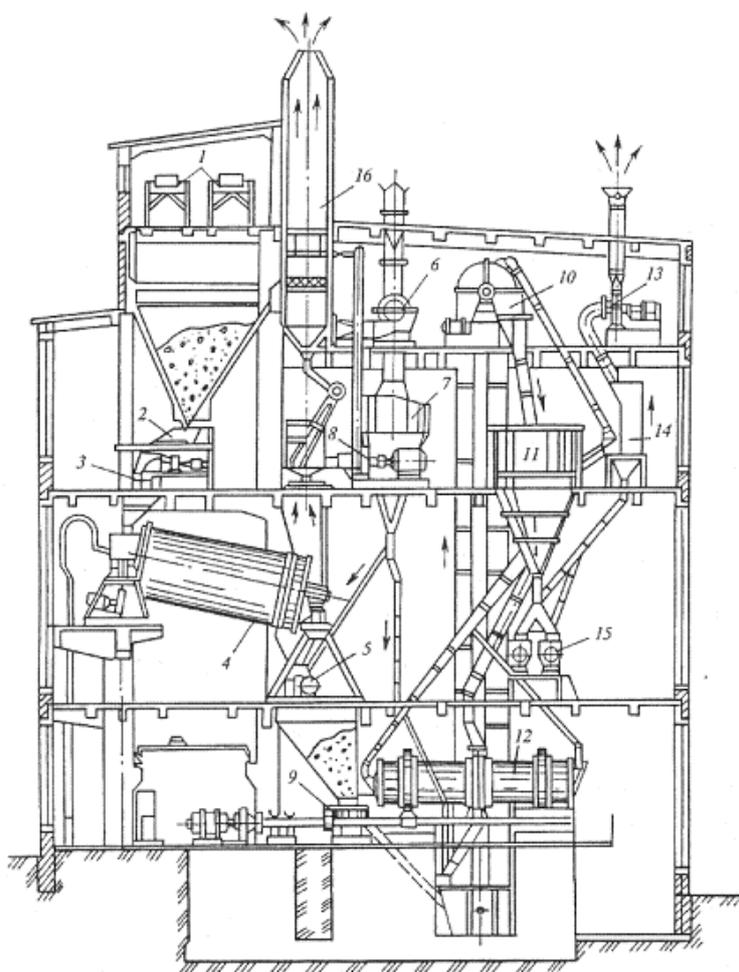


Рис. 2.6. Принципиальная схема топливоподачи:

1 – железнодорожные пути; 2 – тензометрические весы; 3 – размораживающее устройство; 4 – тележка-толкатель; 5 – маневровое устройство; 6 – разгрузочное устройство; 7 – вагоноопрокидыватели; 8 – приемные бункеры; 9 – дробильно-фрезерные машины; 10 – ленточные питатели; 11 – дробилки предварительного дробления; 12, 19 – шкивные магнитные сепараторы; 13, 15, 21, 23, 31, 33, 36, 38 – ленточные конвейеры; 14, 32, 37 – узлы пересыпки; 16 – дробильный корпус; 17 – подвесной магнитный сепаратор; 18 – молотковые дробилки; 20 – колосниковая решетка; 22 – башня пересыпки; 24 – перекидной шибер; 25 – шеполуловитель; 26 – проботборная установка; 27 – проборазделочная установка; 28 – плужковые сбрасыватели; 29 – бункеры сырого угля; 30 – ленточные весы; 34 – роторная погрузочная машина; 35 – кольцевой склад; 39 – разгрузочные бункеры; 40 – качающиеся питатели

На рис. 2.7 показана схема компоновки оборудования центральной системы пылеприготовления [121], в которых перемещение угольной дробленки и пыли производится с помощью различного вида конвейеров и элеваторов. Предварительно топливо (подмосковный уголь) проходит двухступенчатое дробление и грохочение. Для сушки установлено восемь паровых трубчатых сушилок немецкой фирмы «Буккау» с площадью поверхности нагрева 1800 м. Уголь подсушивается до влажности 12–14 %, затем поступает в ковшовые элеваторы, где смешивается с мельничным продуктом и направляется в центробежные сепараторы, откуда крупные фракции попадают в неvented шаровые мельницы фирмы «Пфайфер».



*Рис. 2.7. Компоновка технологического оборудования центральной системы пылеприготовления Каширской ГРЭС: 1 – конвейер; 2 – питатель; 3 – шнек для перемещения сырого угля; 4 – сушилка паровая трубчатая; 5 – шнек для перемещения подсушенного угля; 6, 13 – вентиляторы; 7 – циклон; 8 – насос циркуляционный; 9 – тарельчатый питатель; 10 – ковшовый элеватор; 11 – сепаратор; 12 – мельница; 14 – рукавный фильтр; 15 – шнек для перемещения угольной пыли; 16 – шахта для мокрой очистки запыленной паровоздушной смеси*

Сушильные и мельничные системы оснащены индивидуальными системами очистки запыленных газов. Готовая пыль пневмовинтовыми насосами «Кинион» фирмы АЭГ подается в трубопроводы ( $D = 250$  мм,  $L = 1504, 200$  м) и сжатым воздухом транспортируется в бункеры котельного цеха. Система пылеприготовления обеспечивает подачу готовой пыли в бункеры пяти котлов производительностью 170 т/ч каждый. Испаренная из топлива влага в такой схеме сбрасывается в атмосферу. При этом экономия топлива, связанная с затратами электроэнергии на тягу и дутье, составляет 1,0–1,5 %, обеспечиваются низкие значения потерь теплоты от механического недожога топлива на 0,4–0,5 % вместо 1,0–1,5 % для электростанций с замкнутыми системами пылеприготовления), а затраты теплоты на сушку угля при коэффициенте ценности теплоты пара 0,5–0,6 составляют только 2090–2500 кДж/кг. Суммарные затраты электроэнергии на пылеприготовление не превышают 25 кВт · ч/т.

#### **2.1.4. Химическая промышленность**

Кормовые фосфаты используются для подкормки скота и птицы. К ним относятся костная мука, обесфторенные фосфаты, кормовой монокальцийфосфат, кормовой дикальцийфосфат (преципитат) и т. п.

Кормовой монокальцийфосфат получают нейтрализацией апатитового концентрата или сепарированного мела чистой фосфорной кислотой. Кислоту смешивают с мелом и ретуром в двухвалковом шнековом смесителе, который служит реактором–нейтрализатором. Полученные гранулы подвергают высушиванию топочными газами в сушильном барабане. Затем его охлаждают до 30–40 °С потоком воздуха в барабанном холодильнике и рассеивают. Крупную фракцию дробят и возвращают в реактор–нейтрализатор [93]. На рис. 2.7 показана схема производства моноальцийфосфата. В установке для производства тяжелой соды (рис. 2.8) кальцинированная сода дозировочным шнеком подается в смеситель 2. Вода поступает через распределительный лоток 3. Увлажненная сода в смесителе превращается в крупнокристаллический влажный моногидрат, который загрузочным шнеком 4 направляется в барабан 5 содовой печи. Обезвоженная сода выгрузным шнеком 6 подается в элеватор 7, затем в шнек 10 и в бункер 11 для упаковки в мешки. Крупные частицы, не прошедшие через сито, поступают для дробления в вальцовую мельницу 12, откуда элеватор 13, вновь направляет на рассев. Тепло для обезвоживания влажного моногидрата создается в топке 14. Водяные пары по трубе 15 направляются в конденсатор 16, где охлаждаясь водой, конденсируются. Конденсат поступает в холодильник 17, где он дополнительно охлаждается до температуры

45–50 °С и направляется в смеситель 2 для увлажнения кальцинированной соды.

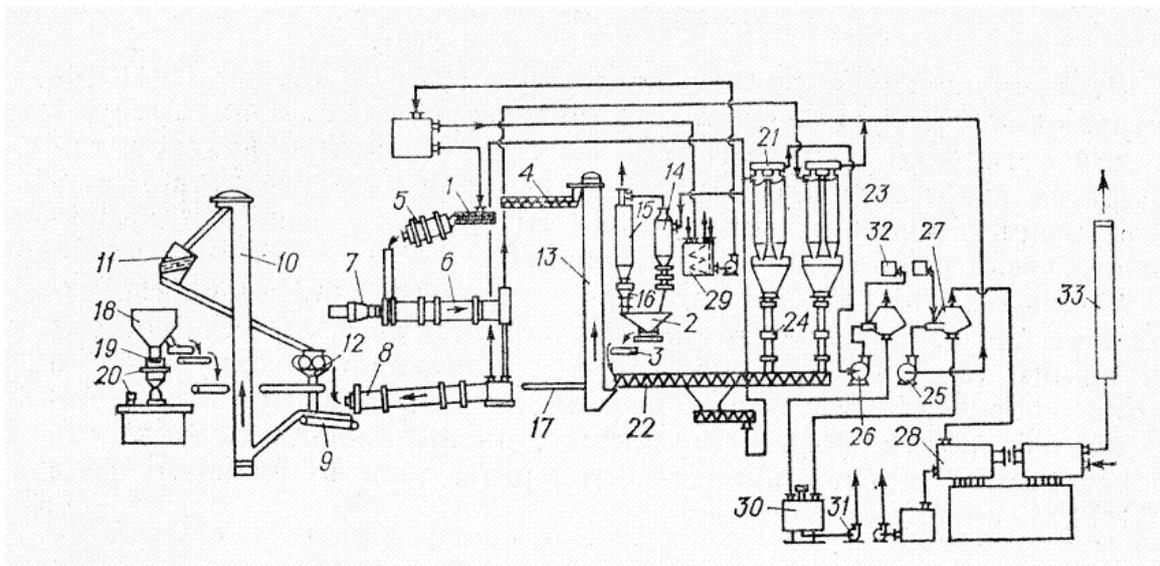


Рис. 2.7. Схема производства монокальцийфосфата:

- 1 – шиновый чмеситель; 2 – бункер; 3 – ленточный питатель; 4 – винтовой конвейер; 5 – гранулятор; 6 – сушильный барабан; 7 – топка; 8 – холодильник; 9 – ленточный конвейер; 10 – элеватор; 11 – грохот; 12 – дробилка; 13 – ретурный элеватор; 14 – бункер-разгрузитель; 15 – циклон; 16 – бункер под циклон; 17 – конвиейер; 18 – бункер; 19 – автоматические весы; 20 – зашивочная машина; 21 – батарейный циклон; 22 – винтовой конвейер; 23 – батарейный циклон; 24 – мигалка; 25 – дымосос; 26 – вентилятор; 27 – центробежный скруббер ВТИ; 28 – абсорбционная камера; 29 – бак для подогрева кислоты; 30 – сборник; 31 – насос; 32 – сборник; 33 – выхлопная труба.

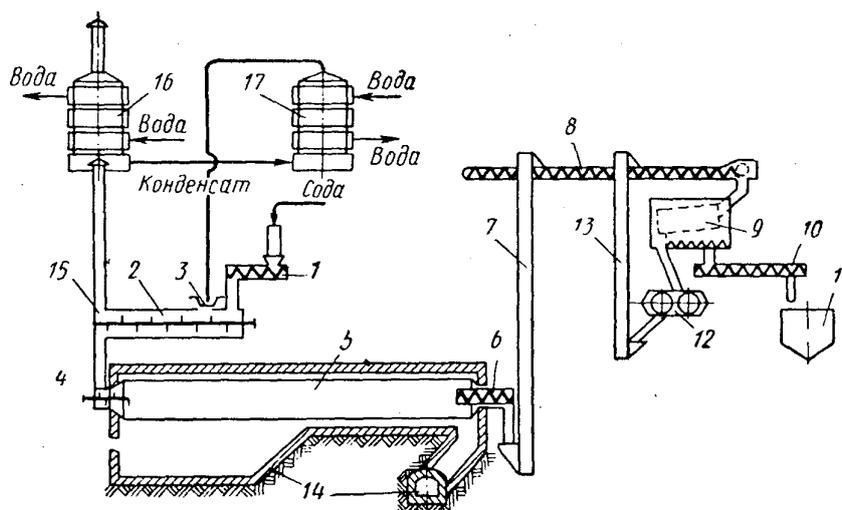


Рис. 2.8. Механические транспортеры в установке для производства тяжелой соды

## 2.2. Схемы с применением пневматических средств транспортировки дисперсных грузов

### 2.2.1. Каталитический крекинг нефти

В установке каталитического крекинга нефти (рис. 2.9) «отработанный» (закоксованный) катализатор реакционного объема катализатора 1, пройдя секцию 2, где происходит отпарка увлеченных катализатором нефтепродуктов, по транспортной линии потоком воздуха подается в регенератор 3. Выжиг кокса с поверхности зерен катализатора осуществляется в кипящем слое во внутренней полости регенератора [94]. Дымовые газы, образующиеся, в процессе выжига кокса, направляются в восемь групп циклонов 4, каждая из которых включает три последовательно соединенных циклона. На выходе из регенератора дымовые газы имеют температуру 600°C. Они направляются в четыре котла – утилизатора 5. Каждый котел соединяется с двумя группами внутренних циклонов. Уловленный в циклонах катализатор по опускным стоякам 6 возвращается в кипящий слой. Регенерированный катализатор возвращается в реактор 7. Очищенные дымовые газы через дымовую трубу 8 выбрасываются в атмосферу. Уловленный катализатор по спускным стоякам направляется в бункер 9 и оттуда подается в зону кипящего слоя регенератора.

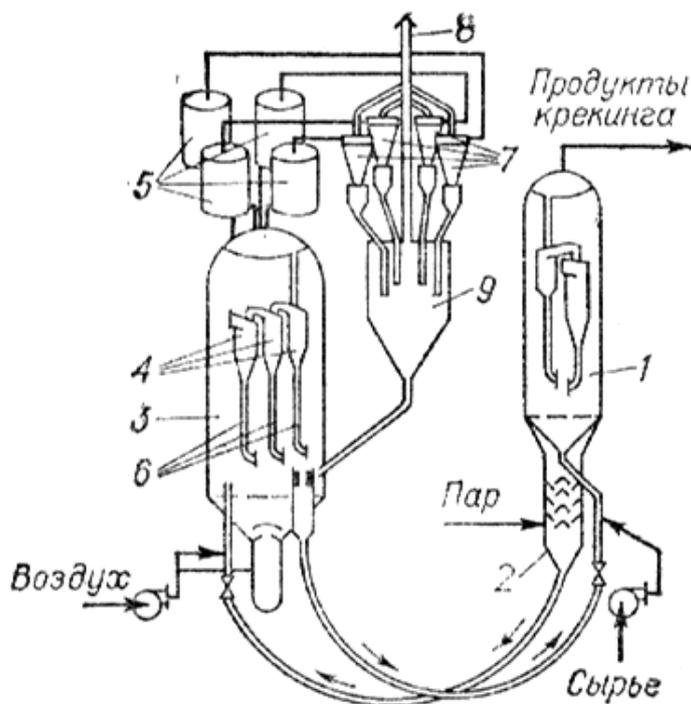


Рис. 2.9. Схема циркуляции катализатора в установке каталитического крекинга нефти

### 2.2.2. Переработка цемента

На заводах сборного железобетона имеются автоматизированные склады цемента вместимостью 720, 1100 т. Характеристики этих складов представлены в [104]. Максимальный расход сжатого воздуха принимается при условии приема цемента из вагонов–цементовозов с пневматической выгрузкой и одновременной выдачей цемента в бетоносмесительное отделение и на автотранспорт. На рис. 2.10 представлена схема переработки цемента на складе завода сборного железобетона.

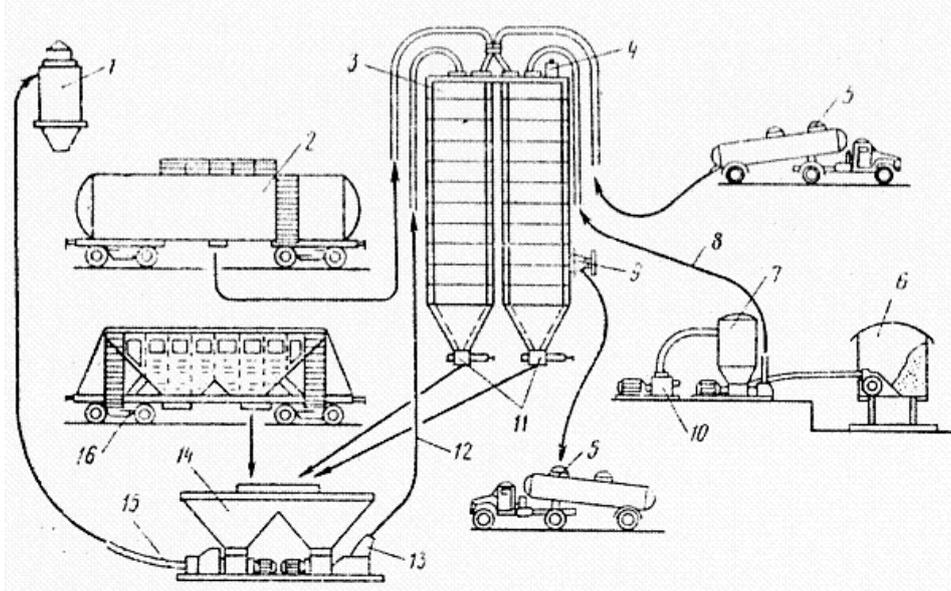


Рис.2.10. Технологическая схема переработки цемента на складе завода сборного железобетона: 1 – расходный бункер; 2 – вагон-цементовоз с пневматической разгрузкой; 3 – силос склада цемента; 4 – фильтр; 5 – автоцементовоз; 6 – крытый вагон общего назначения; 7 – осадительная камера; 8, 12, 15 – трубопроводы подачи цемента; 9 – боковой пневматический разгрузчик; 10 – вакуум-насос; 11 – донный разгрузчик; 13 – пневматический винтовой подъемник; 14 – прирельсовый приемный бункер; 16 – вагон цементовоз бункерного типа

Приемные устройства этих складов позволяют забирать цемент из всех видов железнодорожного транспорта с аэрационно-пневматическим оборудованием, вагона бункерного типа и крытого вагона общего назначения.

На рис. 2.11 представлена установка для выгрузки цемента из судов производительностью 50–100 т/ч [104]. Она состоит из приемного бункера–отделителя и опирающегося на него поворотного крана с подвешенным на нем всасывающим устройством. К донной части бункера отделителя примыкает аэрожелоб, по которому цемент подается в пневмовинтовой насос, транспортирующий его в силосы.

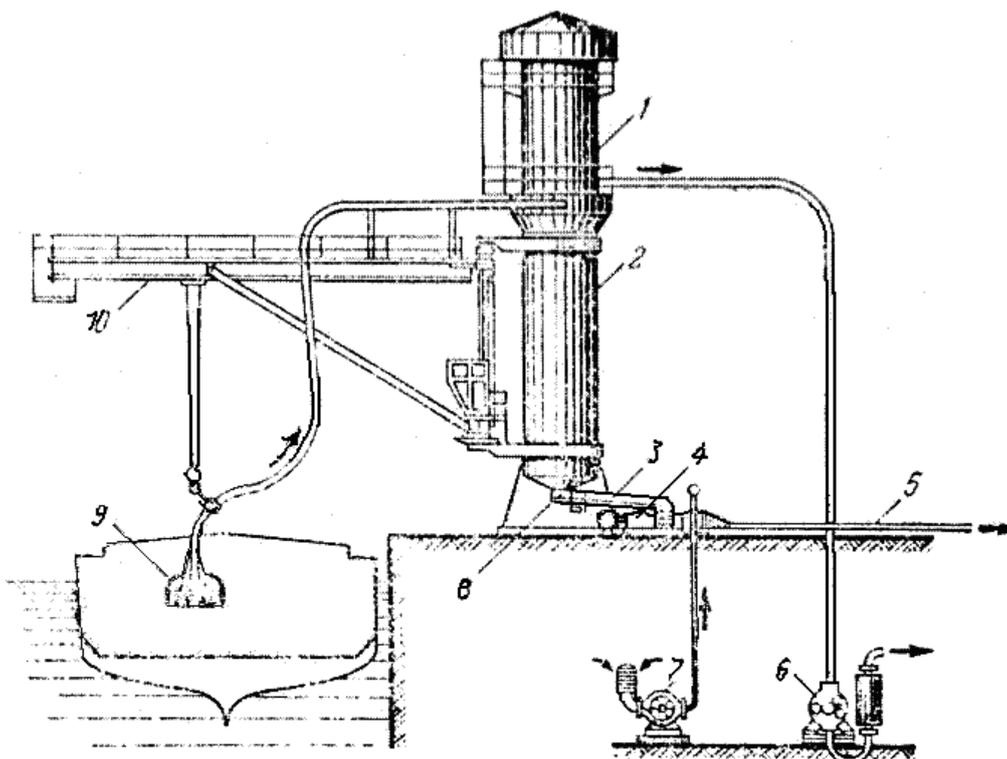


Рис. 2.11. Всасывающий разгрузчик сыпучих грузов из судов фирмы «Петерс» (ФРГ): 1 – фильтр; 2 – бункер; 3 – азжроселоб; 4 – пневмовинтовой насос; 5 – транспортный трубопровод; 6 – вакуум насос; 7 – компрессор; 8 – пневмовыгрузатель; 9 – заборное устройство; 10 – консоль

### 2.2.3. Схемы с применением вихревых аппаратов

Транспортировка частиц закрученными потоками позволяет интенсифицировать тепломассообменные процессы, проводить процессы классификации, обеспыливания зернистых материалов.

Схема сушки пастообразных материалов показана на рис. 2.12.

Установка состоит из вихревой пневмосушилки 1, рукавного фильтра 9 и винтового дозатора 3. Высушенный материал выгружается из бункера сушилки через секторный затвор и распределительное устройство 8, которым можно устанавливать требуемое соотношение сухого продукта на выгрузку и ретур. Это соотношение зависит от продолжительности открытия и закрытия клапана распределительного устройства; открывание и закрытие клапана осуществляется двумя соленоидами, питаемыми с командного электрического прибора. Сополимеры СХН-60, А-15, ВХВД-40 и МА-20 после электролитной коагуляции латекса и выделения на друкфильтре представляют собой комкообразные тиксотропные пасты влажностью 38–67%, содержащие крупные спрессовавшиеся куски размерами до 40 мм [120]. Сополимер А-15-КР – пастообразный или тиксотропный кусковой материал влажностью 40–45% получается при

высаждении полимеризата из раствора в ацетоне изопропиловым спиртом с последующей фильтрацией и промывкой водой. Размер частиц, составляющих куски, не превышает 10 мкм, однако в массе содержится около 20 % твердых, близких к кристаллическому состоянию кусков размерами до 20 мм. Все эти материалы сушить в пневмосушилке при непосредственной подаче невозможно. Вследствие тиксотропности материалы разжижаются в дозаторе и подаются в поток теплоносителя отдельными комками, налипающими на стенки канала и забивающими его. Однако при смешении с 15–20 % сухого продукта исходные материалы приобретают сыпучие свойства.

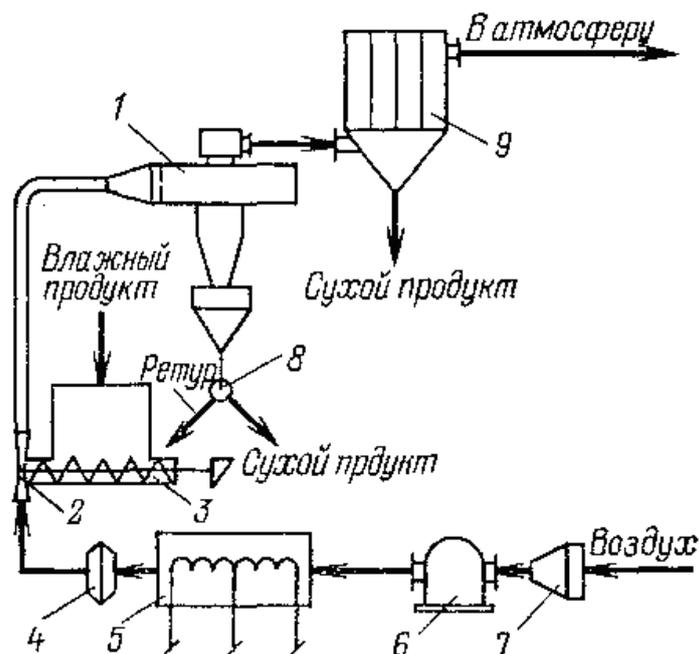


Рис. 2.12. Сушка пастообразных материалов

На рис. 2.13 представлена пневмосушилка для дисперсных материалов фирмы «Проктор-Марк», сушильный тракт которой выполнен в виде плоской спирали в вертикальной плоскости.

Спиральный канал переменного сечения образован закручивающейся к центру спиральной лентой 10. В нижних витках спирального канала имеются щели для сепарации и возврата крупных частиц во внешние витки на досушку.

Газовзвесь с последнего витка спирали через поворотное устройство поступает в циклон 7, Съемная плоская крышка 2 облегчает осмотр и чистку спирального канала. Вытянутая по вертикали форма спирали и переменное сечение канала создают значительную нестационарность гидродинамического режима движения газовзвеси, способствуя интен-

сивному протеканию тепло-массообмена. Следует отметить, однако, что щели в нижних витках спирали, способствуя досушке крупных частиц материала, снижают движущую силу процесса, что вызвано рециркуляцией части газа и материала, и могут служить причиной перегрева последнего [119].

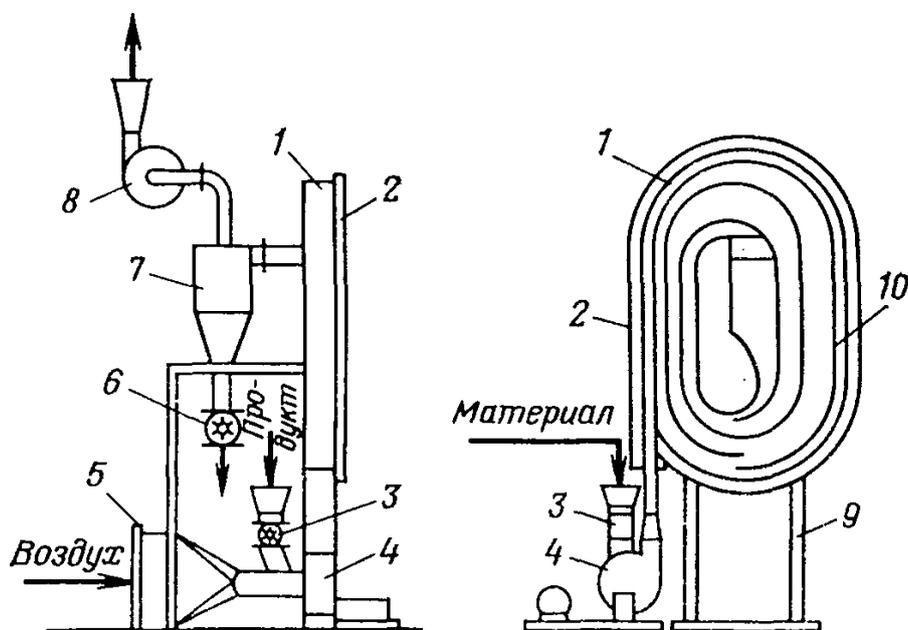


Рис. 2.13 Спиральная сушилка с плоским каналом

В пневматической сушилке фирмы «Комесса» (Франция) многократная рециркуляция материала и воздуха совмещена с измельчением материала (рис. 2.14). Это позволяет осуществлять глубокую сушку материала при низкой температуре сушильного агента и вести процесс достаточно экономично, что обусловлено высоким насыщением отработанных газов влагой. Влажный материал из бункера загружается шнековым питателем 7 в дезинтегратор 8. Одновременно сюда по трубопроводу поступает воздух, нагретый в калорифере 1. В дезинтеграторе происходят предварительная сушка и измельчение материала, а затем он потоком газа выносится в трубопровод 6. Далее материал вместе с газом поступает в сепаратор 2, в котором потоки разделяются и материал досушивается в вихревом режиме. Более легкие (измельченные и высушенные) частицы выносятся потоком воздуха через центральное отверстие сепаратора в циклон 3 и далее в рукавный фильтр 4. Второй поток газа вместе с тяжелыми (крупными и влажными) частицами через щелевой зазор в нижней части сепаратора поступает в трубопровод 9 и далее в дезинтегратор. Осуществляя рециркуляцию воздуха и материала, дезинтегратор выполняет функции измельчителя и вентилятора.

Для этого подвижный диск дезинтегратора снабжен короткими лопатками, создающими необходимый напор газа.

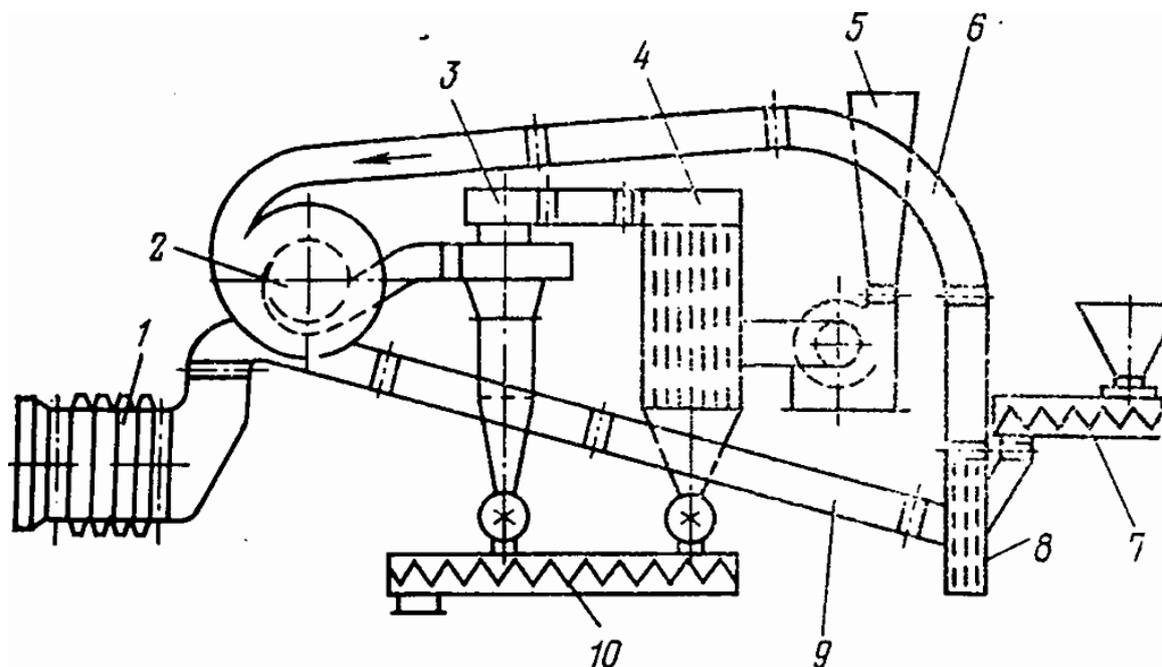


Рис. 2.14. Пневмосушилка фирмы «Комесса» (Франция):

1 – калорифер; 2 – сепаратор; 3 – циклон; 4 – рукавный фильтр; 5 – вентилятор;  
6, 9 – трубопроводы; 7 – питатель; 8 – дезинтегратор;  
10 – винтовой транспортер

На рис. 2.15 представлена конструкция комбинированной пневмосушилки Ивановского химико-технологического института [120], в которой высушиваемый (материал последовательно проходит три зоны с различными гидродинамическими режимами: кратковременно – эжектор и циклон, несколько более продолжительно – циклонную сушилку и затем досушивается в кипящем слое. Влажный материал подается пневматическим питателем 1 в циклон 7, где подсушивается газами, выходящими из сушилки с кипящим слоем 3. При этом на влажные частицы налипает пыль и уменьшается ее унос отработанными газами. Подсушенный материал из пневмопитателя 6 выносится свежим теплоносителем в циклонную сушилку 5. Здесь происходит основная сушка материала. Далее материал пневмотранспортом направляется по трубе 4 в сушилку кипящего слоя 3. Под ее решетку подается второй поток свежего теплоносителя, и материал досушивается до заданной конечной влажности. Оба потока отработанного воздуха поступают в пневмопитатель 1, далее в циклон 7 и выбрасываются в атмосферу.

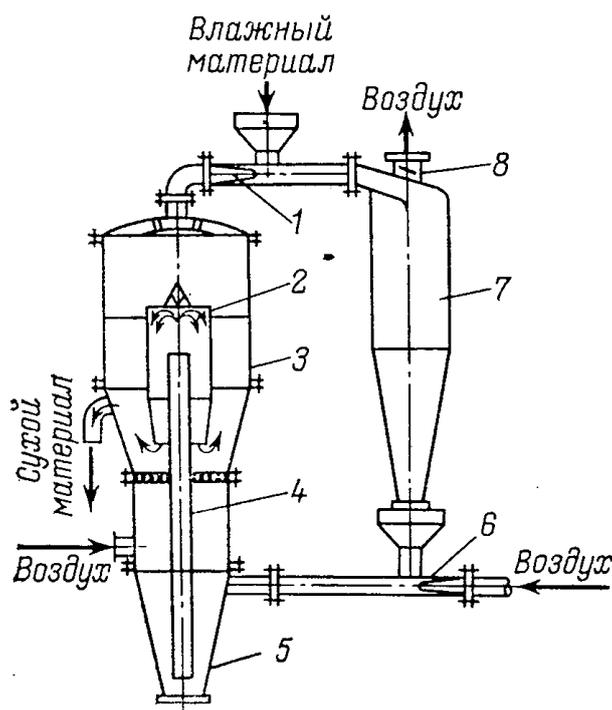


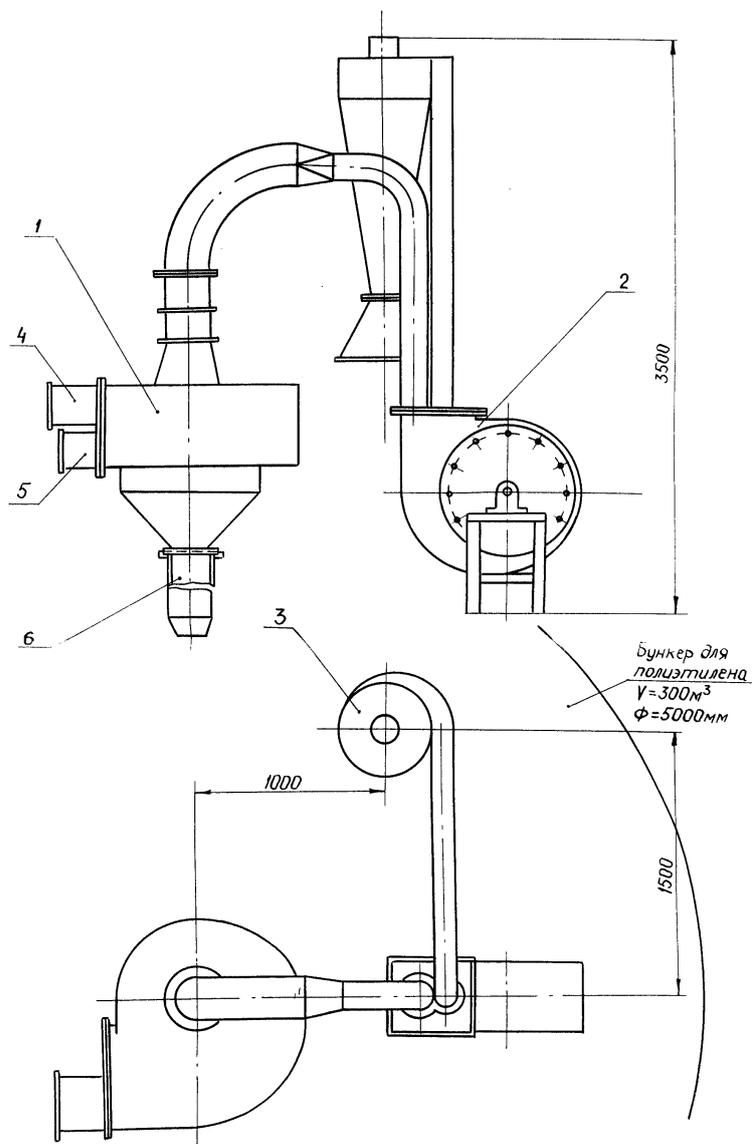
Рис. 2.15. Схема комбинированной сушилки ИХТИ:

1 – пневмотитатель; 2 – стакан; 3 – сушилка кипящего слоя; 4 – пневмотруба;  
5 – циклонная сушилка; 6 – эжектор; 7 – циклон; 8 – заслонка

Комбинированные сушилки данного типа обладают рядом достоинств. Поскольку на разных стадиях условия сушки различны, удаление свободной и связанной влаги происходит в оптимальных режимах: используется тепло газов, отходящих из камеры кипящего слоя; снижается унос пыли; легко организуется рециркуляция сушильного агента и продукта; сушилка проста по конструкции и компактна.

Пневмотранспортные установки гранулированных материалов являются основным элементом технологии конфекционирования полимерных материалов [143, 162]. При пневмотранспортировке этих материалов происходит взаимодействие гранул с ограждающими поверхностями с образованием и разрушением наклепа, в результате чего образуются примеси в виде стружки, волокон, пыли, которые ухудшают качество товарного продукта и загрязняют воздух. Присутствие волокон в грануляте приводит к забивке патрубков выгрузки полиэтилена из бункеров, забивке дозирующих устройств. Присутствие примеси в товарном продукте сверх допустимого приводит к появлению брака у потребителей, у которых при изготовлении изделий образуются неоднородности в расплаве материала. Для отвеивания примеси применяются системы с вращающимися решетчатыми барабанами и грохотами, вентиляторами, фильтрами, которые занимают большие объемы

в производственных помещениях и требуют повышенных затрат на эксплуатацию. Была разработана компактная установка комплексной очистки гранул полиэтилена и воздух самим транспортирующим воздухом [14, 162]. Установки монтируются на анализных и фасовочных бункерах, которые находятся вне помещений.



*Рис.2.16. Установка комплексной очистки:*

*1 – сепаратор; 2 – концентратор; 3 – циклон; 4 – патрубок транспортного потока; 5 – патрубок поддува; 6 – патрубок очищенного гранулята*

Процессы переноса частиц криволинейными, закрученными потоками и практическое использование процессов в технологиях переработки дисперсных материалов в энергетике рассмотрены в многочисленных публикациях [65, 169, 198, 201].

## ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЧАСТИЦ

К механическим средствам непрерывной транспортировки сыпучих грузов относятся конвейеры, элеваторы с гибкими и жесткими органами перемещения частиц и устройствами для загрузки и выгрузки частиц.

### 3.1. Ленточные конвейеры

Ленточные конвейеры являются наиболее распространенными машинами непрерывного транспорта. Их производительность достигает десятки тысяч тонн в час. На рис.3.1 показана схема применения ленточного конвейера при разгрузке вагонов.

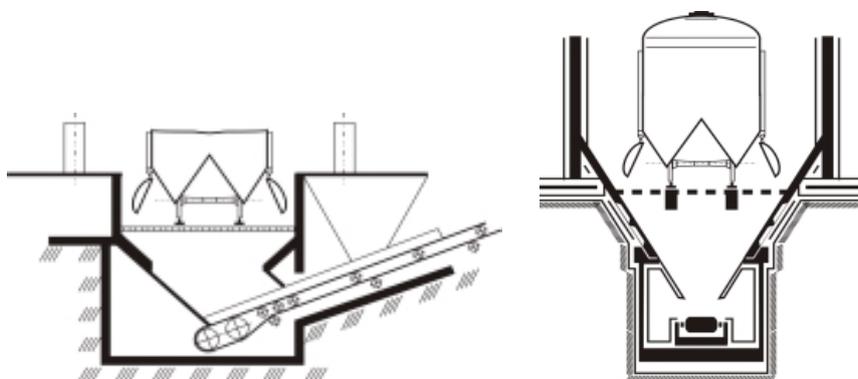


Рис. 3.1. Схема применения ленточного конвейера при разгрузке вагонов

Длина составляет несколько километров. Стоимость ленты и роликов составляет 50 % от стоимости конвейера [3, 71]. Пространственная конфигурация маршрутов перемещения грузов предполагает пересыпки дисперсного материала с транспортера на транспортер. Работа узлов загрузки, пересыпки, выгрузки материала определяют надежность, безопасность, конвейерной системы. Загрузочные устройства ленточных конвейеров включают пересыпные точки вместе с приемными лотками, обеспечивающие правильное направление поступающего на ленту материала, исключая сход ленты в сторону, повреждение и быстрый износ ее от ударов и истирания падающими крупными частицами. Конфигурация течек и размеры их поперечного сечения должны исключать налипание и застревание в них влажного, с глинистыми включениями материала.

Требования к загрузочным устройствам сформулированы в соответствии с основным их назначением – формированием на грузонесущей ветви ленты конвейера при установившемся процессе движения распределенного на ленте потока транспортируемого груза, а также с учетом

возможности рационализации технических решений при проектировании загрузочных устройств [177]. Основные требования сводятся к следующему:

- 1) симметричному размещению груза по ширине конвейерной ленты;
- 2) максимально возможному обеспечению равенства векторов скоростей движения потока загружаемого груза и конвейерной ленты в момент их встречи;
- 3) минимальному ударному воздействию на ленту крупнокускового груза при его подаче на конвейер;
- 4) минимальной инерционности амортизирующих приспособлений под грузонесущей ветвью ленты в зоне подачи на нее груза;
- 5) высокой износостойкости рабочих поверхностей загрузочных устройств (в том числе за счет регенерации защитного слоя);
- 6) исключению (или устранению) возможности просыпания груза за пределы ленты в зоне формирования потока груза, в том числе при неустановившемся процессе, загрузке реверсивных и передвижных конвейеров, а также при загрузке конвейеров, установленных после технологического оборудования (грохотов, дробилок и др.), аккумулирующего обрабатываемый материал;
- 7) предотвращению возможности пылеобразования при транспортировании сухих порошкообразных грузов, а также грузов, содержащих пылевые фракции;
- 8) минимальному шумообразованию при движении груза по устройству;
- 9) предотвращению возможности зависания (сводообразования) груза;
- 10) предотвращению возможности налипания груза на рабочие поверхности устройства;
- 11) минимальной трудоемкости проведения монтажных, демонтажных и ремонтных работ, а также профилактических осмотров;
- 12) возможности визуального наблюдения за потоком загружаемого груза;
- 13) оснащению, при необходимости, устройства датчиками, контролирующими проходимость транспортного тракта и возможные проколы и продольные порывы конвейерной ленты случайно оказавшимся в потоке груза длинномерным инородным телом;
- 14) минимальным размерам, конструктивной простоте и небольшой материалоемкости устройства.

Требования к разгрузочным устройствам соответствуют их назначению – освобождению конвейерной ленты от всей массы или заданной части транспортируемого груза (при разгрузке груза в средней части конвейера):

- 1) удаление с конвейерной ленты транспортируемого груза в полном объеме или в соответствии с заданной программой;
- 2) минимальное расширение потока разгружаемого с конвейера груза, за исключением тех случаев, когда требуется, наоборот, увеличить фронт разгрузки;
- 3) минимальный износ конвейерной ленты, в том числе за счет абразивного воздействия груза и знакопеременной деформации самой ленты;
- 4) минимальной инерционности амортизирующих приспособлений под грузонесущей ветвью ленты в зоне разгрузки;
- 5) высокой износостойкости рабочих поверхностей разгрузочных устройств (в том числе за счет регенерации защитного слоя);
- 6) предотвращению возможности пылеобразования при транспортировании сухих порошкообразных грузов, а также грузов, содержащих пылевые фракции;
- 7) минимальному шумообразованию при движении груза по устройству;
- 8) предотвращению возможности зависания (сводообразования) груза;
- 9) предотвращению возможности налипания груза на рабочие поверхности устройства;
- 10) минимальной трудоемкости проведения монтажных, демонтажных и ремонтных работ, а также профилактических осмотров;
- 11) конструктивной простоте и небольшой материалоемкости устройства.

На рис. 3.2, 3.3 показаны схемы загрузочных и разгрузочных устройств [177].

### **3.1.1. Загрузочные устройства**

При выборе способа загрузки конвейера следует учитывать, что на долговечность конвейерной ленты влияет прежде всего схема установки загрузочного желоба. Вертикальная подача груза (см. рис. 3.2, 1) допустима лишь при небольшой скорости движения ленты, мелкокусковом грузе, малой высоте его свободного падения и небольшой производительности конвейера. При крупнокусковом грузе, большой скорости движения ленты и высокой производительности конвейера целесообразно использование

криволинейных желобов (рис. 3.2, 3), позволяющих уравнивать между собой векторы скоростей движения ленты и груза. А если физико-механические свойства груза меняются во времени, то целесообразно переходить на вариант с автоматически регулируемой длиной криволинейного участка желоба (рис. 3.2, 4). При этом подача груза в сам желоб может осуществляться путем перегрузки из других транспортных средств непрерывного действия, с помощью питателей, разгрузателей или затворов – при установке конвейера под бункерами и складами, а также путем разгрузки из технологического оборудования (дробилок, грохотов и т. д.).

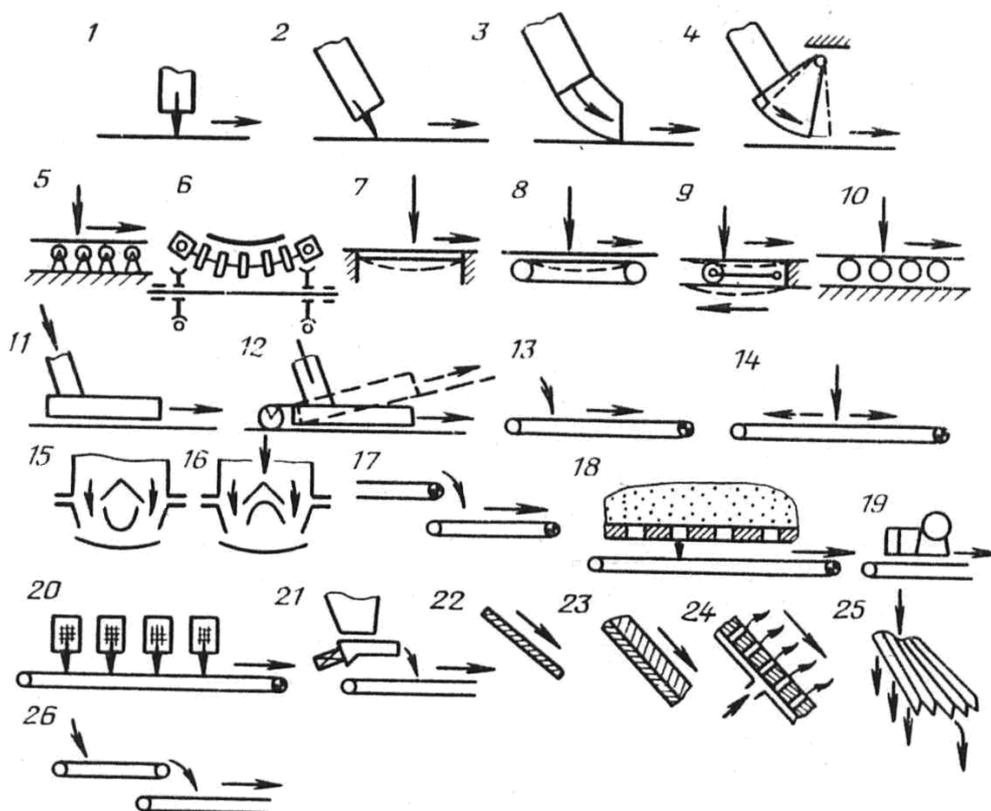


Рис. 3.2. Элементы загрузочных устройств:

1–4 – схемы установки загрузочных желобов; 5–10 – опорные устройства для ленты в зоне подачи на нее груза; 11, 12 – способы установки направляющих бортов загрузочных устройств; 13, 14 – схемы подачи груза на конвейеры с верхней грузонесущей ветвью ленты; 15, 16 – то же, с нижней грузонесущей ветвью; 17–21 – варианты установки конвейеров в системе внутриводского транспорта; 22–25 – конструкции днищ желобов; 26 – загрузка конвейера с помощью ускорительного питателя

При невозможности использования криволинейных желобов (например, при малой высоте перепада груза в зоне загрузки конвейера) и небольшой скорости движения ленты – целесообразно вертикальные

или наклонные тетки (см. рис. 3.2, 1 и 2) применять в сочетании с эластичными опорными устройствами (см. рис. 3.2, 6–10). Причем наилучшим является последний вариант (см. рис. 3.2, 10) – использование безинерционных опорных приспособлений для ленты.

При транспортировании особо липких грузов может оказаться целесообразным использование принудительной газовой смазки по площади контакта загружаемого (или разгружаемого) груза с рабочей поверхностью желоба (тетки, воронки), позволяющей исключить залипание транспортного тракта (см. рис. 3.2, 24). Разрушающее воздействие транспортируемого груза на конвейерную ленту может быть существенно снижено при выполнении днища загрузочного желоба в виде неподвижной или подвижной колосниковой решетки (см. рис. 3.2, 25) за счет не только искусственно создаваемой «постели», но и одновременного разгона лентой подаваемого на нее груза.

### **3.1.2. Разгрузочные устройства**

При разгрузке конвейера через концевой барабан с точечной подачей груза естественна традиционная схема (см. рис. 3.3, 1); при необходимости периодической подачи груза в несколько точек (две и более) – целесообразно использование поворотных воронок (см. рис. 3.3, 15); если же груз с конвейера следует равномерно или по заданному закону распределить по площади (бункера, склада, трюма сухогруза и др.), возможно использование вращающихся загрузочных устройств (см. рис. 3.3, 16). При этом, при расчете траектории разгрузки груза через барабан следует учитывать, что параметры разгрузки зависят не только от скорости движения ленты, радиуса барабана, но и при определенных условиях от коэффициента трения груза о ленту, причем существенным образом.

Если производительность конвейера невелика, а транспортируемый груз ограничен по крупности и легкосыпучий, то при небольшой ширине ленты и малой скорости ее движения можно использовать простые по конструкции и малогабаритные (по высоте) стационарные и передвижные (см. рис. 3.3, 17) плужковые (см. рис. 3.3, 2 и 3) и барабанно-винтовые (см. рис. 3.3, 7 и 8) разгрузатели, а при большой крупности транспортируемого груза – роликовые (см. рис. 3.3, 5) и вибрационные (см. 3.3, 6) сбрасыватели.

Универсальным средством для промежуточной разгрузки ленточных конвейеров являются передвижные сбрасывающие тележки (см. рис. 3.3, 9), которые, однако, имеют большую высоту, длину криволинейного участка и вес. При необходимости одновременной разгрузки груза в средней части конвейера и через его концевой барабан при регулировании величины этих грузопотоков целесообразно использование

устройства с горизонтальным дистанционно или автоматически управляемым шибером (рис. 3.3, 10). При одновременном (например, поочередном) транспортировании конвейером различных грузов (например, угля, руды и породы) с разгрузкой их в различных местах целесообразно использование стационарных или передвижных барабанных устройств с временно формируемым петлевым участком (рис. 3.3, 11–13), причем последняя схема – для реверсивных конвейеров. Устройство обеспечивает работу конвейера на основном грузопотоке без перегибов ленты.

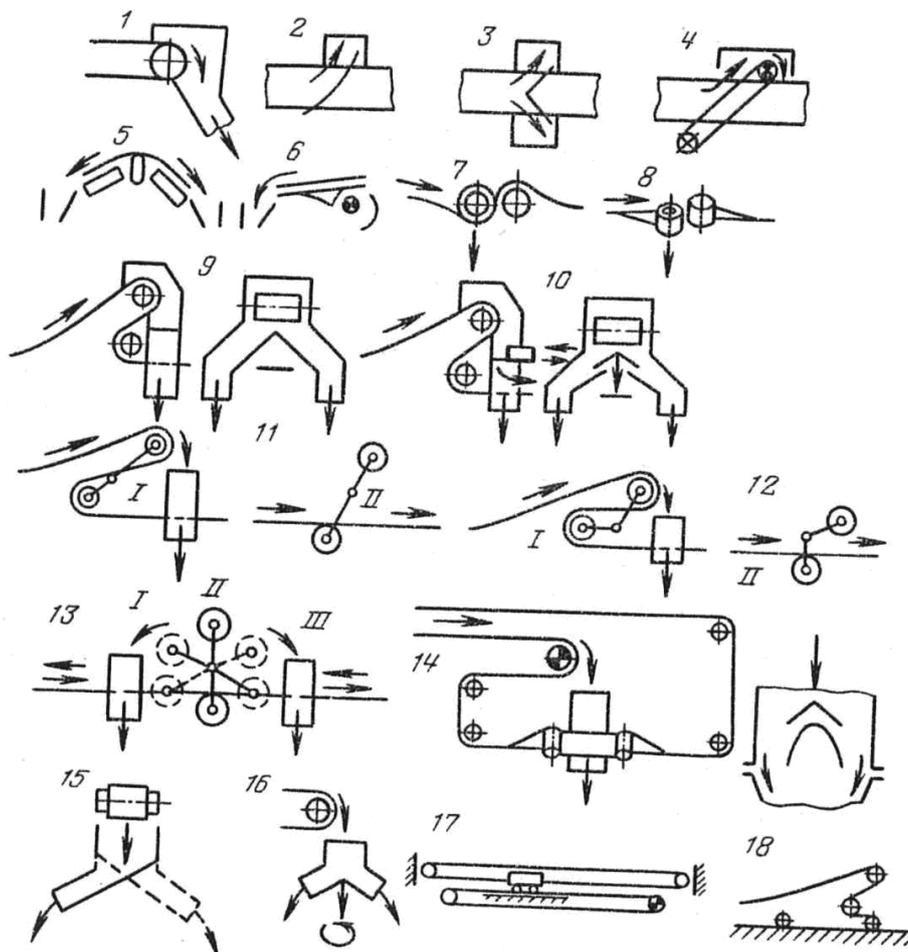


Рис. 3.3. Схемы разгрузочных устройств:

1, 9–13, 14 – барабанные разгрузатели; 2, 3 – плужковые сбрасыватели; 4 – цепной разгрузатель; 5, 6 – роликовый и вибрационный сбрасыватели; 7, 8 – барабанно-винтовые разгрузатели; 15, 16 – поворотные и вращающиеся разгрузочные желоба; 17, 18 – приводы передвижных разгрузателей с их размещением вне перемещаемого объекта и на нем; I, II, III – положения элементов разгрузочных устройств в зависимости от режима работы конвейера (I, III – режим промежуточной разгрузки; II – режим, соответствующий разгрузке груза через головной барабан конвейера)

При транспортировании сильно налипающих грузов успешно могут быть использованы конвейеры с нижней грузонесущей ветвью ленты с соответствующими загрузочными (см. рис. 3.2, 15 и 16) и разгрузочными (см. рис. 3.3, 14) устройствами, а также перегрузочные устройства с расклинивающим смазочным слоем (рис. 3.2, 24). Максимальное выполнение требований к загрузочным и разгрузочным устройствам ленточных конвейеров при выборе их принципиальных схем и конструктивных параметров обеспечит эксплуатацию конвейеров при минимальных значениях трудоемкости их обслуживания, износе дорогостоящих конвейерных лент и элементов самих загрузочных и разгрузочных устройств, минимальных простоях ленточных конвейеров и связанного с ними технологического оборудования.

Загрузочные и разгрузочные желоба ленточных конвейеров при транспортировании сильно налипающих грузов могут эксплуатироваться при постоянном или импульсном формировании расклинивающего смазочного слоя по площади контакта груза с днищем лотка, желоба или воронки. В качестве рабочего тела для формирования такого слоя могут использоваться сжатый воздух, газ или жидкость. Установлено, что рабочую поверхность перегрузочного желоба целесообразно выполнять из пористого материала (металлокерамика) с проницаемостью  $K_p = 10^{-14} - 10^{-12} \text{ м}^2$ . Для более липких грузов следует использовать более проницаемые материалы. Этим требованиям удовлетворяют пористые материалы с диаметром пор 2–50 мкм. На эффективность процесса транспортирования груза по желобу с расклинивающим слоем влияет также соотношение проницаемости материала и самого груза: проницаемость пористой поверхности должна быть несколько меньше проницаемости груза.

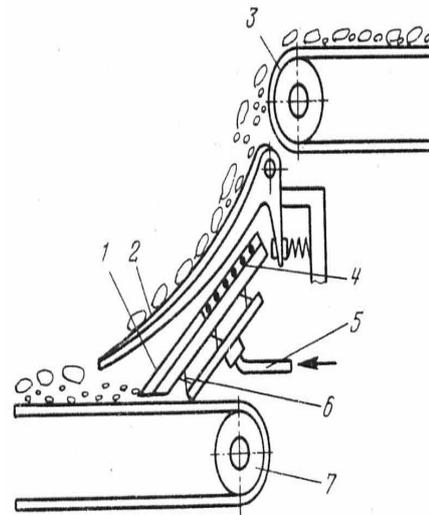
### **3.1.3. Параметры перегрузочных устройств**

К основным параметрам перегрузочных устройств относятся вид рабочего тела, его давление в контактном слое, расход рабочего тела, угол наклона рабочей поверхности, а также названные выше параметры проницаемости. Вид рабочего тела предопределяет тип смазки: жидкостная или газовая. Жидкая смазка характеризуется незначительной зависимостью эффективности ее применения от давления, возможностью ее использования для предотвращения примерзания груза к рабочей поверхности желоба, малой энергоемкостью осуществления антиадгезионного слоя скольжения. Процесс использования газовой смазки более энергоемкий, но зато прост в осуществлении, поэтому в подавляющем большинстве случаев более предпочтителен [177]. Вариант реализации устройства для перегрузки груза с конвейера на конвейер

с использованием расклинивающего слоя возможен в виде сочетания пористой поверхности с размещенной над ней подпружиненной колосниковой решеткой для предохранения пористой поверхности от взаимодействия с крупнокусковой фракцией груза (рис. 3.4); загрузочное устройство может быть также выполнено в виде виброжелоба с закрепленной на его днище пористой поверхностью. Такое устройство позволяет регулировать величину коэффициента сцепления между грузом и рабочей поверхностью желоба [177].

При непрерывном режиме подачи рабочего тела угол наклона рабочей поверхности может быть принят меньше угла трения, а при импульсном режиме работы угол наклона желоба должен приниматься больше угла трения. Время импульса складывается из времени наполнения рабочим телом объема полости, времени на прохождение рабочего тела сквозь пористый материал и создание антиадгезионного слоя, а также времени на перемещение груза вдоль рабочей поверхности. Результаты экспериментальных исследований показали, что расклинивающее давление в смазочном слое повышается при увеличении проницаемости пористой поверхности. Соответственно изменяется и величина коэффициента сцепления липкого груза с рабочей поверхностью желоба (рис. 3.5), что позволяет уменьшить угол наклона желоба или использовать этот фактор для соответствующего регулирования скорости движения груза по желобу.

При непрерывном режиме работы ленточных конвейеров даже при транспортировании ими малоабразивных грузов суммарная работа сил трения грузов о рабочие поверхности загрузочных и разгрузочных желобов получается весьма значительной. Поэтому рабочие поверхности желобов интенсивно изнашиваются, если не приняты специальные меры по их защите от абразивного истирания. При транспортировании же сильноабразивных и тяжелых и крупнокусковых грузов процесс износа желобов прогрессивно ускоряется. Существует два направления борьбы с износом рабочих поверхностей перегрузочных желобов, течек и воронок, с которыми взаимодействует транспортируемый груз:



*Рис. 3.4. Перегрузочное устройство с расклинивающим смазочным слоем:*

*1 – лоток; 2 – колосники;*

*3, 7 – конвейеры;*

*4 – пористая рабочая поверхность;*

*5 – подающие трубопроводы;*

*6 – дроссели*

- 1) облицовка (футеровка) рабочих поверхностей защитными элементами;
- 2) изменение формы перегрузочного устройства.

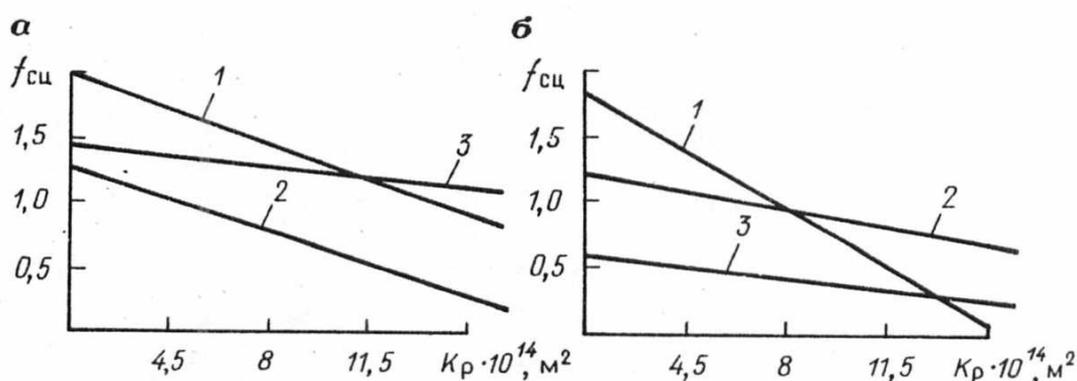


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента сцепления груза с рабочей поверхностью от коэффициента проницаемости пористого материала при давлении подачи воздуха  $p_a = 115$  кПа (а) и  $p_a = 30$  кПа (б), давлении груза на рабочую поверхность 15 кПа, толщине слоя  $H = 0,06$  м и относительной влажности груза  $w$ : 1 – глина ( $w = 27\%$ ); 2 – мел ( $w = 27\%$ ); 3 – железорудный концентрат ( $w = 12\%$ ).

В качестве защитных элементов, предохраняющих несущую часть перегрузочного устройства от абразивного износа, могут быть использованы:

- 1) закрепляемые на днищах и части боковых стенок течек полосы, листы и плиты из марганцовистой стали;
- 2) плиты из каменного литья (получаемого металлургическим путем из базальтов и диабазов);
- 3) футеровка рабочих поверхностей износостойкими антифрикционными полимерными материалами;
- 4) футеровка рабочих поверхностей путем их бетонирования;
- 5) футеровка за счет формирования защитного слоя из самого транспортируемого груза.

Износостойкость плит из каменного литья в 15–20 раз выше чем у малоуглеродистой стали. Более того, при остеклении поверхности коэффициент трения груза по плитам из каменного литья меньше, чем по стальным, поэтому долговечность их еще более повышается. Единственным недостатком каменного литья является относительно невысокая механическая прочность на ударные нагрузки. Эффективным футеровочным материалом является полиэтилен низкого давления–компонор высоко-молекулярный, обладающий следующими физико-механическими свойствами: плотность 1,0 – к 1,3 г/см<sup>3</sup>; прочность на растяжение,

сжатие и изгиб до 25 мПа; твердость по Бринеллю 50 мПа; относительное удлинение 400 %; коэффициент трения по стали 0,15; температура хрупкости и размягчения 210 и 335 К; поперечное сечение плит длиной 3 – 5 м  $500 \times (20-50)$  мм.

Эффективным средством защиты перегрузочных желобов от абразивного износа при транспортировании мелкокусковых грузов при наличии в их составе песчаных фракций и глинистых включений является устройство по ходу движения груза поперечных преград, задерживающих часть транспортируемого груза на рабочей поверхности желоба (рис. 3.6, а). Промежутки, заполненные самоуплотняющимся в процессе эксплуатации желоба материалом, образуют самовоспроизводимый защитный слой, надежно предохраняющий от износа несущие элементы желоба [19, 145].

Однако применение этого метода защиты связано, во-первых, с заметным уменьшением поперечного сечения желоба (по его высоте) и, во-вторых, с увеличением коэффициента сопротивления движению груза, что должно быть учтено при проектировании или реконструкции перегрузочного узла.

В тех случаях, когда по конструктивно-компоновочным или каким-либо другим соображениям не удастся выполнить перегрузочную точку с «охватом» потока груза, подаваемого в точку (например, при разгрузке конвейера через головной барабан), передняя стенка может быть снабжена специальным карманом, в который направляется поток груза (рис. 3.6, б). За счет естественной отстойки, образующейся в кармане как из крупных кусков, так и из мелких и глинистых частиц подаваемого груза, сразу решаются две задачи: предохраняется от износа и разрушения передняя стенка точки, а поток груза меняет направление движения почти на  $90^\circ$ , что целесообразно, например, при конвейерной загрузке виброгрохотов с целью максимального использования их просеивающей поверхности.

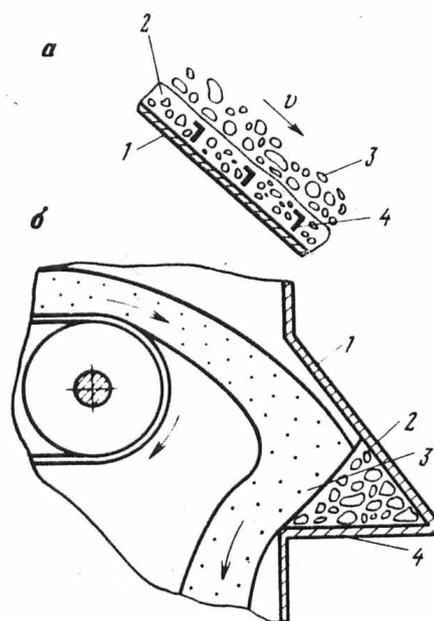


Рис. 3.6. Варианты защиты рабочей поверхности от износа и разрушения:  
 1 – несущая конструкция;  
 2 – защитный слой;  
 3 – транспортируемый груз;  
 4 – преграда

В приемных лотках уплотнение, выполняемое в виде загнутой внутрь лотка полосы из технической резины или конвейерной ленты (манжета), может создавать дополнительное сопротивление движению топлива и тормозить его. Манжеты также сокращают полезную ширину ленты на конвейерах, поэтому их не следует выполнять слишком широкими [9]. При подаче влажного и глинистого груза происходит его налипание на манжеты в лотке, топливо накапливается в нем и затем образует столб в пересыпной точке. Для устранения этого рекомендуется устанавливать в лотках над манжетами защитные козырьки, предупреждающие попадание материала на манжеты (рис. 3.7).

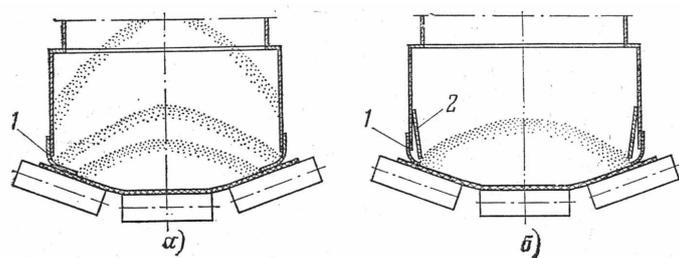


Рис. 3.7. Предупреждение переполнения приемных лотков дисперсным грузом: а – до реконструкции; б – после реконструкции; 1 – уплотнение (манжета); 2 – защитный козырек

Плужковые сбрасыватели с манжетами имеют следующие существенные недостатки: мелкий материал пропускается в сторону приводного барабана, особенно в случаях большого и неравномерного по длине износа резиновой полосы; частая смена резиновой полосы, износ которой происходит иногда довольно быстро (за несколько дней), особенно изготовленной из конвейерной ленты, а не из листовой резины; истирание верхней обкладки ленты, особенно при работе на углях с повышенным абразивным свойством.

Для устранения указанных недостатков на ряде электростанций вместо быстроизнашивающейся манжеты установлен металлический пруток [9]. Износостойкость металлического прутка значительно выше, чем резиновой манжеты, поэтому установка прутка позволяет увеличить срок службы плужков и, таким образом, исключить затраты на довольно частую смену манжет из резины или конвейерной ленты. При хорошем прилегании прутка плужкового сбрасывателя к ленте конвейера и устройстве под плужком достаточно ровного по всей длине стола устраняются пропуски и просыпания топлива. Износ конвейерной ленты при этом уменьшается, так как коэффициент трения металла по резине значительно меньше, чем резины по резине. Металлический пруток от соприкосновения с углем и лентой шлифуется и через короткий промежуток времени становится настолько гладким и обкатанным, что

опасность задира и пореза ленты полностью исключается. В этом случае необходимо качественно выполнять стыки ленты методом вулканизации.

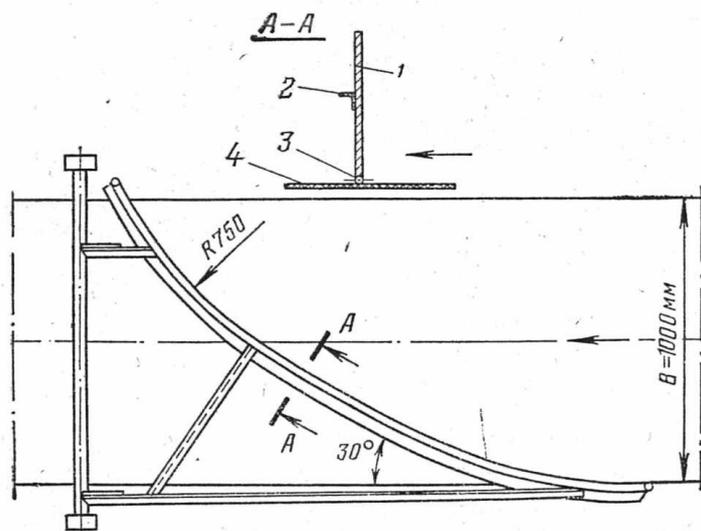


Рис. 3.8. Плужковый сбрасыватель с прутом.

1 – металлический лист; 2 – ребро; 3 – пруток  $\Phi 20$  мм; 4 – лента конвейера

### 3.1.4. Мощность приводного двигателя

Тяговое усилие рассчитывается по формуле

$$P = qg(Lw_0 \pm H),$$

$q = G / (3,6v)$ , где  $G$  – расчетная производительность (т/ч);  $L$  – длина трассы (м);  $v$  – скорость груза на ленте (м/с),  $w_0$  – обобщенный коэффициент сопротивления.  $w_0 = 0,1-0,4$ . Мощность определяется по формуле [71]

$$N_b = \frac{Pv}{1000} \text{ кВт.} \quad (3.1)$$

Для выполнения тягового расчета необходимо иметь схему трассы с размерами характерных участков и местами расположения рассредоточенных сопротивлений; массы 1 м длины ленты, груза и вращающихся частей опор; коэффициенты сопротивлений движению ленты. Примеры расчета приведены в [71].

### 3.1.5. Обеспыливание воздуха на конвейерах

Разгрузка угля, поступающего на ТЭС, транспортировка его по тракту, пересыпка с конвейера на конвейер, дробление, загрузка бункеров сырого угля связаны с постоянным образованием и выделением пыли в атмосферу рабочих помещений. При повышенной запыленности создаются тяжелые условия для работы обслуживающего персонала,

снижается производительность труда, появляется опасность возникновения взрывов, пожаров, особенно для электростанций, работающих на углях с большим выходом летучих. Кроме того, пыль, попадая на подвижные части машин и механизмов, вызывает преждевременный их износ, а на автоматизированных топливоподачах отрицательно влияет на работу элементов автоматики.

Наиболее характерными очагами пылеобразования на тракте топливоподачи являются следующие узлы пересыпки топлива: с конвейера на конвейер; из дробилок на конвейер; из питателя на конвейер; с конвейера в бункер сырого угля. Во всех случаях транспортируемое топливо эжектирует воздух, нагнетая его в укрытие. Внутри укрытия возникает избыточное давление от 2 до 4 кгс/м<sup>2</sup>, которое приводит к интенсивному выбиванию пыли в помещение через неплотности укрытия. При этом в верхней части течки создается разрежение от 0,8 до 2 кгс/м<sup>2</sup>. Особенно сильное пыление наблюдается в течке пересыпки после дробилок, при работе которых избыточное давление увеличивается до 6–8 кгс/м<sup>2</sup> за счет вращения их ротора, в аэродинамическом отношении подобного рабочему колесу вентилятора. Однако выбивание пыли из укрытий происходит не только за счет избыточного давления. Частично пыль выбивается за счет сил инерции. В этом случае пылевые частицы приобретают кинетическую энергию и могут двигаться в направлениях, не совпадающих с движением воздушного потока внутри укрытия. Материалы обследования электростанций показали, что запыленность на топливоподающих трактах ТЭС значительно превосходит допустимые нормы. В [9] приводятся сведения о степени запыленности рабочих зон производственных помещений различных тепловых электростанций.

Все узлы пересыпок дисперсного груза должны иметь герметичные укрытия, препятствующие выбиванию пыли при падении угля с большой высоты. Эти укрытия, как показывает опыт эксплуатации, должны иметь оптимальный свободный объем между конвейерной лентой и стенками укрытия. Большая емкость укрытий способствует снижению подвижности воздуха в полости укрытия, что приводит к равномерному распределению давления на внутренние стенки укрытия. Для снижения избыточного давления, возникающего в месте падения топлива, следует устраивать обводные трубы рециркуляции, которые соединяют зону наибольшего избыточного давления в приемном лотке укрытия с зоной наибольшего разрежения в течке лотка. Сечение обводных труб принимается из расчета 0,05 м<sup>2</sup> на каждые 100 т часовой производительности, но не менее 0,07 м<sup>2</sup>.

На рис. 3.9 показан приемный лоток конвейера с устройством рециркуляции. Боковое уплотнение приемного лотка выполнено в виде двух

стенок, одна из которых (внутренняя) изготовлена из металлического листа с прикрепленной к нему в нижней части полосой технической резины. Эта манжета касается непосредственно конвейерной ленты и обеспечивает уплотнение внутренних стенок лотка. Крепление манжет к боковым стенкам производится с помощью клиньев, вставляемых в приваренные по всей длине лотка специальные Г-образные упоры. Вторая (наружная) боковая стенка выполнена из брезента. Верхняя ее кромка крепится к крышке лотка, а на нижнюю кромку подвешивается груз, обеспечивающий натяжение брезента и прилегание его к столу по всей длине лотка. Камеры, образованные боковыми стенками, закрыты с торцов брезентом и соединены с внутренним пространством лотка окнами, прорезанными в боковой стенке на определенном расстоянии от переднего торца. Крышка лотка выполнена двускатной для уменьшения отложений на ней пыли и для облегчения ее уборки. В районе приемного лотка во избежание провисания ленты и образования щелей между лентой и уплотнениями (манжетами) вместо боковых роликоопор устанавливаются два металлических листа. Непосредственно в месте падения топлива (под точкой) устанавливается стол из металлического листа на всю ширину ленты конвейера для устранения ее повреждений.

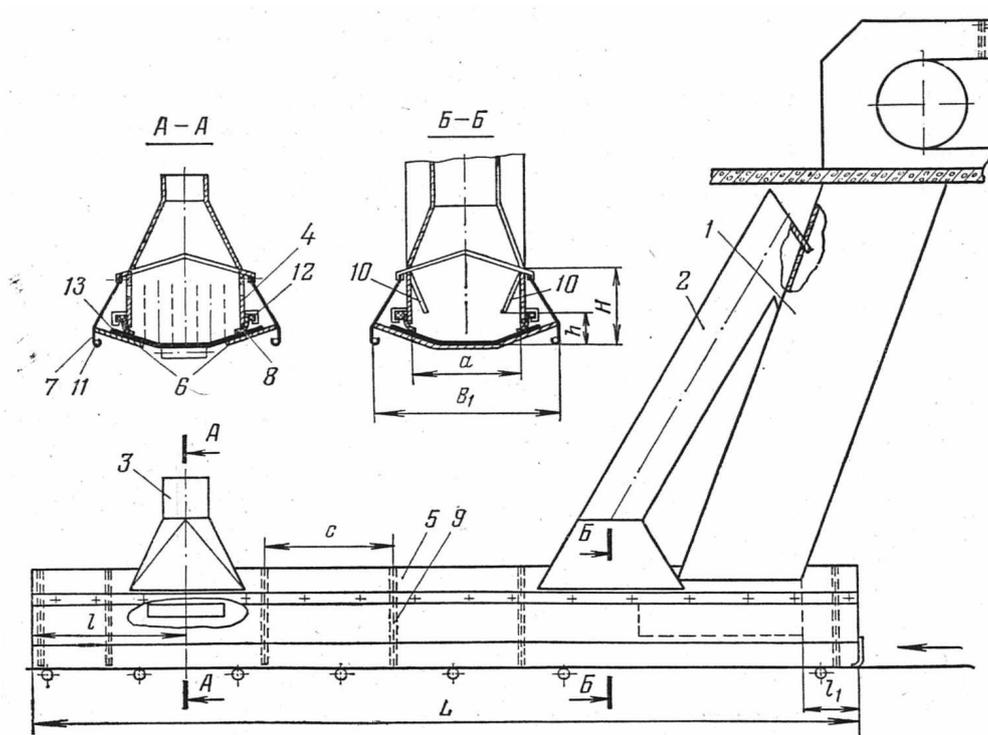


Рис. 3.9. Приемный лоток конвейера:

- 1 – точка; 2 – воздуховод; 3 – аспирационная воронка; 4 – боковая стенка;  
 5 – крышка; 6 – стол; 7 – наружная стенка; 8 – манжета; 9 – сдвоенный фартук;  
 10 – направляющий лист; 11 – груз; 12 – клин; 13 – конвейерная лента

Для создания препятствия свободному выходу запыленного воздуха через выходное отверстие лотка по его длине устанавливается ряд фартуков. Фартуки выполняются сдвоенными, из двух полос технической резины, выкроенных по сечению лотка и в верхней части скрепленных друг с другом. Нижние части этих полос, свободно висящие, имеют вертикальные разрезы, перекрывающие друг друга. Головная воронка приводного барабана уплотняется с помощью фартуков. Для устранения засыпания манжет лотка топливом, что может создать дополнительное сопротивление движению ленты конвейера и вызвать значительный износ манжет, предусмотрены направляющие листы в районе пересыпной точки. Эти листы устанавливаются с каждой стороны от пересыпной точки под углом к боковым стенкам лотка.

Устройство рециркуляции пересыпной точки представляет собой воздухопровод, расположенный рядом с точкой. Верхняя часть воздуховода исключает возможность осаждения пыли на его стенках. Устройство рециркуляции может быть выполнено также в виде камеры, которая сообщается с точкой окнами, прорезанными по всей высоте общей стенки. Конструкция таких укрытий, как показали испытания, позволила снизить выбивание из них пыли на 70–80 %. Кроме того, при этом в 2–3 раза сокращаются потребные аспирационные объемы, так как большая часть нагнетаемого в укрытие воздуха движется по обводному воздуховоду из зоны избыточного давления в зону разрежения со скоростью 1,5–2,0 м/с. Данная конструкция уплотнения приемного лотка рекомендуется в основном в комплексе с аспирацией. Технологическое оборудование (питатели, дробилки) имеет свои кожухи, препятствующие выбиванию пыли. Задача обеспыливания их заключается в постоянном надзоре за их плотностью.

Наиболее распространенным средством снижения запыленности в помещениях топливоподачи является аспирация – создание разрежения в укрытиях за счет отсасывания из них запыленного воздуха с помощью вентилятора, который вместе с укрытием, воздухопроводами и пылеуловителями составляет единую обеспыливающую систему. Нормальная работа аспирационной установки должна обеспечивать, с одной стороны, предотвращение выбивания пыли из-под укрытия, а с другой очистку отсасываемого запыленного воздуха до санитарной нормы.

Для очистки воздуха от пыли в типовых схемах аспирации в 70–80-е годы использовались сухие циклоны и циклоны–промыватели, в основном малогабаритные и конические конструкции Свердловского института охраны труда (СИОТ). Данные многочисленных испытаний показали, что сухие циклоны СИОТ в качестве одноступенчатого пылеуловителя

неэффективны из-за низкой степени очистки в них запыленного воздуха, находящейся в пределах 62–82 %. Применение сухих циклонов целесообразно в двухступенчатых схемах для экономии топлива, так как уловленная ими пыль возвращается на тракт топливоподачи или сбрасывается в бункера сырого угля.

В типовых системах аспирации сухие циклоны работают неустойчиво из-за ненадежной работы конических клапанов-мигалок и пылесбросных труб диаметром 100 мм. Для повышения надежности работы этих пылеуловителей в [9] рекомендуется использовать пылесбросные трубы диаметром не менее 200 мм, прокладываемые под углом к горизонту не менее 70°, и оснащать их плоскими клапанами-мигалками (рис. 3.10).

Циклоны-промыватели использовались для улавливания более тонкой фракции угольной пыли и имеют коэффициент очистки 85–92 %. Сбросные патрубки циклонов-промывателей соединялись с гидрозатвором. На магистрали подвода воды к циклону-промывателю устанавливался вентиль с электромагнитным приводом, сблокированным с электродвигателем вентилятора аспирационной установки. Количество подаваемой в циклон воды регулировалось вентилем с ручным управлением. Испытаниями было установлено, что для нормальной работы циклонов-промывателей необходимо довести расход воды до 0,2 л/м<sup>3</sup> воздуха, что превышает расчетный в 4 раза (0,05 л/м<sup>3</sup>). Удаление загрязненной воды в промливневую канализацию приводит к загрязнению сточных вод и некоторым потерям топлива. Для воды территория склада оборудовалась ямой-отстойником с последующим использованием шлама.

При устройстве и эксплуатации аспирационных устройств важным является правильный выбор схемы удаления уловленной циклонами сухой пыли. Сбрасывать ее в сухом виде обратно в приемный лоток или на конвейерную ленту не допускается. Решать эту задачу можно следующими способами: установкой под сухими циклонами бункеров для накопления уловленной пыли. Сброс ее на конвейерную ленту производится один раз в сутки, но с обязательным увлажнением пыли; транспортированием (пневмотранспорт) пыли в бункер сырого

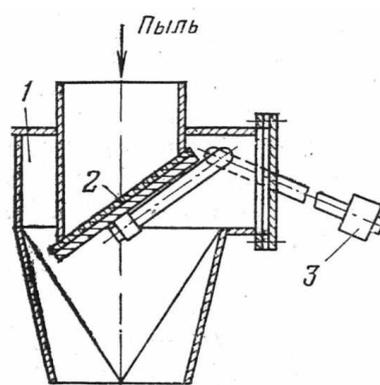


Рис. 3.10. Клапан-мигалка:  
1 – корпус мигалки;  
2 – клапан; 3 – контргруз

угля котельной; установкой под сухими циклонами гидрозатворов, т. е. удалением пыли в виде пульпы (по типу циклонов-промывателей).

В 80-е годы применялись скоростные циклоны-промыватели, которые отличаются большой эффективностью очистки за счет увеличения скорости воздуха во входном патрубке. Существенным недостатком в их работе является несовершенство узла подвода воды.

Типовым проектом предусматривалась создание водяной завесы во входном патрубке, что вызывает образование плотных отложений пыли, которые начинаются на границе раздела сухой и смоченной частей патрубка и распространяются в обе стороны, увеличиваясь со временем. При колебаниях давления воды в магистрали возможно как переполнение нижней части циклона водой, так и недостаточное орошение стенок, что приводит к брызгоуносу и быстрому забиванию циклона влажной пылью.

В настоящее время в системах аспирации применяется пылеуловитель конструкции УО ОРГРЭС. Пылеуловитель состоит из трубы Вентури и каплеуловителя (рис. 3.11). Принцип его действия заключается в следующем. Частицы пыли, двигаясь в потоке воздуха, разгоняются в конфузоре до скорости 50–70 м/с и приобретают энергию, достаточную для преодоления сил поверхностного натяжения воды. В горловину трубы Вентури с помощью форсунки подается вода. За счет разности скоростей капель и частиц пыли последние осаждаются на поверхности капель или проникают внутрь капель. В диффузоре, где кинетическая энергия движения постепенно переходит в потенциальную энергию давления, происходит коагуляция капель воды с осевшими на них частицами пыли. Улавливание укрупненных капель осуществляется в каплеуловителе, в качестве которого применяются центробежные скрубберы, циклоны-промыватели СИОТ и др. Удельный расход воды на орошение труб Вентури составляет 0,1–0,2 л на 1 м<sup>3</sup> очищаемого воздуха. Следует отметить, что вопрос обеспыливания узлов пересыпок с помощью аспирационных установок не решает проблемы устранения вторичного пыления, возникающего на тракте топливоподачи за счет большой скорости ленты конвейера и биения самой ленты.

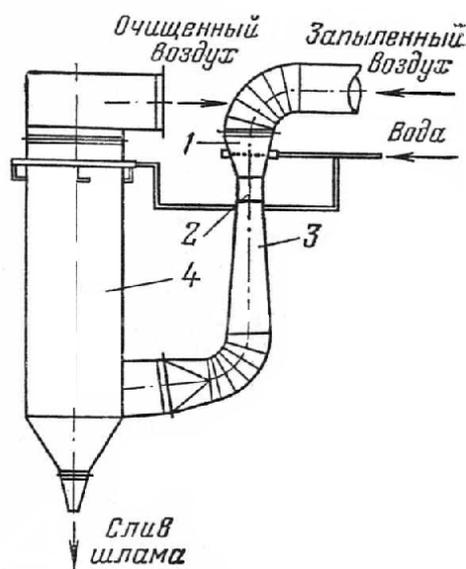


Рис. 3.11. Скоростной пылеуловитель:

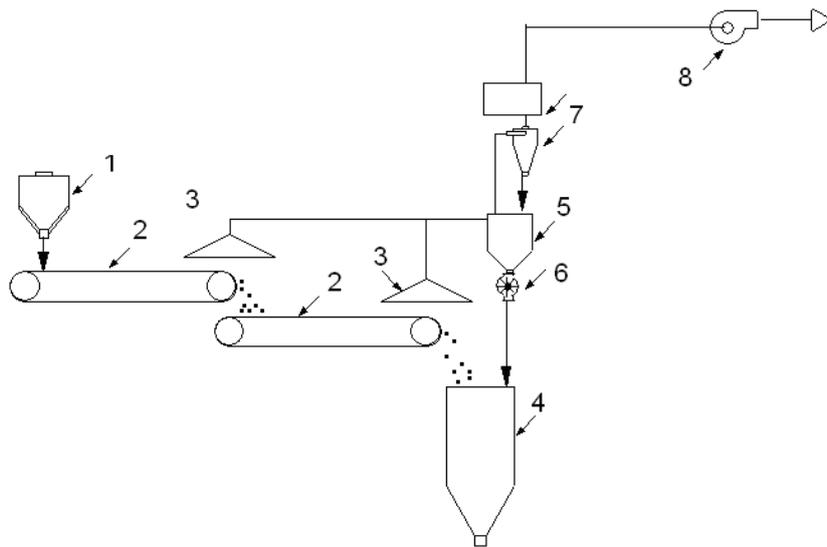
1 – конфузور; 2 – горловина;  
3 – диффузор; 4 – каплеуловитель

Анализ внедрения аспирации показывает, что она применима только для слабопылящих углей, например назаровских. Для этих углей можно использовать аспирационные установки с одноступенчатой очисткой запыленного воздуха, где в качестве пылеуловителя устанавливается циклон-промыватель. Потери топлива при этом сравнительно невелики.

Нерешенной остается проблема транспортировки уловленной пыли в главный корпус ГРЭС. Сбрасывать ее в сухом виде на конвейерную ленту, как это обычно делается в аспирационных установках, нельзя из-за большого объема пыли, порядка 1,5 т в смену. Опыт эксплуатации этой установки еще недостаточен.

### **3.1.6. Обеспыливания воздуха в конвейерных системах цементного производства**

Пространственная конфигурация маршрутов перемещения грузов предполагает пересыпки дисперсного материала с транспортера на транспортер. Обычно короб пересыпки имеет свою аспирационную сеть и пылеуловитель. Объединение нескольких коробов пересыпок в единую аспирационную сеть создает трудности при эксплуатации – выпадение материала из запыленного потока, образование отложений, трудности с поддержанием необходимого расхода воздуха во всех сечениях сети, повышенные энергозатраты на транспортирование больших запыленных объемов воздуха на большие расстояния к месту централизованной очистки. Количество пыли, отходящей только от одного короба пересыпки дробленого известняка, может составлять 200 кг/час. Количество воздуха необходимого для аспирации коробов пересыпок конвейерных систем обычно не превышает 10–15 тыс. м<sup>3</sup>/час [42]. В коробах пересыпки дисперсных материалов конвейерных систем, агломераты частиц в условиях повышенной влажности образуются при их взаимодействии друг с другом, при «блочном» сходе материала с конвейерных лент. Материал поступает в систему сгустками, поэтому концентрация частиц в потоке нестационарна. В условиях пониженной влажности на поверхностях частиц образуется одноименный электрический заряд, что обуславливает повышенную диспергацию частиц. Существенным недостатком современных отечественных систем аспирации является возврат уловленной пыли на ленту, которая с большой вероятностью перейдет во взвешенное состояние в следующем коробе пересыпки или при сбросе в склад. Это обстоятельство приводит к накоплению мелкой пыли по всем маршрутам материала и к ухудшению экологической обстановки, условий труда. При централизованной системе аспирации расходы воздуха оставляют сотни тысяч кубов. На рис. 3.12 представлена схема аспирации.



*Рис. 3.12 Схема обеспыливания транспортеров:  
 1 – питатель; 2 – транспортер; 3 – вытяжной зонд; 4 – силосный склад;  
 5 – приемный бункер; 6 – шлюзовой разгрузитель; 7 – циклон, фильтр;  
 8 – воздуходувка*

В производстве цемента дробленое сырье из конвейеров через лотки ссыпается в распределительный склад, откуда грейферными кранами доставляется к мельничному оборудованию. На рис. 3.13 показана картина запыленности при отводе с конвейера и ссыпании материала в склад.



*Рис. 3.13 Выделение пыли при ссыпании материала из конвейера в склад*

Кабина грейферного крана снабжена системой вентиляции с фильтрами для очистки воздуха. Склад изолирован от галерей с конвейерными транспортерами.

Если аспирация отсутствует, то прорывающийся из пересыпных коробов запыленный воздух распространяется по галереям, и концентрация пыли превышает ПДК на порядки.

Основная трудность проектирования аспирационных систем – в ограниченном объеме размещения необходимого оборудования.

Существующее стандартное оборудование (фильтры) громоздко и ненадежно. Наиболее часто применяют групповые циклонные пылеуловители (см. рис. 3.14) Трудность эксплуатации аспирационных систем с циклонными пылеуловителями заключается в изменении свойств

дисперсной фазы и термодинамических характеристик несущей среды, что приводит к забиванию пылевыводных отверстий циклонов, зависанию материала – снижению устойчивости процесса обеспыливания воздуха. Эти изменения обычно не учитываются проектировщиками, поскольку отсутствует опыт оценки влияния поверхностных характеристик частиц (адгезионные, аутогезионные свойства) на надежность и устойчивость работы воздухоочистных аппаратов.

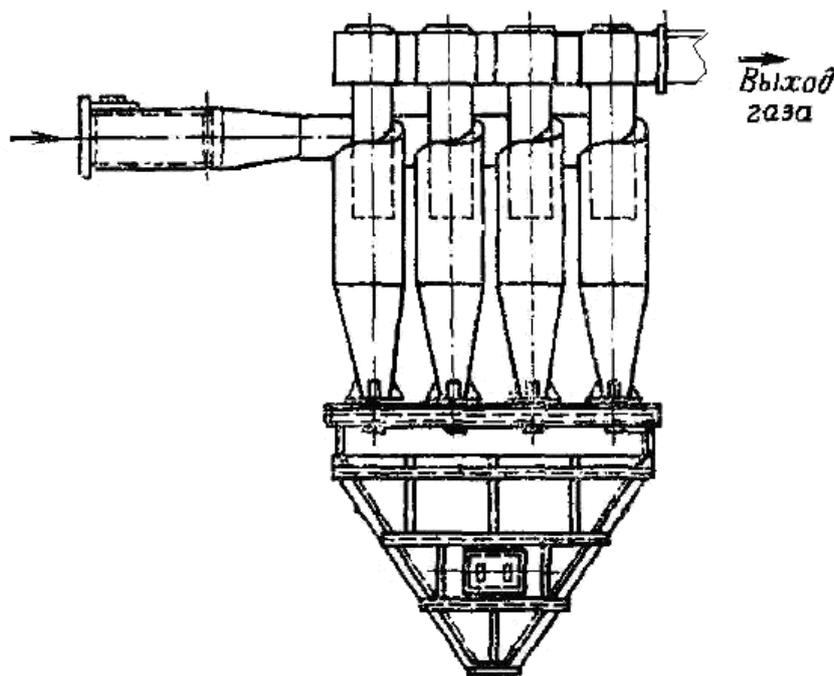


Рис. 3.14. Групповой циклон

Аутогезионные силы проявляются в зависимости от свойств поверхности частиц, термодинамического состояния поверхности при взаимодействии с окружающей средой и друг с другом. Если частицы несут на своей поверхности одинаковый электрический заряд, они отталкиваются друг от друга, аутогезионная сила отрицательна, если разноименный заряд – положительна, если на поверхности адсорбированы пары влаги, сила также положительна и увеличивается с увеличением толщины водяной пленки на поверхности частицы. Прочность сцепления частиц определяется аутогезионными силами. Адгезионные силы проявляются только в монослое частиц, соприкоснувшихся с поверхностью, поэтому не могут играть определяющую роль в формировании отложений.

В групповых циклонных аппаратах в условиях повышенной влажности слипшиеся частицы, образовавшие сгустки различных размеров, с разной концентрацией поступают в элементы и создают неодинаковую

гидродинамическую ситуацию в элементах. Крупный сгусток, поступивший в один из элементов, может инициировать смещение вынужденного вихря в сепарационное пространство, препятствуя транспортировке частиц в пылеприемное устройство, тогда как в других элементах часть потока может протоком проходить через собственное пылевыводное отверстие в соседний элемент через его пылевыводное отверстие. Такая ситуация приводит к забивке отдельных элементов пылью.

При повышенной влажности требуется непрерывно выводить уловленную пыль из общего пылевого бункера. Невыполнение этого условия приводит к возникновению сводообразования и зависанию пыли в пылевом бункере и пылевом затворе. При пониженной влажности в условиях повышенной диспергации частиц образование слоя из частиц в пылевом бункере затруднено. Это обусловлено взаимодействием закрученных факелов, истекающих из пылевыводящих отверстий элементов, и образованием турбулентной бури, размывающей сгустки накопленных частиц в общем пылевом бункере.

Необходимо уменьшить концентрацию пыли и её колебания в аспирационной сети. В отличие от традиционных вытяжных зондов, выполняющих роль укрытий, в которых перепад давления отсутствует, в уплотнительных аспирационных коробах процесс удаления пыли при пересыпках происходит по другой схеме. Ссыпавшийся материал на нижерасположенный транспортер эжектирует воздух из расчета 2–20 м<sup>3</sup> воздуха на 1 м<sup>3</sup> материала. Поток воздуха, отразившись от конвейерной ленты, диспергирует, увлекает материал, и концентрация частиц многократно возрастает. Создаётся перепад давления по высоте пересыпки, который зависит от степени диспергации пыли и высоты между транспортёрами. Этот перепад может колебаться в диапазоне 2–11 мм вод. ст. (0,02–0,11 кПа). В связи с этим обстоятельством интенсивность отвода пыли, т. е. количество воздуха, выводимого с пылью из аспирационного короба, должно регулироваться в зависимости от степени диспергации пыли при пересыпках, т. е. в зависимости от термодинамического состояния поверхностей частиц.

Наиболее распространенный способ аспирации коробов пересыпки заключается в отводе необходимого количества воздуха из верхней области короба и создания разрежения, обеспечивающего запыление пыли. При больших разрежениях воздух, поступающий через уплотнения, проходит в виде струй, увеличивая степень диспергации пыли, концентрацию частиц в объёме короба. Следовательно, чтобы предотвратить интенсивное диспергирование материала струями, выходящими из уплотняющих щелей, необходимо иметь рассредоточенный вывод запылённого воздуха из аспирационного короба, причем скорость воздуха

в выводящих отверстиях должна быть намного больше, чем в уплотняющих щелях. Для большей устойчивости желательно иметь расширительную, демпфирующую камеру, в которой сгустки выпадают из потока и удаляются на транспортерную ленту. При повышенной влажности материала можно использовать малую часть отводящих каналов, но при этом должны быть открыты лючки на коллекторном воздуховоде для обеспечения гидравлической стабилизации всей системы.

Нами разработан радикальный способ аспирации коробов пересыпок конвейерных систем. Отвод запыленного воздуха необходимо осуществляется там, где он поступает из короба в окружающую среду. С наружной стороны крепятся накладки, образующие каналы с щелевыми отверстиями, расположенными вблизи «пылящих» зазоров, а внутри со стороны входа и выхода материала с транспортерных лент устанавливаются дополнительные фартуки. Из пространств между основными и дополнительными фартуками также проводится отвод запыленного воздуха. Таким образом, выводится из короба пыль, которая естественным образом пришла во взвешенное состояние, и которая вышла в зазоры. В этом случае концентрация пыли в коробе может достигать больших значений, однако это допустимо, т. к. пыль не взрывоопасна. В ходе решения задачи обеспыливания воздуха в условиях образования отложений в промышленных системах аспирации конвейерного транспорта известняка нами использован опыт разработки пылеуловителя для очистки дымовых газов котлов слоевого сжигания твердого топлива [40]. Промышленный пылеуловитель на основе улиточного разгрузителя-пылеконцентратора был установлен за котлом КЕ 10/14 котельной ОАО «Шахта Заречная» (г. Польшаево, Кемеровская область). Эффективность батарейного циклона на котле слоевого сжигания топлива составляла 69 %, эффективность нового вихревого пылеуловителя 95 %, гидравлическое сопротивление до 1500 Па.

Разработанный пылеуловитель является альтернативой групповому и батарейному циклонам, обладающим низкой эффективностью и устойчивостью сепарации. Пылеуловитель может быть использован в теплоэнергетической, химической, строительной и других отраслях промышленности.

Особенностью пылеуловителя является возможность его применения на слипающейся пыли, поскольку в улиточном разгрузителе транспортные скорости равны тангенциальной скорости. В этих условиях залипание пыли затруднительно.

Принцип работы пылеуловителя заключается в следующем: запыленный газовый поток поступает в улиточный разгрузитель-пылеконцентратор, снабженный собственным пылеприемником, где поток

освобождается от основной массы частиц. Неотсепарированные в пылеприемнике разгрузителя частицы концентрируются на стенке и выводятся в выносной циклон. Очищенный в разгрузителе-пылеконцентраторе поток поступает в противоточный пылеконцентратор. Здесь тонкая пыль концентрируется и выводится во второй выносной циклон. Поток с пылеконцентратом очищается в циклонах, присоединяется к основному очищенному потоку и поступает на вход дымососа. Таким образом, осуществляется трехступенчатая очистка запыленного потока [38].

Для предотвращения сводообразования и зависания материала циклоны выполняются без промежуточного пылевого бункера, снабжаются «транзит-приемниками» и пылевыми затворами собственной конструкции. В случае работы на сильно слипающихся материалах «транзит-приемниками» с пылевыми затворами выполняются подвижными, что позволяет обеспечить устойчивую выгрузку уловленной пыли без применения вибраторов.

При повышенной влажности материала рекомендуется снижать разрежение в коробе пересыпки. Для этого на входе в разработанный инерционный пылеуловитель установлен подвижный шибер, позволяющий регулировать крутку потока в зависимости от расхода воздуха. Сопротивление и эффективность аппарата останутся на прежнем уровне.

В эксплуатации разработанный пылеуловитель более устойчив в работе, может быть выполнен в абразивоизносостойком исполнении, для улавливания абразивных пылей, устройства для регулирования позволяют осуществлять настройку аппарата. Если сравнивать разработанный пылеуловитель с батарейным или групповым циклоном, то преимущество особенно очевидно: выбросы в атмосферу уменьшаются в 4–6 раз [39].

На рис. 3.15 представлен фрагмент пылеуловителя системы аспирации короба пересыпки транспортеров дробленого известняка, реализованный в условиях производства ООО «Гопкинский цемент».

Производительность пылеуловителя составляет 15 000 м<sup>3</sup>/час, гидравлическое сопротивление до 2000 Па, эффективность пылеулавливания 95 %. Геометрические размеры пылеуловителя значительно меньше одиночного циклона аналогичной производительности. Устройство снабжено регулирующими приспособлениями, которые позволяют поддерживать уровень крутки постоянным, независимо от расхода газа. В этом устройстве несущая способность потока выше, чем в противоточном циклоне, что предотвращает забивание пылеуловителя, зависание материала в пылевыводных отверстиях, повышает устойчивость процесса обеспыливания воздуха.



*Рис. 3.15. Фрагмент пылеуловителя системы аспирации короба пересыпки транспортеров дробленого известняка*

Таким образом, чтобы процесс газоочистки в противоточных циклонах проходил устойчиво, необходимо осуществлять подготовку потока – разгрузку от крупных примесей и сгустков частиц, с одновременным снижением исходной запыленности газов, а также осуществлять концентрирование потоков.

## **3.2. Скребковые конвейеры**

### **3.2.1. Характеристики конвейеров**

Скребковые конвейеры составляют значительную группу машин непрерывного транспорта, основанных на принципе волочения транспортируемого груза по желобу, плоскому настилу или грузу при помощи скребков, прикрепленных к тяговому органу. В скребковых конвейерах реализовано несколько модификаций этого принципа (см. рис. 3.16), связанных с конструкцией скребков, желоба и тягового органа [71]. По схеме, показанной на рис. 3.16, *а*, груз перемещают сплошными прикрепленными к цепи 5 высокими скребками 1, опирающимися катками 3 на направляющие 2. Высокими называют скребки высотой, равной высоте боковых стенок (бортов) желоба или превышающей ее.

Груз при этом перемещается отдельными порциями перед каждым скребком. При перемещении происходит его трение о днище и боковые стенки желоба 6, перемешивание и измельчение. Все это связано со значительными затратами энергии. Высота порции груза, называемой телом волочения 7, в этом случае ограничена высотой бортов желоба, так как с превышением ее происходит пересыпание груза через борта. Конвейеры, выполненные по данной схеме, называют конвейерами порционного волочения с высокими сплошными скребками.

К ним относят и конвейеры, выполненные по схеме на рис. 3.16, б, в которых скребки соединены вертикальными боковыми стенками, образующими подвижные борта, а желоб заменен плоским днищем. Груз здесь также перемещается отдельными порциями высотой, ограниченной высотой подвижных бортов. Однако замена неподвижных бортов подвижными снижает силу трения, так как груз трется только о днище, уменьшаются его перемешивание и крошение, а также общие затраты энергии на перемещение. Скребки вместе с боковыми стенками имеют форму ящичков без дна. Поэтому конвейеры, выполненные по этой схеме, называют ящичными с подвижными бортами.

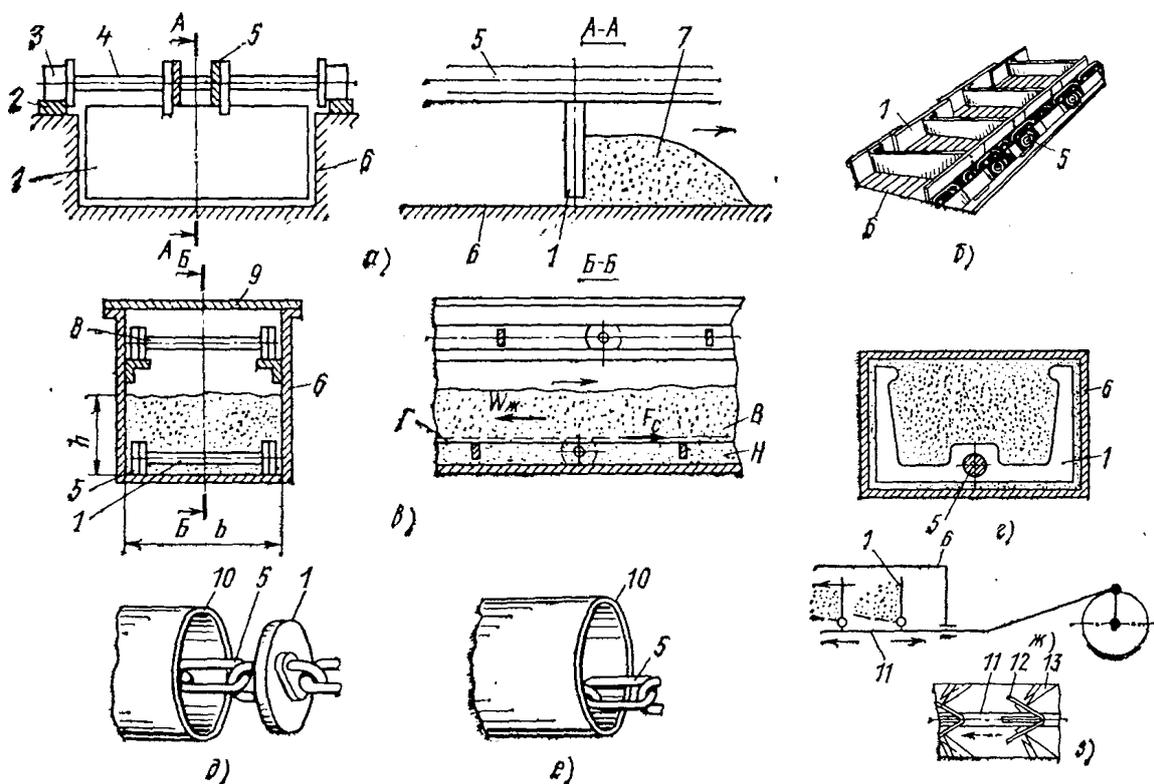


Рис. 3.16. Модификации скребковых конвейеров:

- а – с высокими сплошными скребками; б – со скребками с боковыми стенками;
- в – с низкими погруженными скребками; г – с контурными скребками;
- д – цепь со скребками, перекрывающими сечение трубы; е – цепь без скребков;
- ж – с шарнирными скребками, прикрепленными к итанге, совершающей возвратно-поступательное движение;
- з – со скребками, жестко прикрепленными к итанге

По третьей схеме (рис. 3.16, в) груз перемещают низкими скребками, высота которых в несколько раз меньше высоты бортов желоба. Груз здесь образует сплошное тело волочения высотой, превышающей высоту скребка. Процесс сплошного волочения основан на том, что сила сцепления верхнего свободного слоя *В* груза с нижним принудительно

перемещаемым слоем  $H$ , действующая на границе  $\Gamma$  этих слоев, может превышать силу трения  $W_{\text{ж}}$  верхнего свободного слоя о стенки желоба и усилие  $W_{\Gamma}$ ,

$$F_a \geq W_{\text{ж}} + W_{\Gamma},$$

где  $W_{\Gamma}$  – усилие, затрачиваемое на подъем (при движении вверх ставят знак плюс, вниз – минус) свободного слоя груза.

Конвейеры, выполненные по данной схеме, называют конвейерами сплошного волочения с низкими скребками. Груз, перемещаемый этим конвейером, меньше подвержен перемешиванию и крошению, чем по схеме на рис. 3.16, *а*. Груз засыпается в желоб через холостую ветвь  $\delta$  и отверстие в крышке. Соппротивление движению груза можно уменьшить, если скребки выполнить по форме аналогичными контуру желоба (рис. 3.16, *з*). Это позволяет выполнять конвейер крутонаклонным и вертикальным. Конвейеры, основанные на этом принципе, называют конвейерами сплошного волочения с контурными погруженными скребками. Сила сцепления  $F_c$  зависит от свойств транспортируемого груза: связанности, скатываемости, угла естественного откоса. Транспортирование грузов по схемам на рис. 3.16, *в*, *з* не для всех грузов является эффективным. Наиболее универсальным решением является схема, показанная на рис. 3.16, *д*, по этой схеме контурные скребки заменены сплошными (рис. 3.16, *з*). Такой скребок, полностью перекрывая сечение желоба (обычно трубу 10), обеспечивает перемещение любого груза независимо от его свойств, при заполнении им всего сечения желоба. Конвейеры, выполненные по этой схеме, называют трубчатыми со сплошными скребками.

По схеме, показанной на рис. 3.16, *е*, в конвейерах малой производительности (до 5 т/ч) груз перемещают в трубе волочением круглозвенной цепью без скребков. Схемы транспортирования, показанные на рис. 3.16, *а–е*, используют в конвейерах с непрерывным поступательным движением тягового органа. Стремление сократить длину цепей или полностью освободиться от этих наиболее изнашиваемых частей конвейера привело к появлению схем транспортирования, показанных на рис. 3.16, *ж*, *з*. По обеим этим схемам тяговый орган совершает возвратно-поступательные движения. При движении вперед по ходу движения груза, показанному стрелкой, скребок занимает перпендикулярное положение к тяговому органу и перемещает порцию груза в заданном направлении; при движении назад скребок поворачивается, приближаясь к тяговому органу. При повторном движении вперед скребок занимает перпендикулярное положение и увлекает соседнюю, следующую по ходу движения порцию груза. В конвейерах, выполненных по этой схеме,

гибкий тяговый орган заменен полностью (рис. 3.16, ж) или частично на прямолинейных участках штангами 11, к которым шарнирно прикреплены скребки. Такие конвейеры называют штанговыми. В штанговых конвейерах со сложными трассами гибкий орган имеется только на поворотных (криволинейных) участках, что позволяет во много раз сократить длину цепей. При транспортировании связных грузов, например витой металлической стружки, скребки при обратном ходе увлекают груз назад. Во избежание этого желоба снабжают специальными устройствами – съемниками 13 («ершами»), препятствующими движению груза в обратном направлении (рис. 3.16, з). Аналогичную конструкцию имеют скребки 12, прикрепленные к штанге. Конвейеры, выполненные по этой схеме, называют ершовыми.

По универсальности применения скребковые конвейеры занимают первое место среди машин непрерывного транспорта. По длине рабочего органа общая протяженность их приблизительно в 10 раз больше, чем ленточных. Скребковые конвейеры используют для транспортирования самых разнообразных грузов, как легкосыпучих, так связанных. Конвейеры порционного волочения с высокими скребками применяют в угольной и пищевой промышленности. Более широкое применение имеют конвейеры сплошного волочения с низкими скребками. Эти конвейеры с герметичными желобами используют в пищевой промышленности (транспортирование зерна всех культур, муки, отрубей, комбикормов и их многочисленных ингредиентов), в химической промышленности (транспортирование карбида кальция, извести, коксовой и угольной мелочи, горячего колчеданного огарка, гранулированной сажи, кальцинированной соды, удобрений, ядохимикатов и др.), в целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности (транспортирование серы, глинозема, молотой извести, мела, древесной щепы, опилок, флотационного серного колчедана, колчеданного огарка и др.), в металлургической промышленности (транспортирование бокситов, кокса, измельченной руды, концентратов и огарков цветных металлов и т. д.), в литейных цехах (транспортирование формовочной земли, пылевидной глины, песка), в производстве строительных материалов (транспортирование измельченной сухой глины, мелкого гравия, извести, мела, цемента, песка, молотого камня и др.), в энергетике (транспортирование мелкого угля, фрезерного торфа, каменноугольной пыли, золы, котельной пыли), на железнодорожном и водном транспорте (погрузочно-разгрузочные работы с зерном, удобрениями, мелким углем, песком и т. д.).

### 3.2.2. Мощность приводного двигателя

Сопrotивление движению холостой (порожней) ветви цепи на горизонтальных и наклонных участках прямолинейного пути

$$W_{\Pi} = q_0 g L f' (\cos \beta \pm \sin \beta).$$

Сопrotивление перемещению груза и движению цепи на горизонтальных и пологонаклонных участках рабочей (груженой) ветви [71]

$$W_{\Sigma} = (q + q_0) g L \left\{ f_b \left[ (n_{\sigma} h_{\text{ж}} / b) + l \right] \cos \beta \pm \sin \beta \right\},$$

где  $q$  – масса груза, приходящаяся на 1 м ветви,  $q = G / (3,6v)$ ;

$G$  – расчетная производительность (т/ч);

$f'$  – коэффициент трения цепи о желоб принимаемый равным 0,3–0,4 и 0,5–0,7 для соответственно стальных и деревянных желобов;

$f_b$  – коэффициент трения груза о желоб, для разных материалов груза и поверхности  $f_b = (0,3–1,1)$  [71];

$n_{\sigma}$  – коэффициент бокового давления, воспринимаемого стенками желоба при движении груза,  $n_{\sigma} = \frac{k_e (1,2 + v)}{1 + 2f^2}$ , где  $k_e$  – эмпирический коэффициент,

$k_e = 1–1,2$ ;

$L$  – длина соответствующего расчетного участка конвейера м;

$\beta$  – угол наклона расчетного участка конвейера к горизонту, град;

$b$  – ширина желоба, мм;  $h_{\text{ж}}$  – полезная высота желоба, мм.

Обобщенный коэффициент сопротивления скребкового транспортера  $w_0$  в формуле (3.1) составляет 3–5. Мощность определится по формуле

$$N_{\text{в}} = W_{\Sigma} v / 1000 \text{ кВт}$$

### 3.3. Винтовые конвейеры

#### 3.3.1. Характеристика конвейеров

Винтовые конвейеры применяют для перемещения насыпных грузов. Техничко-экономическая эффективность применения винтовых конвейеров обеспечивается их достоинствами: простотой устройства, невысокой стоимостью изготовления, компактностью в поперечном сечении, возможностью герметизации желоба, удобством и простотой загрузки и разгрузки, простотой ухода в процессе эксплуатации, возможностью использования их на открытых площадках в любое время года. Эти качества определили широкое применение винтовых конвейеров в различных отраслях производства, несмотря на их некоторые недостатки. К числу последних следует отнести ограниченность длины транспортирования (30 м) и производительности (100 т/ч); относительно высокий

расход энергии; необходимость равномерной подачи продукта; наматывание на винт и заклинивание его посторонними предметами, попадающими в желоб с материалом. Повышенный износ деталей шнеков, особенно при транспортировании абразивных материалов, грунтовых масс, различных смесей.

Стационарные горизонтальные винтовые конвейеры применяются с различными схемами привода, в частности от электродвигателя через ременную передачу, через ременную и цилиндрическую зубчатую передачи и от электродвигателя через ременную и коническую зубчатую передачи [63]. Винтовые конвейеры длиной до 15 м с мощностью привода до 2,8 кВт изготавливают также с червячным редуктором и индивидуальным электродвигателем. Желоб конвейера собирается из секций длиной по 2 м. Концевые секции могут иметь длины 0,5; 1,0; 1,5 и 2 м. Сверху желоб закрывается съемными крышками на поворотных зажимах. Привод к горизонтальному и вертикальному конвейерам, когда они применяются в одном агрегате, выполняется по различным схемам. В частности, от редуктора 1 (рис. 3.17) вращается распределительный вал 5, который через цилиндрическую зубчатую пару 2 передает движение горизонтальному конвейеру 6, а через коническую зубчатую передачу 3 – вертикальному конвейеру 4.

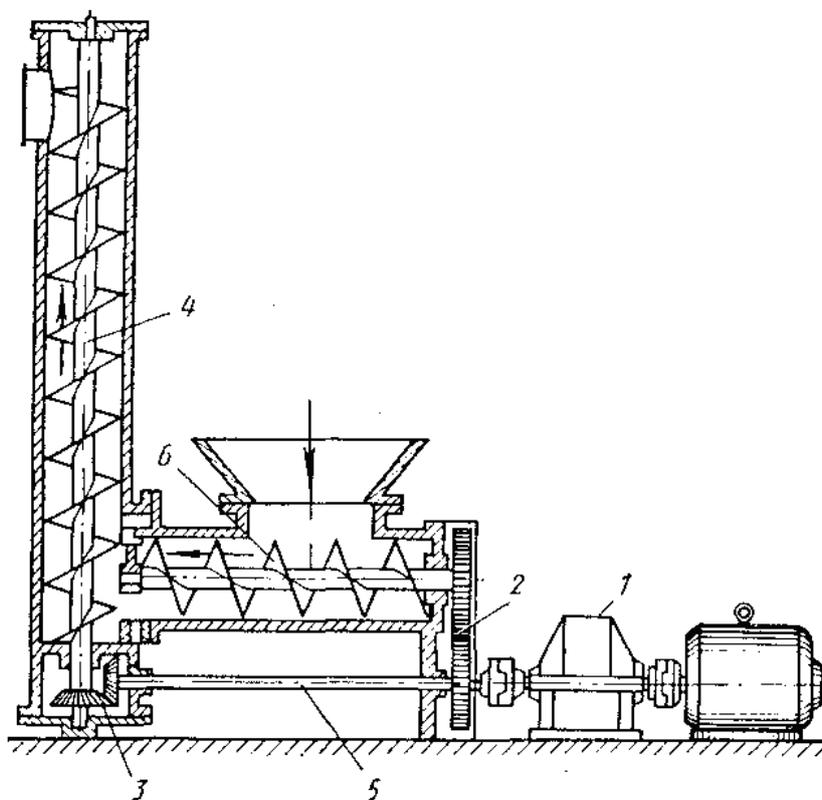


Рис. 3.17 Сочетание горизонтального и вертикального шнеков

В литературе по подъемно-транспортным машинам приводятся эмпирические сведения о порядке расчета винтовых транспортеров, определения производительности и мощности, потребляемой ими. Производительность винтового конвейера рекомендуется определять по формуле

$$G = \frac{60\pi D^2}{4} \psi S n \gamma_0 c = 47 D^2 \psi S n \gamma_0 c, \quad (3.2)$$

где  $G$  в т/ч;  $D$  в м;  $S$  – шаг винта в м;  $n$  в об/мин;  $\gamma_0$  – объемный вес в т/м<sup>3</sup>;  $\psi$  – коэффициент заполнения желоба.

В данном случае  $\psi$  рассматривается в виде отношения средней площади насыпки материала в желобе к площади нормальной проекции винта.  $c$  – коэффициент, учитывающий влияние угла наклона оси шнека к горизонту на его производительность. Рекомендация распространяется на углы  $\delta$  в пределах от 0 до 20° (табл. 3.1). При  $\delta > 8^\circ$  принимается  $S = 0,8D$ , а в нормальных условиях работы рекомендуется  $S = D$ .

Допускаемый коэффициент заполнения желоба принимается по табл. 3.2.

Таблица 3.1  
Значение коэффициента «с»  
от угла наклона винта

Коэф- фициент	Углы				
	0°	5°	10°	15°	20°
$c$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,63

Таблица 3.2  
Допустимые значения коэффициентов заполнения желоба

Наименование материала	$\psi$	Допускаемые об/мин
Продукты помола (угольная пыль, мука, известь, графит)	0,45–0,30	50–120
То же, абразивные (сухая зола, цемент, гипс, мел)	0,35–0,25	50–120
Землистые или зернистые (зерно, древесные опилки, торф)	0,40–0,30	50–120
То же, абразивные (песок, формовочная земля, гранулированные шлаки)	0,40–0,30	50–120
Мелкокусковые неабразивные и полуабразивные (орешковый уголь, известковая порода ...)	0,40–0,25	50–100
То же, абразивные (сухая глина, сера, руда ...)	0,30–0,25	40–80
Липкие (влажный сахар)	0,40–0,20	20–60
Тестообразные (цементный раствор, мучное тесто)	0,40–0,20	20–60

Окончание табл. 3.2

Наименование материала	$\psi$	Допускаемые об/мин
Слеживающиеся и спекающиеся (сырая глина, битуминозные материалы)	0,40–0,20	20–60
Хлопьеобразные и волокнистые (торфяные очесы, химикалии)	0,30–0,25	20–60

Для ленточных винтов при транспортировании легкосыпучих пылевидных и зернистых грузов коэффициент  $\psi$  берется пониженным на 10–15 %. Используется рекомендация, предусматривающая и более укрупненную классификацию материалов. При этом  $\psi$  принимается по табл. 3.3.

Таблица 3.3

*Значения коэффициента заполнения шнека*

Материал	$\psi$	Материал	$\psi$
Легкий и неабразивный (зерновые продукты, мука, древесные опилки, графит)	0,9	Тяжелый и малоабразивный (поваренная соль, кусковой уголь, сухая глина)	0,25
Легкий и мелкоабразивный (гипс, мел, угольная пыль, асбест, торф, сода)	0,32	Тяжелый и абразивный (цемент, зола, песок, глина сырая, дробленая руда, шлак)	0,125

По нормам «Союзпроммеханизации» наибольшие и наименьшие числа оборотов винтовых конвейеров должны соответствовать табл. 3.4, если транспортируются легкие материалы: зерно, семя и др.

Таблица 3.4

*Рекомендуемые числа оборотов*

Число оборотов	Диаметр $D$ в мм						
	150	200	250	300	400	500	600
$n_{\min}$	23,6	23,6	23,6	19	19	19	15
$n_{\max}$	150	150	118	118	95	95	75

Для тяжелых абразивных грузов (зола, песок) число оборотов рекомендуется уменьшать на 50 %, для тяжелых неабразивных грузов (соль) – на 30 %. При использовании вертикальных винтовых конвейеров числа оборотов превосходят значения, указанные в табл. 3.4. Рекомендуется принимать следующие числа оборотов вертикального шнека, в зависимости от диаметра винта (см. табл. 3.5).

Таблица 3.5

Рекомендуемые числа оборотов вертикального шнека [64]

$D$ в мм	100	150	200	250
$n$ в об/мин	400–600	30–550	250–500	200–450

Мощность, потребная для винтовых конвейеров, определяется по формуле [63]

$$N = \frac{G}{367}(L_r W + H),$$

где  $G$  – производительность в т/ч;  $L_r$  – горизонтальная проекция пути перемещения груза в м;  $H$  – высота подъема груза в м;  $W$  – опытный коэффициент сопротивления при движении груза по желобу (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Значение опытного коэффициента от вида дисперсного материала

Материал	$W$
Сухой неабразивный (зерновые продукты, мука, древесные опилки, угольная пыль)	1,2
Влажный неабразивный (сахар-рафинад, сырой солод, хлопковые семена)	1,2
Полуабразивный (сода, кусковой уголь, поваренная соль)	2,5
Абразивный (гравий, песок, цемент)	3,2
Сильно абразивный и липкий (зола, формовочная земля, известь, сахарный песок сырой, сера)	4,0

Для вертикального винтового конвейера применяется формула в виде

$$N = \frac{GHk}{367\eta}(W + 1),$$

где  $G$  – производительность т/ч;  $H$  – высота подъема в м;  $k = 1,5–1,20$  – коэффициент, учитывающий потери на трение винта в подшипниках;  $\eta$  – к.п.д. привода (0,85–0,95);  $W = 4,5–6,9$  – для пшеницы;  $W = 3,6–4,9$  – для овса;  $W = 5,5–7,3$  – для соли;  $W = 12–13$  – для картофеля с гидроподачей.

Опыт конструирования и эксплуатации горизонтальных и с незначительным наклоном низкоскоростных винтовых конвейеров свидетельствует о целесообразности их работы при частичном заполнении пространства между винтовой поверхностью и кожухом шнека. При сплошном заполнении наблюдается снижение осевой скорости, увеличение мощности, расходуемой конвейером, повышение износа деталей

установки. Крутонаклонные винтовые конвейеры с невысокой скоростью вращения при небольших коэффициентах заполнения сыпучий материал перемещать не могут, так как поступательное движение в этих условиях все более сочетается с вращательным, и при частичном заполнении шнека производительность его может стать равной нулю. Условия работоспособности шнека подробно рассмотрены в [63].

### 3.3.2. Гибкие шнеки или спирально-винтовые конвейеры

Гибкие шнеки или спирально-винтовые конвейеры отличаются простотой устройства, удобством эксплуатации, герметичностью, возможностью изготовления в условиях обычных механических мастерских. Пружина или спираль, располагающаяся внутри гибкого рукава, при вращательном движении обеспечивает перемещение материала по любой трассе, включая и криволинейные участки [63]. Применяются односпиральные и двухспиральные винтовые конвейеры. Принцип работы транспортеров с гибкими шнеками ясен из приведенных схем на рис. 3.18–3.20.

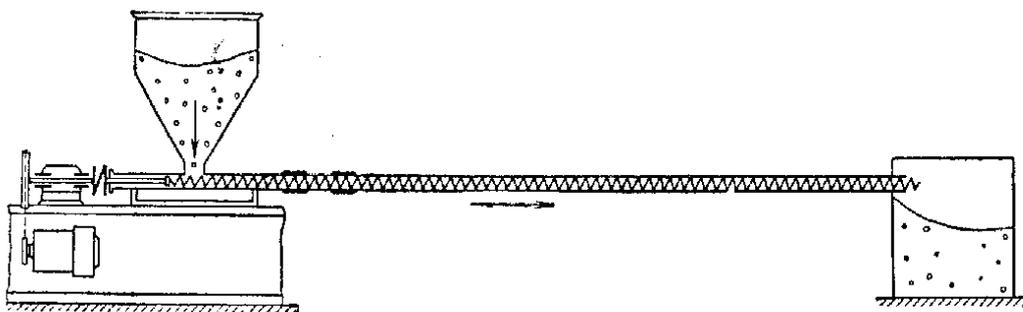


Рис. 3.18. Схема горизонтального гибкого шнека

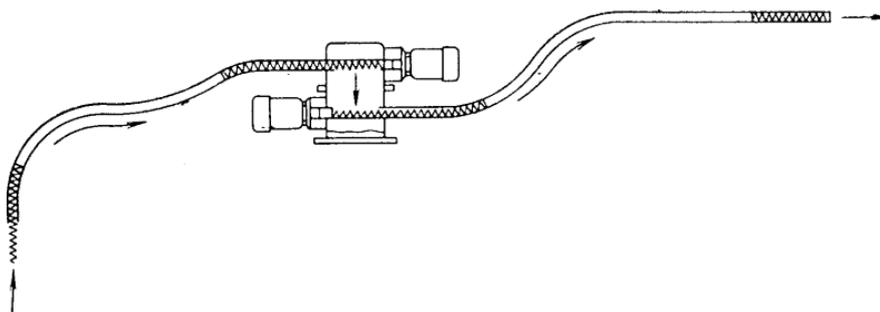


Рис. 3.19. Спирально-винтовой транспортер с перегибом шланга

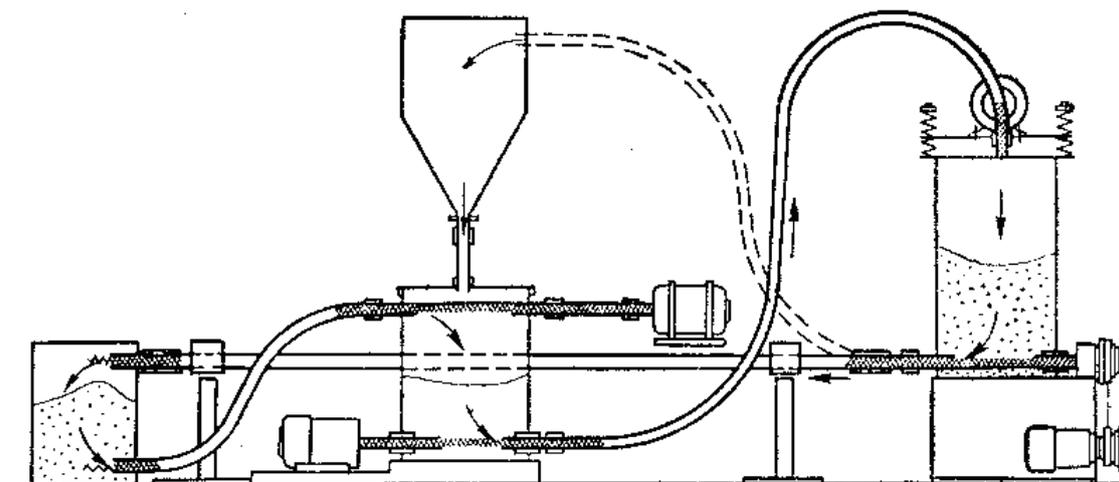


Рис. 3.20. Спирально-винтовой транспортер с изменением трассы транспортирования

Для хорошо сыпучих материалов производительность гибких шнеков определяется с погрешностью 12 % формулой

$$G = 40F_d n \gamma_0 \text{ т/ч,}$$

где  $F_d$  – рабочая площадь поперечного сечения гибкого шнека.

Мощность, потребляемую спиралью гибкого шнека, можно представить в виде секундной суммы работ  $A_1 + A_2 + A_3$ , где  $A_1$  – работа подъема материала;  $A_2$  – работа сил трения между материалом и поверхностью вращающейся пружины;  $A_3$  – преодоление сопротивления между материалом и внутренней поверхностью кожуха-рукава. В действительности, мощность, расходуемая на работу гибкого шнека, складывается еще из мощности на удар вращающейся пружины о поступающий в рукав материал и сообщение ему кинетической энергии; на преодоление трения пружины о кожух при их контакте во время сотрясений в местах перегиба трассы; на перемешивание и измельчение материала в процессе транспортирования. В [63] приведены расчетные соотношения для значений приведенных работ. Однако в практике пользуются формулами, содержащие опытные коэффициенты.

$$N_{\text{мех}} = \pm \frac{GH}{367} + \frac{GL_{\text{тр}}W}{367} \text{ кВт,}$$

где  $G$  – производительность гибкого шнека (т/ч);  $H$  – высота подъема материала (м);  $L_{\text{тр}}$  – длина трассы. Многочисленные эксперименты, проведенные по определению  $W$  при транспортировании кукурузной крупы и хлористого калия, свидетельствуют о том, что величина  $W$  для всех пружин при прямолинейной горизонтальной трассе  $W_a = 7-10$ , а при

транспортировании по S-образной трассе в вертикальном направлении  $W_e = 25-30$ . Опыт работы по транспортированию сыпучих материалов показывает, что вследствие практически ограниченного максимального диаметра кожуха гибкого шнека  $D = 0,1$  м можно рекомендовать транспортировать ими лишь порошкообразные и мелкозернистые материалы, которые, в свою очередь, по транспортным свойствам подразделяются на категории [63].

### 3.4. Элеваторы

Элеваторы применяются для непрерывного подъема сыпучего груза. Преимуществом элеватора является простота конструкции, возможность создания герметичного кожуха. Недостатком является образование пылевого столба по высоте элеватора при транспортировке тонкодисперсных материалов, который обуславливает повышенное давление пылевоздушной смеси в нижней части машины и необходимости аспирирования всей машины. Механические элеваторы используют для непрерывного подъема грузов и делят на ковшовые, люлечные и полочные [3].

Ковшовые элеваторы (рис. 3.21) применяют преимущественно для подъема кусковых, зерновых и гранулированных материалов, и применяют для подъема пылевидных материалов (мука, цемент и др.) [3, 71, 104]. Преимущества механических элеваторов заключаются в сохранности транспортируемого материала, простоте конструкции, надежности при эксплуатации. Движение ковшей создает завихрения воздуха в каналах норш, которое способствует повышенному диффузионному переносу пыли в объеме норши, поэтому по высоте норши формируется пылевой столб с концентрацией пыли, зависящей от содержания мелкой фракции в дисперсном материале, степени его электризации и распыления материала движущимися ковшами.

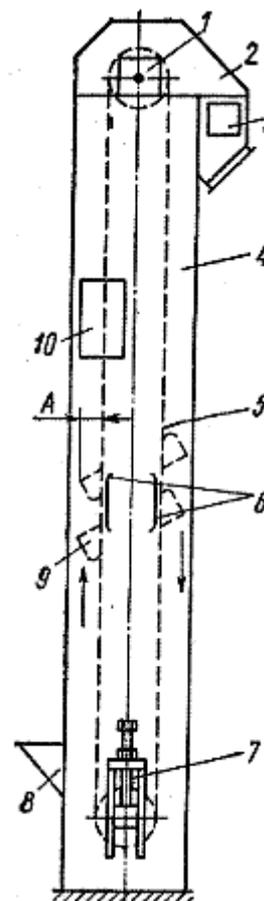


Рис. 3.21. Схема ковшового элеватора:  
 1 – барабан,  
 2 – головная часть,  
 3 – разгрузка, 4 – кожух,  
 5 – тяговый орган,  
 6 – обтекатели,  
 7 – натяжное устройство,  
 8 – загрузочный патрубок,  
 9 – ковши

На сыпучий груз, находящийся в ковше, в процессе обхода последним верхнего барабана действуют объемные  $G$ ,  $F_{ц}$  и граничные силы (рис. 3.22). При центробежной разгрузке  $l_n < r$  (рис. 3. 23).

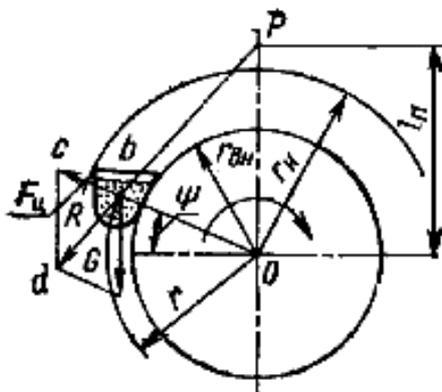


Рис. 3.22. Схема действующих сил на материал в ковше:  
 $G$  – сила тяжести,  $F_{ц}$  – центробежная сила,  $R$  – равнодействующая сила,  $r$  – радиус окружности, проходящий через центр тяжести ковша,  $\psi$  – угол поворота от горизонтального направления,  $P$  – полюс (точка пересечения линии равнодействующей и вертикальной оси),  $l_n$  – расстояние до полюса

При повороте ковша происходит скольжение материала в поверхностном слое дисперсного тела и происходит «перелив» части материала через кромку внешней стенки, а затем происходит скольжение материала по внешней стенке. Скольжение по стенке ковша возникает, когда угол  $\tau$  (рис. 3.23) между вектором объемной силы и стенкой

$$\tau < 90^\circ - \varphi_b,$$

где  $\varphi_b$  – угол трения груза о внешнюю стенку ковша [71], ( $\text{tg}\varphi_b$  – коэффициент внешнего трения).

$$\begin{aligned} \arctg \frac{r \sin \psi_2 - l_n}{r \cos \psi_2} - \psi_2 &= 90^\circ + \gamma_0 + \varphi_b, \\ \tau &= 180^\circ - (\gamma + \xi_2), \\ \gamma &= \gamma_0 - \psi_2, \\ \text{tg} \xi_2 &= \frac{r \sin \psi_2 - l_n}{r \cos \psi_2}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

В табл. 3.7 приведены значения величины  $\xi_2$  от  $\psi_2$  и разница этих величин.

Выбор значений  $\xi_2$ ,  $\psi_2$  определяется суммой величин  $\gamma_0 - 90 + \varphi_b$ , которая зависит от свойств материалов дисперсного груза и ковша.  $\gamma_0 = 110-150^\circ$ ,  $\text{tg}\varphi_b = 0,1-0,6$ . Практика показывает, что более половины дисперсного материала выводится из ковша на первой четверти поворота.

При этом траектории крупных частиц (зерно, кусковые частицы) в основном проходят в область разгрузочного патрубка.

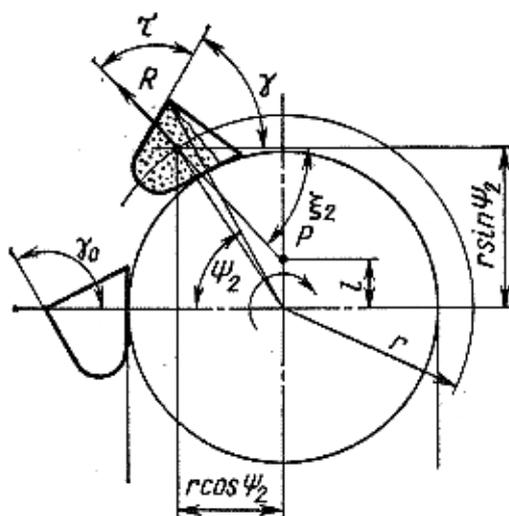


Рис. 3. 23.  $\gamma_0$  – угол наклона внешней стенки ковша к горизонту,  $\xi_2$  – угол наклона к горизонту вектора объемной силы  $R$ ,  $\psi_2$  – угол поворота от горизонтального направления, при котором начинается скольжение материала по внешней стенке,  $\tau$  – угол между равнодействующей силой и внешней стенкой

В приведен метод расчета траекторий частиц без учета сопротивления воздуха [71]. Это дает неправильные оценки скоростей и траекторий мелких частиц. Уравнение движения мелкой частицы по оси  $x$  в предположении неподвижной воздушной среды имеет вид

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{V_x}{\tau}, \quad \tau = \frac{\rho_\delta \delta^2}{\rho 18\nu},$$

где  $\rho$ ,  $\rho_\delta$  – плотности воздуха и частицы,  $\delta$  – диаметр частицы,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости [191].

Решение имеет вид  $V_x = v_{нц} - \frac{x_\delta}{\tau}$ , расстояние, пройденное частицей  $x_\delta = v_{нц} \cdot \tau$ . Величина  $\tau$  для мелких частиц находится в диапазоне  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  секунды, поэтому  $V_y = g\tau \ll v_{нц} = \omega r_n$ ,  $x_\delta \ll r_n$ .

Таблица 3.7

Значения величин  $\psi_2$ ,  $\xi_2$

$\psi_2$	$\xi_2$	$\psi_2 - \xi_2$
20	0.12	19.82
30	10	20
45	27	18
60	45	15
70	57	13
80	75	5

Последнее соотношение показывают, что в головной части норри происходит накопление мелких частиц вследствие притока частиц и отсутствия отвода.

Уравнение движения крупной частицы в неподвижном воздухе имеет вид ( $\psi = 0,44$ )

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{V_x^2}{k}, \quad k = \frac{4 \rho_\delta \delta}{3 \rho \psi} \text{ (м)}. \quad (3.4)$$

Уравнение (3.4) можно преобразовать следующим образом

$$\frac{dV_x}{dx_\delta} = -\frac{V_x}{k},$$

откуда  $V_x = v_{\text{нц}} \exp(-x_\delta / k)$ . За время  $t = \frac{r_{\text{нц}}}{V_x}$ ,  $V_x = \frac{V_{\text{нц}}}{1 + \frac{r_{\text{нц}}}{k}}$ . Расчет показы-

вает, что  $V_y = \sqrt{kg} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2t\sqrt{g}}{\sqrt{k}}\right) \right]$ .

Для крупных частиц диаметром более 100 мкм величина  $k$  находится в диапазоне 0,3–30 метров, следовательно, величина  $x_\delta > 2r_{\text{нц}}$  и частицы попадают в разгрузочный патрубок.

Движение ковшей создает завихрения воздуха в каналах норри, которое способствует повышенному диффузионному переносу пыли в объеме норри.

Движение материала в норриях осуществляется в виде блоков, сгустков и отдельных частиц. Движущийся материал, выброшенный из ковша, эжектирует окружающую запыленную среду в верхний разгрузочный транспортер. Поэтому, часть мелких частиц захватывается крупными частицам вместе с эжектируемым воздухом [18]. Анализ имеющихся исследований позволяет сделать вывод, что для крупных частиц (более 100 мкм) коэффициент эжекции, равный отношению объемного расхода воздуха к объемному расходу дисперсного материала  $k_3 = Q_{\text{в}} / Q_{\text{м}}$ , находится в диапазоне 0,9–9 [18]. Будем называть агломераты, которые попали в выгрузной патрубок также крупными частицами. Обозначим  $G_{\text{н}}$  – подачу норри (кг/с),  $G_{\text{к}}$  – весовой расход крупных частиц, попавших в верхний транспортер (кг/с), плотность запыленного воздуха (плотность среды)  $\rho_{\text{с}} = \rho_{\text{в}} \left[ 1 + (c_\delta / \rho_{\text{в}}) \right]$ , где  $c_\delta$  – концентрация частиц кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха кг/м<sup>3</sup>. Объемный расход определяется через весовой по формуле  $Q_{\text{к}} = G_{\text{к}} / \rho_\delta$ , где  $\rho_\delta$  – плотность частиц, количество мелкой пыли с воздухом, эжектируемой крупными частицами

$$G_{c3} = Q_{c3} \rho_c = Q_{c3} \rho_B [1 + (c_\delta / \rho_B)] = Q_k k_c \rho_B [1 + (c_\delta / \rho_B)].$$

Подача нории  $G_H = G_{c3} + G_K$ . Используя приведенные соотношения, получим

$$c_\delta = \left( \frac{G_H - G_K}{G_K k} \frac{\rho_\delta}{\rho_B} - 1 \right) \rho_B.$$

При  $\frac{G_H - G_K}{G_K} = 0,02$  и  $\frac{\rho_\delta}{\rho_B} = 1000$ ,  $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ,  $k = 5$ ,  $c_\delta = 3,6 \text{ кг/м}^3$ .

Давление пылевого столба на башмак нории составляет величину  $P_{cm} = gHc_\delta$ . При высоте нории 40 м давление составляет 1,4 кПа, что сопоставимо с сопротивлением аспирационной установки. При повышенном давлении пыль из башмака нории поступает в загрузочный транспортер, распространяется по всей его длине и достигает начального пункта подачи материала. При отсутствии герметизации и аспирации пыль поступает в окружающую среду. Таким образом, нижняя часть нории находится под высоким избыточным давлением. Проектирование аспирации предусматривает расчеты объемов очистки воздуха, анализ всех параметров работы пылеулавливающих систем, подбор необходимого аспирационного оборудования и вентиляторов. Наиболее эффективным решением задач является применение 2-х и 3-х стадийных систем аспирации. Такие системы включают в себя пылеулавливающее оборудование различных типов (одинарные циклоны, батарейные установки циклонов, рукавные фильтры) и позволяют производить многоуровневую очистку от крупных, средних и мелких пылевых фракций [38].

#### **3.4.1. Аспирационные системы в механических элеваторных установках**

Причиной выделения пыли в местах перегрузки сыпучих материалов на транспортерную ленту является перенос материалом, перемещающимся по желобу, воздуха.

Механизм переноса двоякий:

- 1) перемещение воздуха, находящегося в пустотах между частицами материала;
- 2) движущийся материал вовлекает в движение окружающий воздух силами вязкости, так как желоб не полностью заполняется материалом.

Элементы элеватора, с помощью которых производится подъем сыпучих материалов, заключены в кожух по всей высоте. При этом при подъеме материала отсос воздуха осуществляют от башмака элеватора (места загрузки). Расход отсасываемого воздуха принимается в зависимости

от ширины ковша и высоты подъема в пределах 600–1700 м<sup>3</sup>/ч. Однако это касается транспортировки зернистых материалов. При транспортировке мелких частиц требуется большее количество отсасываемого воздуха.

Эффективная борьба с пылевыделениями возможна только с помощью местных отсосов (рис. 3.24). При интенсивных пылевыделениях единственными рациональными укрытиями служат всевозможные кожухи.

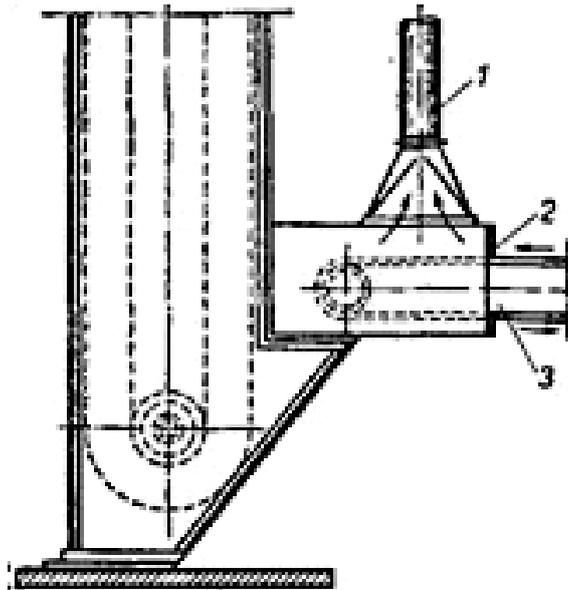


Рис. 3.24. Местный отсос на нории:

1 – отсасывающий патрубок, 2 – герметизирующий кожух, 3 – транспортер

Укрыть очаг пылеобразования и воспрепятствовать прорыву пыли через отверстия и неплотности укрытия – в этом заключается локализация пыли путем вентиляции.

Всасывающие панели и бортовые отсосы сравнительно редко применяются при борьбе с пылью. Однако они могут оказаться эффективными при незначительных и ненаправленных пылевыделениях, при которых образуется пылевое облако. Эти устройства применяются для аспирации узлов подачи материала на транспортеры загрузки нории.

В двухтрубной нории предусматривается аспирационный патрубок (см. рис. 3.25). В зерновых нориях для выведения пыли из каналов применяют промежуточные аспирационные вставки. Такое устройство применяется, если зерно, поступающее в норию, проходит стадию предварительного процесса обеспыливания. В распространенных системах с нориями, транспортирующих дисперсные материалы фильтры не применяются из-за их неработоспособности.

На элеваторах эксплуатируют неоправданно большое число (50–90) аспирационных установок, в зависимости от типа рабочей башни, количества силосных корпусов, приемных устройств с железной дороги и автомобильного транспорта. Энергоемкость приводов вентиляторов и шлюзовых затворов составляет до 30 % от общего потребления электроэнергии [203]. При таком количестве и затратах на их содержание не удается достичь достаточной эффективности обеспыливания. Эффективность очистки воздуха от пыли перед выбросом его из аспирационных установок должна обеспечивать установленную ПДК пыли в окружающем воздухе на территории хлебоприемных предприятий и элеваторов, равную  $1,2 \text{ мг/м}^3$ . Однако этот показатель на многих элеваторах не выдерживается по причине использования морально устаревших и технически изношенных пылеуловителей.

Опыт эксплуатации батарейных циклонных обеспыливателей типа БШЦ с общим пылеприемным бункером (рис. 3.26) показывает, что общая эффективность может оказаться намного ниже, чем эффективность обеспыливания в одиночном циклоне из-за гидравлической неуравновешенности элементов, при которой возникают перетоки газа между ними. В случае перетоков воздуха вынужденный вихрь формируется внутри элемента, частицы не могут пройти в пылевыводное отверстие, происходит их накопление и вынос в зону очищенного газа [32, 34].

Другой причиной неудовлетворительной работы батарейных циклонов может быть более интенсивное протекание жгутообразования из частиц в конической части циклонных элементов. С ростом концентрации частиц на входе в аппарат происходит торможение крутки потока, особенно в области

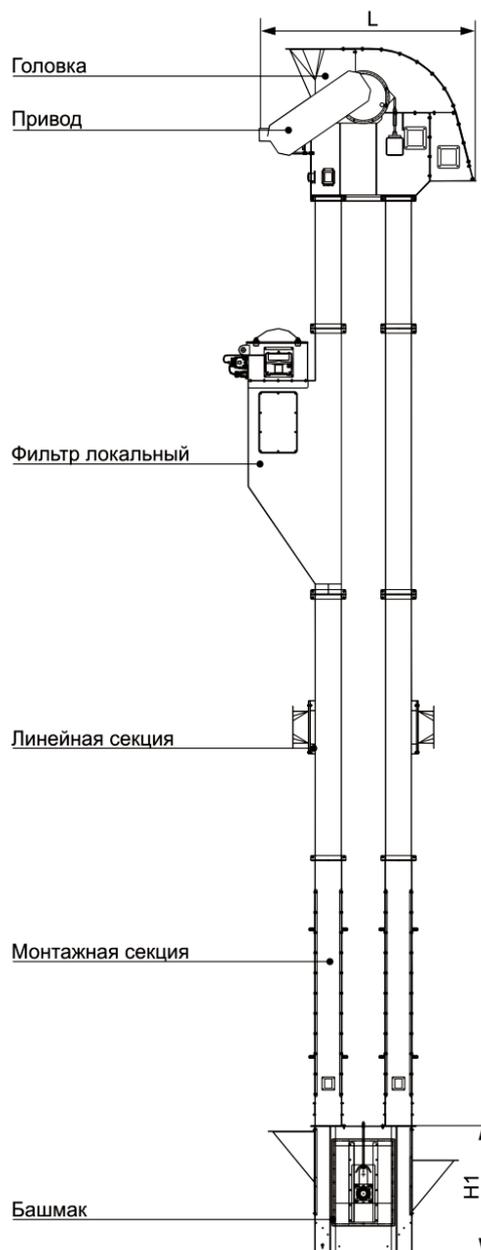


Рис. 3. 25. Нория с аспирационным патрубком

пылевого отверстия. Анализ показывает, что в конической части при повышенных концентрациях крупных частиц происходит их накапливание и начало вынужденного вихря перемещается из приемника в объем циклона. В элеваторных системах воздухоочистки концентрация частиц колеблется. В конических циклонах и цилиндрических в области пылевых отверстий происходит усиление нестационарного взаимодействия частиц на поток в сотни раз. Поэтому начало формирования вынужденного вихря может перемещаться в объем циклона периодически. В батарейных воздухоочистителях это является одной из причин понижения эффективности обеспыливания потока и нарушения процесса сепарации.

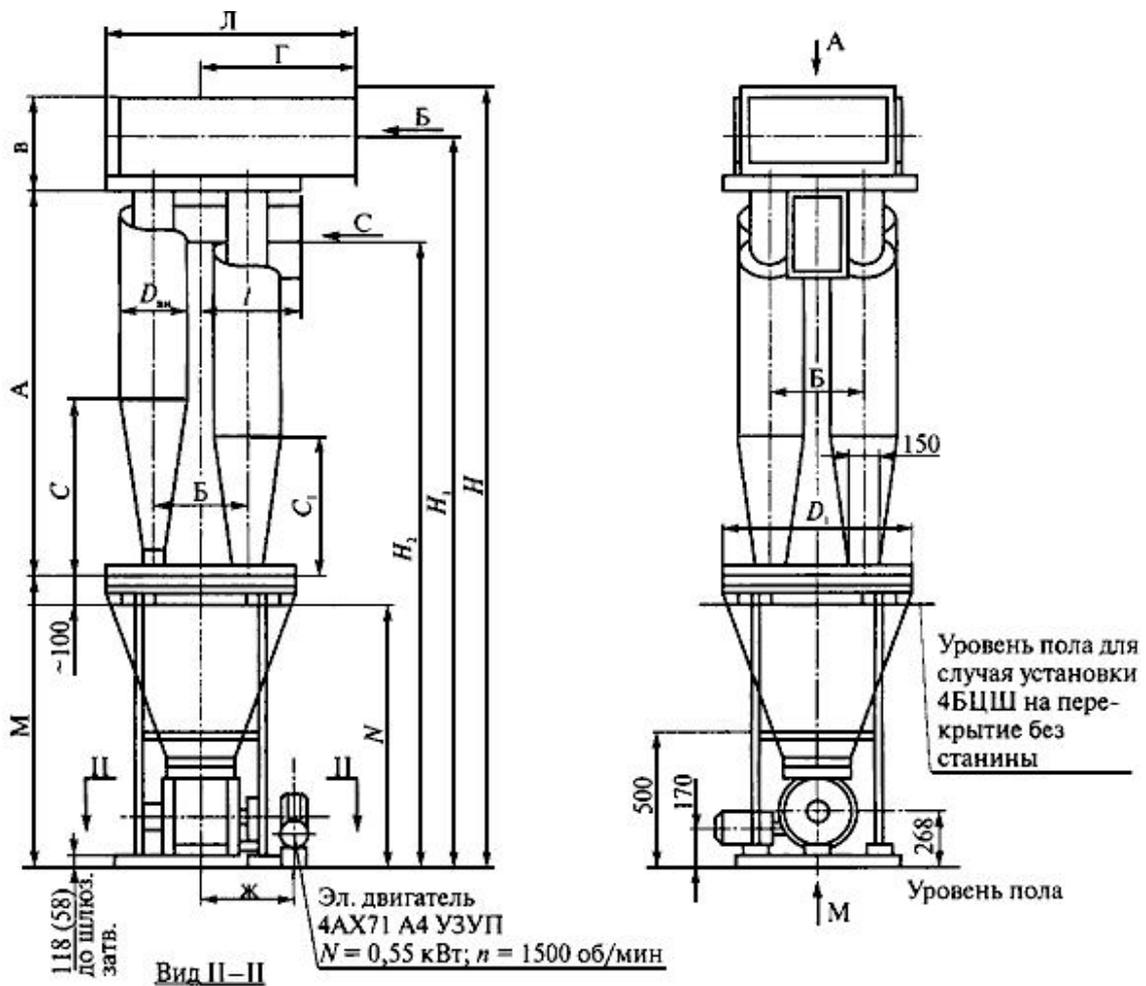


Рис. 3.26. Групповой циклон БЦШ с общим пылесборником

Также причиной снижения эффективности может быть перемешивание натекающих из пылевыводных отверстий факелов в приосевые зоны элементов, в результате чего в бункере циклона образуется турбулентная буря и осаждение мелких частиц невозможно.

В групповом циклоне УЦ (рис. 3.27) отсепарированная пыль в каждом циклонном элементе поступает непосредственно в шнек. Сепарация частиц в элементе неудовлетворительна, поскольку не проходит стадию завершения, которая заключается в затухании вихря в приемнике и укладке образовавшихся жгутов пыли в приемник [34]. Кроме того, переток воздуха между циклонными элементами через шнек имеет место, поскольку отсутствует герметизация в самом шнеке. Поэтому эта двухступенчатая схема не способна обеспечить очистку воздуха от мелких частиц [34].

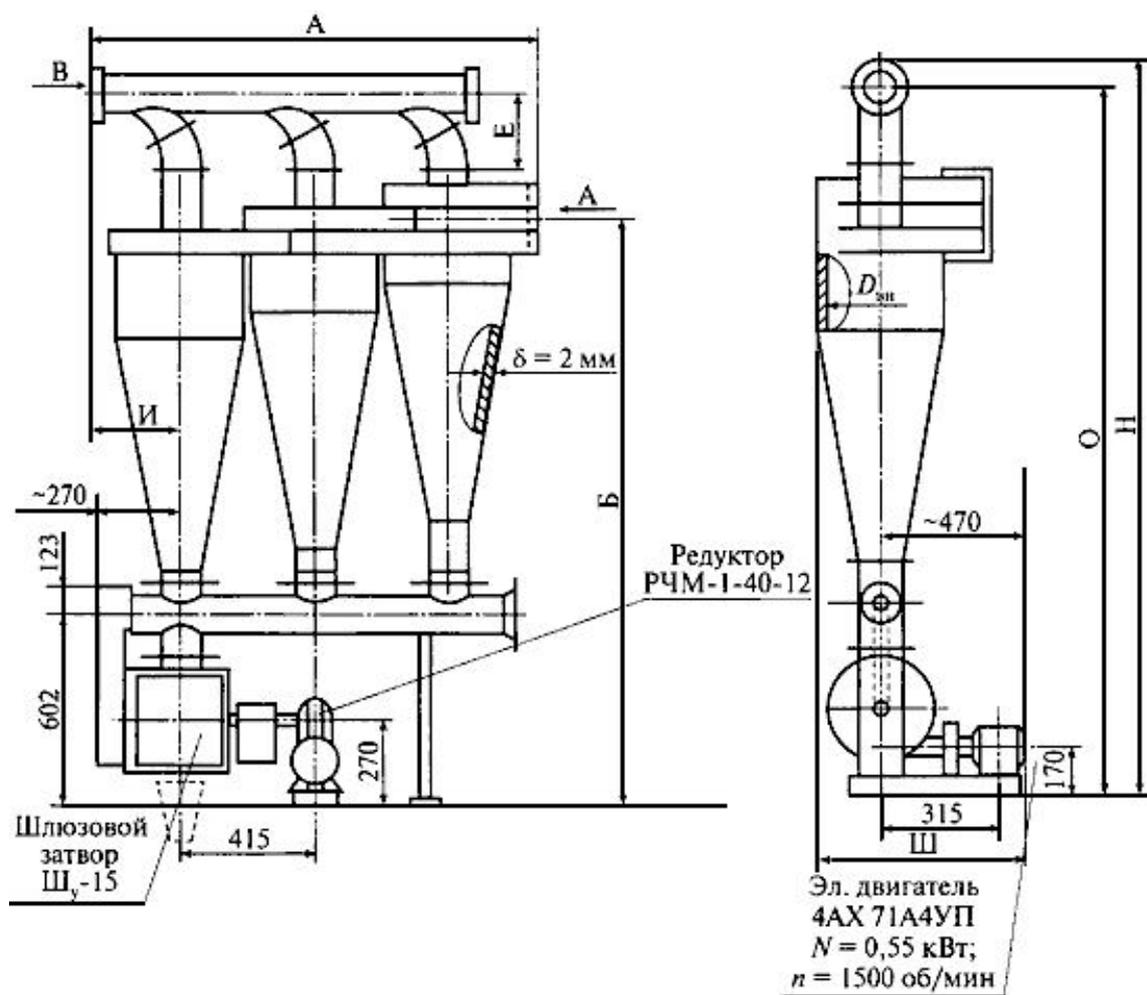


Рис. 3.27. Групповой циклон УЦ с общим шнеком – приемником пыли

Еще одним недостатком этих циклонов является образование отложений мелкой пыли. Механизм этого явления рассмотрен в [146, 47].

В табл. 3.8 приведены эффективности очистки газа от золы в групповом аппарате из 8 циклонов ЦН-11 диаметром 800 мм и одиночного циклона ЦН-11 диаметром 800 мм в процентах.

Таблица 3.8

*Эффективность очистки газа от золы в циклонных аппаратах при различной компоновке*

Тип пылеуловителя	Фракция, мкм		
	0–10	10–20	20–30
Одиночный циклон ЦН-11, диаметр 800 мм	83	91	98
Групповой циклон из 8 элементов ЦН-11, диаметр 800 мм	24,7	29,8	91,3

Из таблицы видно, что относительный пропуск пыли для группового циклона, в зависимости от размеров частиц, в 4–8 раз выше, чем для одиночного циклона. Задача решается более эффективно с использованием противоточных концентраторов [43, 47].

## ГЛАВА 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЧАСТИЦ

Преимуществом пневматического транспорта по сравнению с другими видами является то, что транспортную трассу его можно приспособить к местным условиям [184]. На одной и той же трассе можно транспортировать материал горизонтально, вертикально и наклонено. У механических же транспортеров комбинирование различных направлений транспорта связано с большими трудностями и большими капитальными затратами. Пространство, занимаемое пневмотранспортной системой, значительно меньше занимаемого механическими транспортерами. Наибольшее пространство занимают воздуходувные машины (источники подачи транспортирующего газа), питатели и отделительные устройства. Объем самого транспортного трубопровода невелик. Трубопровод длиной 100 м диаметром 150 мм занимают всего около 2 м<sup>3</sup>. Это очень небольшой объем, если учесть, что по этому трубопроводу можно при определенных транспортных условиях транспортировать 100–200 т материала в час. С другой стороны, ленточный транспортер на такую же производительность имеет ширину ленты 1 м, и только 2 пог. м ленточного транспортера занимают такой же объем, как 100 м пневмотранспортного трубопровода, не учитывая при этом площадь для обслуживающего персонала. Это обстоятельство имеет большое значение для уменьшения строительного объема соответствующего технологического объекта, что дает большую экономию на строительных затратах. Типичным примером этого являются данные по применению пневматического транспорта на мукомольных мельницах. Следует также учитывать, что при пневматическом транспортировании материал все время изолирован и не попадает в рабочее пространство производства. Это обеспечивает беспыльность производства, благодаря чему отпадает надобность в больших эксплуатационных и капитальных затратах на вытяжные устройства в местах, где работают механические транспортеры, особенно ленточные. Основным условием устойчивой работы пневмотранспортной системы является отсутствие завалов, пробок из уплотненного материала. Требуется высокая квалификация персонала в эксплуатации систем транспорта с изменяющимися свойствами материала. Наиболее успешное применение пневмотранспорта в цементной промышленности объясняется спецификой производства и потребления цемента, связанной с однообразием транспортных операций, а также единством физико-механических свойств различных марок цемента, определяющих пневмотранспортный процесс [128].

При экономической оценке пневматического транспорта необходимо исходить из единого решения всего технологического комплекта, а не судить по одному показателю, который неблагоприятен по сравнению с другим средством транспортирования. И наоборот, нельзя рекомендовать применение пневматического транспорта там, где свойства транспортируемого материала (размеры частиц, влажность, большая абразивность) делают применение пневматического транспорта неэкономичным [184].

#### 4.1. Пневмотранспорт взвесью

Это условное понятие режима транспортирования дисперсных сред в трубах, при котором поток однороден по трассе, а изменение давления в конкретной точке потока по порядку меньше, статического давления в данной точке потока. Механизм взвешенного транспортирования мелких частиц в трубах объясняется влиянием турбулентных пульсаций в потоке на частицы. Механизм взвешенного транспортирования крупных частиц объясняется возникновением подъемных сил Магнуса при обтекании газом вращающихся частиц, ударными силами при взаимодействии частиц с ограждающими поток поверхностями [195]. К этому виду транспорта относят условно и транспорт частиц «волочением», при котором часть материала перемещается по дну трубопровода в виде волн, дюн.

##### 4.1.1. Транспорт под разрежением

Основным элементом вакуумной установки является вакуум насос, в качестве которого применяются эжекторные устройства, высоконапорные вентиляторы или водокольцевые насосы [122]. На рис. 4.1 показана схема работы эжектора

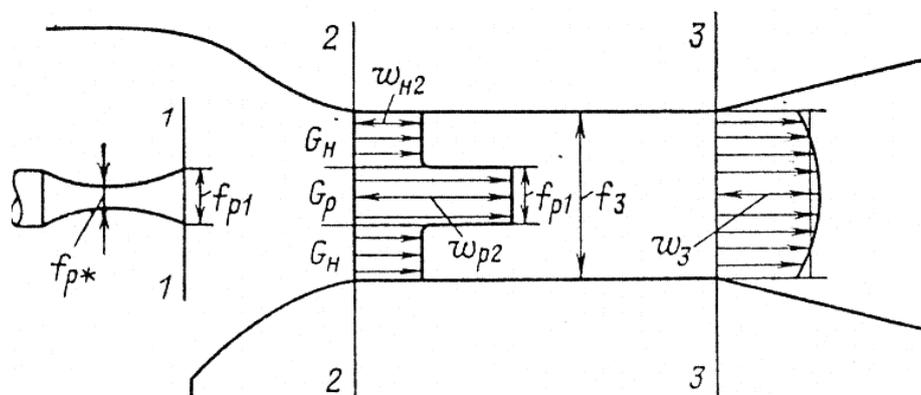


Рис. 4.1. Эпюры скоростей во входном и выходном сечениях камеры смешения

Сжатый рабочий газ истекает из сопла с высокой скоростью и при взаимодействии с эжектируемым потоком увеличивает его количество движения. При этом в системе возникает разрежение [170].

На рис. 4.2 представлена схема парового эжектора.

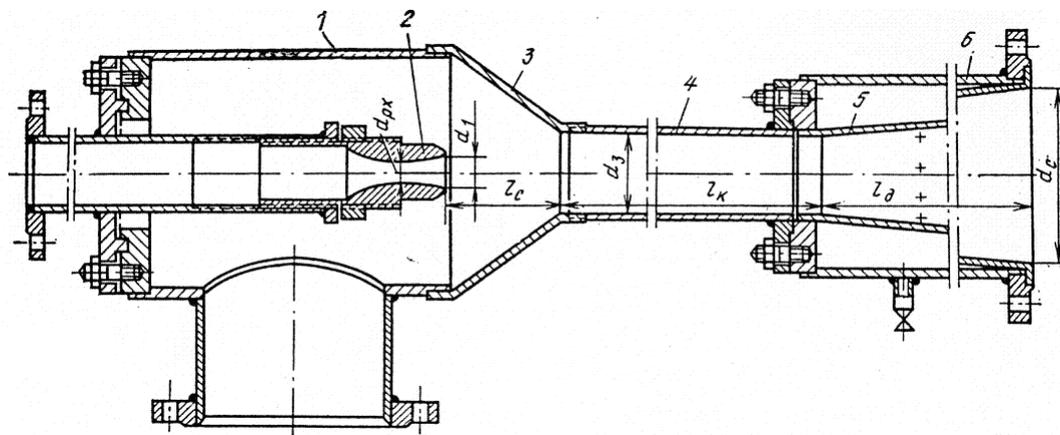


Рис. 4.2. Пароструйный компрессор:

1 – цилиндрический корпус приемной камеры; 2 – рабочее сопло; 3 – переходник;  
4 – корпус камеры смешения; 5 – диффузор; 6 – корпус.

Высоконапорные вентиляторы имеют двухступенчатую схему повышения давления (разрежения). На рис. 4.3 представлена двухступенчатая газодувка, которая выполнена в результате последовательного соединения колес с низким коэффициентом удельного числа оборотов [171].

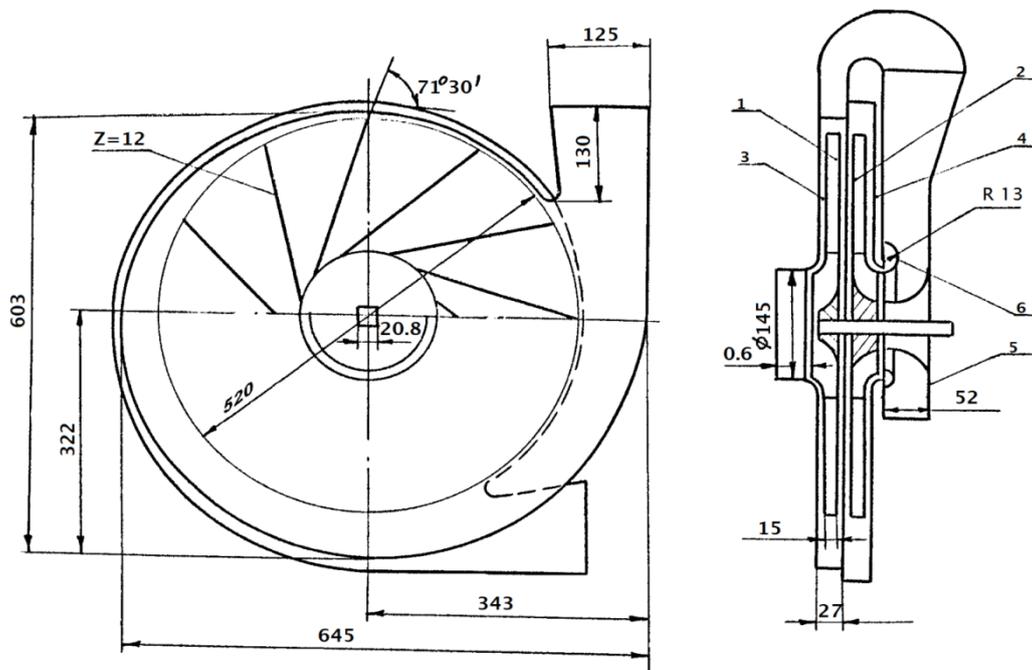


Рис. 4.3. Схема газодувки

На рис. 4.4 приведены расчетные характеристики газодувки. Как видно на рис. 4.4, в области возможных изменений расходов (545–606 м<sup>3</sup>/ч) напорная характеристика с точки зрения устойчивости работы нисходящая, КПД имеет максимальное значение, мощность изменяется незначительно. Преимуществом этой характеристики является также обстоятельство, что с увеличением расхода (при прекращении поступления материала в пневмотранспортный трубопровод) потребляемая мощность остаётся на одном уровне.

Всасывающие системы применяют в основном при переносе материала из нескольких точек в одну, при этом длина трубопроводов обычно не превышает 200 м. С увеличением длины трубопровода повышается гидравлическое сопротивление, которое в вакуумных установках, как правило, должно быть не более 40 кПа.

Определяющим фактором надежности работы пневматических систем является скорость потока воздуха. В вакуумных системах она должна быть не менее 20 м/с.

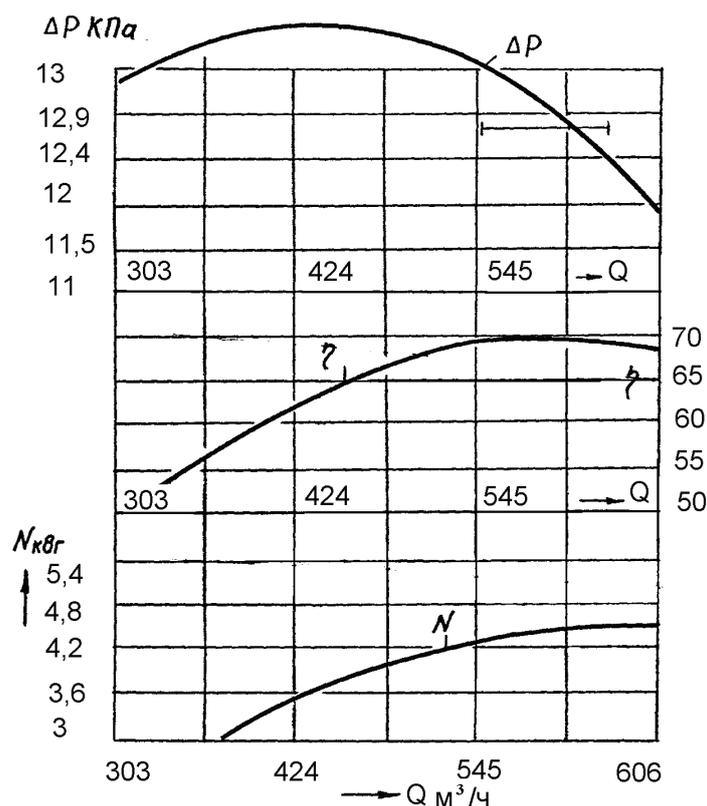
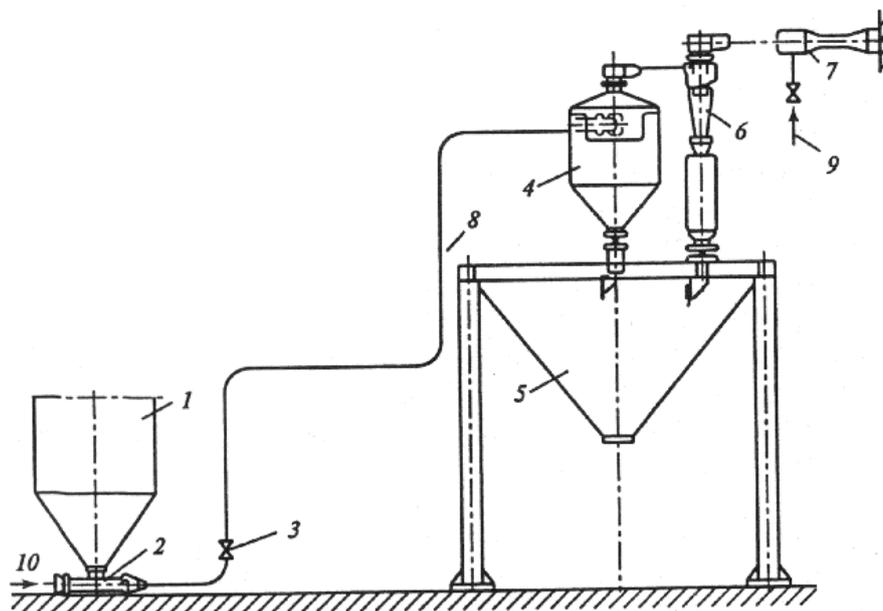


Рис. 4.4. Расчетные характеристики газодувки

На рис. 4.5 представлена вакуумная система золошлакоудаления на базе парового эжектора, а на рис. 4.6 – на базе вакуумного насоса. Зола из бункера золоуловителя 1 поступает в приемную насадку 2.

Паровым эжектором 7 создается разность давлений в начале и конце установки. Разреженный атмосферный воздух подхватывает со дна насадки 2 золу и транспортирует ее по металлическому трубопроводу 8 в циклон 4. В циклоне воздух проходит первую ступень очистки от взвешенных частиц и освобождается от крупных фракций. Предварительно очищенный в циклоне воздух поступает для дополнительной очистки в пылеуловитель 6, где отделяется мелкая пыль. После удаления золы из одного золового бункера приемную насадку 2 отключают пробковым краном 3. Таким же способом удаляют золу из других золовых бункеров. Осевшая зола в циклоне и пылеуловителе поступает в сборный бункер 5. Очищенный воздух эжектором направляется в дымовую трубу.

Условием применения вакуумных систем пневматического золошлакоудаления является сыпучесть транспортируемого материала. Сухая зола обладает этим свойством. В целях обеспечения сыпучести шлак подвергают предварительному дроблению в дробилках, установленных под шлаковыми бункерами котлов. Максимальный размер частиц дробленого шлака должен составлять не более 20–30 мм, средний размер – не более 5 мм [122]. Обеспечив достаточно однородное дробление шлака, можно организовать совместное пневматическое, в частности вакуумное, удаление его с золой.



*Рис. 4.5. Технологическая схема вакуумной системы пневматического золошлакоудаления с паровым эжектором:*

*1 – бункер; 2 – насадка; 3 – пробковый кран; 4 – циклон-осадитель; 5 – сборный бункер; 6 – пылеуловитель; 7 – паровой эжектор; 8 – трубопровод; 9 – подача пара; 10 – подача воздуха*

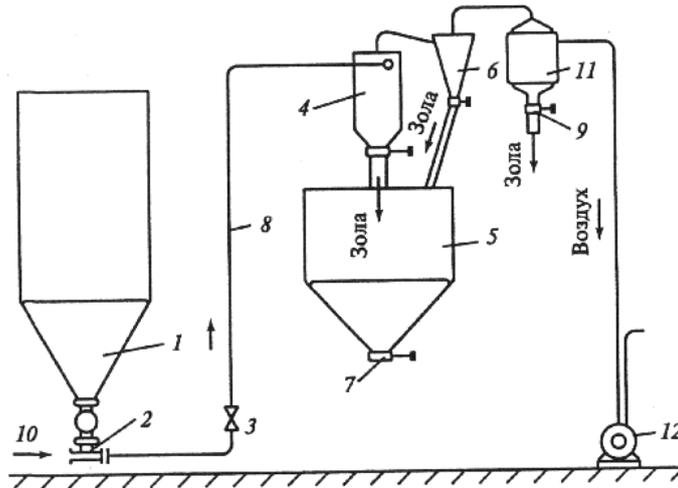


Рис. 4.6. Технологическая схема вакуумной системы пневматического золошлакоудаления с вакуумным насосом:  
 7 – окно выгрузки; 9 – узлы регулировки; 11 – фильтр; 12 – вакуумный насос.  
 Остальные обозначения те же что и на рис.4.5

#### 4.1.2. Транспорт под напором

Схема пневматического удаления шлака по трубопроводам напорной системы с применением эжектора приведена на рис. 4.7. Шлак из шлакового бункера 1 поступает в шлакодробилку 2. Шибер 3 предназначен для регулирования подачи шлака в молотковую дробилку. Раздробленный шлак с размерами кусков 20–30 мм поступает к эжектору 4, состоящему из сопла и диффузора 5. Эжектор одновременно выполняет функции загрузочного устройства для подачи шлака в трубопровод 6 и готовит шлаковоздушную смесь для транспортировки в бункер электрофилтра [122]. Примеры конструктивных решений приведены в [104].

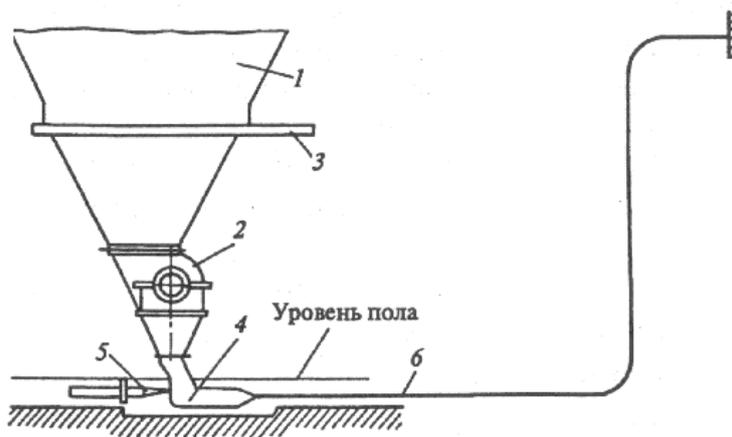


Рис. 4.7. Технологическая схема напорной пневматической системы шлакоудаления с эжектором: 1 – бункер; 2 – дробилка; 3 – шибер; 4 – эжектор;  
 5 – сопло; 6 – трубопровод

На рис. 4.8 показана схема системы под напором с воздуходувкой.

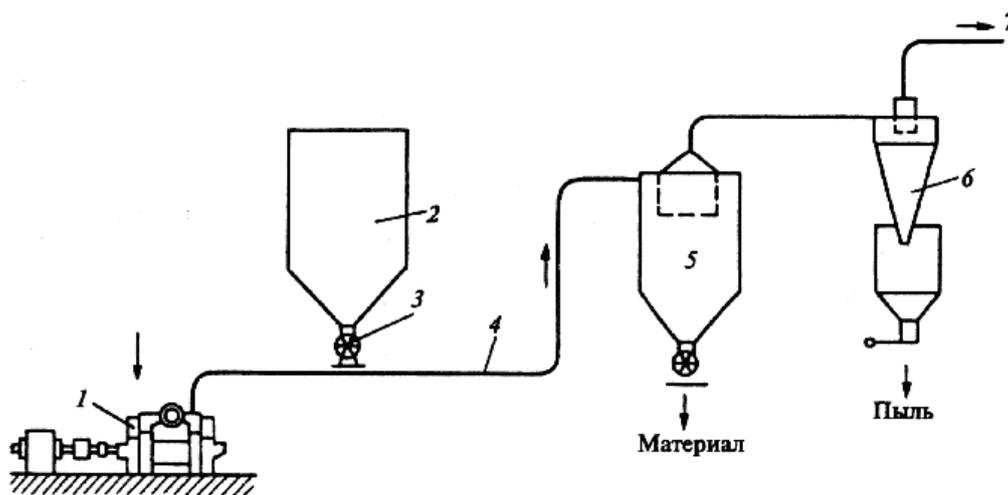


Рис. 4.8. Технологическая схема напорной пневматической системы золоудаления с воздуходувкой: 1 – воздуходувка 2 – бункер; 3 – питатель; 4 – трубопровод; 5 – разгрузитель; 6 – пылеуловитель; 7 – к электрофильтрам

На рис. 4.9. показана схема секторного питателя с транспортом материала из каждого сектора.

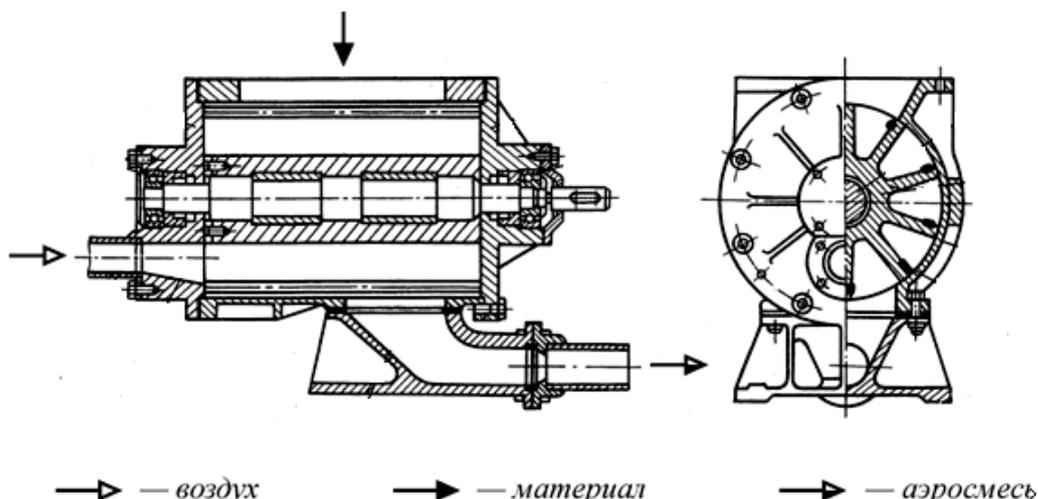


Рис. 4.9. Схема секторного питателя

Работа шлюзового питателя происходит следующим образом: транспортируемый материал через верхнее отверстие в корпусе заполняет ячейки ротора и подается в нижнюю часть корпуса. При совмещении каждой ячейки с отверстием для подачи воздуха последний аэрирует материал и выдавливает его в выходной патрубок, а затем в материалопровод, соединенный с этим патрубком. Герметизация питателя достигается за счет малой величины зазоров между ротором и корпусом.

*Производительность шлюзового питателя.* Для определения производительности шлюзового питателя можно воспользоваться следующей формулой:

$$G = 0,06V\gamma nk \text{ т/ч}, \quad (4.1)$$

где  $G$  – производительность питателя в т/ч;  $n$  – скорость вращения ротора в об/мин;  $\gamma$  – объемный вес транспортируемого материала в кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – полезная емкость ячеек ротора в м<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент заполнения ячеек.

Коэффициент заполнения ячеек в значительной мере зависит от скорости вращения ротора. Если она не превышает 30–35 об/мин, то величина коэффициента заполнения может быть принята равной 0,35–0,4. Испытание шлюзовых питателей [106] позволило установить, что при избыточном давлении, не превышающем 1,2 кгс/см<sup>2</sup>, производительность питателей не зависит от величины давления.

Герметичность шлюзового питателя зависит от величины зазоров между ротором и корпусом. Следовательно, эти зазоры должны иметь минимальную величину. Вместе с тем ротор должен свободно вращаться в корпусе и поэтому сопряжен с ним скользящей посадкой. Опыт изготовления шлюзовых питателей показывает, что в целях обеспечения минимальной утечки воздуха следует обрабатывать сопрягаемые поверхности ротора и корпуса с точностью не ниже 2-го класса, который допускает выполнение скользящей посадки для цилиндров диаметром 280–340 мм с наибольшей величиной зазора 0,085 мм, а для цилиндров диаметром 400 мм – с величиной зазора 0,1 мм. Кроме высокого класса точности, необходима и хорошая чистота обработки поверхности. Для обработки внутренней поверхности ротора рекомендуется 8-й класс чистоты.

Если сравнить величину утечки воздуха из шлюзовых питателей с соответствующими показателями, относящимися к винтовым питателям, то окажется, что утечка воздуха из шлюзовых питателей значительно больше. Мощность, необходимая для привода шлюзовых питателей, весьма невелика, она находится в пределах 0,3–1,0 кВт для всех типоразмеров питателей при расчетной производительности. Малый расход энергии на привод является основным достоинством шлюзовых питателей.

Однако правильное сравнение энергоемкости различных типов питателей может быть получено, если учитывать не только расход энергии на привод питателя, но также непроизводительный расход энергии, возникающий в связи с утечкой сжатого воздуха.

На рис. 4.10. представлена схема перегрузки цемента из вагона в силос.

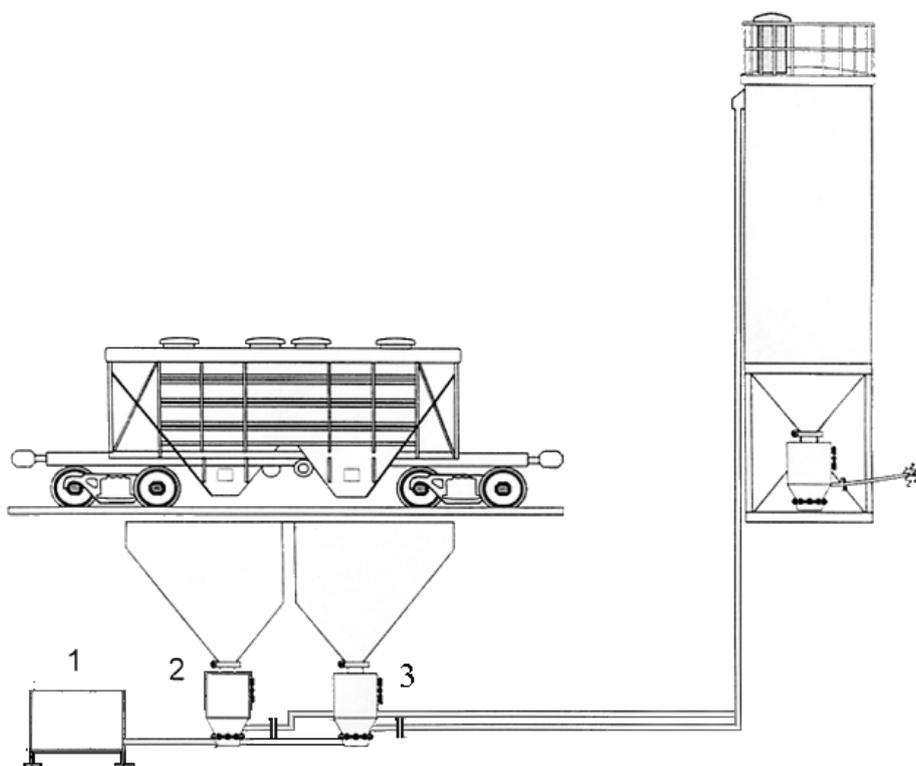


Рис. 4.10. Пневморазгрузчик вагонов: 1 – компрессор; 2, 3 – питатели

В пневморазгрузчиках применяются винтовые (рис. 4.11) или камерные питатели.

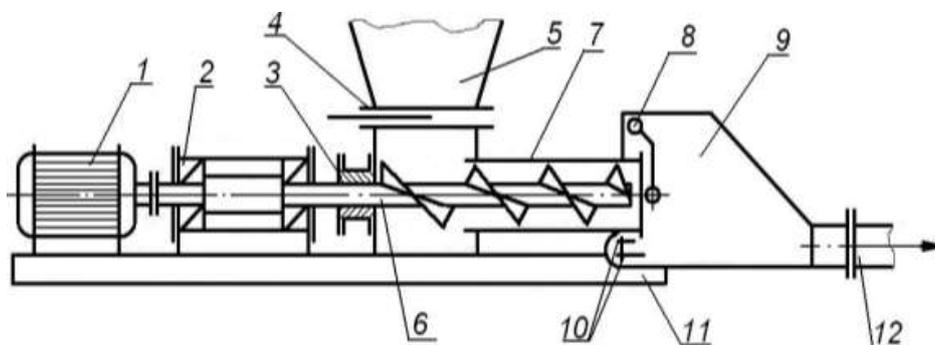


Рис.4.11. Схема пневмовинтового насоса [107]:

- 1 – электродвигатель; 2 – корпус подшипников; 3 – уплотнение; 4 – шибер;  
 5 – бункер; 6 – напорный шнек; 7 – корпус; 8 – клапан; 9 – смесительная камера;  
 10 – сопла; 11 – рама; 12 – транспортный трубопровод

Питатель работает следующим образом: транспортируемый материал поступает в кожух и перемещается винтом в направлении аэрокамеры. При этом вследствие переменного шага витков происходит уплотнение материала в полости кожуха. На участке кожуха, не занятом винтом, материал образует пробку, которая подпирается клапаном и выдавливается в аэрокамеру. Сжатый воздух поступает в нижнюю

часть аэрокамеры, проходит через пористую перегородку в ее верхнюю часть и приводит находящийся здесь сыпучий материал в псевдооживленное (аэрированное) состояние. Этому способствует то, что воздух поступает в материал не концентрированно, а в виде тонких струек, полученных при прохождении его через поры бельтинга.

Образовавшаяся в верхней части камеры аэросмесь под механическим воздействием винта выдавливается в материалопровод и далее транспортируется сжатым воздухом. Герметизация питателя, т. е. предупреждение утечки сжатого воздуха из материалопровода, достигается благодаря быстрому вращению винта, уплотнению материала в напорных витках винта и наличию пробки.

Основными показателями, определяющими работу винтового питателя, являются производительность, величина утечки воздуха и мощность двигателя, необходимая для привода, или удельный расход энергии на привод. Как показали исследования работы винтовых питателей, эти показатели в основном зависят от величины давления в аэрокамере, числа оборотов винта, а также от диаметра винта, числа и шага витков, величины зазора между винтом и кожухом, длины пробки, размеров аэрокамеры.

*Производительность винтового питателя.* Винтовой питатель представляет собой горизонтальный винтовой транспортер, поэтому основой для расчета его производительности может служить формула для расчета производительности горизонтального винтового транспортера формула (3.2).

Отличительная особенность работы винтового питателя состоит в том, что он подает материал в аэрокамеру, где давление воздуха больше атмосферного. Винт и транспортируемый материал находятся под воздействием избыточного давления воздуха, вследствие чего происходит относительное перемещение (скольжение) транспортируемого материала по поверхности винта в направлении, противоположном поступательному движению материала. Скольжению материала способствует также протекание воздуха из аэрокамеры через полость кожуха в атмосферу (утечка воздуха). Эти явления, как показали опыты [106], снижают производительность винтового питателя по сравнению с той, какой он обладал бы, работая как горизонтальный винтовой транспортер. Степень снижения производительности винтового питателя под воздействием избыточного давления воздуха можно определить применительно к данному материалу опытным путем. На производительность питателя влияют утечки воздуха из питателя. Как показали опыты [106], величина утечки воздуха из питателя зависит от величины избыточного давления в аэрокамере  $p$ , длины пробки  $l$ , производительности питателя

$G$  и диаметра винта  $D$ . Они позволяют сделать следующие выводы: утечка воздуха возрастает при увеличении избыточного давления в аэрокамере, уменьшении длины пробки, уменьшении производительности питателя, увеличении диаметра винта. При изменении скорости вращения винта в пределах от 950 до 1460 об/мин утечка воздуха практически имеет одну и ту же величину. В пределах точности опытов не обнаружено разницы в величине утечки воздуха для питателей с постоянным и переменным шагом винта; лишь при малых значениях производительности утечка воздуха из питателей с переменным шагом винта несколько меньше.

Производительность шнека по заборным виткам определяется формулой [141]

$$G_a = 0,785(D^2 - d^2)H_3 k_3 \gamma n 60 \text{ т/ч},$$

где  $D$  – диаметр шнека в м;

$d$  – диаметр вала шнека в м;

$H_3$  – шаг заборных витков с учетом толщины витка в м;

$k_3$  – коэффициент заполнения, зависящий от скорости вращения и характера материала (для цемента, например, при  $n = 1400$  об/мин принимают  $k_3 = 0,7$ );

$\gamma$  – объемный вес материала в т/м<sup>3</sup> (для цемента  $\gamma = 1,2$  т/м<sup>3</sup>);

$n$  – число оборотов шнека в об/мин.

Производительность шнека по последнему витку определяется формулой с коэффициентами скольжения, которые приведены в графическом виде [104].

*Мощность, необходимая для привода питателя.* На основании тех же исследований установлено, что мощность  $N$  на валу питателя зависит от числа напорных витков, величины коэффициента уплотнения  $m$ , который представляет собой отношение шага последнего напорного витка к шагу заборных витков, относительной длины пробки. Исследованиями [106] установлено, что мощность  $N$  практически не зависит от производительности винтового питателя. Это объясняется тем, что энергия электродвигателя расходуется в основном на преодоление сил трения транспортируемого материала о поверхность кожуха и винта, а также на преодоление противодействия в аэрокамере, которые практически не зависят от количества материала, перемещаемого винтом. Сравнительные испытания винтовых питателей с постоянным и переменным шагом винта показали, что при равных условиях последние требуют меньшей мощности для привода. Для разного вида материалов в [106] приведены формулы расчета мощности. В [104] рекомендована формула мощности на привод шнека

$$N = 430P_k D^2 \omega \text{ кВт}, \quad (4.2)$$

где  $P_k$  – избыточное давление в нагнетательной камере, МПа;  $D$  – диаметр шнека, м;  $\omega$  – частота вращения, 1/с.

#### 4.1.3. Камерные питатели

Известны различные конструкции камерных питателей, которые можно классифицировать следующим образом:

- с верхней выдачей материала;
- с нижней выдачей материала;
- с аэрирующим устройством;
- без аэрирующего устройства;
- однокамерные;
- двухкамерные;
- с автоматическим управлением; с ручным управлением.

На рис. 4.12 показана схема однокамерного питателя с верхней выдачей материала и аэрирующим устройством. Он представляет собой металлический резервуар 4, верхняя часть которого выполнена в виде полусферы, а нижняя часть – в виде полусферического или конического днища. В верхней части питателя имеется загрузочное отверстие, которое закрывается коническим клапаном 2. Материалопровод 3 опущен внутрь камеры питателя. В его нижней части имеется телескопический насадок 6, позволяющий изменять расстояние от днища питателя до материалопровода. В днище питателя монтируется аэрирующее устройство 1, которое может состоять из микропористых керамических плиток, пористого материала – бельтинга или перфорированных труб. Сжатый воздух подается по трубопроводу 5. Камерный питатель действует периодически следующим образом. Открывается загрузочное отверстие, и камера питателя заполняется транспортируемым материалом до определенного уровня; затем загрузочное отверстие герметически закрывается клапаном; начинается подача сжатого воздуха, который поступает

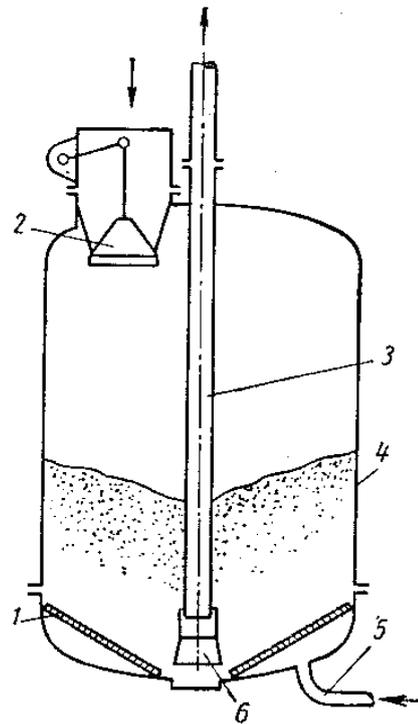


Рис. 4.12. Схема однокамерного питателя с верхней выдачей материала и аэрирующим устройством

в пространство между пористой перегородкой и дном камеры, проникает через пористый слой в камеру, приводит материал в псевдооживленное состояние и выжимает его в материалопровод. После опорожнения камеры подача воздуха прекращается и цикл работы повторяется. В некоторых конструкциях камерных питателей часть воздуха, необходимого для транспортирования, подается через аэрирующее устройство, а остальной поступает в камеру через специальную форсунку, установленную в днище, или подается непосредственно в камеру.

Схема однокамерного питателя с нижней выдачей материала без аэрирующего устройства показана на рис. 4.13. Он состоит из камеры 6, имеющей коническое днище 5, загрузочного устройства 1 с клапаном и разгрузочного устройства 2. Последнее представляет собой плавно суживающийся трубопровод, в который вмонтированы две форсунки 3 и 4 для подачи сжатого воздуха.

Работа питателя происходит следующим образом: открывается клапан загрузочного устройства, камера питателя заполняется транспортируемым материалом, закрывается клапан загрузочного устройства, начинается подача сжатого воздуха, который смешивается с материалом и транспортирует его по материалопроводу. Коническое днище имеет большой угол наклона, обеспечивающий вытекание транспортируемого материала, так как аэрирующее устройство отсутствует. Это увеличивает и без того значительные габариты камерного питателя. Кроме того, неаэрированный материал зачастую образует своды, препятствующие его вытеканию и полному опорожнению камеры. При этом некоторая часть времени каждого цикла отводится на заполнение камеры транспортируемым материалом. В это время не происходит транспортирования, что снижает производительность питателя. Двухкамерные питатели лишены указанного недостатка, так как в период транспортирования материала из одной камеры вторая заполняется им. К достоинствам камерных питателей относится отсутствие движущих рабочих органов, меньший удельный расход энергии на транспортирование и меньший расход воздуха. На рис. 4.14. представлена схема работы питателя [106].

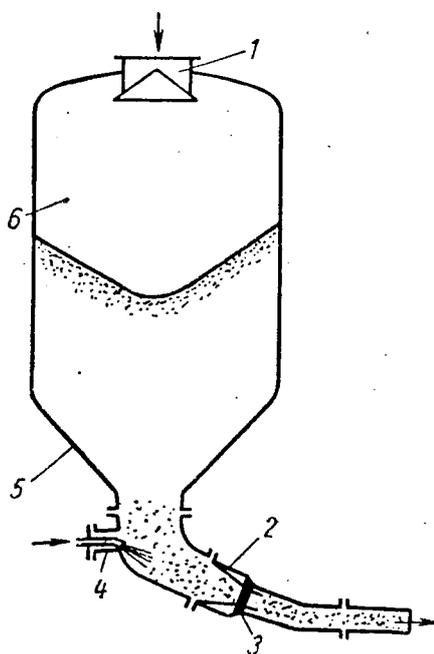


Рис. 4.13. Схема камерного питателя с нижней выдачей материала без аэрирующего устройства

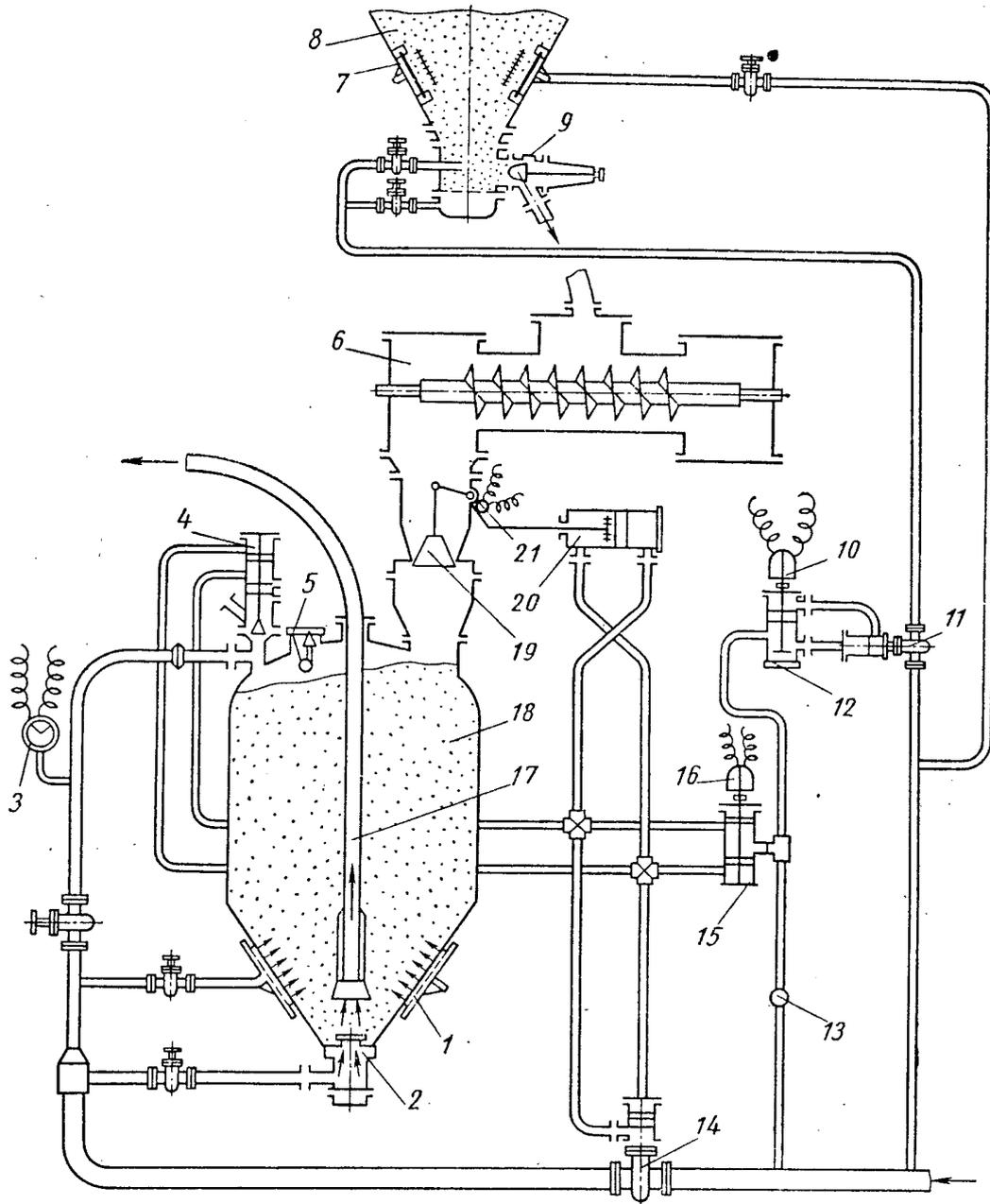


Рис. 4. 14. Схема камерного питателя конструкции ВНИИПТМаши:  
 1 – аэрирующее устройство; 2 – самозакрывающаяся форсунка; 3 – контактный манометр; 4 – воздушный клапан; 5 – указатель уровня; 6 – дозатор; 7 – аэрирующее устройство бункера; 8 – бункер; 9 – донный разгрузатель; 10 и 16 – контакты; 11 – задвижка; 12 и 15 – золотники; 13 – кран; 14 – задвижка; 17 – материалопровод; 18 – камера; 19 – конический клапан; 20 – силовой пневматический цилиндр; 21 – контакты

Управление механизмами питателя автоматизировано и осуществляется следующим образом. Первоначальное включение подачи сжатого воздуха производится вручную. В это время задвижка 14 закрыта и сжа-

тый воздух поступает в систему управления через открытый кран 13. Через золотник 15 сжатый воздух направляется в силовой пневматический цилиндр 20, воздействует на поршень и открывает конический клапан 19. Одновременно открывается и клапан 4, который служит для выпуска воздуха из камеры при ее заполнении материалом. При опускании конического клапана замыкаются контакты 21, и таким образом осуществляется пуск электродвигателя винта дозатора 6 и включение золотника 12, открывающего задвижку 11. Сжатый воздух направляется в нижнюю часть бункера, установленного над питателем, аэрирует находящийся в нем материал, который вытекает в винтовой дозатор и подается им в камеру. После заполнения камеры до определенного уровня срабатывает указатель уровня 5, воздействующий на золотник 12. При этом закрывается задвижка 11, прекращается подача воздуха в бункер и останавливается винт дозатора, затем включается золотник 15, который закрывает конический клапан 19 и выпускной воздушный клапан 4 и открывает задвижку 14. Сжатый воздух получает доступ в камеру питателя; происходит аэрирование материала, который выдавливается в материалопровод и транспортируется в нужном направлении. На воздуховоде, подающем воздух в верхнюю часть камеры, установлен контактный манометр 3. Нарастающим давлением воздуха его контакты размыкаются. После опорожнения камеры давление в воздуховоде падает, контакты манометра 3 замыкаются, что приводит последовательно к выключению электропневматического золотника 15, закрыванию задвижки 14 и открыванию конического клапана 19. Далее цикл работы питателя повторяется.

Пневматический двухкамерный насос (рис. 4.15) представляет собой два вертикальных цилиндрических резервуара. Пыль подается через загрузочные отверстия с клапанами. При заполнении резервуара пыль доходит до пылеулавливающей воронки датчика уровня, клапан закрывается, подается воздух, начинается выдача пыли в трубопровод. В это время второй резервуар загружается пылью. После загрузки начинается разгрузка второго резервуара. Циклы повторяются. Схема автоматизации процесса приведена в [59].

Требуемая мощность двигателя на компрессор (кВт) определяется по формуле

$$N = \frac{k_3 k_n A_m G_B}{\eta_k \eta_d}, \quad A_m = \frac{p_a}{\rho_a} \ln \frac{p}{p_a}, \quad (4.3)$$

где  $k_3 = 1,1$  – коэффициент запаса;  $k_n = 1,1-1,15$  – коэффициент потерь воздуха;  $G_B$  – расход воздуха в кг/с;  $A_m$  – удельная работа кДж/кг;  $p_a$  – атмосферное давление кПа;  $\rho_a$  – плотность воздуха кг/м<sup>3</sup> при атмосферном

давлении;  $p$  – входное давление кПа;  $\eta_k$ ,  $\eta_d$  – КПД компрессора и двигателя.

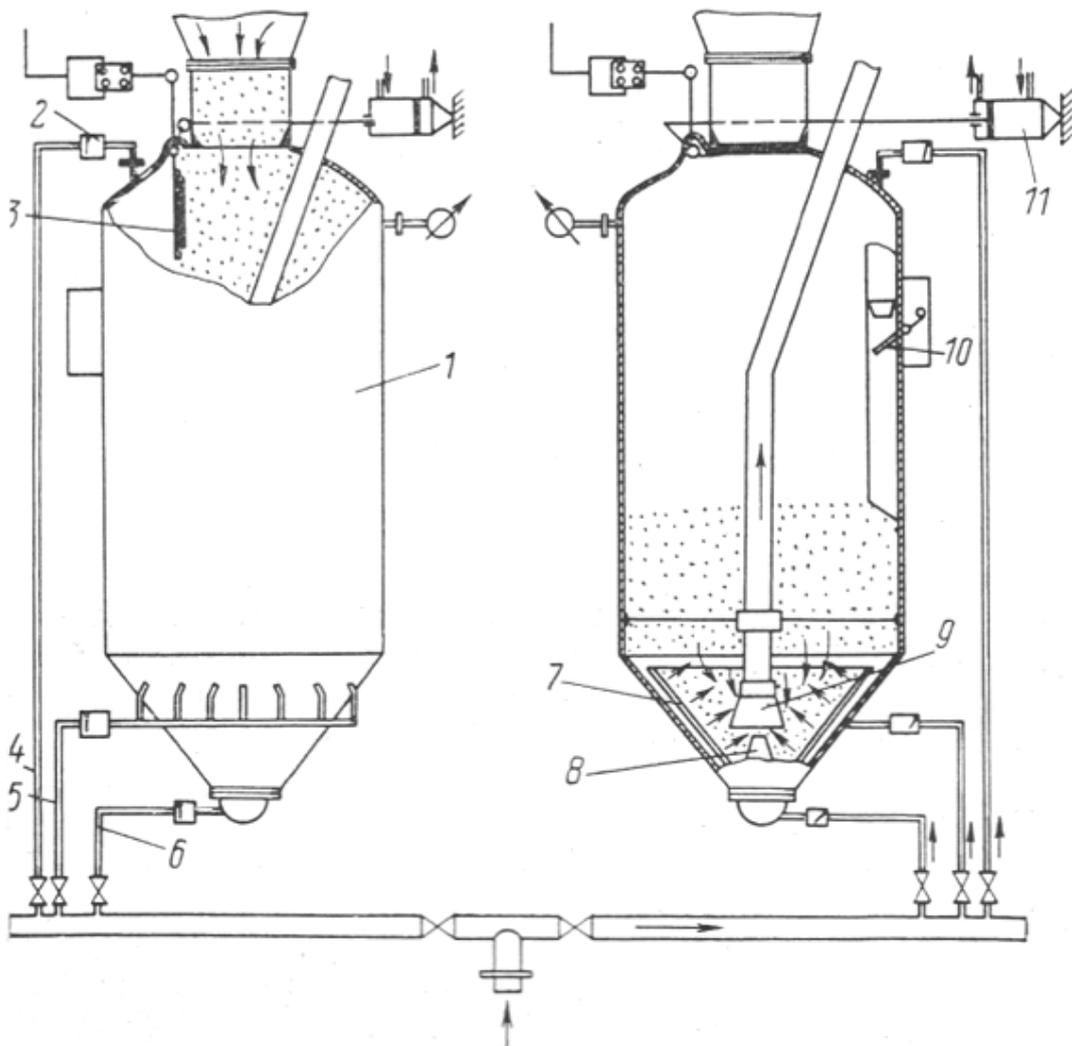


Рис. 4.15. Схема двухкамерного пневматического насоса с вертикальным выгрузным трубопроводом: 1 – резервар; 2 – обратный воздушный клапан; 3 – загрузочный клапан; 4, 5, 6 – наддувочные трубопровод; 7 – кассеты аэрационные; 8 – сопло; 9 – раструб; 10 – датчик уровня пыли; 11 – пневмоцилиндр привода загрузочного клапана

#### 4.1.4. Комбинированные системы пневмотранспорта

В случаях, когда требуется транспортирование золошлаковых материалов на большие расстояния, часто применяют комбинированную систему пневматического удаления, состоящую из двух последовательно работающих (вакуумной и напорной) установок. При этом транспортирование материала осуществляется в два этапа (рис. 4.16) – до места его перегрузки всасывающим трубопроводом (вакуумная система)

и дальнейшее перемещение от места перегрузки до места выгрузки (нагнетательная система). Зола и шлак из бункера 1 поступают во всасывающую насадку 2, соединенную с трубопроводом 3. Воздух, засасываемый из атмосферы, подхватывает засыпанный в трубу материал и транспортирует его до разгружающих резервуаров 5 камерного насоса. После отделения газового потока в одном из резервуаров камерного насоса воздух отсасывается вакуум-насосом 6 через сухой 7 и мокрый 8 фильтры для отделения пыли. Сжатый воздух в один из резервуаров камерного насоса поступает при помощи компрессора 9, подающего сжатый воздух в напорный трубопровод 10. Во время поступления золы в камерный насос автоматически отключается подача воздуха, при заполнении камерного насоса подача золы автоматически отключается и включается подача воздуха. Из резервуара, находящегося под давлением, материал попадает в напорный трубопровод 10, где подхватывается сжатым воздухом и переносится в один из разгрузочных бункеров 11 [122]. Комбинированные системы имеют следующие особенности: большую протяженность транспортирования; надежность в эксплуатации; автоматизированную работу насадок под золовыми бункерами; возможность с помощью одной напорной системы с камерными насосами обслуживать до трех вакуумных систем; необходимость установки не менее двух камерных насосов.

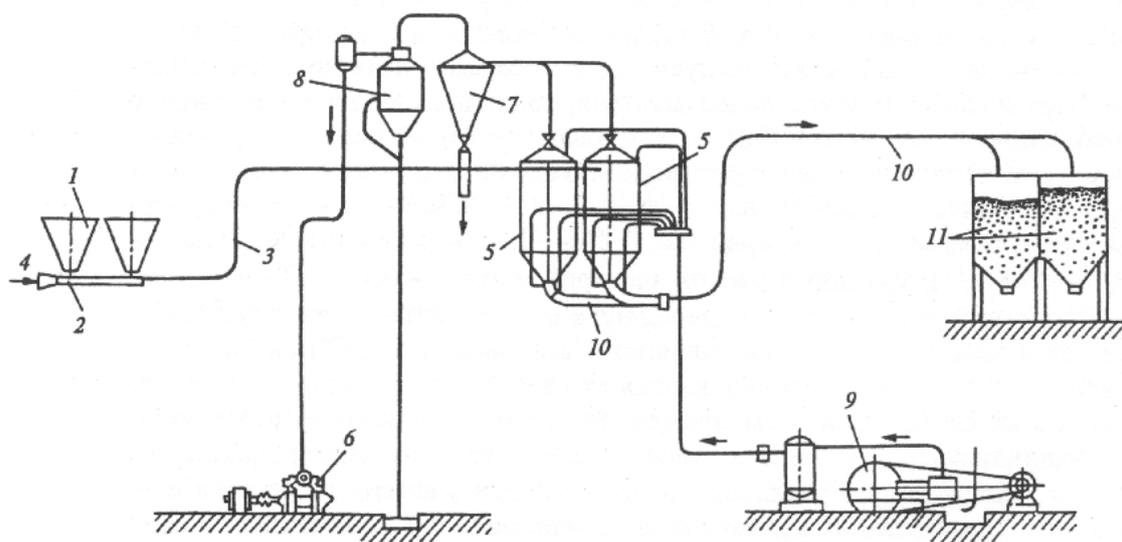


Рис. 4.16. Комбинированная система пневматического золоудаления:  
 1 – бункер; 2 – всасывающая насадка; 3 – трубопровод; 4 – поступление воздуха;  
 5 – разгружающие резервуары камерного насоса; 6 – вакуум насос; 7 – сухой  
 фильтр; 8 – мокрый фильтр; 9 – компрессор; 10 – напорный трубопровод;  
 11 – разгрузочные бункеры

#### **4.1.5. Закрытые и полужакрытые системы**

В закрытых системах транспортирующий газ непрерывно циркулирует, т. е. непрерывно вступает в контакт с новым материалом, и одновременно все время проходит через воздуходушную машину. Достоинством закрытой системы является то, что при транспортировании не сильно абразивных материалов нет надобности в очень эффективном отделительном устройстве, поскольку загрязненный транспортирующий газ не выпускается в атмосферу. Недостатком этой системы является то, что при непрерывном соприкосновении с материалом транспортирующий газ воспринимает от материала влагу, а это ухудшает транспортные параметры. Во влажном транспортирующем газе материал имеет большую склонность к агломерированию и слипанию, доходящим до такой степени, что транспортирование становится невозможным. Постоянно проходя через воздуходушные машины, транспортирующий газ при сжатии нагревается, что способствует испарению влаги из материала. Равновесное состояние между нагревом транспортирующего газа, материала, компрессией, охлаждением стенками трубопровода и испарением влаги из него может наступить только при высоких температурах, отчего материал мог бы повреждаться. Поэтому не строят закрытые пневмотранспортные системы, а вместо них используют полужакрытые системы. У этих систем выпускается в атмосферу небольшая часть транспортирующего газа и вместо него засасывается свежий. Транспортирующий газ, выпускаемый в атмосферу, предварительно очищается в фильтровальном устройстве. Полужакрытая система особенно выгодна в тех случаях, когда транспортируется ценный материал или материал, даже небольшая концентрация которого в атмосфере угрожает здоровью персонала. А также, если по соображениям безопасности (при транспортировании взрывоопасных материалов) или по технологическим соображениям, необходимо транспортировать данный материал не воздухом, другим газом (инертным), расход которого при открытой системе был бы неприемлемо велик. Поскольку в атмосферу выдувается лишь небольшая часть газа (не более 20 %), для него можно создавать совершенные фильтровальные устройства.

#### **4.1.6. Схемы полужакрытых нагнетательных систем**

Полужакрытая нагнетательная пневмотранспортная система схематически изображена на рис. 4.17. Транспортирующий газ, сжатый воздуходушной машиной, направляется в смеситель. Поскольку в смесителе давление избыточное, то транспортируемый материал должен подаваться в смеситель питателем.

Смесь транспортирующего газа с материалом течет по транспортному трубопроводу к месту назначения в отделительное устройство. Оттуда очищенный транспортирующий газ идет по обратному трубопроводу – к воздуходувной машине. Небольшое количество транспортирующего газа засасывается всасывающим патрубком  $n$  и выпускается через фильтр  $F$ , расположенный за отдельным устройством. Общее количество транспортирующего газа регулируется клапаном  $k$  в обратном трубопроводе. Поскольку за отделительным устройством в выпускном отверстии избыточное давление должно быть равно перепаду давлений фильтра, то в отделительном устройстве давление избыточное и поэтому материал необходимо выпускать через уплотненный питатель.

Особой нагнетательной полужакрытой системой является контур, в котором для транспортирования материала используется инертный газ. Чтобы не было засасывания наружного воздуха через неплотности, необходимо в каждом месте установки иметь избыточное давление. Поэтому такая установка отличается от нормальной, показанной на рис. 4.17, тем, что в месте всасывающего патрубка, где подается инертный газ, искусственно поддерживается определенное минимальное давление. В любом другом месте системы давление больше или, когда воздуходувная машина не работает, такое же, как в месте всасывающего патрубка.

Линия пневмотранспортировки полипропилена (ПП) в поданализные бункеры на ОАО «Томский нефтехимический комбинат» представляет замкнутых контур в составе газодувок Р17, трубопроводов транспортировки, узла разгрузки, разгонного участка, переключателей, циклонных разгрузителей, установленных на бункерах, от которых отходят уравнивательные трубки, сообщающиеся со шнеками Т5–Т7, и возвратным газопроводом к газодувке Р15 [25]. На этих трубках установлены запорные заслонки. Общая схема контуров транспортировки с газодувками Р15 и Р17 приведены на рис. 4.18.

Эксплуатация пневмотранспортной линии показала, что при производительности линии 8 т/ч наиболее благоприятная загрузка осуществляется в бункеры Д28;

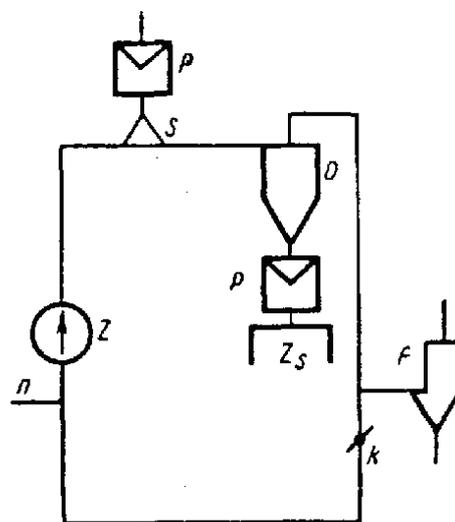


Рис. 4.17. Схема полужакрытой нагнетательной пневмотранспортной системы:  $P$  – питатель;  $S$  – смеситель;  $O$  – отделитель;  $Z_s$  – бункер;  $n$  – всасывающий патрубок;  $k$  – клапан;  $F$  – фильтр

загрузка бункеров Д29 осуществлялась на пределе, Д30 вообще не загружался. Трудность транспортировки в более отдаленные бункеры обуславливалась еще тем, что требовалась автоматическая синхронизация работы секторных питателей Р21 с изменением сопротивления системы. Было замечено, что при загрузке ПП в Д29 трубопровод ввода в циклон Д25 над бункером Д28 оставался горячим. Это привело к предположению, что существует утечка азота в Д28 при открытых заслонках на выходе из циклона Д25 и через Д28 в уравнительную линию газодувки Р15.

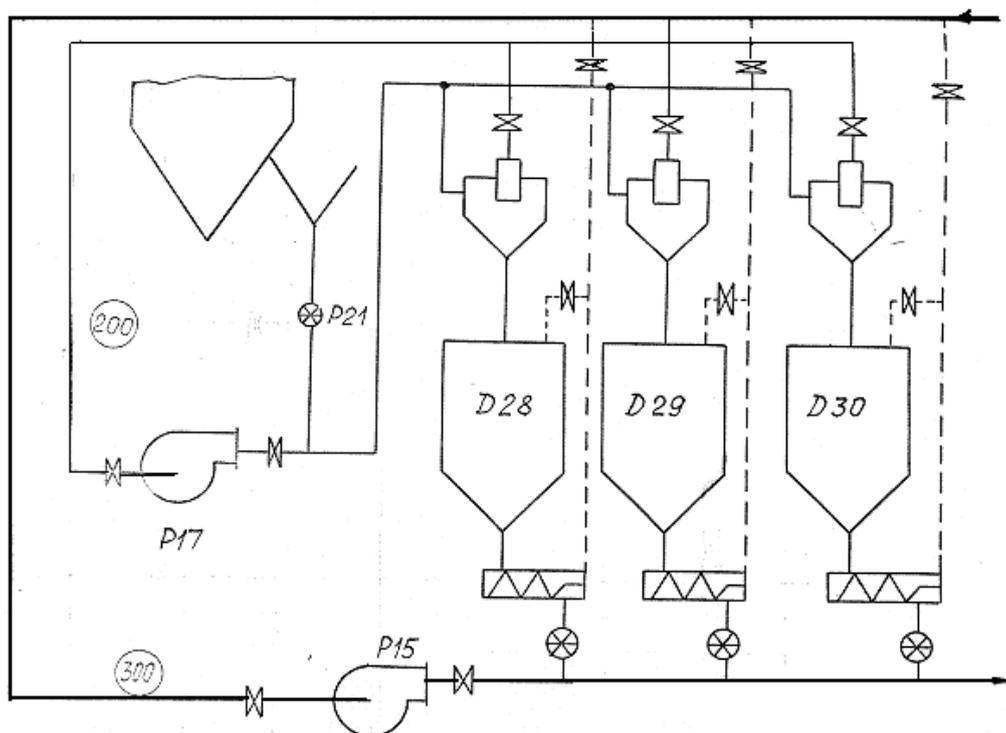


Рис. 4.18. Замкнутая схема транспортировки ПП в поданализные бункеры [25]

Встал вопрос о количестве перетоков и их влиянии на транспортирующую способность потока азота в отдаленные бункеры. С этой целью предполагалось поставить датчики давлений, и по их показаниям при перекрытии и открытии заслонок на незадействованных циклонах определить эти перетоки. Велось наблюдение за поведением линии и фиксирование расхода и напора при более тщательном выставлении запорных клапанов. Выяснилось, что через два часа после переключений трубопроводы на входе в незадействованные циклоны охлаждались. Было высказано предположение о негерметичности переключателей. Проводились наблюдения за линией с полной герметизацией незагруженных участков с помощью заслонок. Видимо, в этот период про-

изошла самогерметизация переключателей из-за наклепа ПП на стенки переключателей и в дальнейшем работа линии стабилизировалась, перебои прекратились. Тем не менее транспортировка ПП в отдаленные бункеры оказалась затруднительной при максимальной производительности. Оказалось, что работа газодувки осуществлялась при максимальном значении напора на характеристической кривой аналогичной рис. 4.4. В этом случае для повышения устойчивости работы системы потребовалось увеличение числа оборотов газодувки с тем, чтобы значение напора находилось на нисходящей части характеристики [5, 171].

#### **4.1.7. Оценки транспортирующей способности потока**

##### **Горизонтальный транспорт**

В некоторых работах скорость витания в горизонтальном потоке называют скоростью трогания, или скоростью веяния [149]. Под этой величиной понимают среднюю скорость газового потока в горизонтальной трубе, при которой твердая частица, находящаяся на дне трубы в состоянии покоя, начинает перемещаться вдоль трубы в горизонтальном направлении. Помимо сложности явления, наблюдаемого при пневмотранспорте в вертикальном потоке, в данном случае процесс осложняется большим влиянием трения частиц. Причина движения твердых частиц в горизонтальном направлении объясняется возникновением под воздействием газового потока подъемной силы, действующей на твердую частицу. Подъемная сила возникает в результате срыва вихрей при обтекании частицы, находящейся в пристеночной области. Под влиянием этой силы, а также собственной силы тяжести и сопротивления среды твердая частица переходит из состояния покоя в состояние движения. В этих условиях твердая частица движется по криволинейной траектории и снова попадает в пристеночную область, где вновь подвергается воздействию подъемной силы. Таким образом, поднимаясь и опускаясь, частица совершает скачкообразные движения вдоль оси трубы [149]. Другое объяснение вертикального перемещения частицы исходит из того, что подъемная сила, действующая на частицу, может быть следствием только вертикальных составляющих пульсационных скоростей потока. Под пульсационной скоростью понимают разность между мгновенным значением скорости потока в данной точке и ее средним значением, получаемым усреднением во времени мгновенных значений. Пульсационные скорости потока создают пульсационные скорости частиц.

Влияние силы тяжести частиц обуславливает неравномерное по высоте сечения горизонтального потока распределение твердых частиц.

На основе предполагаемой аналогии между распределением твердых частиц по высоте поперечного сечения горизонтальной трубы и распределением молекул в поле силы тяжести (последнее подчиняется закону Больцмана), а также с учетом упоминавшейся выше зависимости подъемной силы от пульсационных скоростей, была предложена методика расчета скорости витания в горизонтальной трубе. Связь между объемной концентрацией частиц  $\varepsilon_\delta$ , диаметром трубопровода  $D$  и пульсационной скоростью твердых частиц  $u_\Pi$  определяется уравнением

$$0,75\varepsilon_\delta = \frac{0,393}{1 + 0,445 \left( \frac{2qD}{u_\Pi^2} \right)^{\frac{3}{2}}}.$$

При турбулентном обтекании пульсационная скорость потока в зависимости от плотностей твердой и газовой фаз и пульсационной скорости частиц может быть выражена в виде следующей формулы:

$$v_\Pi = \frac{\rho + 2\rho_\delta}{3\rho} u_\Pi.$$

Соотношение между средней скоростью потока  $v$ , его пульсационной скоростью и скоростью витания определяется [149] следующим уравнением (где  $Re_v$  отнесено к  $v_v$  и  $D$ ):

$$\frac{v}{v_\Pi} = \ln Re_v - 0,9.$$

Следует отметить, что транспортирование твердых частиц в горизонтальном потоке может начинаться при значительно более низких скоростях, чем скорости, рассчитанные по формулам. Часть гранул может находиться во взвешенном состоянии при скорости потока меньше скорости витания.

Движение зернистого материала в горизонтальном трубопроводе при скоростях, меньших скорости витания, осуществляется вследствие перекачивания и волочения твердых частиц. Для этого необходимо преодолеть силы трения между частицами и стенкой. Сила трения равна произведению веса частицы на коэффициент трения; последний меньше единицы, поэтому для перекачивания и волочения частиц в горизонтальном направлении сила воздействия потока на них может быть меньше их силы тяжести. Однако скорость, необходимая для начала горизонтального транспортирования без перекачивания частиц с заполнением всего объема трубы твердой фазой, всегда выше скорости витания в вертикальном потоке.

Распределение твердых частиц в потоке зависит от скорости транспортирующего потока [149]. При высоких скоростях твердые частицы

равномерно распределены по поперечному сечению трубы. Некоторое снижение скорости приводит к увеличению неравномерности распределения твердых частиц и даже к выпадению отдельных частиц на дно трубопровода. При дальнейшем снижении скорости эта неравномерность еще более возрастает. При этом материал в нижней части трубы может быть неподвижен и движение будет осуществляться лишь в верхней части поперечного сечения трубы.

В [149] приведены сведения об эмпирической формуле для определения критической скорости, т. е. скорости газового потока, при которой твердые частицы не осаждаются на дно трубы, а транспортируются в горизонтальном направлении:

$$v = 5,6D^{0,34}\delta^{0,36}\left(\frac{\rho_{\delta}}{\rho}\right)^{0,5}m^{0,25},$$

где  $m$  – весовая концентрация частиц.

Эта скорость может быть оценена, исходя из следующих данных [149]. Зола с частицами размером 0,142 мм транспортируется достаточно равномерно по сечению при скорости 14–15 м/сек; при снижении скорости до 9 м/сек значительная часть золы движется по дну трубы. Частицы угля размером 0,105 мм равномерно распределяются в сечении горизонтального трубопровода при скорости 14 м/сек. Частицы золы размером 0,82 мм полностью взвешены в потоке при скоростях выше 22 м/сек. Скорости витания, а также скорости газа, необходимые для устойчивого транспортирования таких частиц в вертикальном потоке, будут значительно ниже указанных величин.

В работе [149] приводятся сведения об экспериментальных данных, которые дают представление о гидравлическом режиме при горизонтальном пневмотранспортировании ([149], табл. III-4).

Обращается внимание на значительную разницу между линейными скоростями транспортирующего потока и транспортируемого материала. Это объясняется тем, что материал, расположенный в верхней половине трубы взвешен, а в нижней половине трубы – находится в неподвижном состоянии, либо передвигается с очень небольшой скоростью.

### **Определение скорости вертикального газового потока, необходимой для транспортирования твердых частиц**

Скорость витания является тем пределом, при котором вертикальный пневмотранспорт существовать не может. Для устойчивого пневмотранспорта скорость газового потока должна превышать скорость витания. Скорость витания, а также скорость транспортирующего потока зависит от концентрации транспортируемого материала в потоке.

Скорость обтекания твердых частиц при их витании без поступательного движения равна  $v / \epsilon$ . Если частицы обладают поступательной скоростью относительно стенок трубы, то при прямоточном движении газа и частиц скорость газа относительно частиц  $v^* / \epsilon$  равна разности между скоростью обтекания (без поступательного движения частиц) и скоростью частиц:

$$\frac{v^*}{\epsilon} = \frac{v}{\epsilon} - u.$$

При противоточном движении газовой и твердой фаз (например, в напорных стояках) последнее уравнение также применимо. Однако правая его часть выражается суммой  $\frac{v}{\epsilon} + u$ .

Приведенную скорость можно выразить в виде

$$Re^* = \frac{Ar(1 - \epsilon_\delta)^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{Ar(1 - \epsilon_\delta)^{4,75}}},$$

где  $Re^* = \frac{v \cdot \delta}{\nu}$ ;  $Ar = \frac{g\delta^3(\rho_\delta - \rho)}{\nu^2\rho}$ ;  $\delta$  – диаметр частицы;  $\rho$ ,  $\rho_\delta$  – плотности газа и частицы;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости газа;  $\epsilon_\delta$  – объемная концентрация частиц.

Данные эксперимента показывают, что в трубе диаметром 77 мм интервал изменения производительности по твердому материалу больше, чем в трубе диаметром 50 мм. При этом для получения этого интервала требуется меньший диапазон изменения скоростей. Изменение расхода алюмосиликатного сферического катализатора в трубе диаметром 77 мм с 0,565 до 10,25 т/ч достигается при возрастании средней скорости воздуха с 1,37 до 2,59 м/сек. Аналогичное изменение расхода твердого материала в трубе диаметром 50 мм с 0,525 до 11,5 т/ч возможно при увеличении скорости от 2,35 до 8,16 м/сек. Экспериментальные данные по двум типам активированного угля качественно подтверждают сделанный вывод. Такое явление можно объяснить возрастающим влиянием стенок трубы диаметром 50 мм вследствие недостаточно высокого отношения диаметра трубы к диаметру гранул. Отношение диаметра трубы (50 мм) к среднему диаметру гранул алюмосиликатного катализатора равно 15,15; для активированного угля это отношение равно 22,4. Очевидно, что при отношениях  $\frac{D}{\delta} < 15 - 20$  возможен проскок части газа у стенок трубы, а также другие явления, характерные для сыпучих материалов при малых отношениях  $D / \delta$ .

При вертикальном пневматическом транспорте гранулированного сыпучего материала низкой концентрации обычно считают, что в равновесном состоянии, т. е. после прохождения частицей участка разгона, средняя скорость транспортирующего потока равна сумме скоростей частиц  $u$  и витания  $v_{\text{вит}}$ .

$$v = v_{\text{вит}} + u,$$

где скорость витания определяется из выражения  $Re_{\text{вит}} = \frac{Ar}{18 + 0,6\sqrt{Ar}}$ ;

$$Re_{\text{вит}} = \frac{v_{\text{вит}} \delta}{\nu}.$$

Энергетический смысл уравнения  $v = v_{\text{вит}} + u$  заключается в том, что определенная часть энергии транспортирующего потока затрачивается на создание условий витания частиц, а другая часть на создание собственной скорости частиц и преодоление трения.

#### 4.1.8. Гидравлические характеристики транспортных систем

При расчете пневмотранспортной установки (ПТУ) задаются исходные данные:

- характеристикой транспортируемого материала (наименование материала, плотность частиц, объемная масса, гранулометрический состав);
- производительность установки;
- требования по режиму транспортировки (непрерывная, циклическая или порционная подача);
- условия подачи в питатель (дозированная или навалом).

Задается схема трассы транспорта.

#### Гидравлическое сопротивление трассы [141]

Для расчета установки необходимо принять скорость воздуха на выходе из трубопровода для чего пользуются графиком (рис. 4.19) зависимости этих пара метров от приведенной дальности транспортирования  $L_{\text{пр}}$ .

Согласно принятой пространственной схеме трассы, приведенная длина  $L_{\text{пр}}$  выражается суммой

$$L_{\text{пр}} = \sum l_{\Gamma} + \sum l_{\text{э,к}} + \sum l_{\text{э,п}},$$

где  $\sum l_{\Gamma}$  – сумма геометрических длин прямых горизонтальных, наклонных и вертикальных участков в м;

$\sum l_{\text{э,к}}$  – сумма эквивалентных длин прямых участков для отводов в м;

$\sum l_{э,п}$  – сумма эквивалентных длин прямых участков для переключателей в м. Эквивалентную длину прямых участков для отводов под углом  $90^\circ$  при  $R/D$  в горизонтальной плоскости следует принимать равной 5 м, а для отводов под углом  $90^\circ$  при  $R/D$  в вертикальной плоскости – 8 м. Эквивалентную длину прямых участков трубы для двухходовых переключателей принимают равной 8 м.

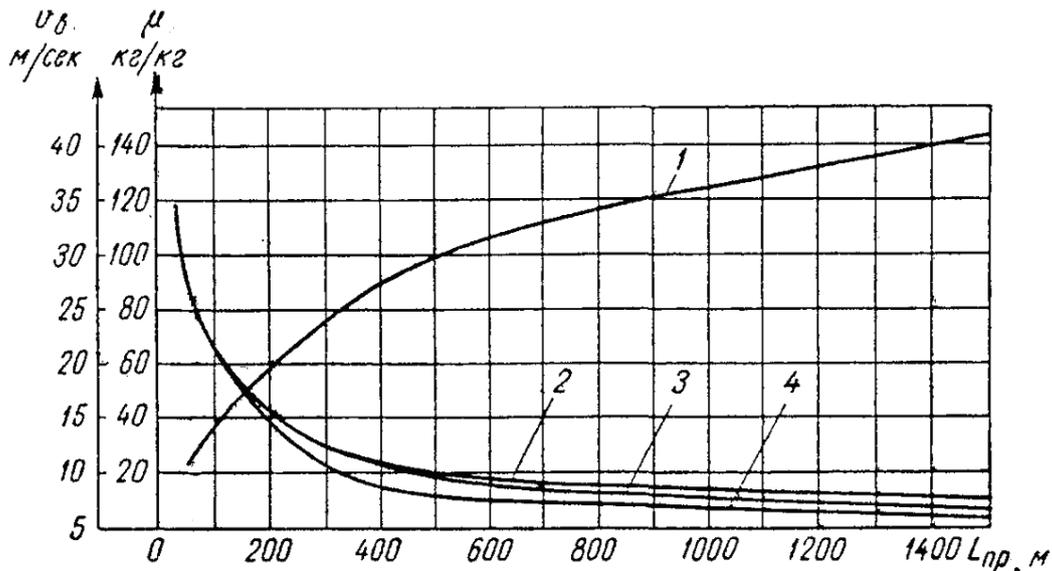


Рис.4.19. График зависимости оптимальной скорости воздуха  $v_в$  на выходе из трубопровода и весовой концентрации смеси от приведенной дальности транспортирования  $L_{пр}$ :  
 1 –  $v_в$  для всех пневмотранспортных установок; 2 –  $\mu$  для камерных насосов;  
 3 и 4 –  $\mu$  для винтовых насосов, предназначенных для работы при перепадах давления соответственно до 3,5 и до 2 ати

При расчете пневмотранспортной установки нагнетательного действия определяют следующие ее параметры: внутренний диаметр транспортного трубопровода  $D$ , требуемый расход сжатого воздуха  $Q_в$ , полное сопротивление в трубопроводе  $H_{полн}$ , требуемую мощность привода воздуходувной машины  $N_к$ . Расход  $Q_в$  в первом приближении определяется на основании выбранной весовой концентрации смеси  $\mu$  и часовой производительности установки  $Q_м$  по формуле

$$Q_в = \frac{1000 Q_м}{60 \mu \gamma_в} \text{ нм}^3/\text{мин},$$

где  $\gamma = 1,2 \text{ кгс}/\text{м}^3$  – удельный вес «стандартного» воздуха при нормальном атмосферном давлении и температуре  $+10^\circ \text{C}$ . Диаметр  $D$  определяется на основании подсчитанного расхода воздуха  $Q_в$  и выбранной скорости на выходе из трубопровода  $v_в$  по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4Q_B}{60\pi v_B}} \text{ м.}$$

Этот диаметр округляется до ближайшего диаметра, соответствующего ГОСТу на трубы. Уточняются значения  $Q_B$  и  $\mu$ .

Полное сопротивление трубопровода  $\Delta p_{\Pi}$  выражается суммой

$$\Delta p_{\Pi} = \Delta p_T + \Delta p_H + \Delta p_{\text{ВХ}}, \text{ Па}$$

где  $\Delta p_T$  – потери давления по трассе, включая потери в отводах и переключателях;  $\Delta p_H$  – потери давления на подъем материала;  $\Delta p_{\text{ВХ}}$  – потери давления в загрузочном устройстве и на ввод материала в трубопровод.

$$\Delta p_{\Pi} = K\mu\lambda \frac{\rho_B v_B^2 L_m}{2D} + \rho'_B gh + (\chi + \mu) \frac{\rho_{\text{ВХ}} v_{\text{ВХ}}^2}{2} \text{ Па;}$$

где  $K = \frac{CD}{v_B^{0,9}}$ ;  $\lambda = 0,243 \text{ Re}^{-0,22}$ ;  $\text{Re} = \frac{v_B D}{\nu}$ ;  $\nu \approx 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $C$  – опытный

коэффициент, для цемента  $C = 100$ ;  $\rho'_B$  – средняя плотность воздуха на участке подъема  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\chi$  – коэффициент, зависящий от типа загрузочного устройства: для камерного питателя  $\chi = 2$ , для винтового насоса  $\chi = 1$ ;

$$\rho_{\text{ВХ}} = \rho_B \frac{\Delta p_{\Pi} + p_a}{p_a}, \text{ кг}/\text{м}^3; v_{\text{ВХ}} = v_B \frac{p_a}{\Delta p_{\Pi} + p_a}, \text{ м}/\text{с};$$

$p_a$  – атмосферное давление  $p_a \approx 101 \cdot 10^3 \text{ Па}$ .

На рис. 4.20. приведены данные по параметрам винтового насоса от дальности транспортирования.

Приведенный расчет предназначен для материалов типа цемента. Для полимерных материалов расчет приведен в [162].

Алгоритм расчета следующий. Находится величина удельного расхода материала  $q_m = BL_{\text{пр}}^{-0,333}$ ,  $q_m = G_m / S$ ,  $S = \pi D^2 / 4$ , коэффициент  $B$  для конкретного материала берется из таблицы 1 в [162]; весовая расходная концентрация  $\mu = AD^{0,13} \cdot L^{-0,867}$ , коэффициент  $A$  для конкретного материала берется из табл.1 в [162]; расход газа  $G_B = G_m / \mu$ . Истинная скорость газа, с учетом стесненности потока материалом, определится из уравнения

$$\frac{dv}{dx} = \frac{\left(1 + \frac{\mu}{k}\right) q_v \frac{g}{v} + v \frac{\lambda}{2D} + \frac{4\tau_m S}{DG}}{\frac{a^2}{k(v\varepsilon)^2} (\varepsilon k + \varepsilon_m) - (1 + \mu)}, \quad (*)$$

где  $a^2 = RT$ ;  $k = u/v$ ;  $q_v = \pm \cos \alpha$ ;  $\epsilon_m + \epsilon = 1$ ;  $\tau_m = \frac{u \lambda_m G_m}{8S}$  – для прямоли-

нейного участка,  $\tau_m = \frac{f_c \rho_m (u \epsilon_m)^2 D \epsilon_m}{6R_i}$  для поворота в горизонтальной

плоскости, аналогичное представление  $\tau_m$  для поворота в вертикальной плоскости.

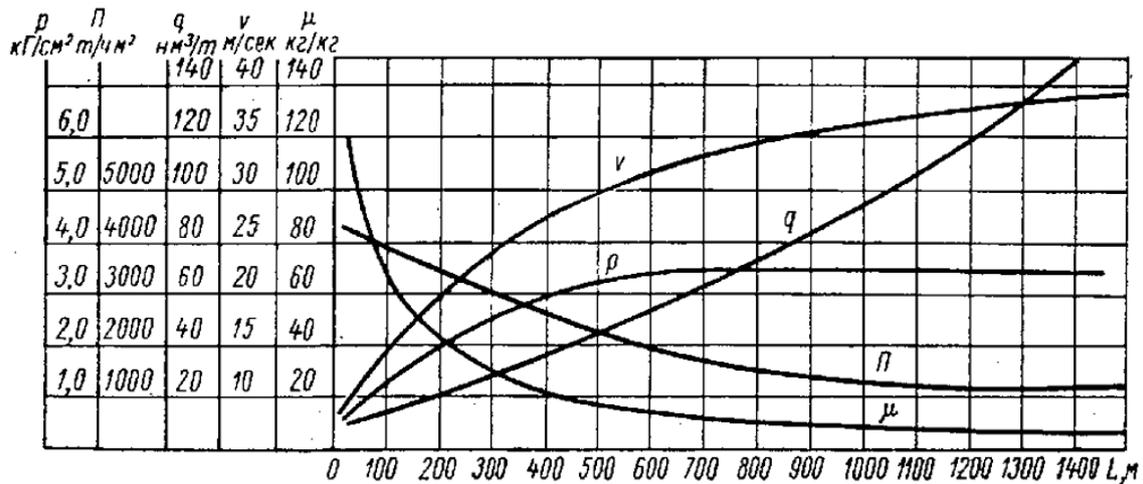


Рис. 4.20. График зависимости основных параметров винтовых насосов от дальности транспортирования:  $\mu$  – коэффициент весовой концентрации;  $v_e$  – скорость воздуха на выходе из трубопровода;  $q$  – удельный расход воздуха;  $\Pi$  – пропускная способность сечения трубопровода;  $p$  – рабочее давление в смесительной камере

Обозначаются координаты участков. Находятся истинные длины участков. Определяются параметры в выходном участке трубопровода с учетом сопротивления разгрузителей, пылеуловителей. Определяется минимальная скорость горизонтального потока из условия  $v_{\min} > 1,45v_{\text{вит}}$ . Определяются действительные скорости газа последовательно для каждого участка с использованием уравнения (\*). Скорость материала  $u = v - v_{\min}$ . Истинная объемная концентрация материала

$\epsilon_m = G_m / (\rho_m S u)$ . Плотность газа  $\rho = \frac{G}{\epsilon S v}$ . Статическое давление  $p = a^2 \rho$ .

Расчет ведется до сечения  $x = 0$ . Потери давления на разгонном участке  $\Delta p_p = 0,3 q_m (2,8 v_{x=0} - v_{\min})$ . Начальное давление  $p_n$  включает потери на разгон частиц. Начальная плотность  $\rho_n = p_n / a^2$ . Приведенная скорость  $v^* = \frac{G}{S \rho_n}$ . Истинная скорость  $v_n = v^* / \epsilon$ .

#### 4.1.9. Устойчивость систем

Реальный процесс транспортировки дисперсного материала сопровождается колебательными явлениями концентрации, давления, скоростей частиц и газа, что приводит к потере устойчивости систем. Многолетний опыт эксплуатации пневмотранспортных установок наряду с общеизвестными достоинствами показал, что распространение их тормозится возможностью возникновения завала [149, 128]. Завал – это следствие неустойчивого режима транспортирования, а причины, приводящие к этому режиму, могут быть самыми разнообразными вплоть до тривиальных случаев, таких как отключение электроэнергии или разгерметизация системы. Завал – явление крайне нежелательное, поскольку транспортная установка выходит из строя на время, необходимое для его ликвидации. Прекращение подачи материала приводит к остановке всего технологического процесса и может произойти в самый неблагоприятный момент. Это снижает достоинства пневматического транспорта, даже такое бесспорное, как обеспечение хороших санитарно-гигиенических условий труда. Во избежание завалов транспортных трубопроводов на большинстве действующих установок расходы газа завышены. Это увеличивает их энергоемкость, ускоряет износ трасс, приводит к измельчению транспортируемого материала и затрудняет очистку отработанного газа от пыли.

Исследования [128] показали, что при транспортировании материала в неустойчивом режиме возникает гребень, полностью перекрывающий поперечное сечение трубы. Гребень трансформируется в поршень. Скорость поршня резко падает, впереди него по ходу оседает материал. По мере продвижения поршня длина его увеличивается за счет осевшего перед ним материала. Наконец, сформировавшаяся пробка останавливается. Давление газа со стороны выходного конца транспортного трубопровода падает до атмосферного. Через некоторое время вновь наблюдается продвижение пробки с последующей остановкой. Этот процесс повторяется. Длина пробки увеличивается ступенчато до конечного значения, величина которого определяется перепадом давления на пробке. При этом в пробке образуются расширяющиеся трещины. Появление каждой трещины предшествует началу движения пробки. На промышленных установках подобное явление сопровождается характерным звуком, возникающим вследствие трения спрессованного материала о стенки трубы.

Явление завала при вертикальном транспорте связано с выбором рабочей скорости транспортирующего потока. В [149] происхождение завала объясняется уменьшением расстояния между частицами при

увеличении концентрации твердой фазы. Вследствие этого частицы попадают в гидродинамический след летящих впереди частиц, снижается лобовое сопротивление, увеличивается скорость витания и частицы выпадают из потока. При пневмотранспорте мелкодисперсного материала, склонного к агломерации, образование завала можно объяснить недостаточной скоростью потока для агломератов определенной величины, имея в виду, что их количество и частота образования возрастают с увеличением концентрации частиц. Имеются различные оценки скорости транспортирующего потока, при которой происходит завал [149].

#### 4.1.10. Высоконапорные системы с пневмонасосами

Отклонение эксплуатационных характеристик ПТУ от проектных в значительной мере зависит от процессов загрузки шнека винтового питателя и его конструктивных особенностей [59]. При производственных испытаниях выяснилось, что производительность насосов (рис. 4.11) оказалась в два раза ниже по сравнению с паспортной. Причем в линии проявились сильные колебания давления и мощности. Оказалось, что существенное влияние на производительность насосов оказывают условия, определяющие движение пыли в бункере, создаваемых самим насосом. В бункере вовлекается в движение пыль только в зоне первого витка шнека. Остальной материал над выходным отверстием остается неподвижным, слеживается и служит основанием для образующегося в бункере свода. Кроме того, часть пыли захваченной лопастями шнека возвращалась в бункер. Были проведены работы по устранению этого явления. На рис. 4.21. показаны изменения в конструкции загрузочного устройства.

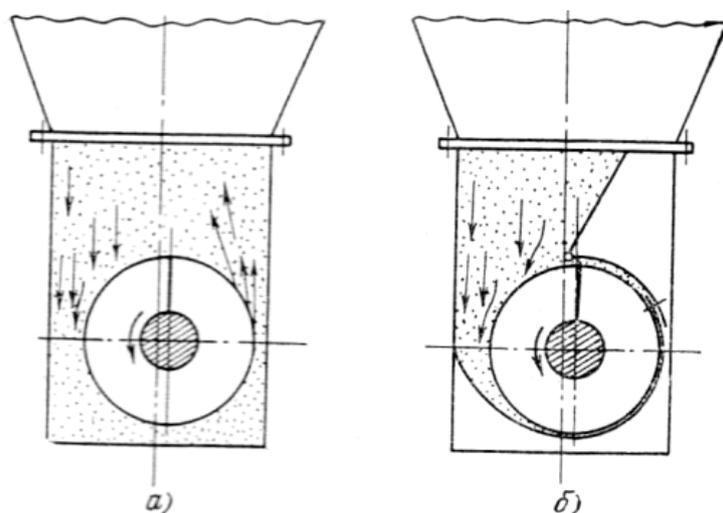


Рис. 4.21. Схема движения угольной пыли в приемной камере насоса:  
а) без обечайки; б) с обечайкой в форме улитки

Устойчивость насоса возросла (рис. 4.22), однако производительность осталась прежней. Коэффициент заполнения шнека (коэффициент производительности) составляет 0,2. В последних витках происходит накопление материала с подачей его в выгрузочную камеру. При этом происходит заполнение всего межвиткового пространства с образованием пылевой пробки. Правильный подбор отношения шага выгрузных и загрузочных витков, а также обеспечение герметичности позволило повысить производительность питателя.

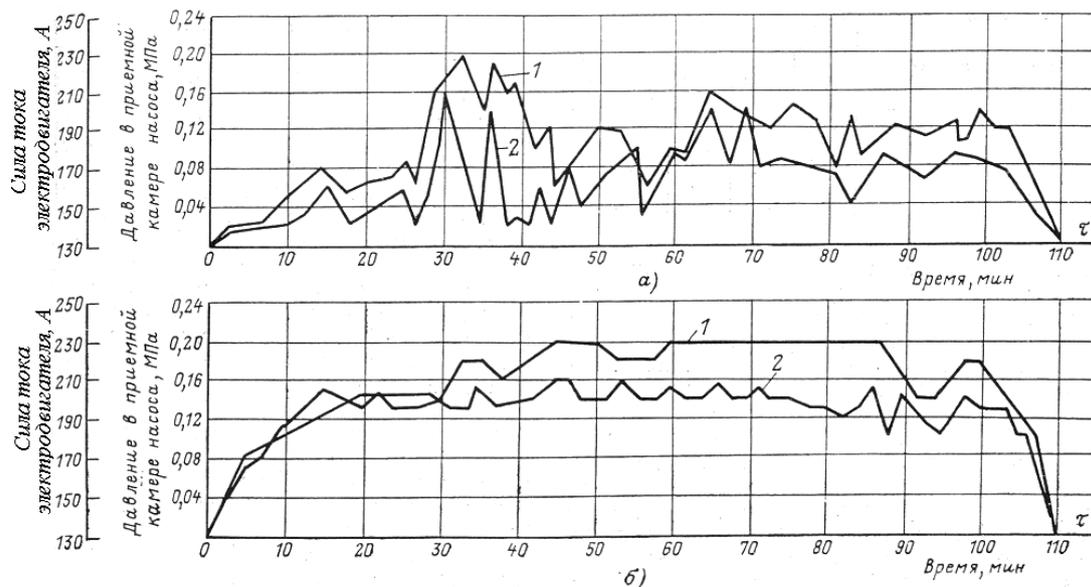


Рис. 4.22. Изменение рабочих параметров насоса во времени:  
 а) без обечайки; б) с обечайкой в форме улитки. 1 – ток электродвигателя;  
 2 – давление в камере

В разгрузочной камере происходит подготовка пыли к пневматическому транспорту – ее аэрация, разгон частиц и подача смеси в трубопровод. Камера должна работать как эжектор. В стандартном винтовом насосе конструкции КЗЦМ в разгрузочной камере происходит хаотичное движение частиц и эжекционный эффект отсутствует (рис. 4.23 – пунктир). В ней происходили завалы пылью, вызывающие прекращение работы насоса.

После реконструкции эжекционный эффект проявляется в большей мере (рис. 4.23 – сплошная линия).

Была увеличена длина камеры, уменьшен угол торцевой стенки, оси сопл были сфокусированы на ось трубопровода. Изменено число и диаметр сопл. После реконструкции, испытания показали, что система работает стабильно при паспортных показателях, однако потребовалась вертикальная компоновка подачи материала и потребовалось уменьшить вибрации вала насоса.

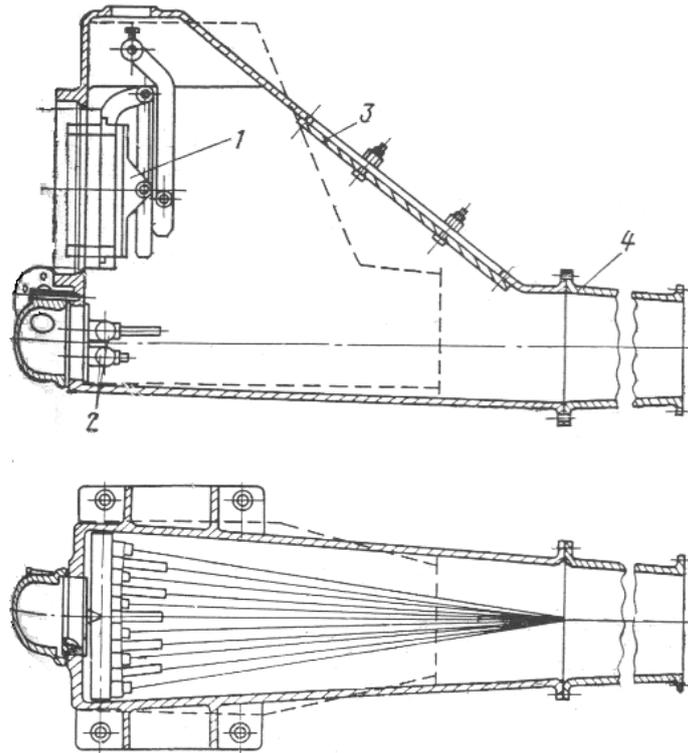


Рис. 4.23. Выгрузочная камера насоса КЗЦМ  
(сплошная линия новая камера, пунктирная линия—старая камера КЗЦМ):  
1 – клапан; 2 – сопла; 3 – люк; 4 – переходной конфузор

В связи с этим была разработана усовершенствованная конструкция ВТИ с двухсторонними подшипниковыми узлами (рис. 4.24).

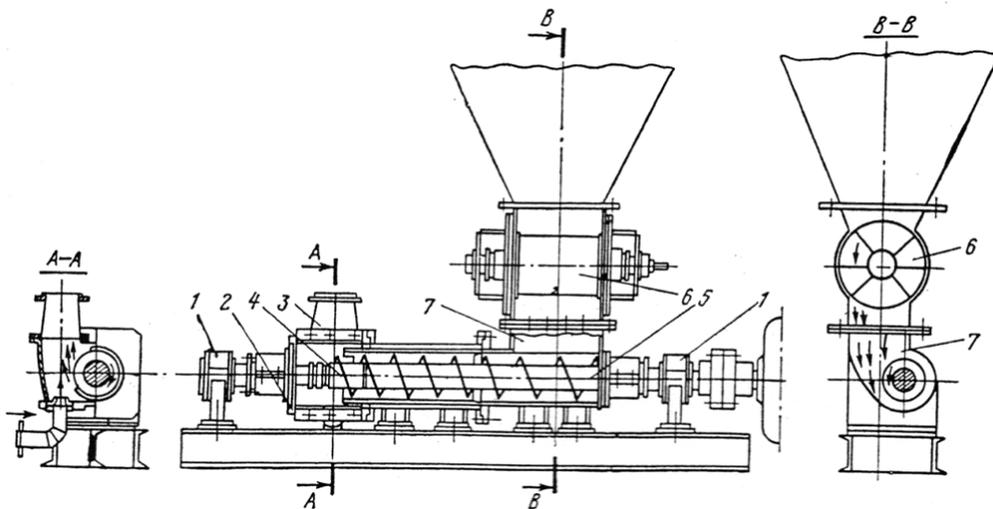
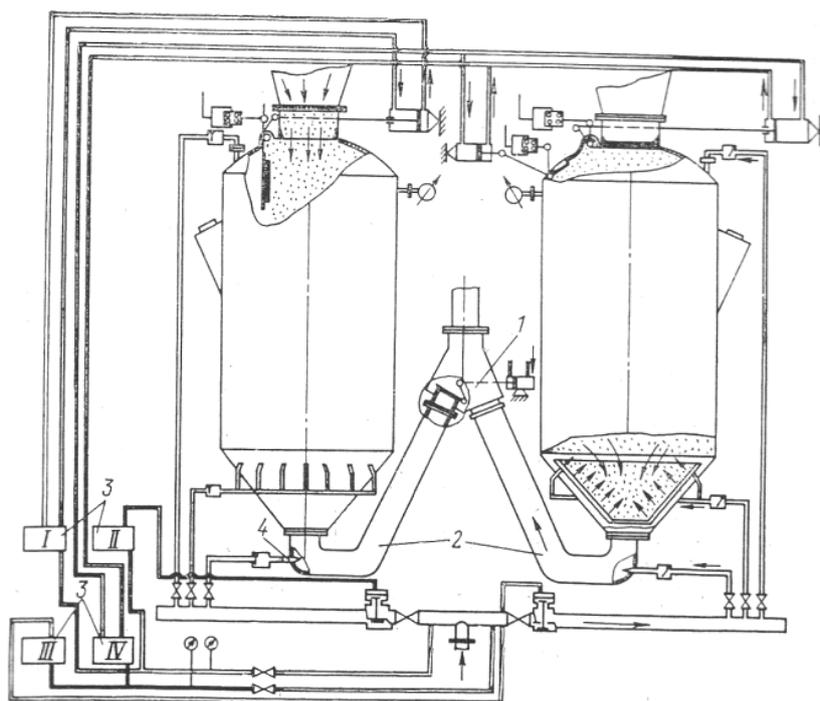


Рис. 4.24. Общий вид пневмовинтового насоса ВТИ:  
1 – передняя и задняя опоры подшипников вала; 2 – лабиринтное уплотнение;  
3 – вертикальная выгрузочная камера; 4 – съемный виток; 5 – шнек; 6 – шлюзовой затвор; 7 – приемная камера

Перед приемной камерой насоса установлен шлюзовой затвор с независимым теристорным приводом, приемная камера имеет улиткообразную форму, торцевые лабиринтные уплотнения охлаждаются водой; шнек имеет оптимальное соотношение шагов винта. Вал шнека опирается на два подшипника, расположенные вне корпуса.

Для транспортировки пыли на расстояние 600 м были применены двухкамерные насосы (рис. 4.15) [59]. Первые пуски двухкамерного насоса показали, что неудовлетворительно работает система автоматического переключения клапанов, что приводило к выбросу пыли в атмосферу. После отладки выяснилось, что насос работает неустойчиво с большими пульсациями аэроsmеси в трубопроводе. Производительность составляла 45 % от расчетной. При размещении вертикального трубопровода в полости резервуара часть воздуха проходит транзитом в трубопровод, не захватывая пыли. После реконструкции угольная пыль стала выдаваться через выгрузное отверстие в днище резервуара (рис. 4.25). Далее через трубопроводы, подключенные к общему транспортному трубопроводу, пыль направляется в бункер котлоагрегата.



*Рис. 4.25. Схема реконструированного двухкамерного пневматического насоса:  
1 – двухходовой переключаемый клапан; 2 – трубопроводы выдачи угольной пыли;  
3 – воздухораспределители; 4 – сопло*

Переключение резервуаров на общий трубопровод осуществляется через двухходовой переключаемый клапан с пневмоцилиндром. Сопла для подвода сжатого воздуха врезаны на начальном участке

трубопровода. При расходе воздуха на аэрацию  $V_1 = 3500 \text{ м}^3/\text{ч}$ , на наддув  $V_3 = 3500 \text{ м}^3/\text{ч}$  производительность составляла 87 т/ч. При дополнительной подаче через сопло  $V_2 = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  производительность снизилась до 84 т/ч. Подача воздуха через сопло не увеличивает производительность, однако отключение этой подачи приводит к забивке трубопровода пылью. На рис. 4.26 показаны характеристики системы.

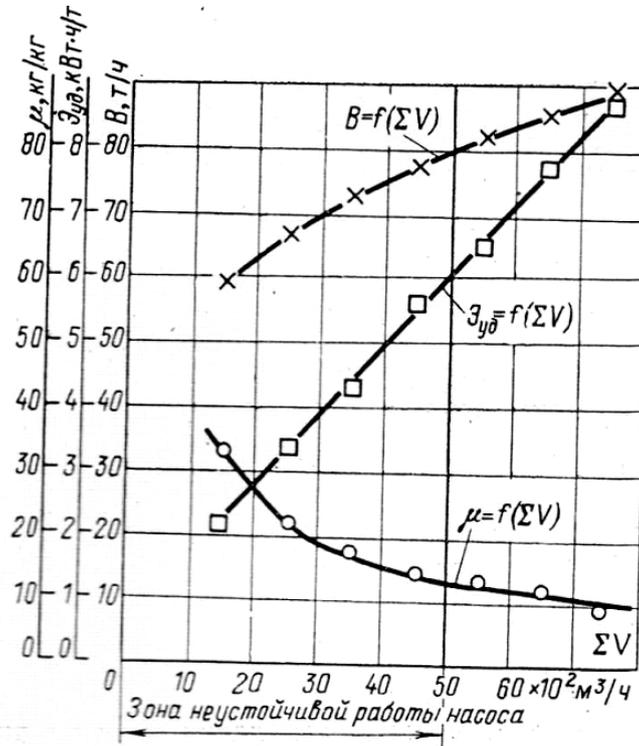


Рис. 4.26. Основные характеристики двухкамерного насоса на угольной пыли АШ.

Видно, что с увеличением суммарного расхода, увеличивается производительность, удельный расход энергии, уменьшается концентрация.

В пневмовинтовом насосе в отличие от пневмокамерного насоса увеличение расхода воздуха может привести к уменьшению производительности. Сопоставление данных о работе камерного насоса и пневмовинтового, прошедшего реконструкцию, показали, что камерный насос менее экономичен: концентрация пыли в воздухе составляет 9–13 кг/кг, удельный расход энергии составляет 6–8,8 кВт·ч/т, а пневмовинтовые насосы работают с  $\mu$  до 23 кг/кг при  $\varepsilon_{уд} = 4,5\text{--}5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ .

Однако в системах возникают пульсации давлений, которые снижают надежность транспортирования, ведут к разрушению креплений транспортной магистрали. Это связано с неравномерностью загрузки шнеков материалом. Значительные пульсации в трассе возникают в период опорожнения бункеров [60]. Неравномерность поступления пыли

из бункеров происходит из-за сегрегации частиц при их загрузке, образования застойных зон, полостей и обрушений материала. Наличие в бункере больших масс неподвижной пыли приводит к уплотнению ее, слеживанию и частичной потере сыпучести [66]. Например, охлаждение застойной угольной пыли служит причиной конденсации и затем понижения в ней парциального давления водяных паров и диффузии последних от центральной части канала (канала истечения) к периферии (в неподвижные слои пыли). Это приводит к образованию на поверхности частиц тонких водяных пленок. В результате при соприкосновении частиц в местах контакта под действием поверхностного натяжения возникают прочные аутогезионные связи, которые превышают силы тяжести в сотни раз [186, 64]:

$$f_0 = F_a / G_\delta = 6\sigma_n \zeta / \delta^2 \rho_\delta g; \quad \zeta = \delta_k / \delta,$$

где  $\delta_k$ ,  $\delta$  – диаметры площади контакта и частицы;  $\sigma_n$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Прочность сцепления получается тем большей, чем меньше размер частицы. В результате в слое появляется неоднородность физико-механических характеристик пыли. Сход материала из бункера становится неравномерным. Пыль движется дискретно, обвалами, что приводит к флуктуациям давления внутри слоя.

Низкочастотные пульсации снижают надежность транспортных систем. Это связано с тем, что перепад давления в сопловом аппарате изменяется, изменяется расход воздуха. Изменение расхода воздуха ведет к образованию завалов. При пульсациях меняется мощность насоса. С увеличением давления в трубопроводе, возрастает осевое усилие со стороны «пылевой пробки» на последние два витка шнека. Частота вращения пылевой пробки  $\omega_n$  связана с частотой вращения шнека  $\omega_{\text{шн}}$  соотношением  $\omega_n = \omega_{\text{шн}} (1 - \psi_{\text{пр}})$ , где  $\psi_{\text{пр}} = 0,2 - 0,35$  – коэффициент производительности (коэффициент заполнения) шнека, определяющий количество пыли, выдаваемой в трубопровод за один оборот шнека к максимально возможному (теоретическому). При уменьшении расхода воздуха и образовании отложений скорость воздуха в пограничном слое отложений уменьшается. По мере увеличения  $v_v$  вынос пыли снизу возрастает, сечение прохода увеличивается, сопротивление падает. Отложение пыли были сведены до минимума при скорости 17 м/с. На рис. 4.27 показаны области устойчивой работы линии. Из рисунка видно, что от оси симметрии и ниже имеется достаточный градиент скоростей воздуха, что способствует более равномерному распределению пыли по сечению.

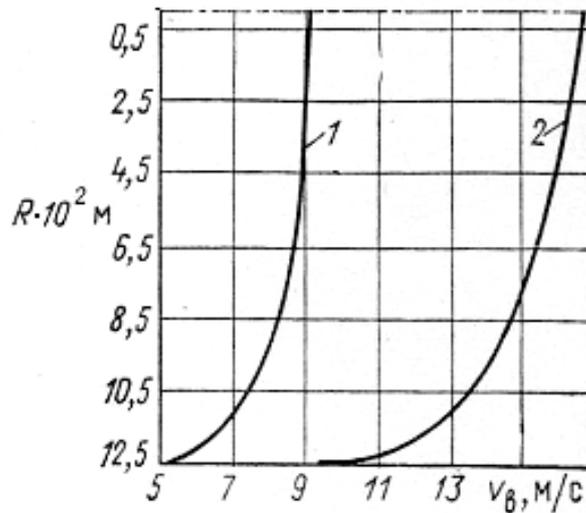


Рис. 4.27. Осредненные профили скоростей воздуха в трубопроводе диаметром 0,25 м: 1 и 2 – неустойчивый и устойчивый режимы транспорта угольной пыли

На рис. 4.28 представлена зависимость высоты пограничного слоя и скорости воздуха от осредненной скорости воздуха по центру трубопровода диаметром 0,25 м.

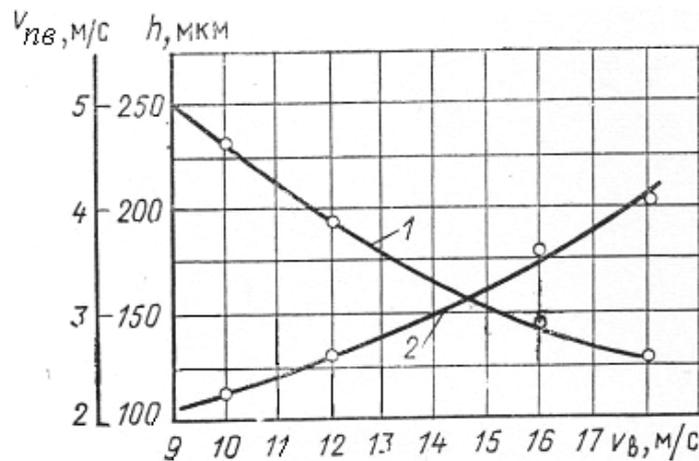


Рис. 4.28. Зависимость высоты пограничного слоя и скорости воздуха от осредненной скорости воздуха по центру трубопровода диаметром 0,25 м: 1 – высота слоя мкм; 2 – скорость воздуха на поверхности слоя

На границе слоя скорость воздуха составляет 2,2 м/с. Частицы попадая в слой образуют плотную массу. По мере увеличения этой массы скорость увеличивается и частицы удаляются из отложений. В итоге неустойчивый режим приводит к появлению колебаний.

#### 4.1.11. Влияние воздухоочистительных устройств

Пневмотранспорт цемента используется почти на всех предприятиях строительной промышленности: цементные заводы, заводы по производству железобетонных изделий, конструкций.

На рис. 4.29 представлена схема пневмотранспортной установки, включающая нагнетательную линию, приемный узел, состоящий из разгрузителя, приемника цемента, фильтра.

В приемнике *П*, транспортирующий поток освобождается от материала и направляется на доочистку. Чаще всего для окончательной очистки используют фильтры. Однако они ненадежны: либо разрываются, либо забиваются и создают большое противодавление в системе, нарушающее работу транспортной линии. Причиной этого является как среднесуточные колебания температуры, так и переменная влажность материала и воздуха. Было проведено обследование приемного узла цемента пневмотранспортной линии бетоносмесительной установки Томского завода по производству железобетонных изделий с целью проектирования более надежной системы обеспыливания воздуха [76].

На заводах ЖБК и ЖБИ отработана схема устойчивой транспортировки и выделения цемента из потока, в которой часть потока из разгрузителя *Р* проходит в приемник *П*, в этом случае цемент не зависает в разгрузителе. В исследованном приемном узле имелось два патрубка вывода отработанного воздуха: из верхней части разгрузителя  $d = 70$  мм и из приемника  $d = 120$  мм, запыленный воздух из которых поступал в атмосферу.

Пневмотранспорт цемента из силосов имеет особенности транспортирования, зависящие от его количества в силосе. При содержании материала в силосе цемента, превышающем 10 % его объема, материал в транспортном трубопроводе движется поршнями (пробками) и средняя концентрация частиц в воздухе составляет более 20 кг/кг воздуха (рабочий режим транспортирования цемента). При этом во время поступления поршня количество входящего воздуха минимально, а в промежутках между поршнями – максимально. Содержащиеся в воздухе частицы в основном имеют размер менее 1 мкм. При содержании материала в силосе не превышающем 10 % его объема, материал в транспортном трубо-

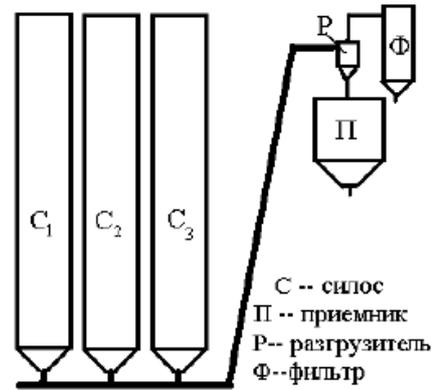


Рис. 4.29. Схема пневмотранспорта цемента

проводе движется в виде взвеси (аэрозольный режим) с повышенным расходом воздуха. Пыль в потоках на выходе из разгрузителя и приемника имеет фракционный состав близкий к исходному материалу.

Визуальные наблюдения показали, что при рабочих режимах транспортирования (поршневой режим) потоки с пылью из патрубков выходят периодически с невысокой концентрацией частиц. Перерывы между выбросами составляли 5...15 сек. Длительность выбросов также находилась в этих пределах. В редких случаях наблюдались более продолжительные выбросы с более высокой концентрацией частиц. Выбросы резко возрастали при переполнении приемника. Производительность пневмотранспортной линии колеблется в пределах 10...20 т/час (2800–5600 г/с). В период опорожнения силосов расход воздуха увеличивается, и транспортировка цемента происходит в аэрозольном режиме.

С целью выяснения аэродинамических характеристик существующей системы пневмотранспорта были проведены замеры давлений в разгрузителе, приемнике, а также проведен отбор проб с использованием циклона  $d = 90$  мм и рукавного фильтра после него. Пыль собиралась в стеклянный приемник под циклоном и в рукавном фильтре. Давления в разгрузителе и приемнике колебались в пределах 20...120 мм в.ст. Расход воздуха через циклон определялся по известному гидравлическому сопротивлению и давлению на входе. Взвешивалась пыль в приемнике циклона и определялся привес рукавного фильтра. Проводился микроскопический анализ уловленной пыли.

Исходный материал – цемент марки М400 со следующими характеристиками: медианный диаметр частиц  $\delta_m = 20...23$  мкм, дисперсия  $\sigma = 3$ . Такой цемент в коническом циклоне диаметром 300 мм в стационарных условиях улавливается с эффективностью 96,5...97,5 %. Циклон диаметром  $d = 90$  мм должен был иметь еще более высокую эффективность. Однако при отборе проб обнаружилось, что его эффективность не превышает 40 %. Микроскопический анализ уловленной пыли показал, что диаметр частиц не превышает 1 мкм. Поскольку содержание частиц менее 1 мкм в исходном цементе составляет менее 0,5 %, можно сделать вывод: в циклон поступала пыль после ее вторичного образования в разгрузителе или приемнике, а на вход в разгрузитель поступали поршни из частиц, что характерно для поршневого режима [162].

Наблюдения за работой пневмотранспортной линии показало, что цемент движется поршнями, причем длина поршня составляет 5...20 м и на вход в разгрузитель поступают поршни весом 50...200 кг, т. е. реализуется беспылевой транспорт. Однако в момент переполнения приемника выброс увеличивается в сотни и тысячи раз. Также происходит по-

вышенный выброс в случае нарушения пробкового режима, когда реализуется аэрозольный режим с повышенным расходом воздуха.

В период обследования системы пневмотранспорта фильтры находились в разрушенном состоянии. Возникла необходимость создания пылеуловителя, который не оказывал бы запирающего действия на пневмотранспортную линию и обладал достаточной эффективностью обеспыливания воздуха.

Поэтому было решено выполнить пылеуловитель, представляющий собой систему воздухоочистки с комбинацией циклонов и фильтрующих приемников с элементами для регулировки потоков [135]. Схема воздухоочистной установки представлена на рис. 4.30.

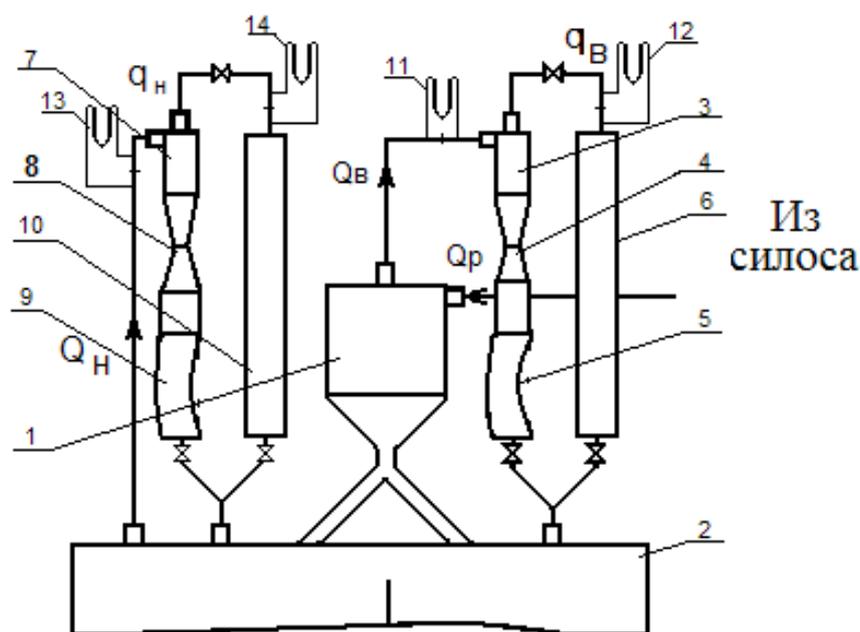


Рис. 4.30. Схема воздухоочистной установки

Принцип работы установки следующий. Запыленный воздух из силоса в количестве  $Q_P$  поступает в разгрузитель, где происходит разгрузка потока от основной массы частиц. Воздух из разгрузителя 1 в количестве  $Q_H$  с высокой концентрацией частиц проходит в приемник 2, где освобождается от сгустков частиц и далее в циклон 7. Из циклона 7 воздух с меньшим содержанием частиц в количестве  $q_H$  выводится в рукавный фильтр 10, а воздух с повышенной концентрацией частиц через успокоитель потока 8 поступает в фильтрующий приемник 9. Воздух из разгрузителя 1 с меньшей концентрацией частиц в количестве  $Q_B$  проходит в циклон 3 и далее разделяется на два потока: поток с меньшей концентрацией частиц в количестве  $q_P$  направляется на фильтрацию в рукавный фильтр 6, а другой поток через успокоитель потока 4

поступает в фильтрующий приемник 5. При определенном соотношении потоков, процесс транспортировки материала и очистки воздуха проходит стабильно и эффективно: зависания материала в разгрузителе не наблюдается, сопротивление системы очистки возрастает незначительно; вынос пыли в фильтры 6 и 10 составляет менее 0,003 % от количества пыли поступившей в разгрузитель.

За основу воздухоочистителя была принята аэродинамическая схема циклона, которая была отработана в сублиматном производстве СХК г. Северск, и на основе которой были выполнены реконструкции с заменой металлокерамических фильтров на циклоны [28].

Циклоны 3, 7 соединены с фильтрующими приемниками, у которых фильтрующая поверхность составляла более  $6 \text{ м}^2$ , т. е. соответствовала нормальной фильтрации всего воздуха поступающего в систему. Емкость объемов приемников позволяли накапливать в них цемент в количестве 1,4 т (1400 кг). Для быстрой наладки применялись расходомеры 11–14.

Если режим отклоняется от поршневого и в циклоны поступает пыль, близкая по фракционному составу к исходной, то она собирается в приемниках. В этом случае расход запыленного воздуха приближается к максимальному значению и заслонки верхнего вывода воздуха из циклонов открыты.

В закрытом положении верхних циклонных заслонок (при минимальном расходе воздуха) работа системы осуществляется пропуском отработанного воздуха в фильтрующие приемники. В этом случае фильтры приемника работают в облегченных условиях, поскольку в них поступает пыль из циклонов в виде жгутов. Регенерация фильтров осуществляется один раз в смену после закачки цемента в приемник. Однако, для предотвращения разрыва ткани фильтрующего приемника, подбирается режим, при котором заслонки верхнего вывода воздуха из циклонов приоткрыты, для вывода избытка воздуха в атмосферу.

Выброс цементной пыли, проведенный инструментальным путем, составил около 0,5 г/с при производительности системы пневмотранспорта по цементу 15 т/час (4167 г/с) и расходах воздуха 600–1500  $\text{м}^3/\text{час}$ . Столь незначительная величина выброса позволила отказаться от рукавных фильтров 6, 10, стабилизировать работу пневмотранспорта, обеспечить устойчивую, высокую эффективность системы воздухоочистки (99,99 %) независимо от режима транспортирования материала.

Полученные результаты позволили стабилизировать работу пневмотранспортной линии при незначительных потерях материала.

#### 4.1.12. Низконапорные транспортные системы

Ручной пневмоперегрузчик зернистых и пылевидных материалов был разработан в НИИ ПММ для транспортировки поставляемого сырья в установку переработки и изготовления продукта [155].

Предлагаемое устройство относится к группе струйных насосов с центральным соплом, но по сравнению с традиционными конструкциями имеет ряд существенных отличий. Устройство представляет собой инжекторную насадку на гибкий участок транспортного продукта провода весом всего в несколько килограммов. В качестве энергоносителя к соплу инжектора подводится сжатый воздух от компрессорной установки с помощью гибкого шланга. Забор сыпучего материала осуществляется через входной конфузурный участок инжектора за счёт вакуума, возникающего в результате эжекционного воздействия струи сжатого воздуха, выбрасываемого из сопла. Разгон сыпучего материала и дальнейшая его подача в транспортный трубопровод осуществляются через смесительный участок инжектора и следующего за ним диффузора, в котором осуществляется частичное преобразование кинетической энергии движущегося газа в статическое давление. Несмотря на сравнительно низкий КПД, предлагаемый пневмоперегрузчик незаменим в целом ряде производственных ситуаций благодаря простоте конструкции, малым габаритам и весу, отсутствию трущихся и вращающихся деталей, а также благодаря возможности осуществлять перегрузочные работы на необорудованных площадках и по временно сооруженным трубопроводам, включающим в себя гибкие резиноканевые рукава. Конструкция инжекторной насадки представлена на рис. 4.31. Газодинамические и геометрические параметры струйного насоса определяются точно так же, как и для газоструйного эжектора [170].

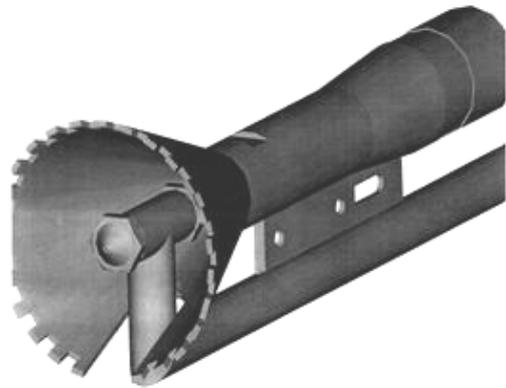


Рис. 4.31. Инжекторная насадка

Для расчёта достижимых параметров газоструйного насоса необходимо задать весовую конструкцию твёрдой фазы в газовом потоке и определить общие потери давления в транспортном трубопроводе, включая потери давления в газоочистных устройствах (циклоны, рукавные фильтры, ротационные отделители и др.). Для порошкообразных материалов весовую концентрацию можно принять, как для цемента, учитывая приведённую дальность транспортирования  $L_{\text{пр}}$  [141].

Полное сопротивление транспортного трубопровода или общие потери давления рассчитывались по [141].

Технические характеристики пневмоперегрузчика приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

*Технические характеристики пневмоперегрузчика*

Производительность (по глинозёму с весовой концентрацией $\mu = 2,0$ кг/кг), кг/ч.	500
Производительность (по электрокорунду с весовой концентрацией ( $\mu = 3,0$ кг/кг), кг/ч.	700
Рабочее давление сжатого воздуха, МПа	0,35–0,4
Расход сжатого воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$ .	180
Максимально достижимый вакуум при откачивании воздуха из замкнутой ёмкости, %	90
Диаметр рабочего сопла, мм	8
Диаметр транспортного трубопровода, мм	50
Приведенная дальность транспортирования, включая подъем на высоту 4 м	116
Коэффициент эжекции по чистому воздуху	0,5
Полное сопротивление транспортного трубопровода, включая сопротивление газоочистных устройств, МПа	0,03

Двухгодичная эксплуатация ручного пневмоперегрузчика показала, что сквозной износ смесительной камеры инжектора и его выходного диффузора наступает при перекачивании 30 т электрокорунда.

Струйные насосы можно разделить на две основные группы: с центральным соплом и с кольцевым. Насосы с кольцевым соплом до настоящего времени не нашли широкого применения несмотря на эффективный способ загрузки, осуществляемый вдоль оси насоса и способностью перемещать кусковые материалы крупностью до 40 мм (по данным фирмы Хёлтер) [187]. Причина низкой заинтересованности в таких насосах кроется в том, что они обладают не достаточным по сравнению с насосами с центральным соплом коэффициентом сжатия, а поэтому и меньшей дальностью транспортирования. В отечественной промышленности для транспортирования цемента на расстояние до 150 м используют струйные насосы разных конструкций ЦНИИОМТП и Волгоградского отдела института Гидропроект им. С.Я. Жука [187], созданные на основе эжектора с центральным соплом. Диаметр стальных магистральных трубопроводов в выпускаемых струйных насосах варьируется от 150 до 200 мм, а соответствующая техническая производительность от 25

до 40 т/ч. Аналогичные струйные насосы в разных вариациях выпускаются фирмами «Мёллер» (Moller) и «Франц Зайферт» (Franz Seifert) Германия, а также фирмами «Ламберн» (Lambert) и «Девистел» (Devistal) США [85].

Струйные насосы с кольцевым соплом, обеспечивающие транспортирование крупнокусковых материалов, выпускает фирма «Хёлтер» (Германия). Все выше перечисленные струйные насосы, как отечественного, так и зарубежного производства выпускаются в стационарном исполнении с точной привязкой к технологической схеме конкретного предприятия и предназначены для обеспечения основного цикла производства.

В НИИ ПММ Томского госуниверситета, в лаборатории процессов и аппаратов порошковой технологии разработаны мобильные пневматические перегружатели сыпучих материалов с центральным и кольцевым соплом. Такие перегружатели не требуют особой привязки к конкретным условиям предприятия и могут быть оперативно применены на неподготовленных площадках, а также перекачивать сыпучие материалы из любой тары и из насыпи. Один из таких пневмоперегружателей с центральным соплом успешно эксплуатируется на одном из предприятий более 10 лет [155].

Для перегрузки крупнозернистых материалов в последнее время в лаборатории разработан и изготовлен экспериментальный эжектор с кольцевым соплом, который пристыковывается к трубопроводу или гибкому рукаву таким же образом, что и пневмоперегружатель с центральным соплом, разработанный ранее, рис. 4.32. Сжатый воздух поступает в вихревую камеру 3 через тангенциальный патрубок 4 и истекает через кольцевое сопло с изменяемой геометрией 5, образованное входным участком смесительной камеры п. 2 и подвижной частью сопла 5. Изменение величины кольцевого зазора осуществляется путем осевого смещения подвижной части сопла посредством резьбового соединения с фиксирующей гайкой 8. Съёмный вихревой конфузор 6 служит для улучшения условий входа сыпучего материала в приемную часть эжектора при разгрузке сыпучего материала из открытой тары или из насыпи.

Атмосферный воздух входит в тангенциальный патрубок 7 и предварительно аэрирует поступающий в эжектор сыпучий материал. На рис. 4.32 представлен действующий образец экспериментального эжектора с кольцевым соплом при снятом входном конфузоре.

Для достоверности сравнения эксплуатационных характеристик эжекторов различных конструкций проточная часть обоих эжекторов выполнена одинакового сечения, а расходная характеристика центрального

сопла ранее разработанного эжектора уравнена с расходной характеристикой кольцевого сопла благодаря его изменяемой геометрии. К гибкому участку транспортного трубопровода оба эжектора пристыковываются со стороны выходного участка диффузора.

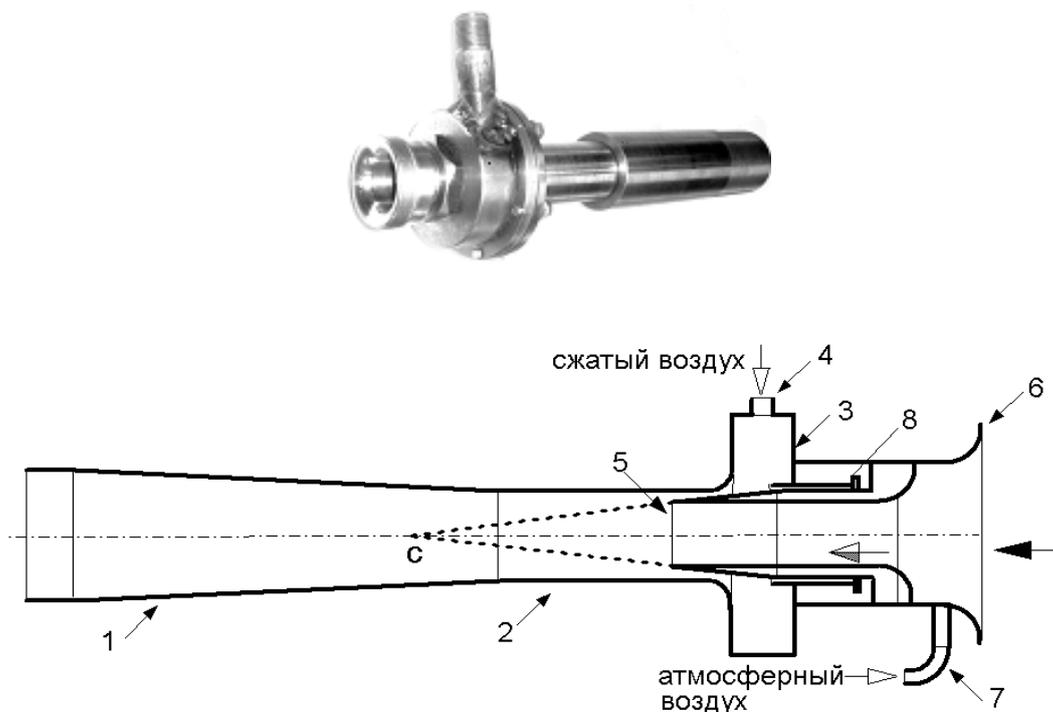


Рис. 4.32 Эжектор с кольцевым соплом

Параметрический расчет кольцевого эжектора проводился в предположении, что по экспериментальным данным И.Д. Семикина и других исследователей, половина угла раскрытия струи на начальном и основном участке меняется от 0 до 10 градусов при среднем значении 8 градусов 15 минут [187]. Геометрические характеристики проточной части эжектора определены по методике предложенной В.А. Успенским [187].

Отличительной особенностью механизма эжектирования в случае кольцевого сопла является то, что рабочей поверхностью струи является внутренняя поверхность вращающейся газовой воронки с вершиной в точке «С», рис. 4.32. Процесс эжектирования, смешивания и разгона твердой фазы в такой конструкции происходит на участке цилиндрической смесительной камеры и частично захватывает диффузор. Поэтому, для более эффективной работы такого эжектора требуется удлиненная смесительная камера по сравнению с аналогичной камерой эжектора имеющего центральное сопло. Для экспериментальных исследований был изготовлен эжектор с укороченным смесительным участком.

Сравнительные результаты испытания обоих эжекторов представлены в табл. 4.2.

Результаты испытаний показывают, что при более низкой напорной характеристике кольцевого эжектора последний обладает большим коэффициентом эжекции. Это говорит о том, что при одинаковом диаметре смесительного участка активная коническая площадь струи кольцевого сопла больше чем площадь конуса раскрытия струи центрального сопла на основном участке. Это означает, что вследствие прилипания к стенкам смесительной камеры угол раскрытия струи кольцевого сопла меньше чем предполагалось в начале.

Таблица 4.2

*Сравнительные параметры насосов*

Параметры	ЦС	КС
Производительность по глинозему, кг/час, ( $\rho_n = 1084 \text{ кг/м}^3$ )	500	300
Рабочее давление сжатого воздуха при испытаниях, МПа	0,35–0.4	0,35–0.4
Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /час	180	147
Максимально достижимый вакуум, %	90	60
Площадь сопла, мм <sup>2</sup>	50,3	50,3
Диаметр транспортного трубопровода, мм	50	50
Приведенная дальность транспорта, включая высоту подъема на 4 метра	116	116
Коэффициент эжекции по чистому воздуху	1,5	2,7
Полное сопротивление транспортного трубопровода, включая сопротивление газоочистных устройств, МПа	0,03	0,03

*Примечание:* «ЦС» – эжектор с центральным соплом, «КС» – эжектор с кольцевым соплом.

Отсутствие выступающих деталей по оси проточной части предлагаемого эжектора и полученные результаты испытаний открывают возможность использования его в пневмотранспортных установках струйного типа в качестве промежуточных или конечных тяговых эжекторов, устанавливаемых на магистральном трубопроводе, что значительно повысит дальность транспортирования.

*Пневмотранспортные установки гранулированных материалов* являются основным элементом технологии конфекционирования полимерных материалов. При транспортировке этих материалов образуются примеси в виде стружки, волокон, пыли, которые ухудшают качество товарного продукта. Гранулированный полиэтилен в процессе транс-

портирования или перемешивания может приобрести электрический заряд, адсорбировать на поверхности пыль. Силы прилипания мелких частиц зависят от их размеров, влажности воздуха, степени электризации. Силы прилипания растут с увеличением времени контакта и зависят от площади контакта, которая в свою очередь зависит от размера и формы частиц [15].

Эффект отрыва частиц с поверхности гранул зависит от режима обтекания гранул воздушным потоком, размера и формы частиц. При обтекании слоя прилипших частиц может происходить удаление верхних частиц слоя, а при значительных инерционных силах, действующих на гранулу, и отрыв всего слоя.

Эффективность выделения частиц из воздушного потока, зависит от размеров, формы, плотности частиц. При малых скоростях движения частиц относительно несущей среды, при которых имеет место вязкое обтекание, частицы могут ориентироваться любым образом по отношению к направлению своего движения. Если достигается критическое значение режима обтекания, когда начинается турбулизация обтекающей частицу потока, характер движения меняется. Вытянутые частицы стремятся принять такое положение, при котором сопротивление среды было бы максимальным для пластинок, чешуек, и т. п. Это будет то положение, в котором их более развитые грани и более длинные ребра расположены перпендикулярно направлению движения.

Сопротивление частиц неправильной формы при движении их относительно несущего потока зависит от размеров, формы, режима обтекания несущей средой. Для лентообразных чешуйчатых частиц коэффициент формы во много раз больше единицы. Особенно малой подвижностью обладают вытянутые частицы. Такие частицы имеют развитую поверхность, склонны к налипанию и образованию агломератов. Особенность поведения частиц, отличающихся от шарообразной формы, определяет конструктивные особенности аппаратов для отделения частиц от несущей среды. Например, в центробежных циклонных пылеотделителях поведение частиц носит случайный характер, т. к. из-за больших градиентов скоростей в пристеночной зоне несущего потока, частицы деформируются, сворачиваются в жгуты, и, взаимодействуя между собой, образуют скопления, приводящие к забивке разгрузочных устройств и пылевыводных отверстий. В известной схеме пневмотранспорта гранулята полиэтилена запыленный воздух нагнетается в циклоны с последующей доочисткой в рукавном фильтре (см. рис. 4.33). Пыль полиэтилена осаждается на внешней поверхности рукавов. Периодически внутрь рукавов подается импульс продувочного сжатого воздуха, вызывая вибрацию рукавов. При этом пыль стряхивается с ткани рука-

вов и собирается в пылеприемном бункере фильтра. Анализ работы этой установки показал, что из-за зависания примеси в циклоне она выносится в фильтр, приводя к его забиванию, создавая большое противодавление в системе. Установка неустойчива в работе, требует ручного обслуживания, повышенных трудозатрат.

Разработан метод очистки воздуха от наэлектризованной примеси, обладающий лучшими эксплуатационными характеристиками.

Схема сепарации наэлектризованной полимерной примеси из воздушного потока показана на рис. 4.34 [15].

Пневмотранспортный поток проходит в накопительный бункер, из которого воздух с примесью поступает в спиралевидный концентратор 1 (рис. 4.34). Часть пневмотранспортного потока (доли процента) с гранулятом, минуя накопительный бункер, направляется в концентратор 1, снабженный регулирующей заслонкой 3.

Большая часть очищенного воздуха с расходом  $Q$  выходит из центрального патрубка концентратора 1.

Незначительная часть воздуха с расходом  $q_1$  с повышенным содержанием частиц отводится в выносной циклон 2, где смесь примеси и гранул выделяется из потока. Очищенный воздух выбрасывается в атмосферу.

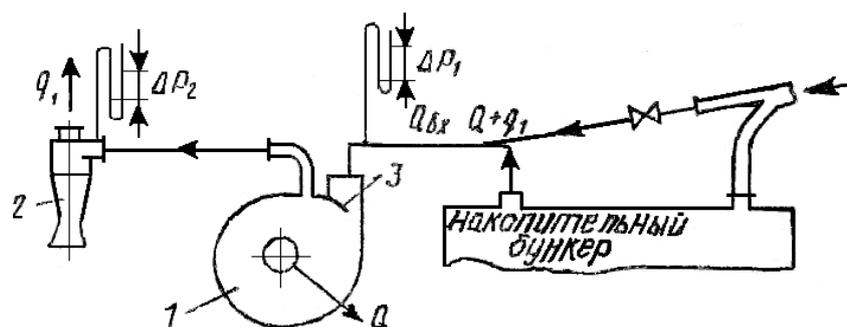


Рис. 4.34. Схема сепарации наэлектризованной полимерной примеси из воздушного потока [15]

Скорость потока на входе в концентратор 1 регулируют заслонкой 3. Поток направляют со скоростью 20–25 м/с вдоль криволинейной поверхности концентратора. При скорости потока 20–25 м/с гранулы за счет сил

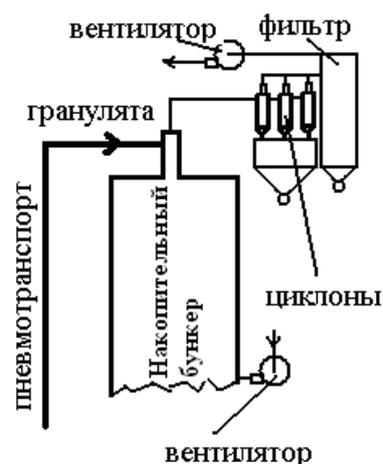


Рис. 4.33. Схема пневмотранспорта гранулированного полиэтилена

упругости, Магнуса и центробежных сил интенсивно ударяются о криволинейную поверхность концентратора, «размывают» жгуты, диспергируют сгустки примеси, которые входят в контакт с криволинейной поверхностью за счет электрических сил. При скорости потока выше 25 м/с наблюдается унос гранул в атмосферу из концентратора. Количество гранул должно быть таким, чтобы были охвачены все участки «обстрела» криволинейной поверхности и осуществлялось интенсивное взаимодействие с примесью, причем количество вводимых гранул зависит от содержания в примеси волокон, стружки, сгустков и их размеров.

По мере концентрирования примеси вдоль криволинейной поверхности концентратора, на поверхности образуется подстилающий слой из частиц примеси, который уменьшает рикошетирование гранулята, движущегося с незначительной амплитудой в прыжковом режиме. Подстилающий слой образуется при концентрации частиц примеси в отводимой части потока более  $1 \text{ г/м}^3$ . При концентрации частиц примеси более  $10 \text{ г/м}^3$  гранулы застревают в подстилающем слое, увеличивая трение слоя, ухудшается несущая способность потока вследствие его торможения частицами, эффективность сепарации уменьшается, вывод частиц затрудняется. Затрудняется также контакт частиц с поверхностью. Концентрация частиц в загрязненной части потока регулируется количеством отводимого из спирального концентратора в выносной циклон 2 воздуха, вместе с частицами примеси и гранулята. Регулирование осуществляется по показаниям манометров изменением входного сечения, путем перемещения заслонки 3. В выносном циклоне 2 вводимый с примесью и гранулами газовый поток закручивается, при этом частицы примеси и гранулята по периферии отводятся из сепарационной зоны, гранулы способствуют выводу примеси в приемник. Очищенный в выносном циклоне поток выводится в атмосферу, а примесь и гранулы отправляются на переработку. При этом наличие гранулята в примеси улучшает ее сыпучесть т. к. частицы больших размеров имеют меньшую поверхность соприкосновения и обладают большей подвижностью. Это облегчает истечение материала из расходных емкостей перерабатывающих машин, увеличивая их производительность. Контроль количества воздуха, сбрасываемого через центральный патрубок концентратора с расходом  $Q$  и выносного циклона с расходом  $q_1$ , ведется с помощью манометров по перепадам давлений  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  и известным коэффициентам гидравлического сопротивления. Количество воздуха с гранулятом подбирают таким образом, чтобы количество гранул было достаточным для нормального истечения примеси из выносного циклона 2.

Разработанная система обеспыливания воздуха обладает лучшими эксплуатационными характеристиками, позволяет отказаться от рукав-

ных фильтров, стабилизировать работу пневмотранспорта, осуществлять работу без использования дополнительных вентиляторов.

#### **4.2. Системы транспортирования дисперсных материалов с низкими скоростями и высокими концентрациями**

Необходимость перемещения материалов на значительные расстояния по трассам сложной пространственной геометрии, транспортирование с высокой производительностью при малой скорости движения дисперсной среды привело к разработке систем с импульсным перемещением материала в виде поршней. Пневмотранспорт сыпучих материалов с концентрацией, близкой к насыпной, является наиболее экономичным по сравнению с другими режимами транспортирования. При больших весовых концентрациях наиболее полно используется энергия несущей среды, нет необходимости в обеспечении скорости взвешивания частиц в начале трубопровода, уменьшается скорость материала на выходе из магистрали, улучшается возможность пылеотделения. Однако дальность транспорта сплошным потоком при любом перепаде ограничивается 20 м [164]. С увеличением дальности поток становится неустойчивым: наблюдается хаотичное образование поршней сыпучего материала с последующей неравномерностью их движения относительно друг друга, их объединением, разрушением, а в некоторых случаях закупоркой трубопровода. В [164] проведен анализ механизмов образования разрывов, нестабильности в структурах перемещаемых слоев материала. Для реализации транспорта повышенной дальности необходимо выполнение ряда трудно выполнимых мероприятий, одним из которых является использование ступенчатого расширяющегося трубопровода и уменьшение скорости движения по повороту. Делается вывод, что наиболее действенным при транспортировании на значительные расстояния является использование импульсного поршневого пневмотранспорта, в котором за счет использования малого перепада давления на порции сыпучей среды распределение давления близко к линейному и растягивающие усилия незначительны.

##### **4.2.1. Характеристика систем транспортирования дисперсных материалов с низкими скоростями и высокими концентрациями**

Основная особенность импульсного способа – относительно малая скорость транспортирующего сжатого воздуха (2–10 м/с), что позволяет медленно перемещать сыпучий материал в так называемой плотной фазе со скоростью 1,5–5 м/с. Малые скорости материаловоздушных потоков дают возможность снижать общие энергетические затраты, сокращать абразивный износ элементов установки, транспортировать

чувствительные на истирание продукты, ликвидировать расслоение подаваемой смеси и применять фильтрующие установки с малой поверхностью фильтра.

Фирма «Бюллер-Миаг» (ФРГ) выпускает несколько типоразмеров камерных насосов, входящих в состав пневмотранспортных установок, (систем) с различным принципом действия [104]. В зависимости от физикомеханических свойств транспортируемого материала (размера частиц, прочности на истирание, абразивности, слипаемости, способности к аэрированию) рационально, по мнению фирмы, использовать 6 систем пневмотранспорта (рис. 4.35).

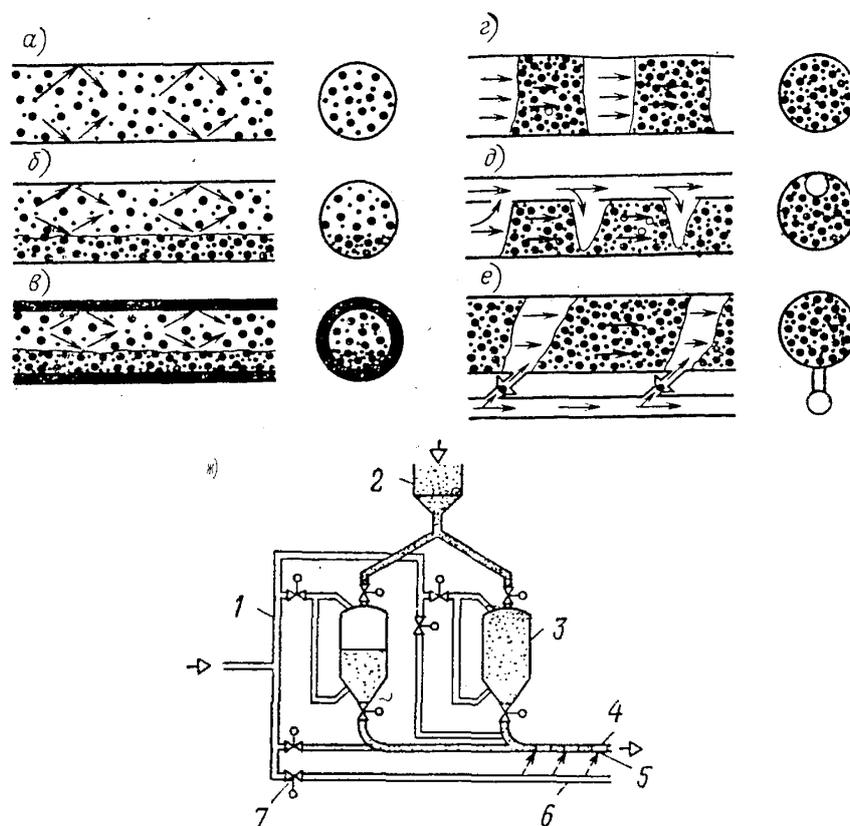


Рис. 4.35. Типы потоков транспортирования:

*a–г – схемы потоков воздушно-материальной смеси в пневмотранспортных системах; а – подача в потоке сжатого воздуха; то же с подстилающим слоем («Флуид-Лифт»); в – подача в гибком трубопроводе в потоке сжатого воздуха с подстилающим слоем («Флуид-Флекс»); г – импульсная подача с образованием пробок материала в начале транспортного трубопровода («Такт-Шуб»); д – импульсная подача с прокладкой перфорированного воздухопровода внутри транспортного трубопровода («Флуид-Штат»); е – импульсная подача с прокладкой параллельного воздухопровода с форсунками-байпасами («Флуид-Шуб»); ж – схема установки камерного насоса с двумя резервуарами в системе «Флунд-Шуб»:  
 1 – подводящий трубопровод; 2 – бункер; 3 – резервуар питателя; 4 – транспортный трубопровод; 5 – сопло поддув; 6 – сопроводительный трубопровод; 7 – клапан*

Графики скорости воздуха в конце трубопровода в этих же установках представлены на рис. 4.36. Транспортные установки «Такт-Шуб», «Флуид-Штат» и «Флуид-Шуб» осуществляют подачу сыпучего материала импульсным способом с разделением потока аэросмеси на отдельные пробки.

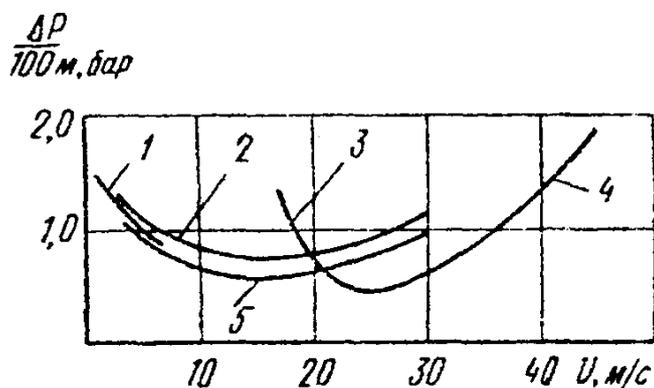


Рис. 4.36. График скорости воздуха в конце транспортного трубопровода в установках фирмы «Бюллер-Миаг» (ФРГ):

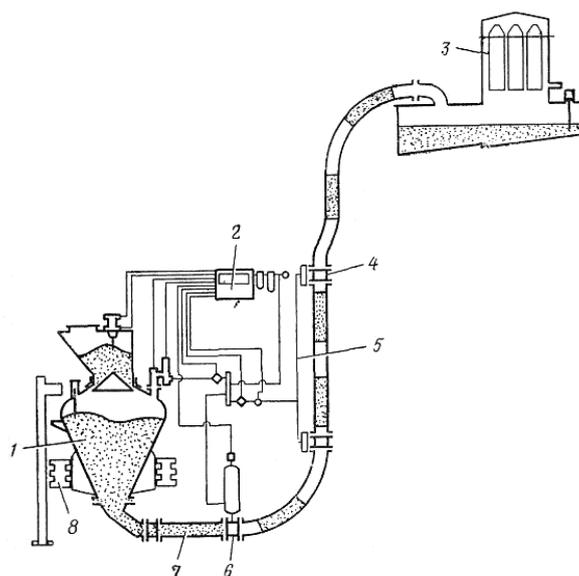
1 – пульсационная транспортировка («Такт-Шуб»); 2 – то же, с внутренним перфорированным трубопроводом («Флуид-Штат»); 3 – транспортировка с подстилающим слоем («Флуид-Лифт»); 4 – транспортировка с малой концентрацией смеси материала с воздухом; 5 – пульсационная транспортировка с дополнительным параллельным воздухопроводом и соплами («Флуид-Шуб»)

Отличительными особенностями этих трех систем друг от друга являются следующие:

- в установке Такт-Шуб «пробки» подаваемого материала образуются в начале транспортного трубопровода;
- в установке Флуид-Штат эти пробки образуются с помощью перфорированного воздухопровода, находящегося внутри транспортного трубопровода;
- в установке системы «Флуид-Шуб» пробки материала образуются и поддерживаются с помощью форсунок (байпасов), расположенных на дополнительном воздухопроводе, который на определенном расстоянии связан с транспортным трубопроводом.

Фирма «Систем-Техник» (ФРГ) разработала пневмотранспортную установку «Пневмовибропульсатор» (рис. 4.37), которая также подает сыпучий материал импульсным способом [104]. Основной рабочий орган этой установки вибрационный пневматический камерный насос с нижней выгрузкой. Установку используют для подачи влажных связанных материалов (например, транспортировки высокоактивной порошкообразной глины с влажностью 3–5 %). Резервуар насоса установлен на вибраторах, которые создают направленные колебания. Внутренняя

полость резервуара имеет гладкую поверхность без каких-либо выступающих частей. На выходе из насоса расположен гибкий трубопровод (рукав), который предотвращает передачу вибрации на металлический трубопровод. Импульсный клапан разделяет поток материала на воздушные подушки и пробки материала. Установленные с интервалом по всему трубопроводу релейные станции снабжаются сжатым воздухом по параллельным воздухопроводам и дополнительно поддерживают систему пневмоимпульса. Транспортный цикл выполняется автоматически благодаря следующему управлению.

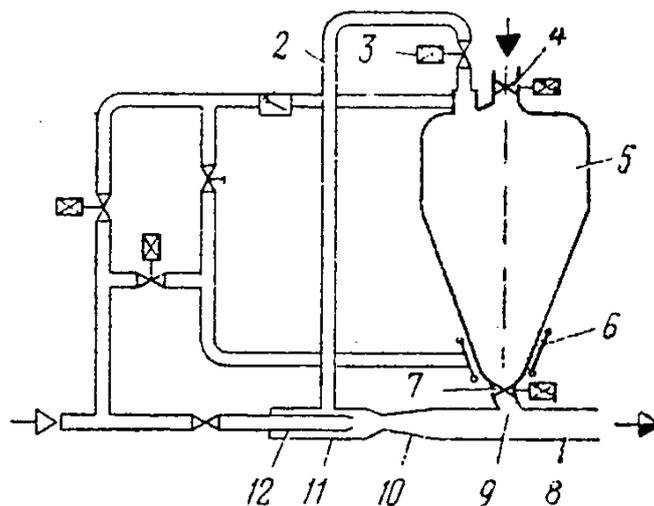


*Рис. 4.37. Пневмотранспортная установка «Пневмовибропульсатор с вибрационным камерным насосом фирмы «Систем-Техник» (ФРГ):*  
 1 – резервуар; 2 – шкаф управления; 3 – фильтр; 4 – релейная станция (регулятор);  
 5 – воздухопровод; 6 – импульсный клапан; 7 – гибкий трубопровод (шланг);  
 8 – вибратор

Западногерманская фирма «Клаудиус Петерс» разработала конструкцию камерного насоса со сбросом воздуха в процессе деаэрации в транспортный трубопровод (см. рис. 4.38). Этот камерный насос оснащен эжектором, который при подаче сжатого воздуха в транспортный трубопровод одновременно эвакуирует запыленный воздух из резервуара питателя.

Так как камерный насос работает периодически, то при автоматическом режиме очень важна своевременная фиксация положений верхнего и нижнего уровней порошкообразного материала в резервуаре. Существуют три основных способа автоматической регистрации составляющих цикла камерного питателя: контроль загрузки и выгрузки по массе, по времени и по объемному наличию материала в резервуаре

(с помощью указателей уровня). Контроль по массе имеет три разновидности установки резервуара: на весовой площадке, на эластичной подвеске с фиксацией наполнения и опорожнения резервуара с помощью концевых выключателей и на датчиках. Наиболее точен весовой контроль наличия материала в резервуаре (для крупногабаритных питателей с применением гидравлических или тензометрических датчиков; для малогабаритных камерных насосов на эластичной подвеске).



*Рис. 4.38. Камерный насос со сбросом воздуха в транспортный трубопровод: 1 – пневмопереключатель; 2 – трубопровод сброса воздуха; 3 – привод воздушного клапана; 4 – загрузочный затвор; 5 – резервуар питателя; 6 – аэроднище; 7 – нижний затвор; 8 – транспортный трубопровод; 9 – цилиндрический участок; 10 – диффузор; 11 – эжектор; 12 – сопло эжектора*

Достоинство камерных питателей – возможность создания больших рабочих давлений при высоких концентрациях материаловоздушной смеси. Недостаток этих питателей – их большие габариты, цикличность работы, сложная автоматика и значительные капитальные затраты.

Усовершенствование систем проводится в направлении повышения стабилизации загрузки трубопровода материалом и управлением процесса транспортирования [162].

Известна установка для пневматического транспортирования сыпучих материалов, в которой материал передвигается в виде отдельных пробок, а для повышения надежности транспортирования сыпучих материалов вдоль транспортного трубопровода проходит дополнительный, трубопровод с более высоким давлением сжатого воздуха и меньшего сечения, который на определенных расстояниях соединен с транспортным трубопроводом отводами, при этом ввод дополнительного воздуха в транспортный трубопровод осуществляется в зависимости от скорости движения пробок, которая контролируется устройствами типа светового

затвора, распределенными вдоль трубопровода, а в отводах, соединяющих основной и дополнительный трубопроводы, встроены кратковременно открывающиеся вентили, срабатывающие от импульсов, вырабатываемых световыми затворами при прохождении отдельных пробок и усиленных усилителями [11].

Недостатком этой установки является низкая надёжность работы световых затворов и установки в целом при транспортировании материалов, склонных к налипанию на стенки трубопровода (мел, сажа и др.). Также известна установка для пневматического транспортирования сыпучих материалов, содержащий питатель, материалопровод, дополнительный воздушный трубопровод с отводами, соединяющими последний с материалопроводом, и контрольное устройство, заблокированное с механизмом подачи и регулирования количества воздуха.

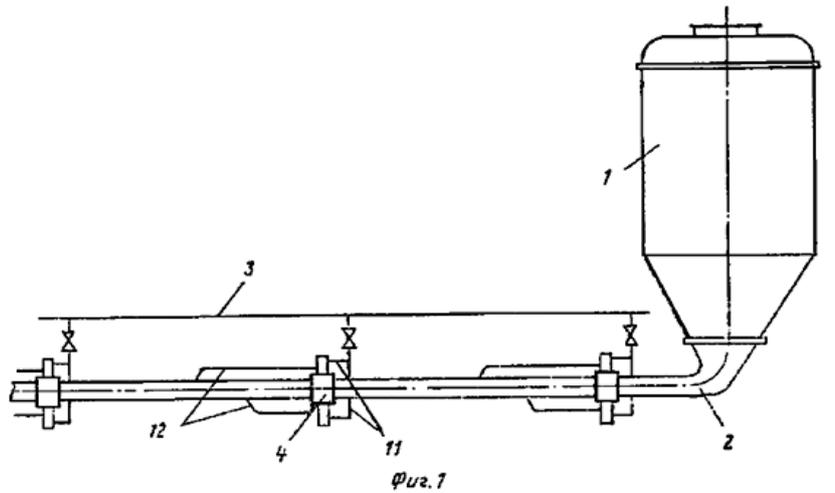
Недостатком этих установок является низкая надёжность работы контрольных устройств и сложность настройки системы управления.

На рис. 4.39. показан узел регулирования состояния материала в поршневой структуре.

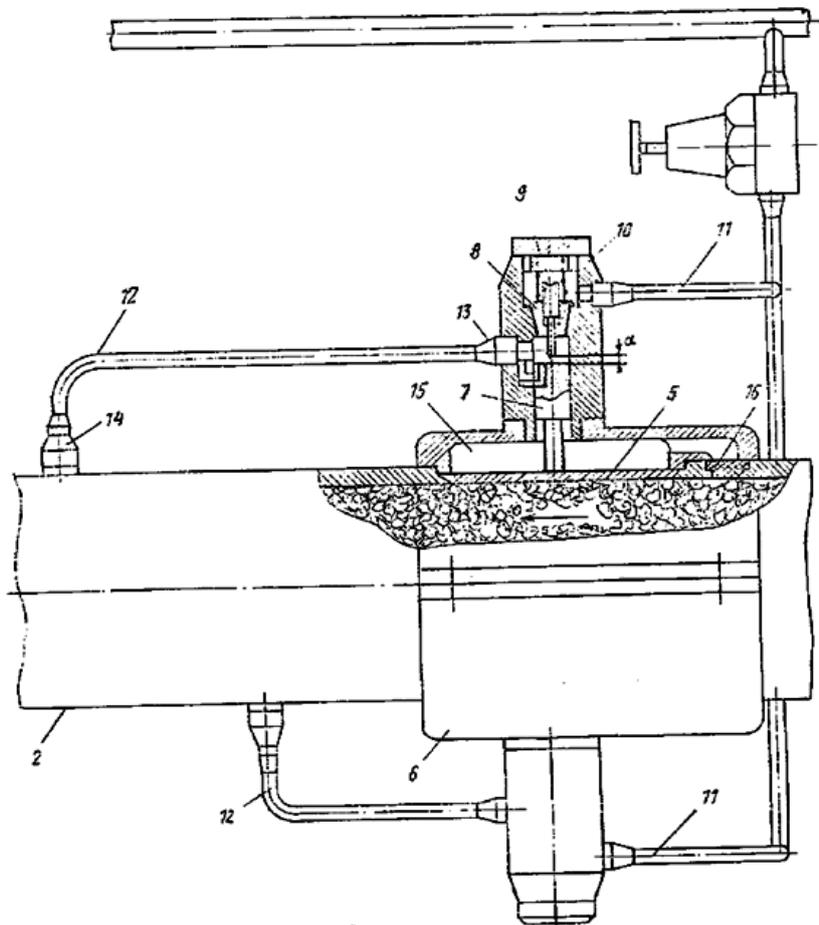
На фиг. 1 изображена принципиальная схема предлагаемой установки; на фиг. 2 – конструктивная схема контрольного устройства, связанного с механизмом подачи и регулирования количества воздуха.

Установка работает следующим образом (а.с. 676513).

Под действием перепада давления воздуха материал сплошным потоком, либо отдельными порциями вытесняется из камеры 1. В случае устойчивого, без переуплотнения, движения материала при нормальном давлении на стенку, обеспечивающем заданную скорость транспортирования, пневмотранспорт на некотором участке трассы осуществляется без стабилизирующих движение потока мер. По мере движения сыпучего материала в материалопроводе происходит изменение структуры потока, сопровождающееся на некотором участке трубопровода уплотнением сплошного потока, либо соединением отдельных порций, ухудшением условий фильтрации газа через движущийся слой и как следствие этого возрастанием нормального давления материала на стенку материалопровода и снижением скорости потока. По мере возрастания нормального давления на стенку увеличивается деформация втулки 5 и уменьшается зазор а между золотником 7 и винтом 9. По достижении нормального значения давления золотник 7, нажимая на винт 9, открывает клапан 8, посредством чего осуществляется ввод сжатого воздуха из трубопровода 3 в материалопровод 2 через 5 отводы 11 и 12. Благодаря этому происходит либо разрыхление потока, либо отделение одной порции, а в случае одновременного срабатывания нескольких устройств нескольких порций материала от потока.



Фиг. 1



Фиг. 2

Рис. 4.39. Узел управления состоянием материала в установке пневмотранспорта: 1 – напорная камера; 2 – материалопровод; 3 – дополнительный трубопровод сжатого воздуха; 4 – устройства контроля величины нормального давления; 5 – втулка; 7 – золотник; 8 – дроссельный клапан; 9 – регулировочный винт; 7 – золотник; 8 – клапан; 10 – корпус; 11, 12 – отводы; 13 – каналы; 14 – обратный клапан; 15 – полость; 16 – пористая вставка

При этом улучшаются условия фильтрации движущей материал газообразной среды, снижается нормальное давление и таким образом обеспечивается дальнейшее продвижение потока с заданной скоростью.

При уменьшении нормального давления, материала на стенку система золотник – клапан возвращается в исходное положение и подача дополнительного воздуха автоматически прекращается. Причем количество дополнительно вводимого в материалопровод воздуха зависит от того, насколько быстро структура потока достигает заданных параметров. Диапазон регулирования количества воздуха определяется величиной хода дроссельного клапана, при этом увеличение диапазона достигается тем, что форма сечения упругого элемента выбирается в зависимости от распределения величины нормального давления материала по поверхности материалопровода. Каждый из упругих элементов может быть сблокирован с несколькими дроссельными клапанами и, имеющими индивидуальную настройку и самостоятельный отвод, соединяющий его с материалопроводом, на определенном расстоянии от смежного с ним отвода.

Устройство для стабилизации истечения сыпучих материалов из емкости (рис. 4.40) содержит расположенные в корпусе емкости 1 один над другим сужающиеся книзу экраны 2, прикрепленные широкой частью к стенкам емкости. Система подачи сжатого газа содержит электромагнитный клапан 3, предназначенный для подачи регулируемых импульсов сжатого газа через запорно-регулирующую арматуру 4. Сжатый газ в систему поступает из ресивера 5. Ко внутренней поверхности каждого экрана прикреплены верхними и боковыми кромками упругие пластины 6 трапециевидальной формы, образующие с экраном внутренние полости 7, сообщающиеся посредством каналов 8 системой подачи сжатого газа. Кромка каждой упругой пластины, совпадающая с нижней кромкой экрана, остается не закрепленной, а лишь плотно с ней сопряжена.

Устройство работает следующим образом [12].

При необходимости стабилизации истечения сыпучего материала из емкости 1 сжатый газ при помощи клапана 3 через арматуру 4 импульсами поступает в каналы 8, распределяющие воздух по полостям 7. В период между импульсами сжатого газа полости 7, благодаря упругости пластин 6, давлению сыпучего материала, а также возможному избыточному давлению газа в емкости, плотно закрыты. В момент подачи импульсов сжатого газа упругие пластины, деформируясь, совершают колебания, частота и амплитуда которых зависят от частоты и давления и импульсного сжатого газа, а также от условий внутри камеры (избыточное давление, давление материала и т. д.), т. е. осуществляется вибромеханическое воздействие на слой сыпучего материала. В соот-

ветствии с частотой колебаний пластин 6 происходит периодическое сообщение полостей 7 с внутренней полостью емкости через каналы, автоматически образуемые при деформации поверхностей упругих пластин по их нижней кромке, благодаря чему осуществляется импульсное воздействие «ожигающего» сыпучий материал газа. Таким образом, благодаря комплексному, как вибромеханическому, так и аэромеханическому воздействию на слой материала в емкости, достигается стабильное истечение сыпучих материалов с адгезионными свойствами.

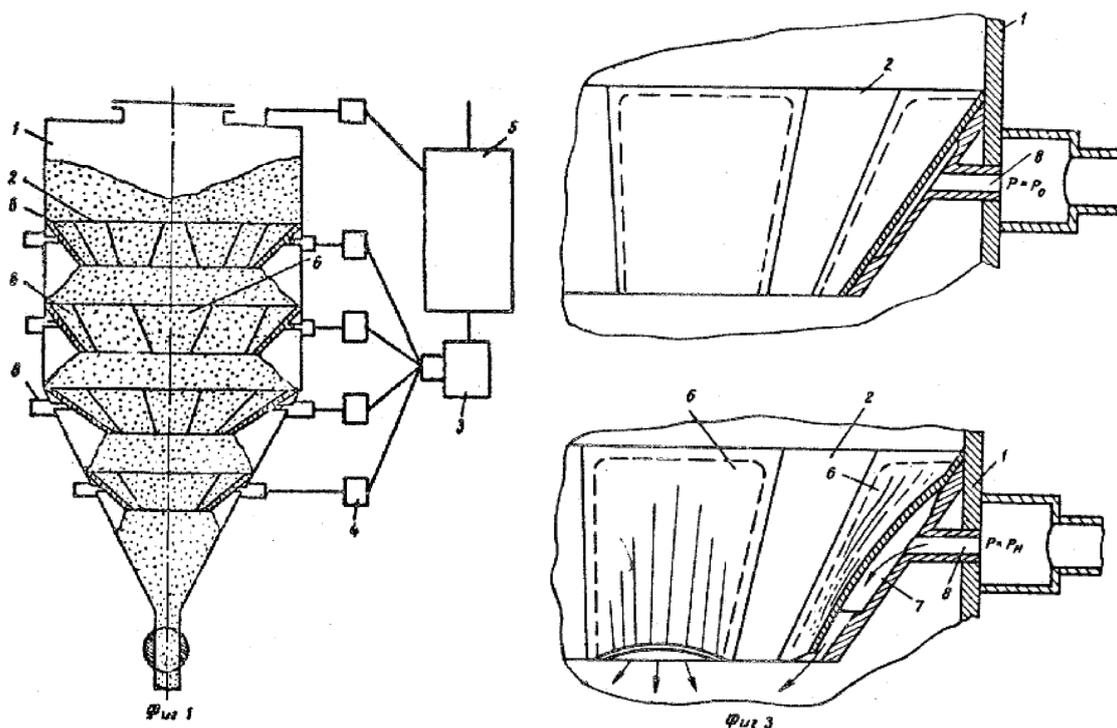


Рис. 4.40. Устройство для стабилизации истечения сыпучего из емкости

Для снижения энергоемкости и повышение надежности при транспортировании материала на дальнее расстояние предложено устройство [16] (см. рис. 4.41).

На фиг. 1 изображена принципиальная схема установки: на фиг. 2 рис. 4.41 – один из вариантов выполнения клапана.

Установка содержит расходный бункер 1 с аэрирующим приспособлением 2, транспортный трубопровод с патрубками 4, оборудованными клапанами 5, и источник разрежения (не показан). В процессе работы в трубопроводе 4 образуются порции материала 6.

Клапан 5 выполнен в виде обрезиненного диска 7, имеющего возможность перекрывать один конец патрубка 4, сообщен с трубопроводом 3, для чего он помещен в корпус 8; другой конец патрубка 4 сообщен с атмосферой. диск 7 подпружинен пружиной 9. Клапан снабжен

винтами 10 и 11, используемыми при его регулировке по разрежению в трубопроводе 3. При помощи винта 10 можно изменять усилие пружины 9, а винтом 11 можно отрегулировать расстояние между диском 7 и срезом патрубка 8.

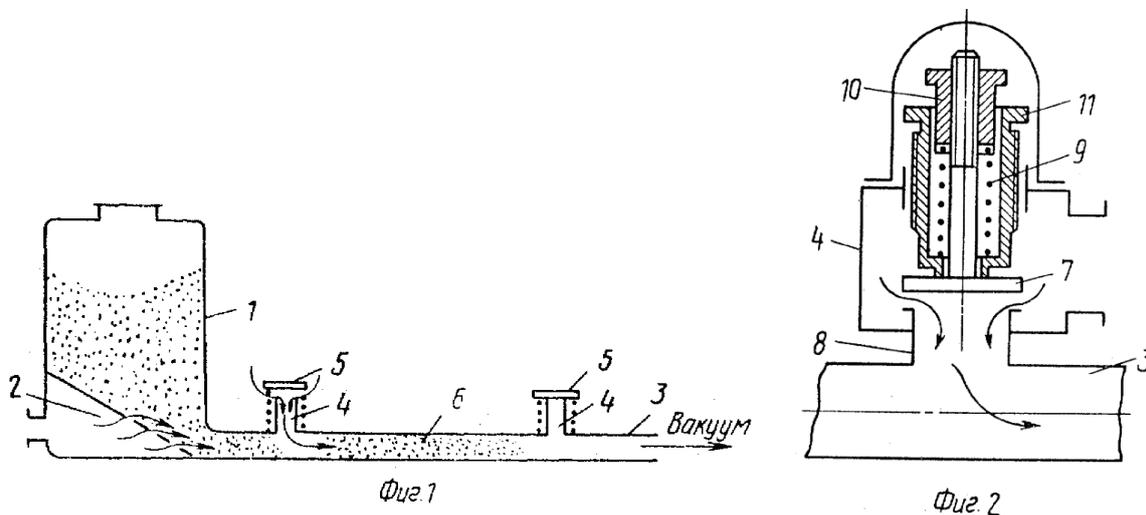


Рис. 4.41. Схема установки под разрежением

Установка работает следующим образом (рис. 4.41). При создании разрежения в транспортном трубопроводе 3 (фиг. 1) атмосферный воздух начинает поступать в трубопровод 3 через патрубки 4. При достижении необходимого разрежения и соответствующего расхода газа через патрубки 4 диск 7 (фиг. 2) преодолевает усилие пружины 9 и перекрывает доступ воздуха в трубопровод 3, в силу чего все клапаны 5 оказываются закрытыми. Разрежение в трубопроводе 3 продолжает нарастать, воздух преодолевает гидравлическое сопротивление сыпучего материала и начинает поступать в бункер 1 через азирующее приспособление 2, сообщенное с атмосферой, азируя сыпучий материал. Столб сыпучего материала всасывается в трубопровод 3. При этом давление газа в сечении патрубка изменяется пропорционально длине столба материала. Разрежение в первом от питателя, расположенном на начальном участке трубопровода 3, патрубке 4 уменьшается. В некоторый момент времени усилие пружины 9 становится достаточным для открытия клапана 5, атмосферный воздух входит в трубопровод 3 через патрубков 4, отсекая часть столба материала и образуя порцию б расчетной длины, которая под действием перепада давления перемещается к выходу из трубопровода. В это время по материалу 5 от патрубка 4 к питателю проходит обратная волна, выравнивая давление, прекращая поступление материала из питателя и дополнительно разрыхляя сыпучий

материал. После выхода порции материала в приемную емкость трубопровод вакуумируется и процесс повторяется. При повышенной дальности транспортирования (от десятков до сотен метров) трубопровод необходимо оборудовать несколькими патрубками с клапанами. Клапаны открываются по мере прохождения порций материала, При этом устраняются гидравлические потери на течение газа в запоршневой области, что позволяет поддерживать давление за поршнем близким к атмосферному. При достаточной мощности источника разрежения происходит ускоренное движение порции и ее скорость может достичь значений, нежелательных с точки зрения сохранения ее целостности. В этом случае расход транспортирующего газа через патрубки, расположенные за движущимся газопроницаемым поршнем материала, достигает величины, достаточной для захлопывания клапанов, расположенных за порцией. В запоршневой области появляется разрежение, что ограничивает перепад давления на первой порции и ее скорость и позволяет питателю сформировать вторую порцию материала, перемещающуюся на некотором расстоянии вслед за первой и т. д.

Последние два обстоятельства были исследованы экспериментально, что позволило найти оптимальный диапазон расстояний между патрубками – от 100 до 200 диаметров трубопровода, которое зависит от свойств перемещаемого материала, дальности транспортирования, мощности источника разрежения.

Благодаря наличию клапанов установка обладает способностью к саморегулированию. В частности, в случае изменения свойства материала и степени разрежения на выходе установка не склонна к закупориванию. Так, в случае разрушения порции и расстилания материала в трубопроводе расход газа через патрубки резко увеличивается, все клапаны закрываются и питатель формирует новую порцию, восстанавливая стабильное транспортирование. Наоборот, в случае образования в трубопроводе чрезмерно длинной пробки и остановки ее, например, на повороте трассы, расход газа уменьшается, открываются клапаны, расположенные за порцией, и давление в запоршневой области повышается до атмосферного, в то время как разрежение перед порцией продолжает нарастать. Высокий градиент давления либо сдвигает порцию и она преодолевает местное сопротивление, либо разрывает ее на части, что также восстанавливает процесс транспортирования.

Установка позволяет сократить энергоемкость процесса за счет использования атмосферного воздуха на пневмотранспортирование материала вместо сжатого газа.

Установка для пневматического транспортирования сыпучих материалов (см. рис. 4.42) содержит расходный бункер 1 с сыпучим материалом 32, в нижней части которого расположено аэрирующее приспособление 2, в котором наклонно в сторону транспортного трубопровода 6 закреплена пористая перегородка 3. Расходный бункер 1 и аэрирующее приспособление 2 установлены на весы 4. Нормально открытые пневмоклапаны 5 установлены на транспортном трубопроводе 6 и на каждом из накопителей 7, 8, 9. Для приема транспортируемого материала служат приемники материала 10, 11, 12, в верхней части которых смонтировано устройство для разгрузки сыпучих материалов из области пониженного давления в область повышенного давления 13, содержащее клапанное устройство 14. Очистка несущей среды осуществляется в циклоне 15 и фильтре 16. На трубопроводах установлены вентили 17, 18, 19.

Промежуточные накопители 7,8,9, установленные на вертикальном участке трубопровода 6, включают в себя корпус 20 (см. фиг.2), в верхней части которого смонтирован входной патрубок 21 с герметизирующей заслонкой 22. В нижней части корпуса 20 закреплена выходной патрубок 23 и патрубок 24, на котором установлен нормально открытый пневмоклапан 5. Внутренние полости патрубка 24 и накопителя 7 (в данном случае) сообщаются между собой посредством пористой перегородки (фильтра) 25. Нормально открытые пневмоклапаны 5, установленные на трубопроводе 6 и на каждом из накопителей 7, 8, 9, состоят из крышки 26, закрепленной с помощью резьбового соединения в основании 27.

К верхней части крышки 26 прикреплена пружина 28, на которой подвешены запорный диск 29 с направляющим штоком 30. В основании 27 клапана в нижней части и сбоку выполнены отверстия 31, 32. Кольцо 33 служит для уплотнения контакта диска 29 с основанием 27. Величина зазора между нижней частью основания, в котором выполнено отверстие 32, и диском 29 регулируется с помощью резьбового соединения крышки 26 и основания клапана 27. С увеличением величины указанного зазора увеличивается сила (определяемая перепадом давления и расходом газа через пневмоклапан), которую необходимо затратить для закрытия пневмоклапана 5.

Устройство для разгрузки сыпучих материалов из области пониженного давления в область повышенного давления 13 (фиг. 3) состоит из камер 34, 35 с выходными патрубками, на которых закреплены герметизирующие поворотные заслонки 36, 37.

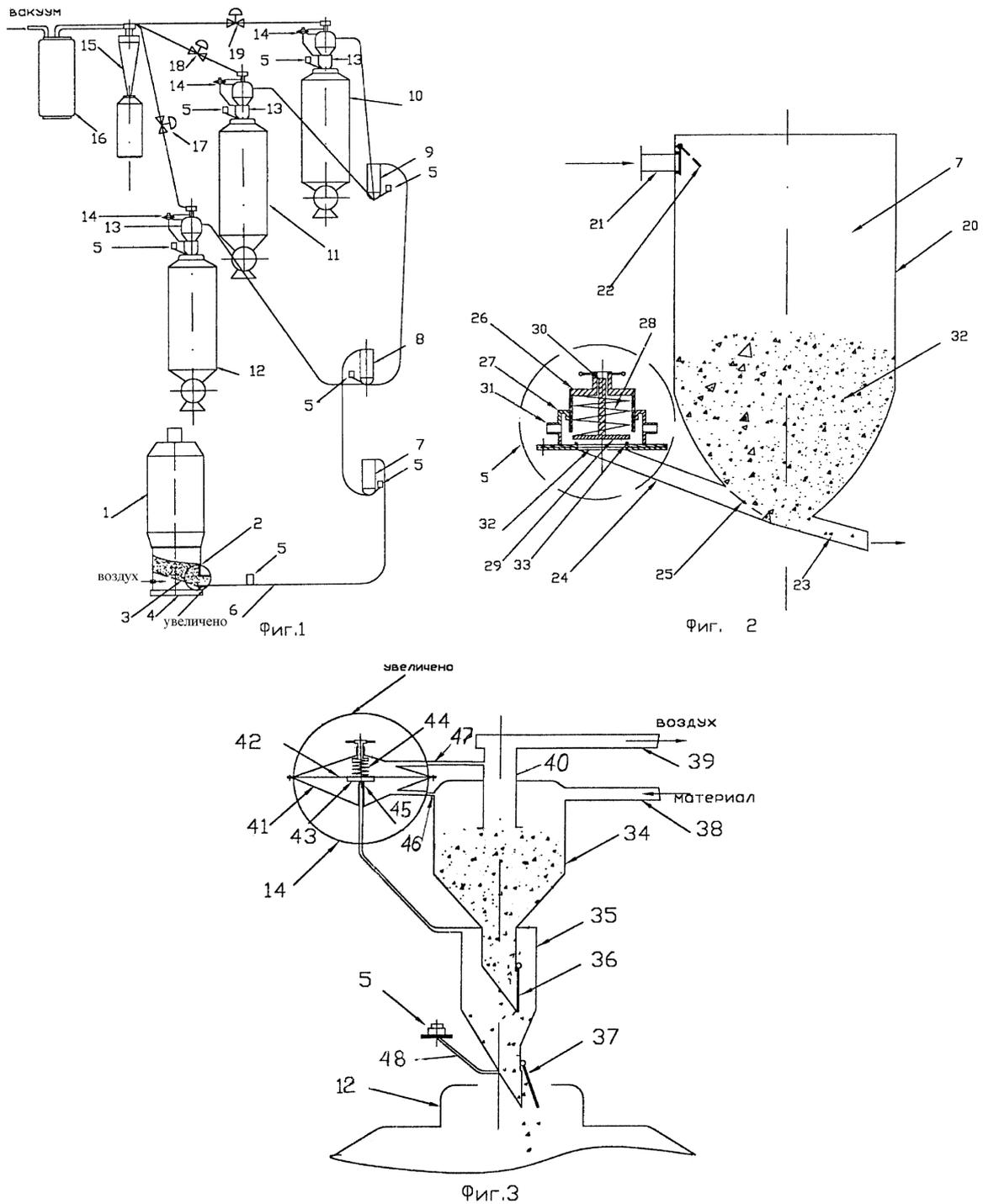


Рис. 4.42. Установка для пневматического транспортирования сыпучих материалов и устройство для разгрузки сыпучих материалов из области пониженного давления в область повышенного давления [135]:  
 Фиг. 1 – схема установки; Фиг. 2 – промежуточный накопитель;  
 Фиг. 3 – разгрузочное устройство сыпучего из области пониженного давления

В верхней камере смонтированы тангенциальные патрубки входа сыпучего материала 38 и выхода газа 39. Патрубок 39 закреплен на центральной трубе 40, входящей внутрь верхней камеры 34. Клапанное устройство 14 содержит корпус 41, внутри которого закреплена подпружиненная мембрана 42 с уплотнительным диском 43, который с помощью пружины 44 поджимается к входу переточной трубы 45 из нижней камеры 35. Патрубок 45 соединен с внутренней полостью бункера 35. Подмембранная полость клапанного устройства 14 сообщена с газовым пространством камеры 34 через патрубок 46. Полость над мембраной 42 соединена с внутренней полостью патрубка выхода газа 39 через патрубок 47. Внутрь нижней камеры 35 введен патрубок 48, на котором установлен нормально открытый пневмоклапан 5. Установка работает следующим образом.

Включается вакуумный насос (не показан), во внутренней полости установки устанавливается разрежение. Атмосферный воздух начинает поступать в транспортный трубопровод 6 через патрубки 24, на которых закреплены нормально открытые пневмоклапаны 5. В некоторый момент времени, при достижении необходимого разрежения в трубопроводе 6 и расхода газа через пневмоклапаны 5, усилие пружины 28, удерживающей пневмоклапан в открытом состоянии, преодолевается, диск 29 прижимается (присасывается) к уплотнительному кольцу 33 и перекрывает доступ воздуха в трубопровод 6. Все нормально открытые пневмоклапаны 5 закрываются. Воздух, преодолевая гидравлическое сопротивление слоя материала в аэрирующем приспособлении 2, продвигает слой материала в виде высококонцентрированного сгустка в трубопровод 6 и далее в промежуточные накопители 7, 8, 9. Согласно законам фильтрации, в слое материала устанавливается перепад давления, зависящий от степени разрежения и пропорциональный длине слоя материала. Разрежение в слое материала будет уменьшаться по направлению к аэрирующему приспособлению 2. В некоторый момент времени из-за уменьшения разрежения усилие пружины 28 становится достаточным для открытия пневмоклапана 5, установленного на трубопроводе 6 вблизи аэрирующего приспособления 2, атмосферный воздух через отверстия 31, 32 поступает в трубопровод 6 и отсекает часть материала. При достаточной мощности источника разрежения сформированный в начале транспортного трубопровода «поршень» сыпучего материала со скоростью 5-8 м/с проходит через промежуточные накопители 7, 8, 9 и удаляется в приемники 10, 11, 12, в зависимости от того, открыты или закрыты вентили 17, 18, 19, соединяющие источник разрежения с конкретной транспортной линией. Накопители в данном случае являются простыми и эффективными переключателями потоков. Например, при

открытых вентилях 18, 19 порошок транспортируется в приемники материала 10, 11. При закрытых вентилях 18, 19 и открытом вентиле 17 сыпучий материал транспортируется в приемник 12. В этом случае герметизирующая заслонка 22, установленная на патрубке 21 в промежуточном накопителе 9, закрывается и препятствуют ненужному вакуумированию линий, соединенных с накопителем 9. При поступлении материала в камеру 34 происходит его осаждение, так как герметизирующая заслонка 36 находится в закрытом состоянии. После того, как слой материала достигает среза центральной трубы 40, разрежение в полости над мембраной 42 увеличивается (патрубок выхода газа 39 связан с полостью над мембраной), мембрана 42 прогибается вверх, преодолевая усилие пружины 44. Так как газовые пространства камер 34 и 35 оказываются пневматически связанными посредством переточной трубы, из камеры 35 отсасывается часть газа и в нем устанавливается разрежение. Присасывающая сила, действующая на поворотную заслонку 36 устройства для разгрузки, ослабевает, заслонка затвора открывается и материал пересыпается в камеру 35. Мембрана 42 возвращается в исходное состояние, так как давление в полостях над и под мембраной выравнивается. После удаления материала из камеры 34 заслонка 36 под действием перепада давления (разрежения) закрывается. Нормально открытый пневмоклапан 5, установленный на патрубке 48, после уменьшения степени разрежения открывается, атмосферный воздух поступает внутрь камеры 35. Заслонка 37 под действием веса материала отклоняется и открывает выпускное отверстие. Материал удаляется в приемник 12 (в данном случае), находящийся под атмосферным давлением. После наполнения сыпучим материалом камеры 34 процесс автоматической разгрузки материала повторяется.

После удаления «поршней» сыпучего материала из транспортного трубопровода 6 и восстановления степени разрежения в трубопроводе 6 и промежуточных накопителях 7, 8, 9 процесс транспортирования повторяется. Контроль за расходом сыпучего материала осуществляется с помощью весов 4. Для обеспечения взвешивания трубопровод 6 и аэрирующее приспособление 2 соединены с помощью гибкой вставки (не показано).

При транспортировании сыпучих материалов с высоким удельным весом по протяженным вертикальным участкам для преодоления силы тяжести слоя материала необходимы значительные затраты энергии. Для надежного транспортирования пневмоклапаны 5 регулируются таким образом, что формируется «поршень» материала меньших размеров. Этот «поршень» в процессе движения может разрушиться из-за растилания материала по поверхности трубопровода. В этом случае

усиливается расход газа через установку, все пневмоклапаны 5 закрываются, в аэрирующем устройстве 2 формируется новая порция материала, концентрация материала в трубопроводе 6 увеличивается и процесс транспортирования материала в виде высококонцентрированных сгустков автоматически восстанавливается. В трубопроводе формируется несколько «поршней», которые в процессе движения являются неустойчивыми образованиями, т. е. они могут разрушаться, объединяться и образовывать новые высококонцентрированные сгустки, но в целом сохраняется «поршневой» режим движения. В процессе движения материала создаются условия для открытия клапанов 5, расположенных на вертикальном участке трубопровода 6. В этом случае материал отсекается в промежуточных накопителях 7, 8 или 9. Если часть материала отсекается в верхних накопителях, то материал задерживается в небольших отрезках трубопровода и нижерасположенных накопителях, материал не просыпается вниз и не переуплотняется в нижней части трубопровода, а равномерно распределяется по всей его длине. Продолжение работы установки в этой ситуации не представляет трудностей.

Таким образом, накопители на вертикальном участке трубопровода являются устройствами коммутации и грузонесущими узлами, позволяющими снизить удельные затраты на транспортирование за счет рационального распределения сыпучего материала по трубопроводу. Применение установки для транспортирования сыпучих материалов вакуумного типа с «поршневой» структурой перемещаемого материала позволяет примерно в 10 раз снизить удельные энергозатраты по сравнению с транспортом взвешенным потоком и значительно уменьшить износ трубопровода из-за низкой скорости транспортирования. Устройство для разгрузки сыпучих материалов из области пониженного давления в область повышенного давления позволяет использовать обычные негерметичные конструкции приемных емкостей без упрочнения стенок, обеспечивает непрерывность процесса транспортирования в связи с тем, что при выгрузке сыпучих материалов из наполненных приемных емкостей нет необходимости останавливать процесс транспортирования и отключать вакуум.

Пример конкретного выполнения.

Установка для пневматического транспортирования сыпучих материалов была испытана в НИИПММ (Томск) и на Сибирском химическом комбинате. Установка применялась для транспортирования флюоритового концентрата (шпата).

Установка имела следующие конструктивные и рабочие параметры:

Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	43–70
Производительность, т/ч	4

Разрежение, мм рт.ст.	500
Длина трубопровода, м	50
Высота подъема материала, м	20
Количество накопителей, шт.	5
Характеристика материала.	
Плотность материала, (шпат) кг/м <sup>3</sup>	3100
Насыпная плотность (шпат), кг/м <sup>3</sup>	2000
Среднемассовый диаметр частиц, мкм	10–30

Как показали результаты испытаний, установка обладает высокой надежностью при работе с материалами, имеющими высокий удельный вес, транспортирование которых по трубам представляет собой большую проблему, так как транспортирование материала взвешенным потоком невозможно из-за постепенного осаждения порошка и «зарастания» трубопровода. Необходимо отметить, что установка для пневматического транспортирования сыпучих материалов вакуумного типа и устройство для разгрузки сыпучих материалов из области пониженного давления в область повышенного давления позволяют решить и экологические проблемы предприятия – транспортирование вредных для окружающей среды материалов становится безопасным процессом.

#### **4.2.2. Характеристики дисперсных сред в поршневых структурах**

В [154] проведены результаты экспериментального исследования на установке, представляющей собой канал прямоугольного сечения ( $75 \times 150 \times 2000$ ) мм<sup>3</sup> со съемной крышкой, выполненной из оргстекла. В днище канала был вмонтирован мембранный датчик, с помощью которого регистрировалось давление сыпучего материала. Исследование проводилось с двумя различными по своим физико-механическим свойствам сыпучими материалами: кукурузной мукой, которая относится к плохо текучему и сильно уплотняющемуся материалу с насыпной плотностью  $\rho_n = 700$  кг/м<sup>3</sup> и гранулированным полиэтиленом, который отличается в обычных условиях хорошей текучестью и слабым уплотнением,  $\rho_n = 610$  кг/м<sup>3</sup>.

Для изучения сжимаемости слоя под действием перепада давления воздуха сечение канала перекрывалось решеткой. В полость канала, ограниченную воздухораспределительной и съемной решетками, равномерно засыпался сыпучий материал, после чего канал закрывался крышкой. Под действием создаваемого в канале перепада давления воздуха слой, лишенный возможности перемещения, уплотнялся, о чем можно было судить как по уменьшению объема слоя, так и по возрастанию его давления на днище канала. Опыты показали, что увеличение перепада давления воздуха, фильтрующегося через неподвижный

(сдерживаемый решеткой) слой сыпучего материала в канале, приводит к асимптотическому возрастанию плотности слоя  $\rho_1$  и его давления на ограждающие поверхности  $p_6$  (рис. 4.43)

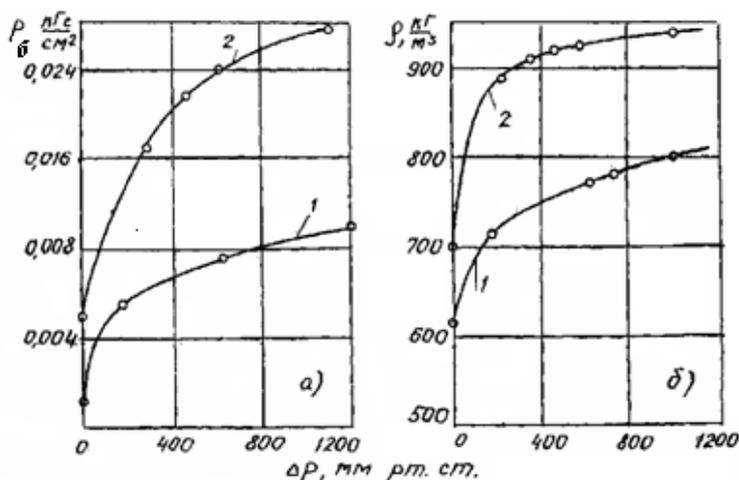


Рис.4.43. Влияние напора воздуха на давление слоя на стенку (а) и на изменение плотности (б):

1 – гранулированный полиэтилен; 2 – кукурузная мука

Для исследования изменения давления на стенку и плотности слоя при его сдвиге под действием  $\Delta p$  съемная решетка после формирования слоя удалялась. Начальная плотность засыпки менялась посредством искусственного его сжатия крышкой канала, на которую устанавливались дополнительные грузы.

Установлено, что устойчивый сдвиг слоя под действием  $\Delta p$  относительно ограждающих поверхностей происходит при вполне определенных значениях плотности слоя  $\rho_1$  и его давления на стенку  $p_6$  (см. рис.4.44, рис. 4.45) Эти значения названы «критическими». При этом сдвигу предварительно уплотненного слоя предшествует его расширение с уменьшением  $p_6$  и  $\rho_1$  [154]. Существование «критического» диапазона объясняется различием механизмов передачи усилий, создаваемых статическим перепадом газа в слоях с различной исходной структурой. В случае плотной исходной упаковки частиц за счет проникновения сжатого воздуха в поры происходит частичное снятие созданных в слое напряжений, а следовательно, и уменьшение силы трения на контактной поверхности материала со стенкой. В ряде случаев, особенно для сильноуплотняющихся материалов, необходимого для сдвига слоя ослабления напряжений можно достигнуть лишь более сильным воздействием на слой, например, импульсным подводом сжатого газа или сочетанием аэрирования и вибрации. Сжимаемость же слоя в рыхлой упаковке в основном определяется сближением частиц для создания не-

обходимой контактной цепочки, обеспечивающей перемещение всего слоя под действием на него статического давления движущей среды.

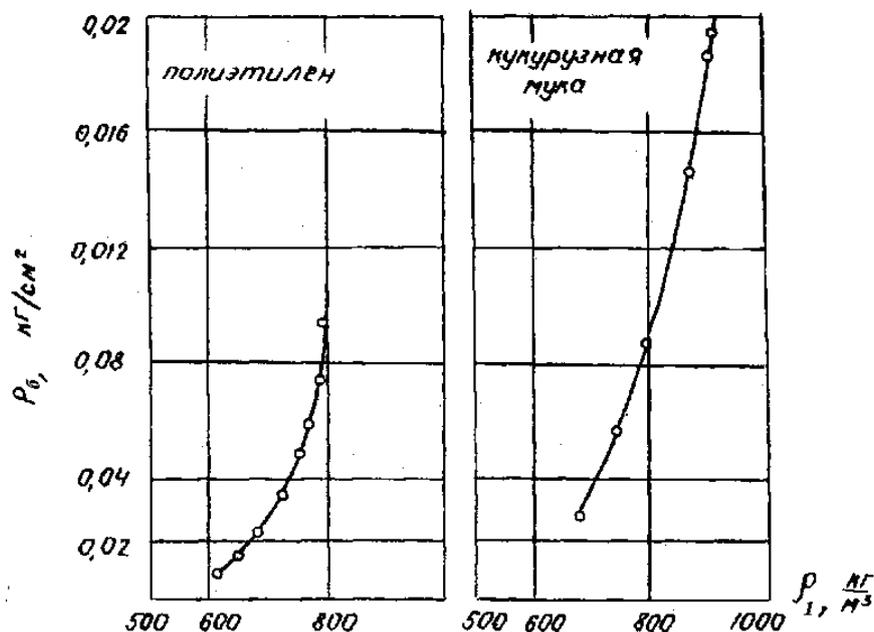


Рис. 4.44. Взаимосвязь нормального давления сыпучего материала и плотности укладки частиц

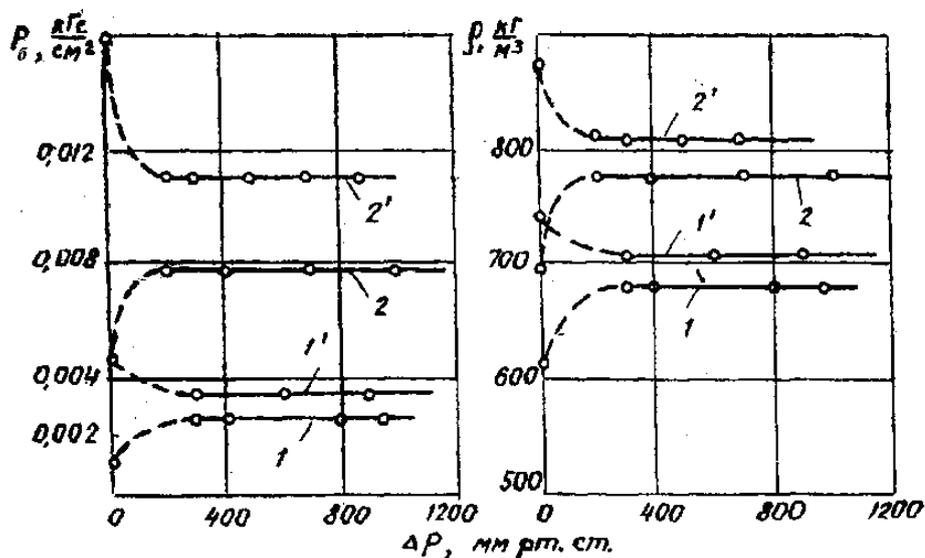


Рис. 4.45. Изменение давления на стенку и плотности укладки слоя при страгивании под действием перепада статического давления воздуха при различной начальной плотности: 1 – полиэтилен; 2 – кукурузная мука

Опыты показывают, что наиболее устойчивое движение плотного слоя в аппаратах при побуждающем действии перепада давления газа возможно при условии обеспечения распределения плотности слоя и его

давления на ограждающие поверхности, изменяющихся в пределах «критического» диапазона.

$$\rho_{кр} = (1,11 - 1,12)\rho_{н.}$$

На установке, снабженной датчиками давления материала на стенку (рис. 4.46), были получены результаты распределения давления по длине поршня в зависимости от свойств материал и размеров поршня рис. 4.47.

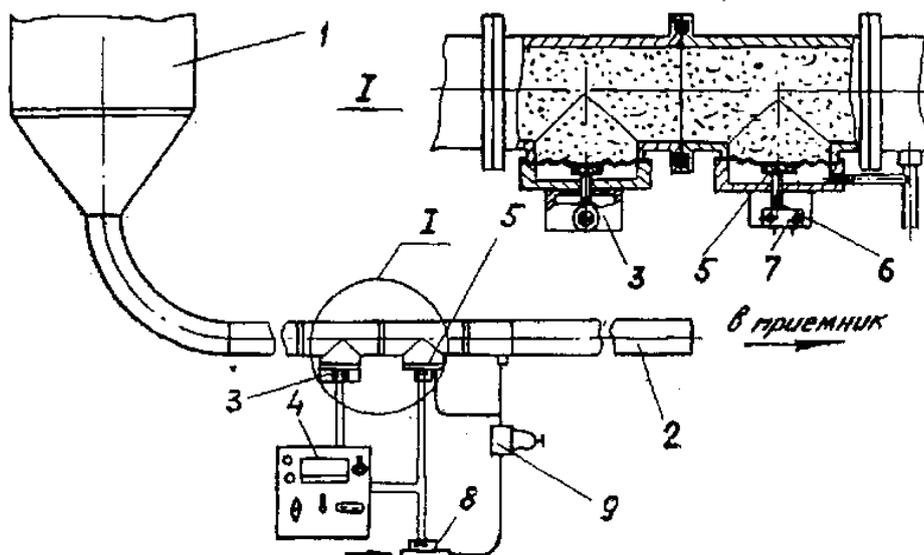


Рис. 4.46. Экспериментальная установка:

- 1 – камерный питатель; 2 – стеклянный трубопровод; 3 – контрольный датчик давления материала; 4 – вторичный прибор; 5 – рабочий датчик; 6 – шток; 7 – микропереключатель; 8 – электроклапан; 9 – регулятор давления воздуха

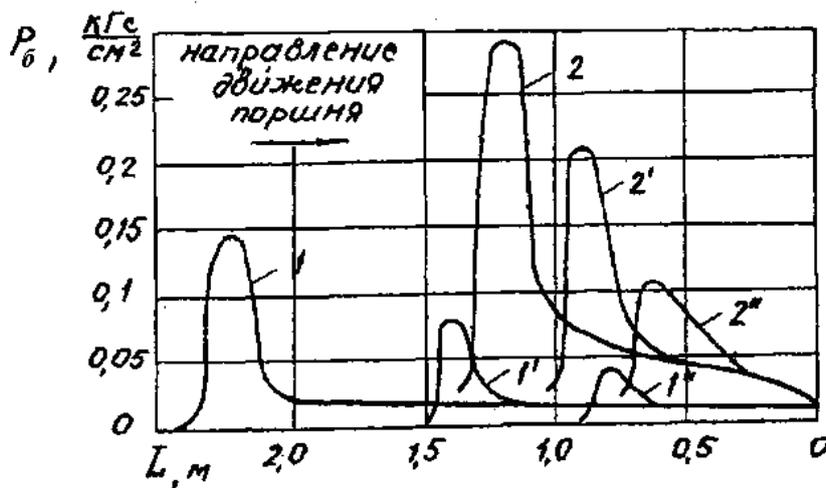


Рис. 4.47. Характер распределения давления на стенку по длине поршня сыпучего материала:  
1 – кукурузная мука; 2 – порошкообразный хлористый калий

Опыты показывают, что наиболее устойчивое движение плотного слоя в аппаратах при побуждающем действии перепада давления газа возможно при условии обеспечения распределения плотности слоя и его давления на ограждающие поверхности, изменяющихся в пределах «критического» диапазона. Опыты показали, что стабильность движения поршня во многом определяется характером распределения  $p_6$  и  $p_1$  по его длине. Причем значение  $p_6$  в тыловой части поршня может в десятки раз превышать «критические» величины нормального давления материала (рис. 4.47), что связано с появлением большой величины силы трения материала о стенку и, как следствие, возрастанием статического давления несущей среды, потребного для перемещения материала.

В свою очередь, возрастание разности статического давления на поршне, еще в большей мере приводит к переуплотнению слоя. Как видно из рис. 4.47, при прочих равных условиях с увеличением длины поршня растет и максимальное значение  $p_6$ .

Искусственно поддерживая степень уплотнения сыпучего материала в слое (поршне) в заданных пределах, можно эффективно управлять величиной силы трения о стенку канала, которая во многом определяет режим движения. Это достигается путем блокировки прибора контроля нормального давления слоя сыпучего материала на стенку канала с клапаном дополнительной подачи воздуха (см. рис. 4.46).

Система обеспечивает ввод дополнительного небольшого количества воздуха в слой и разрыхляет его, когда давление сыпучего материала на мембрану датчика достигает заданного значения [10, 11].

Апробирование этого способа управления режимом движения материала было осуществлено на лабораторной установке со стеклянным трубопроводом длиной 30 м [10], оборудованной постами с датчиками давления материала на стенку. Работа постов дополнительной подачи воздуха контролировалась с помощью сигнальных ламп. Каждый из постов обеспечивал ввод сжатого воздуха в уплотняющийся поршень материала, когда давление последнего на мембрану датчика достигало для хлористого калия  $0,1 \text{ кгс/см}^2$ , а для полиэтилена  $0,025 \text{ кгс/см}^2$ .

Анализ диаграмм записи нормального давления на стенку и кадров киносъёмки показывает, что с падением этого давления поршень получает некоторое ускорение с последующим замедлением по мере роста плотности сыпучего материала. Такие изменения в прямом горизонтальном трубопроводе носят регулярный характер, поэтому поддерживается некоторая средняя скорость поршней. Настраивая датчики на различную величину нормального давления материала, можно получить заданную среднюю скорость его движения. Возможность такого регулирования имеет большое значение для уменьшения разрушения

частиц перемещаемого материала, износа трубопроводов при транспортировании абразивных материалов, а также повышения эффективности работы установок пневматического транспорта и снижения потенциала статического электричества. Для материалов с хорошей текучестью (гранулированный полиэтилен и др.) характерна непрерывная реорганизация структуры потока в горизонтальных каналах. Образующиеся отдельные длинные поршни с тенденцией к переуплотнению материала на отдельных участках немедленно разрыхляются и расчленяются вводимым дополнительным  $w$  воздухом, поэтому движение материала осуществляется в виде отдельных сгустков со средней длиной около 0,5 м.

При указанных выше величинах нормального давления исследуемых материалов средняя скорость их перемещения составила 1,2–1,9 м/с. Этим режимам соответствуют следующие величины весовой расходной концентрации: для хлористого калия – 98 кг/кг, для полиэтилена – 39 кг/кг. Длина поршней при транспортировании хлористого калия находилась в пределах 1,2–1,8 м.

Автоматическое включение подводов дополнительного воздуха при прохождении мимо постов поршней с повышенным против заданного значения нормальным давлением на стенку значительно снижает расход воздуха по сравнению со способом непрерывной его подачи и обеспечивает заданную скорость перемещения материала. Посты контроля давления слоя на ограждающие поверхности могут быть сблокированы не только с дополнительными подводами сжатого газа, но и с вибрационными, механическими, пневмомеханическими, ультразвуковыми и другими устройствами, позволяющими изменить структуру и режим движения слоя. Это делает возможным применение метода практически в любом аппарате с движущимся плотным слоем сыпучего материала [154].

Тонкодисперсный сыпучий материал, подлежащий пневматическому транспортированию, характеризуется большим набором взаимосвязанных параметров, что вносит определенную трудность в разработку универсальных методов расчета транспортных систем. Основой для нахождения устойчивых режимов транспортирования продолжает оставаться учет сил трения с помощью эмпирических зависимостей.

Известно, что коэффициенты внешнего трения сыпучих материалов зависят от трех факторов: материала стенки и характера ее поверхности (шероховатости, наличия пленки влаги); плотности укладки частиц материала; режима работы (нагрузки, скорости, температуры).

В работе [57] исследовано влияние на коэффициенты трения влажности материала  $W$ , скорости его движения  $u$  относительно стенки и плотности укладки частиц (средней по высоте и сечениям объемной

концентрации частиц)  $K = V_{\text{ч}} / (V_{\text{ч}} + V_{\text{п}})$ , где  $V_{\text{ч}}$  – объем частиц;  $V_{\text{п}}$  – объем пор в единичном объеме сыпучего материала. В качестве тонкодисперсного материала использовался апатитовый концентрат ГОСТ 3277–54, состоящий на 71 % из фракции 30–60 мкм. Удельный вес материала  $\rho_m = 3200 \text{ кг/м}^3$ , средний насыпной вес  $\rho_n = 1350 \text{ кг/м}^3$ , средняя плотность укладки частиц  $K = 42,2 \%$ . Методика определения коэффициента внешнего трения описана в работе [57]. Определялись величины сдвиговых напряжений  $\tau_0$  – сдвиговое напряжение при нулевой нормальной нагрузке,  $\tau$  – сдвиговое напряжение при нормальном напряжении  $\sigma$ . При исследовании влияния напряженного состояния на коэффициент внешнего трения  $f_1 = \frac{\tau - \tau_0}{\sigma}$  установлено, что  $f_1$  при сдвиге образца (коэффициент трения покоя) практически не зависит от прикладываемой нагрузки и, следовательно, от плотности укладки частиц. В процессе движения коэффициент  $f_1$  уменьшается, что особенно заметно для высоких значений предварительного уплотнения.

Как показали исследования, в области изменения  $\sigma$  от 0 до  $5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$   $f_1$  уменьшается на 20–25 % (см. рис. 4.48). Этот факт можно объяснить некоторой переориентацией частиц с соответствующим изменением плотности укладки частиц в тонком слое, примыкающем к движущейся поверхности. Полученные экспериментальные данные аппроксимируются выражением

$$f_1 = f_1^* - 0,155 \left[ 1 - \exp \left( -0,038 \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \right], \quad (4.4)$$

где  $\sigma$  – нормальные напряжения;  $\sigma_0$  – напряжения, вызванные силой тяжести. Замечено, что составляющая  $f_1^*$  зависит от влажности, причем для сухого материала  $f_1^* = 0,48–0,50$ , при влажности  $W = 1,5 \%$  значение  $f_1^*$  возрастает до  $0,53–0,55$  и при дальнейшем увеличении влажности до  $W = 5,1 \%$  значение  $f_1^*$  остается на этом уровне.

Очевидно, это связано с различием свойств воды, образующей тонкие пленки на поверхности частиц, которая может находиться как в связанном, так и в свободном состоянии [193]. Таким образом, на величину коэффициента трения движения оказывает влияние величина сжимающей нагрузки и для сравнительно сухих материалов – влажность материала.

В области исследованных нагрузок не обнаружено заметного влияния величины скорости относительного движения на коэффициент трения пары апатит – нержавеющая сталь. Такой же результат получен

в нескольких контрольных опытах с портландцементом. Слабое уменьшение  $f_1$  при возрастании скорости, а также при фиксированном значении скорости с течением времени лежит в пределах погрешности опыта и может быть объяснено изменением поверхностных свойств образца, температура которого при линейных скоростях  $v = 10\text{--}15$  м/с быстро возрастает.

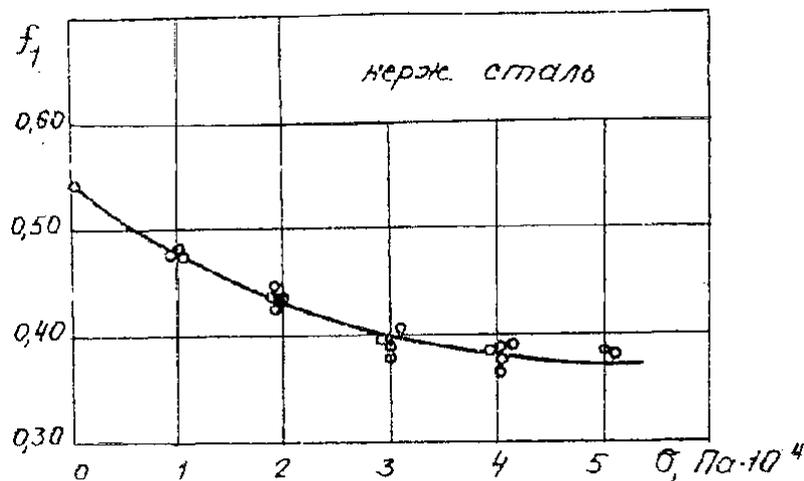


Рис. 4.48. Зависимость коэффициента трения от сжимающей нагрузки

В режиме импульсного пневмотранспорта, дисперсный поток имеет высокую концентрацию и отличается от газозвеси наличием контактов между соседними частицами. С возрастанием плотности укладки частиц число таких контактов увеличивается, что существенно влияет на коэффициенты трения. Ряд авторов [57] объясняют это явление уменьшением числа связей качения и увеличением числа связей скольжения. Эксперименты по исследованию плотности укладки частиц апатита показали, что этот параметр является нелинейной функцией влажности, имеющей минимум  $K_{\min} = 37,8\%$  при влажности  $W \approx 1,5\%$ , что примерно в 1,3 раза ниже, чем у сухого материала в свободной насыпи. В работе [57] приведены зависимости плотности укладки частиц от влажности.

Уплотнение материала нельзя отождествлять с компрессионным сжатием. На рис. 4.49 показана зависимость плотности укладки частиц от действующей нагрузки.

Эксперименты по исследованию сдвиговых характеристик проведены на стеклянных трубопроводах с диаметрами  $D = 80; 57,7; 31,5$  мм. В трубе формировался поршень тонкодисперсного материала с известной плотностью укладки частиц

$$K = \frac{4M}{\pi D^2 \rho_m l_0},$$

где  $M$  – масса материала;  $\rho_m$  – его плотность;  $l_0$  – начальная длина поршня.

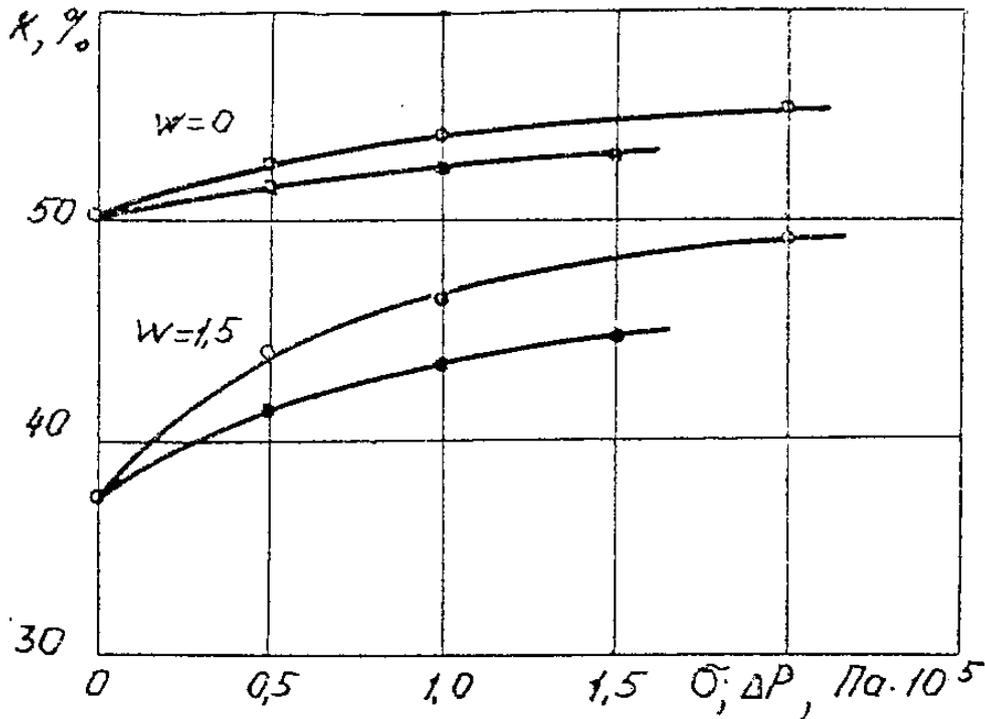


Рис. 4. 49. Зависимость  $K$  от внешней нагрузки:

- ○ ○ – одноосное механическое сжатие;
- ● ● – воздействие перепада давления

Установка позволяет изменять перепад давления на слое по линейному закону  $\Delta p = \alpha t$ . В [57] приведено описание измерений. Характерный вид диаграмм приведен на рис. 4.50. Сдвигу материала соответствует падение давления на заднем по ходу движения фронте поршня, фиксируемое датчиком давления. При фиксированном значении плотности укладки  $K$  перепад давления, необходимый для сдвига поршня, значительно выше, чем для последующего движения. Достаточно рыхлый поршень уплотняется (диагр. I рис. 4.50), что видно из нелинейности участка  $oa$ , и страгивается при усилии, достаточном для преодоления пристеночного трения (точка  $b$ ). Более плотный материал уплотняется незначительно (диагр. II). Основной рост действующего усилия происходит в области  $oa$ , затем рост перепада давления замедляется, что возможна только при наличии фильтрационного расхода ( $ab$ ). Согласно закону Дарси, в области  $ab$  происходит увеличение скорости фильтрации. Процесс, зафиксированный на диаграмме III качественно

отличен от предыдущих. Участок  $ab$  свидетельствует о резком увеличении фильтрационного расхода, что говорит о нарушении структуры переуплотненного слоя и увеличении его пористости. Описанные процессы хорошо согласуются с положениями теории предельного равновесия сыпучих сред [70], согласно которым сдвиг происходит при вполне определенном (критическом) значении пористости материала.

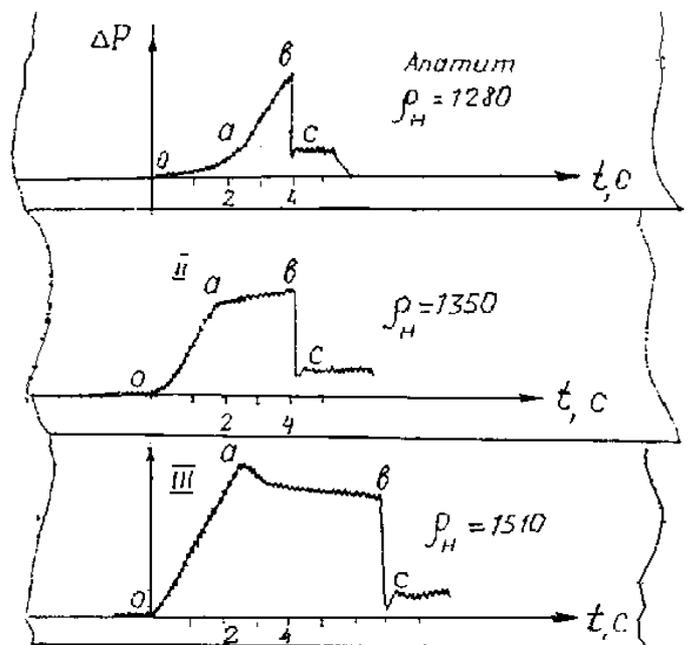


Рис. 4.50. Диаграмма сдвига поршня [57]

Следует отметить, что фильтрационный расход газа через уплотненный тонкодисперсный материал осуществляется в основном вдоль стенки канала. Это экспериментально установлено при продувании поршней апатита, цемента и, в меньшей степени, пиритного огарка.

Последний материал меняет светоотражающую способность при уплотнении, что удобно для визуальных наблюдений. Под действием перепада давления материал начинает уплотняться, наблюдается смещение заднего фронта поршня при неподвижном переднем. Фронт уплотнения в виде границы между темной и более светлой частью достигает головной части. Вслед за этим вдоль стенки движется фронт фильтрации, что заметно по потемнению пристеночного слоя. Сдвиг происходит после достижения фронтом фильтрации головной части поршня. Скорость пристеночной фильтрации лежит в области 0,3–0,6 м/с.

Эти факты согласуются с теоретическими и экспериментальными данными других авторов, указывающих, что, в силу определенной регулярности укладки частиц, пристеночная пористость примерно в 1,5 раза выше, чем средняя по каналу [17]. На сдвиговые характеристики влия-

ют, кроме скорости нарастания перепада давления, геометрические размеры слоя, а именно; отношение длины сдвигаемого поршня  $l$  к диаметру трубопровода  $D$ , а также предварительное уплотнение материала, т. е. плотность укладки  $K$ :

$$t = t^* + \varphi_1(K) \varphi_2 \frac{l}{D}. \quad (4.5)$$

При фиксированном значении  $l/D$  величина  $\tau$  является степенной функцией  $K$ :

$$\varphi_1 = aK^b. \quad (4.6)$$

Составляющая предельных касательных напряжений трения  $\tau^*$  в выражении (4.5) вызвана силами тяжести и в осредненном виде может быть выражена следующей формулой:

$$t^* = 0,5 f_1 \rho_m g K D, \quad (4.7)$$

где  $\rho_n$  – плотность;  $f_1$  – коэффициент внешнего трения.

Коэффициент  $f_1$ , в свою очередь, зависит от напряженного состояния, поэтому в (4.7) следует использовать значения  $f_1$  и  $K$  с учетом зависимости (4.4).

Кривые I, II, III на рис. 4.51 получены для диаметров трубопровода  $D = 31,5; 57,7; 80,0$  мм соответственно. После сдвига начинается медленное ползущее движение материала. Сопротивление трения в это время гораздо ниже, и значения  $\tau$  лежат близко от расчетных значений (4.5).

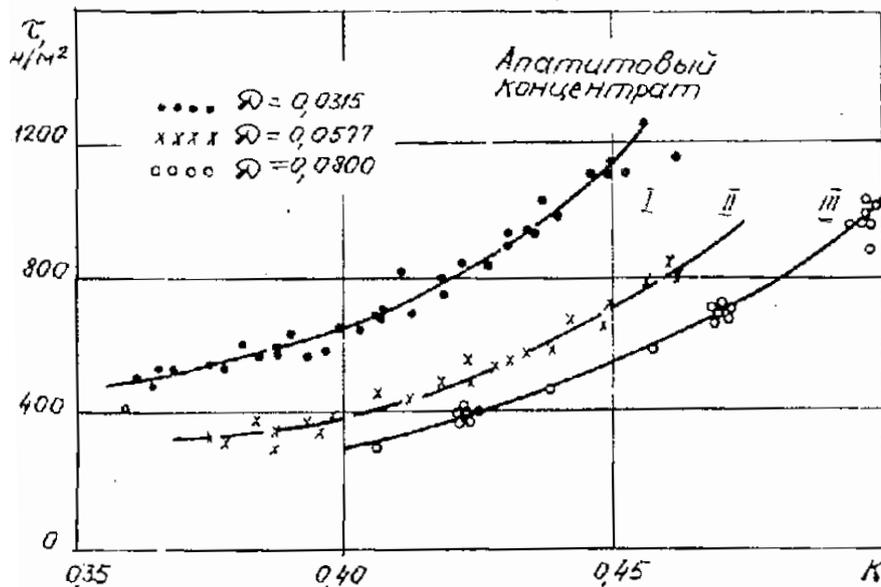


Рис. 4.51. Зависимости сдвиговых напряжений от плотности укладки частиц

При сдвиге материала происходит перестройка структуры пристеночной зоны. С увеличением плотности укладки частиц коэффициент внутреннего трения растет по степенному закону (4.6). Связь с геометрическими параметрами слоя (рис. 4.52) определяется характером распределения нормальных напряжений  $\sigma_n$  по поверхности взаимодействия. Поскольку максимальные  $\sigma_n$  из-за эффекта расклинивания локализованы в задней части поршня, влияние неоднородности  $\sigma_n(x)$  тем больше, чем большую часть поршня занимает область переуплотнения. Для подобных друг другу поршней ( $K, l/D = \text{idem}$ ) такое влияние уменьшается с увеличением длины  $l$ .

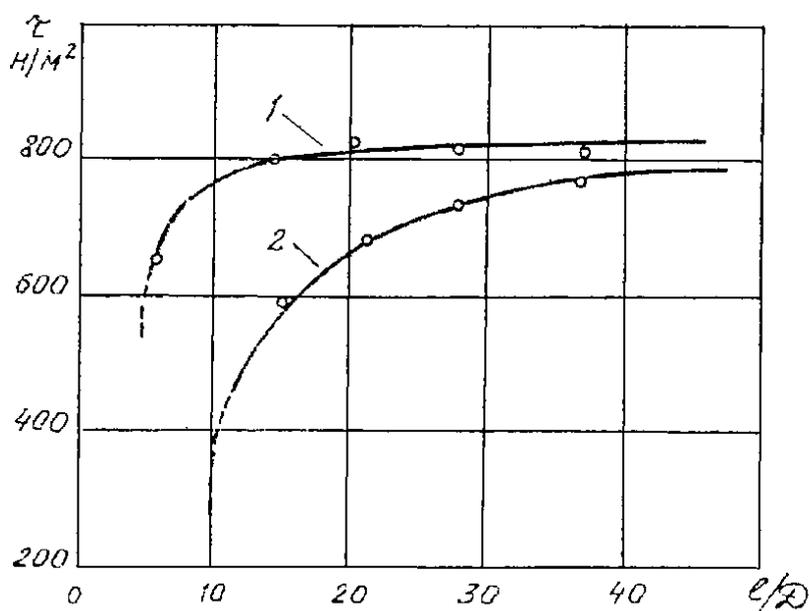


Рис. 4.52. Зависимость сдвиговых напряжений от приведенной длины поршня: 1 – вертикальный канал; 2 – горизонтальный канал; ---- – продувание слоя

Таблица 4.5

Увеличение нормальных напряжений на стенке под действием перепада давления газа

$D$ , мм	$l$ , м	$l/D$	$K$	$n$
31,5	0,475	15,1	0,422	5,37
57,7'	0,779	13,5	0,422	2,38
80,0	0,960	12,1	0,422	1,40

Из табл. 4.5 видно, во сколько раз осредненные нормальные напряжения на стенке при сдвиге превышают тот же параметр для слоя, не испытывавшего уплотняющего воздействия перепада давления газа  $n = \sigma_n / \sigma_{n0}$ ,  $\sigma_n = \tau/f_1$ ,  $\sigma_{n0} = K\rho_m gD/2$ . Проведенные исследования позво-

ляют учесть основные закономерности сопротивления трения материала о стенку и тем самым их влияние на динамику дисперсного потока при пневмотранспорте. Это упрощает решение основной задачи по выбору устойчивых режимов работы ПТУ и конструктивных параметров питателя и трубопровода для ряда тонкодисперсных материалов.

При транспортировке поршнями гранулированных и зерновых материалов встает вопрос о формировании поршней и стабильности процесса. На рис. 4.53 представлена экспериментальная установка.

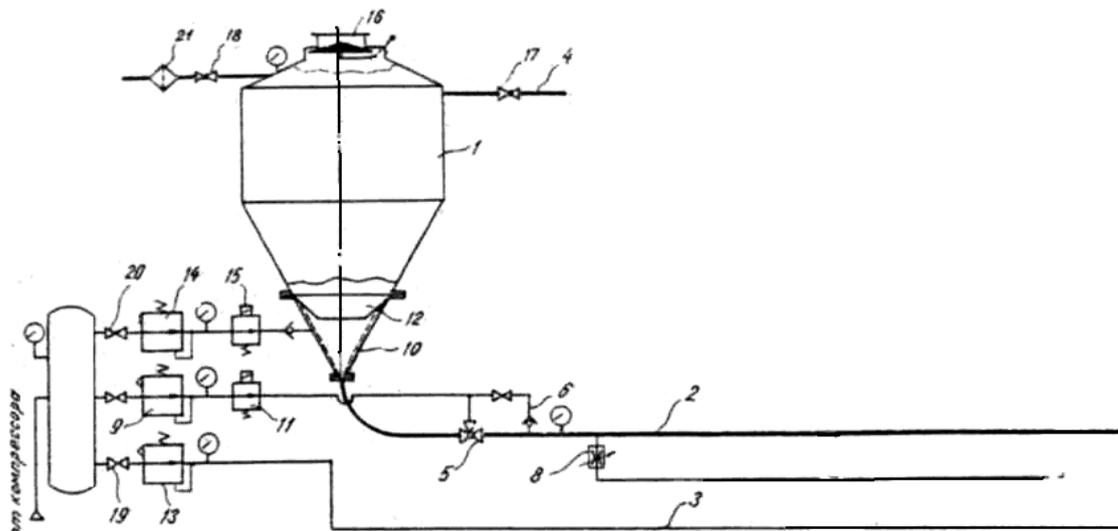


Рис. 4.53. Схема опытной установки импульсного пневмотранспорта гранул:  
 1 – питатель; 2 – транспортный трубопровод; 3 – питающий трубопровод;  
 4 – воздух в питатель; 5 – порционирующее устройство; 6 – пневмоделитель;  
 7 – пусковой клапан; 8 – дроссель; 9 – редуктор; 10 – пористая воронка;  
 12 – усеченный конус; 13, 14 – регуляторы; 15 – клапан; 16 – затвор;  
 17, 18, 19, 20 – вентили; 21 – фильтр

Транспортный трубопровод 2 с внутренним диаметром 51 мм и длиной 306 м расположен в горизонтальной плоскости, и имеет два поворота под углом  $180^\circ$ . Формирование поршней может быть осуществлено или с помощью поворотного клапана 5, или пневматическим делителем 6, работа которых регламентируется задатчиком импульсов. Перед запуском установки открытием вентилей 19 и 20, а также клапана 15 в питатель 1 и трубопровод 3 подается сжатый воздух, заданное давление которого обеспечивается регуляторами 13 и 14. При пуске установки включаются соответствующие клапаны 7 дополнительной подачи воздуха для аэрации материала и обеспечения необходимого распределения статического давления по трубопроводу 2 за счет дросселей 8, объединенных в отдельные группы. Приводится в действие задатчик импульсов, который управляет работой воздухораспределителя в случае

использования порционирующего устройства 5 или работой клапана 11, когда действует пневматический делитель 6. В последнем случае редуктор 9 обеспечивает подачу воздуха в трубопровод 2 с давлением, необходимым для прекращения в течение заданного времени подачи материала питателем. При закрытом положении клапана 11 питатель подает материал в течение времени, необходимого для формирования заданной длины поршня. В качестве транспортируемых материалов использовались гранулированный полиэтилен высокого давления и катализатор АШНЦ-3.

Программа исследований предусматривала осуществление транспорта единичными поршнями, поршнями с определенным расстоянием между ними и при непрерывной подаче материала из питателя. Транспортирование единичными поршнями проводилось при начальном давлении 1,0–1,2 ат со средней скоростью перемещения 5–10 м/с. При этом, время формирования поршня, которое регламентирует его длину, находится в пределах 4–7 с. Непрерывная подача материала в трубопровод без дополнительно подаваемого воздуха по магистрали привела к закупорке трубопровода. Включением дополнительных подводов удавалось осуществить транспортирование, но стабильность его сказывалась низкой, с частыми остановками движущегося материала на начальном участке трубопровода.

Отработка режимов транспортирования при различных вариантах подключения дополнительных подводов привела к следующим результатам:

а) характер движения материала при работе без дополнительных подводов носит неустойчивый характер с остановками поршней;

б) излишнее количество постоянно действующих подводов приводит к нарушению регулярного движения поршней, появляются большие скопления материала, которые переуплотняются, создавая жесткий режим работы с вибрацией трубопровода, скорость движения сгустков велика;

в) оптимальные режимы транспортирования исследуемых материалов обеспечиваются подводами в зоне поворотов трубопровода;

г) дополнительный расход воздуха в зоне поворотов составляет при различных режимах 9–15 % от общего расхода.

Визуальные наблюдения через прозрачные участки трубопровода показали, что сформированный в начале трубопровода поршень длиной 1,5–2,0 м практически сохраняет свою длину при прохождении всей магистрали. Это достигается соответствием количества осыпающегося материала с тыльной части поршня подбираемому передней его частью

из нижнего слоя, который поддерживается толщиной 10–15 мм. О регулярности этого процесса свидетельствует также характер изменения статического давления при прохождении поршнями сечений трубопровода, где установлены датчики. По характерным для поршня изменениям давления при известных скоростях протяжки ленты самописца и расстояния между соседними датчиками оценивалась скорость перемещения поршней. По осциллограммам представляется возможным определить распределение статического давления вдоль магистрали (рис. 4.54).

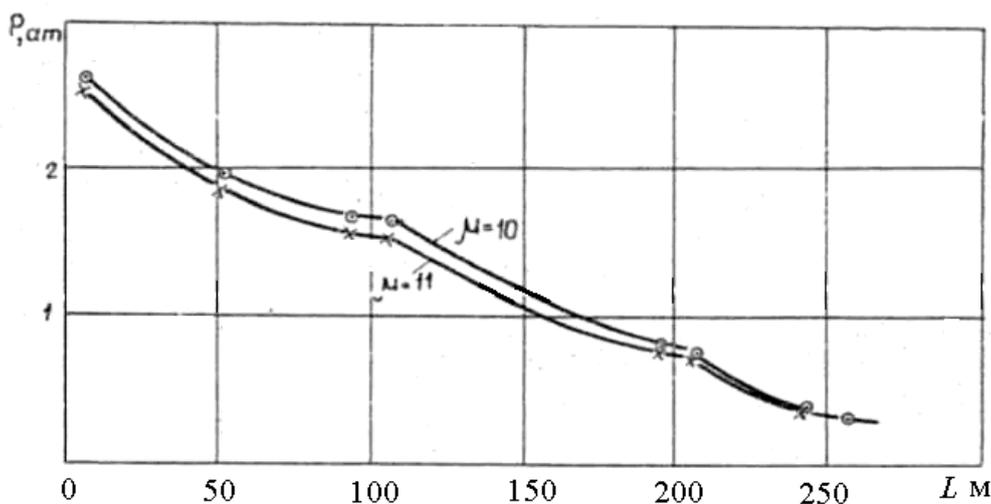


Рис. 4.54. Распределение статического давления по транспортной магистрали

Как видно из кривых, построенных по максимальному давлению в циклах, в местах поворотов трубопровода градиент давления увеличивается. Замедление движения материала в зоне поворотов с дальнейшим его ускорением на прямолинейных участках отчетливо видно по кривым изменения скорости поршней вдоль магистрали (рис. 4.55).

Результаты нескольких опытов, полученных при различных режимах транспортирования полиэтилена, но с дополнительными подводами воздуха только в зоне поворотов, сведены в таблицу.

Как видно из табл. 4.6, с увеличением начального давления растет расход воздуха и скорость движения материала, производительность увеличивается. При увеличении давления более 3 ат поршни переуплотняются, наблюдается вибрация трубопровода. При давлении менее 1,8 ат при приведенных в таблице времени пуска транспорт невозможен.

С увеличением расстояния между поршнями увеличивается их скорость. В то же время устойчивость движения нарушается, когда создаются условия к объединению отдельных порций в длинные пробки. Рабочие режимы с минимально возможным начальным давлением и расстоянием

между поршнями обеспечивают наименьшую скорость перемещения материала, хотя одновременно с этим снижается и производительность установки.

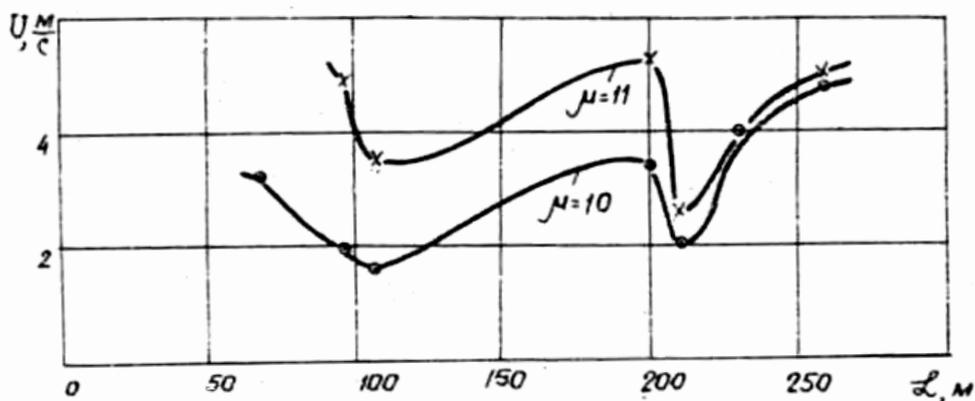


Рис. 4.55. Распределение скорости движения материала вдоль транспортной магистрали [165]

Таблица 4.6

Показатели транспорта гранулированных материалов

Давление в камере питателя, ат	Суммарный расход воздуха, кг/ч	Время впуска материала и воздуха, с		Расход, материала, кг/ч	Средняя скорость движения материала, м/с
		$t_m$	$t_b$		
1,8	83,0	4	3	534	1,72
2,0	51,7	6	2	510,6	1,03
2,1	55,9	5	7	615,4	2,575
2,5	66,8	5	7	857	2,94
3,0	109,3	5	7	1263	3,5

Интересным для практики явилось использование вместо механического делителя пневматического устройства для формирования поршней. В принципе, оно представляет *подвод воздуха* перпендикулярно оси транспортного трубопровода с давлением, несколько превышающим давление в питателе (0,2 ат). Опыты, проведенные с этим устройством, показали хорошие результаты.

Анализ проб материала после многократной перегонки по транспортной линии не показал наличия стружки полиэтилена и разрушения довольно хрупких гранул катализатора АШНЦ-3.

Проведенные исследования доказывают возможность устойчивого перемещения по горизонтальным трубам гранулированных материалов

с малой скоростью, а, следовательно, с высокой степенью сохранения гранулометрического состава исходного материала. Кроме того, установлено, что при осуществлении импульсного пневмотранспорта на расстояние 300 м необходим дополнительный подвод воздуха в зоне поворотов трубопровода, который не только не уменьшает эффективность работы установки, но и обеспечивает надежные и мягкие режимы ее работы при низкой скорости перемещения материала.

#### 4.2.3. Расчетные оценки параметров потоков

##### Горизонтальный транспорт

Организация поршневого пневматического транспорта осуществляется при помощи периодического, последовательно чередующегося введения порций материала и воздуха в транспортирующий трубопровод. Для лучшего управления процессом вводится дополнительный воздух по длине трассы. Считается, что фильтрация газа через поршни пренебрежимо мала. Однако пренебрежение фильтрацией приводит к неограниченному возрастанию боковых давлений [56].

В процессе сжатия дисперсная среда, состоящая из агломератов, подвергается пластическим деформациям с формированием дисперсного тела. Для связного материала переуплотнение представляет повышенное остаточное напряжение в материале при снятии нагрузки.

Оценка воздействия остаточных напряжений на необходимый перепад давления на поршне для осуществления его движения может быть проведена следующим образом. Изменение напряжения по длине поршня  $x$  равно элементарной силе сопротивления, приходящейся на единицу боковой поверхности. Из этого условия можно получить соотношение

$$\pi R^2 d\sigma_3 = -\sigma_{пл} n 2\pi R k_3 dx - \sigma_3 2\pi R k_3 dx,$$

где  $R$  – радиус трубы,  $\sigma_{пл} n$  – остаточное напряжение, связность,  $\sigma_3$  – напряжение при упругой деформации в процессе перемещения поршня,  $k_3$  – коэффициент сопротивления. Решение последнего уравнения имеет вид

$$\left[ \exp\left(\frac{2L}{R} k_3\right) - 1 \right] n \sigma_{пл} = \Delta P, \quad (*)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на поршне;  $L$  – длина поршня.

Анализ (\*) показывает, что при отличном от нуля значении  $n \sigma_{пл}$  и  $\frac{2L}{R} k_3 > 5$ , требуемый перепад для сдвига поршня имеет неприемлемо большие значения. В этом случае транспорт частиц осуществляется короткими поршнями или гребнями [159].

При поршневом транспорте, анализ показывает, одним из основных параметров, определяющим устойчивость движения дисперсного материала, является пористость  $\varepsilon$  – объемная доля газа в смеси [159]. Средний относительный объем дисперсной среды  $\varepsilon_m$  в трубопроводе определяется производительностью  $G$  (т/ч), временем пребывания материала  $L / V_T$  (с), массой транспортного пространства с материалом  $\rho_T SL$  (т):

$$\varepsilon_{TL} = 1 - \varepsilon_L = (G / 3600)(L / V_T) / SL\rho_T = (G / 3600) / V_T S\rho_T,$$

где  $\rho_T$ ,  $V_T$ ,  $S$  – плотность, скорость твердой фазы, проходное сечение трубопровода без материала.

Отличие истиной, локальной порозности от средней определяет характер движения дисперсной фазы и ее напряженное состояние. Средняя объемная доля воздуха при поршневом транспорте  $\varepsilon_L$  составляет 0,7–0,9 во взвеси – 0,96–0,99. При установившемся движении скорость фильтрации несжимаемой жидкости через пористую среду в поршне [99]

$$V_\phi = \frac{k\Delta P}{\mu l_T},$$

где  $k$  – проницаемость ( $m^2$ ),  $\Delta P$ ,  $l_T$  – перепад давления на поршне, длина поршня,  $\mu$  – динамическая вязкость (Па·с). Для величины  $k$  имеется несколько соотношений (Слихтер, Козени, Терцаги и др. [99]). По Козени

$$k = \frac{\varepsilon^3 d^2}{120(1 - \varepsilon)^2} \approx 0,057\varepsilon^4 d^2 \quad \text{в диапазоне } \varepsilon = 0,26 - 0,48 \quad [100], \quad \text{где } d -$$

диаметр зерен материала (м), образующих дисперсную среду в поршне,  $\varepsilon$  – объемная доля газа в объеме дисперсного материала в поршне, (пористость). При изотермическом течении сжимаемого газа в пористой среде распределение давления по длине поршня определяется зависимостью

$$p^2 = p_1^2 - \frac{p_1^2 - p_2^2}{l_T}, \quad (4.8)$$

а массовый расход газа через единицу поверхности [99]

$$\rho V_\phi = \frac{k(p_1^2 - p_2^2)}{2\mu\beta l_T},$$

где  $\beta$  – коэффициент в соотношении  $\frac{p}{\rho} = \beta = \frac{8,31 \cdot 10^3}{M} T$  (Дж/кг =  $m^2/c^2$ ),

$M$  – молярная масса газа (кг/кмоль),  $T$  – абсолютная температура газа °К. Изменение количества движения поршня на длине  $l_T$  от сечения 0–0 до сечения 1–1 определяется соотношением

$$p_0 - p_1 = \rho_m V_{\tau 1}^2 (1 - \varepsilon_1) - \rho_m V_{\tau 0}^2 (1 - \varepsilon_0) + \int_0^{l_{\tau}} (4\sigma_{\delta} f / D) dx.$$

Из уравнения сохранения  $(1 - \varepsilon_1)V_{\tau 1} = (1 - \varepsilon_0)V_{\tau 0}$  следует

$$p_0 - p_1 = \rho_{\tau} V_{\tau 0} (1 - \varepsilon_0) (V_{\tau 1} - V_{\tau 0}) + \int_0^{l_{\tau}} (4\sigma_{\delta} f / D) dx,$$

где  $\sigma_{\delta}$  – боковое давление материала на стенку,  $\sigma_{\delta} = \sigma \xi$ ,  $\sigma$  – осевое напряжение в материале,  $\xi$  – коэффициент бокового давления материала на стенку. При медленном движении в системе, связанной с поршнем, уравнение равновесия сил записывается в виде [128],

$$-\frac{d\sigma}{dx} - \frac{dp}{dx} - \frac{4\sigma \xi f}{D} = 0, \quad (4.9)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения о поверхность трубы. Величина  $dp / dx$  определяется дифференцированием уравнения распределения давления по длине поршня. Уравнение равенства сил на элементе дисперсного образования в поршне имеет вид

$$\frac{d\sigma}{dx} + a_1 \sigma = -(a_2 - a_3 x)^{-0,5} a^3,$$

где  $a_1 = \frac{4\xi f}{D}$ ,  $a_2 = \frac{p_0^2}{2}$ ,  $a_3 = \frac{p_0^2 - p_1^2}{2l_{\tau}}$ .

Решение имеет вид

$$\sigma = e^{-a_1 x} \int_x^{l_{\tau}} (a_2 - a_3 x)^{-0,5} a^3 e^{a_1 x} dx. \quad (4.10)$$

Пусть

$$\begin{aligned} p_0 &= 400 \text{ кПа}; & D &= 0.1 \text{ (м)}; \\ p_1 &= 350 \text{ кПа}; & \xi &= 0,1; \\ l &= 1 \text{ (м)}; & f &= 0,1. \end{aligned}$$

Имеем  $a_1 = 0,4$  (1/м);  $a_2 = 8 \cdot 10^4$  (кПа)<sup>2</sup>,  $a_3 = 1,875 \cdot 10^4$  (кПа)<sup>2</sup>/м.

Данные расчета величины  $\sigma$  приведены в табл. 4.7. При внезапном повышении перепада давления на поршне фильтрация нестационарна.

Таблица 4.7

Значения осевого напряжения

$x$ (м)	0	0,25	0,5	0,75	1
$\sigma$ (кПа)	35	24,8	15,7	7,5	0

Нарастание фильтрующего потока в слое поршня происходит за короткое время. Заменяем слой частиц системой микротрубок с радиусом  $a = \frac{d_3}{2}$  [99].  $d_3 = \frac{4\varepsilon}{S_0(1-\varepsilon)}$ ,  $S_0 = \frac{6(1-\varepsilon)}{\delta}$ , где  $\varepsilon$  – порозность,  $\delta$  – диаметр частицы,  $S_0$  – удельная поверхность частиц на единицу занимаемого объема,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ . Расчет нестационарного движения воздуха в трубке при скачкообразном повышении давления проведен в соответствии с [103]. Формулы для расхода воздуха в трубке имеют вид

$$\bar{Q} = 1 - 32 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{v\lambda_k^2 t}{a^2}\right)}{\lambda_k^4}, \quad Q = \frac{\bar{Q}\pi a^4 \Delta P}{8\mu l}, \quad \text{м}^3/\text{с},$$

где  $v$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\lambda_k$  – корни бесселевых функций нулевого порядка:  $\lambda_1 = 2,405$ ;  $\lambda_2 = 5,52$ ;  $\lambda_3 = 8,65$ ;  $\lambda_4 = 11,79$ ;  $\lambda_5 = 18,07\dots$ ;  $t$  – время, с;  $\Delta P$  – перепад давления, Па;  $l$  – длина поршня, м.

В табл. 4.8 приведены расчетные величины безразмерного расхода.

Таблица 4.8

*Расчетные величины безразмерного расхода*

$\sqrt{vt}/a$	0,1	0,3	0,7	1
$\bar{Q}$	0,16	0,52	0,95	0,998

Из таблицы следует, что при  $vt/a^2 = 1$  расход воздуха через микротрубку является стационарным. Следовательно время установления фильтрационного потока определится из соотношения  $t = a^2/v$ . Для гранулированного полиэтилена с  $d_3 = 3$  мм и  $v = 1,5 \cdot 10^{-5}$   $\text{м}^2/\text{с}$  это время составляет 0,15 с. Фильтрационный поток  $F_\phi = 8Q\mu l / \pi a^4$ ,  $\text{Н}/\text{м}^3$ . Из приведенных формул следует, что величина  $F_\phi$  есть функция порозности  $\varepsilon$  и за время установления потока происходит уменьшение порозности вследствие уплотнения слоя. При этом совершается работа по изменению объема слоя и генерации напряжений  $\sigma_{уп}$  вследствие уменьшения объема. Обозначим  $\Delta x = \int_0^{\Delta x} dx$  – изменение длины поршня вследствие

уплотнения,  $\Delta\varepsilon_k = \Delta x / l$  – изменение порозности  $\Delta\varepsilon_k = \frac{1}{l} \int_0^{\Delta x} dx$ ,

$F_\phi S l = S \alpha \Delta\varepsilon^\beta$ ,  $\alpha = l F_{\phi k} / \Delta\varepsilon_k^\beta$ . Здесь  $\Delta\varepsilon_k$  – изменение порозности при ус-

тановившейся фильтрации,  $F_{\text{фк}}$  – конечная сила фильтрации на единицу объема при установившемся режиме. Работа потока может быть записана как  $Sl \int_0^{\Delta x} F_{\text{ф}} dx = S\alpha \int_0^{\Delta x} \Delta \epsilon^{\beta} dx$ . Эта работа должна быть приравнена изменению энергии (повышению напряжения) в уплотненном состоянии  $\sigma_{\text{уп}} \cdot l$ .

$$\sigma_{\text{уп}} = \frac{1}{l} \alpha \int_0^{\Delta x} \left( \frac{x}{l} \right)^{\beta} dx = F_{\text{фк}} \Delta x = (\beta + 1) = \frac{\frac{P}{l} \Delta x}{\beta + 1} = \frac{P \Delta \epsilon}{\beta + 1}.$$

Величина  $\beta = 1$  при упругой деформации, при пластической –  $\beta = 0$ . Величина  $\sigma_{\text{уп}}$  – это напряжение, которое генерировано изменением структуры поршня. При установившейся фильтрации сила фильтрации затрачивается на поддержание структуры поршня и преодоление сопротивления стенок канала. Для упрощения будем полагать, что распределение давления вдоль слоя дисперсного материала линейно и  $dP = (P/l) dx$ , где  $P$  – давление воздуха на входе в канал,  $L$  – длина канала.

На рис. 4.56 показана схема действующих сил в элементе поршня. На элемент действуют силы тяжести, возникающих напряжений, сила трения и сила фильтрации, которая относится к объемной силе, поскольку действует на весь объем. При фильтрации возникает дополнительная увлекающая материал сила за счет поверхностного взаимодействия частиц и газа. При стационарной фильтрации уравнение баланса сил, действующих на слой материала, имеет вид (рис. 4.56):

$$-Sd\sigma - (\sigma + \rho_1 g h k_g) \xi f dS_{\delta} + F_{\text{ф}} d\Omega = 0,$$

где  $S$  – площадь канала,  $\text{м}^2$ ,  $\sigma$  – нормальное напряжение в материале, Па,  $h$  – высота канала, м,  $\rho_1$  – насыпная плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ ,  $k_g \approx 0,5$  – коэффициент, учитывающий распределение напряжения по периметру от воздействия веса материала [70, 71],  $\xi$  – коэффициент бокового давления,  $f$  – коэффициент трения материала о стенку,  $F_{\text{ф}} = f_{\delta} S_0$  – сила фильтрации на единицу объема поршня,  $f_{\delta}$  – удельная сила, действующая по поверхности частиц дисперсной среды  $\text{Н}/\text{м}^2$ ,  $S_0$  – удельная поверхность дисперсной среды  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ,  $d\Omega = S dx$  – элементарный объем, в котором проявляются поверхностные силы,  $dS_{\delta} = L_{\delta} dx$ ,  $L_{\delta}$  – периметр канала, м. Фильтрационная сила определяется перепадом давления на элементе  $d\Omega = S dx$ :  $F_{\text{ф}} d\Omega = dPS$ .

Уравнение равновесия действующих сил будет иметь вид

$$d\sigma - (\sigma + k_1) k_2 dx + (P/l) dx = 0, \quad (4.11)$$

где  $k_1 = \sigma_{\text{уп}} + \rho_1 g h k_g$ ,  $k_2 = \xi f L_6 / S$ .

Решение этого уравнения имеет вид

$$\sigma k_2 = \left( \frac{P}{l} - k_1 k_2 \right) \left[ 1 - \exp(-(l-x)k_2) \right] + \sigma_2 k_2 \exp(-k_2(l-x)), \quad (4.12)$$

где  $\sigma_2$  – напряжение задней площадки поршня (площадки выхода воздуха из поршня) близко к нулю.

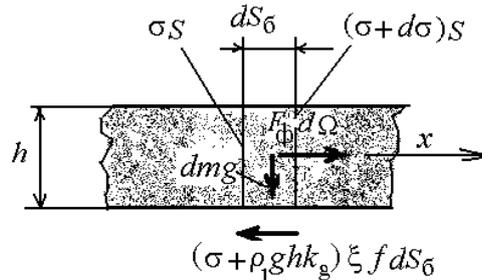


Рис. 4.56. Схема сил, действующих на элемент слоя поршня

Выражение (4.12) показывает, что в передней части поршня ( $x = 0$ ) напряжение максимально и при значении  $k_2 l > 5P/l \approx k_2(\sigma_1 + k_1)$ . Последнее соотношение свидетельствует о том, что напряжение в передней части поршня увеличивается прямо пропорционально давлению. Поскольку величина  $P/l$  по длине поршня одинакова, а напряжение трения по длине поршня уменьшается, движение поршня начинается с задней части, что наблюдается в эксперименте [128]. Наблюдается каскадное расслоение, соединение частей поршня. Процесс является нестационарным. В практике для устойчивой транспортировки должно выполняться условие  $k_2 l < 1$ .

Механизм образования пробок (поршней) сыпучего материала и их движения по трубопроводу, как в напорном, так и в вакуумном режиме на первый взгляд не отличается друг от друга, так как и в том и в другом случае движение пробок (поршней) сыпучего материала происходит в результате действия градиентных сил фильтрующегося газа. Также в обоих случаях в процессе движения пробок давление несущего газа в трубопроводе носит в основном нестационарный характер. В напорном трубопроводе распространение возмущений (волн давления и главных напряжений в слое сыпучего материала) направлено по течению потока. Главные нормальные напряжения в пористом скелете слоя сыпучего материала называют эффективными напряжениями, так как они эффективно действуют на частицы пористого скелета грунта или слоя сыпучего вещества, уплотняя их [193, 128]. В плотном слое сыпучего материала движущегося в напорном трубопроводе через какое-либо ме-

стное сопротивление, например, поворот, возникают осевые и радиальные напряжения, создающие значительные силы трения материала о стенки трубы способные при достаточной скорости изменения давления вызвать закупорку трубопровода.

В случае вакуумного пневмотранспорта распространение возмущений направлено против направления движения слоя сыпучего материала. В результате чего плотный слой сыпучего материала испытывает растягивающие (разрывающие) усилия не вызывающие переуплотнения материала, а напротив, длинные пробки разрываются на несколько более коротких, суммарный перепад давления на которых остается прежним. По этой причине вероятность закупорки транспортного трубопровода вакуумной пневмоустановки значительно снижается.

Приближенное аналитическое решение задачи об отрыве и образовании новых поршней приведено в [128]. Для решения задачи определения параметров и условий отрыва поршня использовалось известное уравнение нестационарной фильтрации при различных граничных и начальных условиях:

$$\frac{\partial}{\partial t}(p \cdot \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial z} \left( a \cdot p \frac{\partial p}{\partial z} \right). \quad (4.13)$$

В процессе решения определялись: градиент давления, определяющий прочность сводовых структур,  $t$  – время окончательного формирования пробки,  $L$  – длина окончательно сформировавшейся пробки,  $a$  – коэффициент фильтрации,  $\varepsilon$  – порозность.

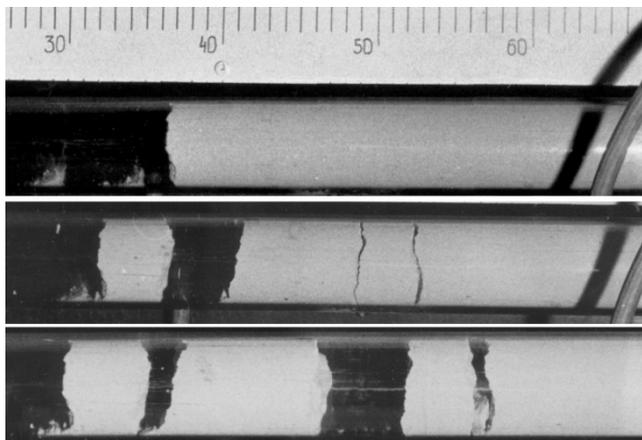
Напряжение, необходимое для отрыва слоя материала толщиной  $Z$ , определялось из уравнения:

$$\sigma = \left[ \rho_d (1 - \varepsilon) g + \tau_{тр} / R \right] Z + \sigma_{сц}, \quad (4.14)$$

где  $\tau_{тр}$  – напряжение сил трения материала о стенки трубы, Па;  $R$  – гидравлический радиус трубы, м;  $\sigma_{сц}$  – напряжение сил сцепления сыпучего материала, Па.

В лаборатории пневмотранспорта НИИ ПММ проведены экспериментальные исследования взаимодействия волны разрежения со слоем дисперсного материала разной плотности и связности. Полученный материал представлен в виде графических зависимостей и фотографий процесса. Результаты полученных экспериментальных исследований вполне соответствуют результатам полученных Г.М. Островским [128]. Целью исследований являлось изучение поведения слоя сыпучего материала разной плотности и связности при воздействии на него градиентных сил возникающих при нестационарной фильтрации газа. За величину интенсивности накладываемых возмущений на слой была принята скорость изменения давления газа на его границе.

На рис. 4.57 показано исходное состояние слоя сыпучего материала с высокой связностью (порошковое молоко) и тот же слой после взаимодействия с волной разрежения интенсивностью  $K_p = 118$  Па/с в разные моменты времени.



*Рис.4.57. Состояние материала при воздействии волны разрежения*

Как видно на фотографии отрыв каждого слоя происходит после образования характерных трещин, по которым длинный поршень разделяется на несколько коротких.

На рис. 4.58 показано состояние малосвязного сыпучего материала (глинозем) после воздействия волны разрежения.



*Рис. 4.58. состояние малосвязного сыпучего материала (глинозем) после воздействия волны разрежения*

В этом случае видно, что оторвавшиеся пробки материала сразу рассыпаются под углом естественного откоса, т.к. силы сцепления между частицами глинозема намного меньше, чем у предыдущего материала. При этом длины каждой из отделившейся пробки одинаковы и примерно равны диаметру трубы. График зависимости глубины разрушения слоя от скорости изменения давления газа приведен на рис. 4.59 Нели-

нейность поведения кривой на рис. 4.59 объясняется тем, что все экспериментальные точки получены при одном и том же начальном давлении газа, энергии которого хватает на отрыв слоя вполне определенной длины. Чтобы увеличить глубину разрыва пробки необходимо увеличить начальное давление.

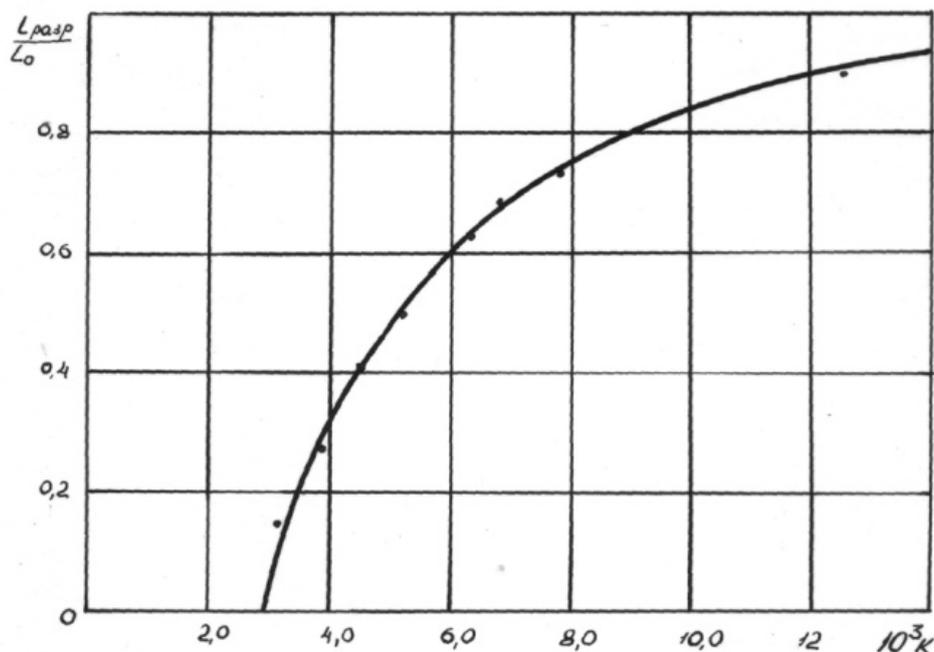


Рис. 4.59. Зависимость относительной глубины разрушения от скорости падения давления

Динамика процесса становится понятной при анализе рис. 4.60 и рис. 4.61. Здесь построены распределения градиентов давления газа и скорость их изменения, т. е. вторые производные от давления по координате для разных моментов времени. Градиент давления нелинеен вдоль слоя. Как следствие, в материале возникают меняющиеся от точки к точке силы межфазного взаимодействия и растягивающие эффективные напряжения.

Величина последних зависит от степени изменения локальных градиентов, т. е. характеризуются второй производной от давления. Функция второй производной имеет характерный экстремум, который эволюционирует во времени и по слою. При достаточной интенсивности возмущающей волны, растягивающие усилия превысят силы сцепления, и в материале возникает разрыв.

Появление таких разрывов совпадает по времени с точкой экстремума и расположены в тех местах слоя, где растягивающие усилия достигают величины силы связности материала.

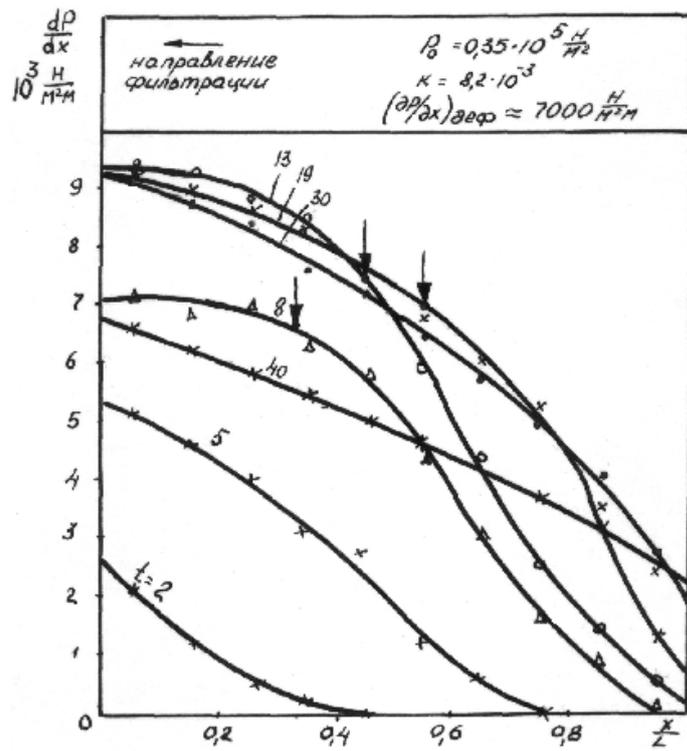


Рис. 4.60. Зависимость градиента давления от относительной координаты для разных моментов времени

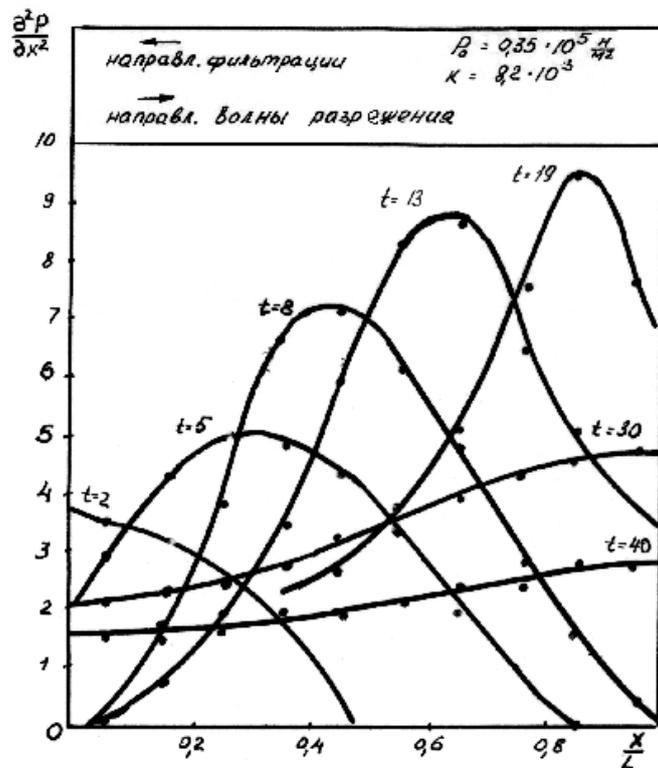


Рис. 4.61. Зависимость производной от градиента давления от относительной координаты и времени

В работах Г.М. Островского координата и момент времени отрыва слоя находятся из условия, когда эволюционирующая по слою кривая градиента давления газа коснется прямой, представляющей решение уравнения (4.13), т. е. когда градиентные силы фильтрующегося газа превысят силы сцепления между частицами слоя.

### Вертикальный транспорт

Пневматические подъемники дисперсных материалов (элеваторы) применяются для осуществления технологических процессов на предприятиях пищевой промышленности, в металлургии, энергетике, строительстве, угольной промышленности. Погрузочно-разгрузочные работы с порошкообразными и пылевидными материалами сопровождаются значительными выделениями пыли, что требует применения эффективных аспирационных систем [104]. Существуют системы вертикального пневмотранспорта с низкой концентрацией ( $1-\varepsilon < 0,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ), со средней (объемная концентрация  $1-\varepsilon$  в диапазоне  $0,05-0,15 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ), высокой (более  $0,15 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ).

На рис. 4.62 представлена схема элеватора.

Основное требование к транспорту – удовлетворение требования технологического процесса с наименьшими потерями материала, загрязнения окружающей среды. В практике для конкретных решений пользуются понятием величины нагрузки на площадь поперечного сечения трубопровода  $q \text{ т}/(\text{м}^2\text{ч})$

$$q = 3,6 \frac{G_m}{F} = 3,6 m \rho_0 v = 3,6(1-\varepsilon) \rho u,$$

где  $G_m$  – расход материала кг/с;  $F$  – площадь поперечного сечения  $\text{м}^2$ ,  $m$  – массовый коэффициент взвеси кг/кг,  $\rho_0$ ,  $\rho$  – плотности газа и материала  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $\varepsilon$  – порозность,  $u$ ,  $v$  – скорости частиц и газа м/с.

Алгоритм расчета для гранулированных и зерновых материалов следующий. В качестве исходных данных выступают производительность  $G_m$ , высота  $L$ , плотность газа и частиц, размер частиц, динамическая вязкость газа. По априорным данным задается величина  $q = 500 - 1000 \text{ т}/(\text{м}^2\text{ч})$ , определяется диаметр пневмоствола, скорость витания, скорость газа, которая равна удвоенной скорости витания, определяется скорость частиц, которая равна разнице скоростей газа и скорости витания, массовая концентрация  $k = G_T / uF$ , порозность  $\varepsilon = 1 - k / \rho$ , рассчитывается длина разгонного участка, стационарного участка, потери давления на трение газа, твердых частиц о стенки пневмоствола, потери от веса материала, потери давления от изменения количества движения твердых частиц.

Для мелких частиц в диапазоне диаметров частиц 50–430 мкм и концентраций 20–100 кг/м<sup>3</sup> соотношение между скоростями имеет вид

$$\frac{v-u}{v_B} = 375d^{-0,845},$$

где  $v_g$  – скорость витания частицы,  $d$  – диаметр частицы в мкм. Для полидисперсных материалов, содержащих большое количество мелких частиц, скорости витания для крупных должны быть уменьшены из-за их взаимодействия с мелкими частицами [149]. При этом вводится понятие кажущейся вязкости при взаимодействии частиц. Для цемента, например, массовое содержание частиц менее 20 мкм составляет 50 %, поэтому их влияние на уменьшение скорости витания крупных частиц велико.

Применение данного алгоритма дает возможность осуществлять подъем материала взвесью с устойчивым процессом пневмотранспорта. Трудности возникают в части выделения мелких частиц из газа в фильтрах, которые создают противодействия и требуют регулировки. Для упрощения эксплуатации фильтров их размещают внизу силоса, а уловленную пыль транспортируют в элеватор [149, 104].

В [20] приводится обзор исследований по циркуляционным слоям с расходом твердого материала. Это более устойчивая схема проведения каталитических процессов по сравнению со схемой псевдооживления. По высоте аппарата наблюдается три характерных зоны: нижняя – с большой концентрацией частиц, верхняя – с порозностью, близкой к единице и переходная между ними в середине аппарата. В этих устройствах наблюдается резко неравномерное распределение скоростей газа и частиц и концентраций последних по сечению подъемного стояка. Движение вверх материала осуществляется за счет большего локального удельного потока в центральной области по сравнению с отрицательным (опускающимся) потоком на периферии. Оба этих потока уменьшаются

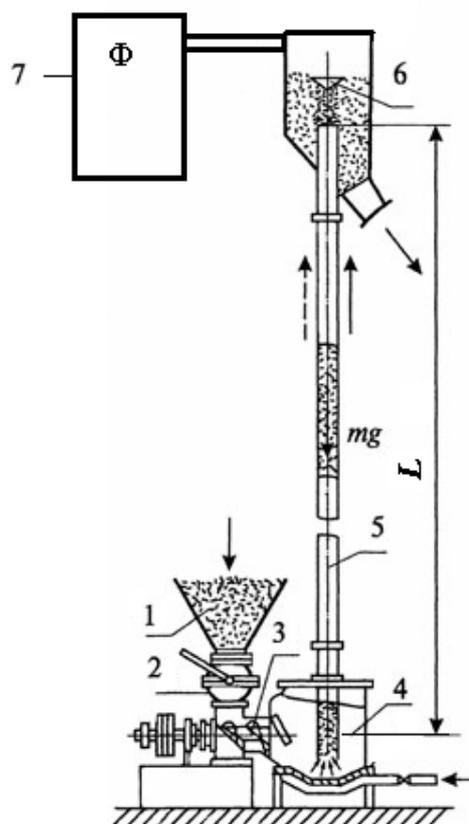


Рис. 4.62. Схема элеватора:  
1 – бункер; 2 – затвор; 3 – шнек;  
4 – загрузочная камера  
с аэроднищем; 5 – пневмоствол;  
6 – приемник материала;  
7 – фильтр

по высоте стояка, тогда как их разность остается постоянной. Внутренняя циркуляция частиц резко увеличивает время их пребывания, а значит и время взаимодействия частиц с газом. Имеются многочисленные экспериментальные данные по распределению давлений по высоте стояков с различной загрузкой, удельным расходом частиц, размером частиц, скорости газа. Выяснено, что на распределение плотности среды в стояке влияет условие вывода потока из стояка. При сужении вывода или применении меньшего диаметра выводного патрубка концентрация (плотность потока) вверху увеличивается. В [20] рассмотрена модель псевдооживленного слоя. Введены коэффициенты, учитывающие эффективные коэффициенты вязкости при взаимодействии частиц. Если представить полидисперсный материал, состоящий только из крупных и мелких частиц, причем скорость витания крупных частиц при обтекании газом без частиц на один–два порядка больше скорости витания мелких частиц, можно полагать, что крупные частицы обтекаются потоком псевдожидкости повышенной вязкости и плотности из-за присутствия мелких частиц. В этом случае скорость псевдооживления крупных частиц оказывается меньше по сравнению со скоростью псевдооживления в отсутствие мелких частиц. В этом случае транспортировка частиц в режиме взвешенного слоя оказывается благоприятной для полидисперсного материала, в котором содержание мелких и крупных частиц по массе оказывается сопоставимым. Расчет гидродинамических параметров проводится аналогично [149].

Наиболее экономичным является пневмотранспорт дисперсных материалов потоком высокой концентрации. Использование пневмоствола одинакового диаметра приводит к разным режимам движения материала. В нижней части ствола концентрация материала составляет  $600 \text{ кг/м}^3$ , в верхней из-за разжижения концентрация уменьшается до  $65 \text{ кг/м}^3$  [20]. Движущийся слой сыпучего материала сохраняет высокую концентрацию, пока скорость фильтрации не превысила определенного значения. При увеличении скорости выше определенного предела транспорт сплошным потоком переходит в транспорт дисперсной фазы низкой концентрации. Изучение транспорта пылевидного катализатора высокой концентрации сплошным потоком показало, что наиболее устойчивая транспортировка достигается при среднем диаметре частиц порядка  $66 \text{ мкм}$ . Приводится оптимальный дисперсный состав, обеспечивающий максимальную загрузку пневмоподъемника [149]. Для пылевидного материала, склонного к образованию агломератов, предлагается следующая оценка параметров пневмоподъемника. Задаваясь величиной  $q = 1500\text{--}3500 \text{ т/м}^2\text{ч}$ , определяют  $F$ . Чем меньше среднее значение  $d$ , тем

выше  $q$ . Задав величину  $1-\varepsilon$  в пределах  $(312/\rho)-(382/\rho)$ , определяют скорость частиц  $u$ . Величина скольжения

$$i = \frac{v}{u} = 4.9 \left[ \frac{\rho_0}{\rho(1-\varepsilon)} \right]^{0,111} = 1,5 - 2,2.$$

Используя эти значения, определяют скорость газа и объемный расход газа. Далее определяют статическую потерю напора, потерю на динамическое трение, причем коэффициент трения записывается в виде

$$\lambda^* = \frac{27}{Fr^{0,75}}, \text{ где } Fr \text{ относится к скорости и диаметру частиц: } Fr = \frac{u^2}{g\delta}.$$

Кроме того, учитывается потери напора на изменение количества движения материала.

Однако движение материала сплошным потоком предполагает взаимодействие частиц и возникновение напряжений в движущемся слое. Эти напряжения способствуют возникновению боковых напряжений и соответственно напряжений кулоновского трения. Кроме того, распределение напряжений влияет на распределение проницаемости слоя по высоте из-за изменения порозности. Эти изменения могут привести к пластическим деформациям агломератов и их уплотнению.

Проведем оценку возникающих напряжений по аналогии с [172]. Однако рассмотрим восходящее движение и вертикальную ось направим вверх с ее началом в зоне ввода материала. Положим, распределение давления вдоль пневмоствола линейным. Проводя аналогичные выкладки, получим следующее выражение для аксиального напряжения

$$\sigma_z = \left( \frac{P}{L} - (1-\varepsilon)g\rho \right) \frac{D}{4\xi f} \left[ 1 - \exp\left( -(L-z) \frac{4\xi f}{D} \right) \right],$$

где  $P$  – избыточное давление газа внизу пневмоствола;

$L, D$  – длина и диаметр пневмоствола;  $f = (\tau_{rz})_w / (\sigma_r)_w$  – коэффициент трения,

$\xi = (\sigma_r)_w / (\sigma_z)_w$  – коэффициент бокового давления,  $(\tau_{rz})_w, (\sigma_r)_w$  – напряжения трения и радиальное на стенке,  $(\sigma_z)_w$  – аксиальное напряжение на стенке.

Величина коэффициент трения скольжения  $f$  для твердых материалов в газообразной среде находится в диапазоне 0,15–0,7; коэффициент бокового давления  $\xi$  находится в диапазоне 0,3–0,6. Так что  $\xi f$  находится в диапазоне 0,05–0,5. Однако экспериментально определенные величины в [172] имеют намного меньшие значения. Гранулированные материалы имеют кажущуюся плотность  $\rho$  в диапазоне 900–1200 кг/м<sup>3</sup>.

Объемная масса цемента в зависимости от его состояния (аэрированный или уплотненный от длительного хранения) находится в диапазоне 0,8–1,6 т/м<sup>3</sup>, кажущаяся плотность  $\rho = 2,8\text{--}3,2$  т/м<sup>3</sup>. Образование сплошного движения происходит в начальном участке в результате торможения частиц ограждающими поверхностями и взаимодействия частиц между собой. Расчет показывает, что при  $L = 50$  м,  $D = 0,3$  м,  $q = 3500$  т/м<sup>3</sup>ч,  $P = 500$  кПа,  $4\xi f \approx 1$ ,  $\varepsilon = 0,8$ ;  $\rho = 3000$  кг/м<sup>3</sup>, в нижней части величина  $u = G_m / 3,6F(1 - \varepsilon)\rho = 1,6$  м/с;  $v = 2,4$  м/с;  $\sigma_z = 1,2$  кПа, что мало сказывается на уплотнении слоя. На расстоянии 30 м для сохранения сплошного движения необходимо увеличить диаметр трубопровода до 0,42 м. При таком режиме транспортирования затруднений при эксплуатации фильтра не возникает.

#### 4.2.3. Движение дисперсной среды в виде слоя

При транспортировке мелкозернистого материала потеря напора проходу воздуха между стенкой и материалом намного ниже, чем потеря напора на фильтрацию воздуха через слой [53]. Поэтому сопротивлением трения воздуха о поверхность трубы можно пренебречь. При этом, скорость воздуха вблизи стенки оказывается больше, чем в слое. Сила трения материала о трубу пропорциональна силам, прижимающим частицы к стенкам трубы.

Скорость частиц, перемещаемых сплошным потоком, можно выразить равенством:

$$u = \frac{G_m}{S\rho_m}. \quad (4.15)$$

Потеря напора в трубопроводе длиной  $\Delta l_i$  с учетом приведенных условий равна

$$\Delta p_i = p_{i+1} - p_{i-1} = \xi_m \frac{\Delta l_i \rho_{i+1}}{\delta \cdot 2} (v_{i-1} - u)^2, \quad \xi_m = \lambda_{m\delta} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \psi, \quad (4.16)$$

где  $\lambda_{m\delta}$  – коэффициент потери напора от трения транспортирующей среды о беспорядочную насыпь шаровидных частиц,  $\psi$  – отношение потери напора в любом насыпном материале к потере напора к беспорядочной насыпи шаровидных частиц.

При изотермическом расширении газа будет справедливо равенство

$$\Delta p_{ii} = p_{i+1} - p_{i-1} = p_{i-1} \left[ 1 - \sqrt{1 - \xi_m \frac{2}{p_{i-1}} \frac{\Delta l_i \rho_{i+1}}{\delta \cdot 2} (v_{i-1} - u)^2} \right]. \quad (4.17)$$

Полные потери напора учитывают потери на подъем материала. В [53] приведены диаграммы полной потери напора транспорта зерна плотным слоем от скорости воздуха, когда транспортирующая среда

имеет постоянный объем. Для протяженных трубопроводов необходимо учитывать изменение плотности. На рис. 4.63 показаны кривые зависимости отношения перепада давления при изотермическом расширении потока к перепаду при постоянном объеме (изохорическое течение)  $\chi = \Delta p_{ii} / \Delta p_i$ . При изменении скорости воздуха относительно зернового материала пшеницы от 0,1 до 0,53 м/с при производительности 2 кг/с в трубе 61 мм, длиной 20 м потери напора от расширения потока возросли в 10 раз.

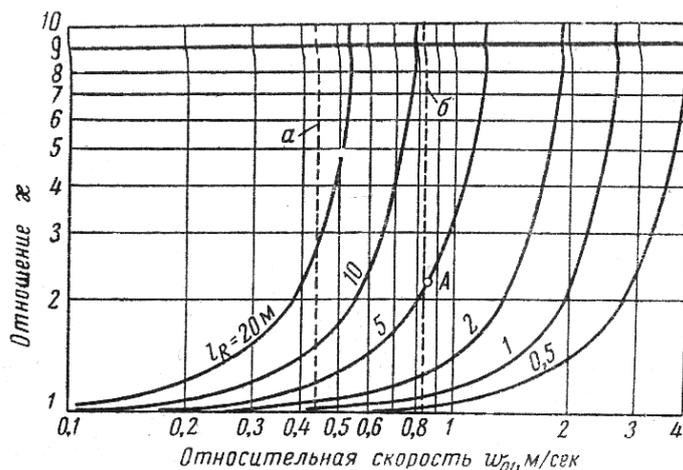


Рис. 4. 63. Зависимость отношения  $\chi$  от средней относительной скорости  $w_{01}$ . а и б – границы транспортирования для горизонтального и вертикального трубопровода соответственно

Таким образом, транспортирование материала сплошным потоком по длинным трубопроводам требует затрат значительной энергии. Для уменьшения этих затрат необходимо отводить часть воздуха, чтобы средняя скорость оставалась неизменной.

В табл. 4.9 показаны различия между пневмотранспортом взвесью и транспортом сплошным потоком.

Таблица 4.9

Различия между пневмотранспортом взвесью и транспортом сплошным потоком

Сравниваемый показатель	Пневмотранспортирование	
	обычное	сплошным потоком
Относительная потеря напора $\frac{\Delta p_L}{\Delta p_R}$ , $\frac{\text{кг} / \text{м}^2}{\text{м}}$	5–70	300–10 000
Средняя скорость воздуха $v_0$ , м/сек	14–35	0,4–4

Расширение транспортирующего воздуха	умеренное	значительное
Концентрация материала	$\frac{\rho_{p0}}{\rho_m} < 0,11$	$\frac{\rho_{p0}}{\rho_m} < 0,61$
Средняя скорость материала $v_0$ , м/сек	$0,3 v_0 - 0,7 v_0$	до $0,8 v_0$
Ускорение и замедление движения частиц материала	значительные	небольшие
Повреждение материала	возможно	незначительное
Регулировка подачи материала	Питающее устройство в начале трубопровода	Выпускное устройство в конце трубопровода
Перемещение через искривленные трубопроводы	Возможно при увеличенной потере напора	В большинстве случаев невозможно (значительная потеря напора)
Коэффициент использования энергии воздуха при производительности 1 кг/с	0,7–0,9	1,2–1,4 (при $l \rightarrow 0$ ), 0,3–0,5 ( $l = 20$ м)

Для оценки расхода энергии при пневмотранспортировании сплошным потоком вводится понятие коэффициента использования энергии воздуха.

Для пневмотранспорта сравнивается работа по перемещению материала по трассе длиной  $l_R$  и энергия воздушного потока  $N_L$ .

$$\eta = \frac{gG_m l_R}{N_L}. \quad (4.18)$$

Оценки коэффициента использования для пневмотранспорта взвесью и сплошным потоком зерна пшеницы даны в [53]. Однако выражение (4.18) должно относиться к вертикальному подъему материала, поскольку в горизонтальном направлении полезная работа направлена только против сил трения. Поэтому в мощность воздушного потока должна входить составляющая подъема материала и мощность на затраты против сил трения. Таким образом, коэффициент использования энергии воздуха для всех типов пневмотранспорта должен быть меньше единицы.

### Метод псевдовязкого течения

Существующие методы расчета пневмотранспорта высококонцентрированных потоков используют модели поршневого [195] или волнового [128] движения материала. Однако экспериментальные исследования

движения высококонцентрированных потоков по трубам различного диаметра, длины и конфигурации показали, что сыпучий материал движется вдоль трубопровода одновременно в виде поршней разной длины, слоев, реализуется, кроме того, и волновое движение. Поэтому результаты расчетов по моделям [195, 128] не вполне согласуются с опытными данными [167].

Поскольку рассматривается случай движения материала в виде агломератов, в которых частицы находятся в постоянном контакте друг с другом при концентрации, близкой к насыпной, и на них одновременно действуют несколько сил, происходит непрерывное изменение скорости, структурных характеристик, концентрации частиц, скольжение их относительно друг друга, а, возможно, и расслоение материала. Все это создает трудности при составлении физической модели движения и математическом описании. Однако, как показывают экспериментальные исследования, при всех формах движения, когда сохраняется контакт частиц друг с другом и не происходит переуплотнение материала при движении отдельных поршней, скорость отдельных слоев материала по поперечному сечению трубопровода различная. Такая картина движения позволяет провести аналогию с вязким течением жидкости и использовать уравнения гидродинамики [167]. Вместе с тем, в отличие от сплошной среды, поле напряжений структурных элементов материала не распространяется на весь объем трубопровода или рассматриваемый участок. Поэтому при использовании уравнений сплошной среды вводят среднюю концентрацию материала на этом участке. Используя обычный метод теории подобия для гидродинамических процессов [167] и представляя параметры смеси через соответствующие параметры компонентов для стационарного изотермического потока, определяются критерии подобия, характеризующие вязкое сопротивление трению: независимый критерий как отношение инерционных сил к силам вязкости (аналог числа Рейнольдса) и критерий давления как отношение градиента давления за счет трения к инерционным силам (аналог числа Эйлера). Принимая за характерный линейный размер внутренний диаметр трубопровода и допуская, что местные градиенты скорости компонентов смеси как по продольной оси трубопровода, так и по нормали к его стенке одинаковые, указанные критерии представлены в виде [167].

$$\text{Re}_m = \frac{Du_m \rho_m}{\eta_m}, \quad \text{Eu}_f = \frac{dp}{dx} \frac{D}{\rho_m u_m^2}, \quad (4.19)$$

$$u_m = v\varepsilon + u\varepsilon_m; \quad \rho_m = \rho\varepsilon + \rho_m \varepsilon_m / k; \quad k = u / v; \quad \eta_m = \eta\varepsilon + \eta_m \varepsilon_m / k.$$

Предложены числа Эйлера для прямолинейного участка  $Eu_f$  и местного сопротивления (колена)  $Eu_b$ . Если для газожидкостной смеси определение вязкости не вызывает затруднений, то вязкость смеси газ – твердое (особенно вязкость твердого компонента) представить трудно [167]. Однако формально использовать этот термин можно исходя из следующих соображений. Главная особенность рассматриваемого случая – высокая концентрация перемещаемого материала и низкая скорость несущего потока. Поэтому сыпучий материал движется только в виде слоев, дюн и поршней, которые постоянно разрушаются и вновь образуются, вдоль горизонтального или наклонного трубопровода. При этом за счет гравитационных сил и сил трения происходит относительное перемещение слоев материала, движущихся параллельно продольной оси. На этом основании принято, что характеристики трения, как и для вязкой жидкости, определяются связью между касательным напряжением и скоростью деформации сдвига слоев твердого компонента смеси относительно друг друга в направлении нормали к стенке трубопровода  $du_m / dn$ . Поэтому, как и для ламинарного одномерного течения вязкой жидкости, будет справедлива простая линейная зависимость, определяющая «вязкость» сыпучего материала:

$$\eta_m = \frac{\tau_m}{du_m / dn}.$$

Касательное напряжение зависит от нормального напряжения в слое и физико-механических свойств материала. Для его определения проводят трибометрирование нагруженного насыпного слоя. Для этого предлагается нагружать подвижный элемент трибометра таким образом, чтобы нормальное напряжение с между перемещаемым и неподвижным слоями исследуемых материалов оставалось постоянным. Если принять, что стандартный градиент скорости по нормали к контактной поверхности равен единице, то отношение коэффициента внутреннего трения к псевдовязкости материала принимает постоянное значение

$$\frac{f}{\eta_m} = \frac{1}{\sigma} \frac{du_m}{dn} = \text{const.}$$

Таким образом, физико-механические свойства сыпучего материала характеризуются не только коэффициентом внутреннего трения, но и его псевдовязкостью.

Принятая гипотеза псевдовязкого потока со стандартным значением «вязкости» твердого материала, а следовательно, и возможность использования гидродинамических критериев подобия для определения сопротивления трению подтверждены экспериментальными данными, полученными для пневмотранспорта сыпучих материалов с различными

физико-механическими свойствами [167]. Исследования проведены на экспериментальной установке (рис. 4.64), предназначенной для изучения импульсного поршневого пневмотранспорта особых (взрывоопасных, радиоактивных) сыпучих материалов, транспортировка которых требует выполнения специальных условий. Установка оснащена необходимыми клапанами с дистанционным управлением, расходомером. Базовый трубопровод 3 прямолинейный, горизонтальный, внутренним диаметром 50 мм и длиной 100 м. Пунктиром показаны другие трубопроводы длиной до 210 м с вертикальным участком 12 м, которые работают по замкнутому контуру и оснащены необходимыми измерительными устройствами. Степень заполнения трубопровода регламентируется соотношением диаметров выходного патрубка питателя и колена-накопителя, а также цикличностью впуска воздуха в колено-накопитель с помощью клапана, работающего от устройства, задающего импульсы [132].

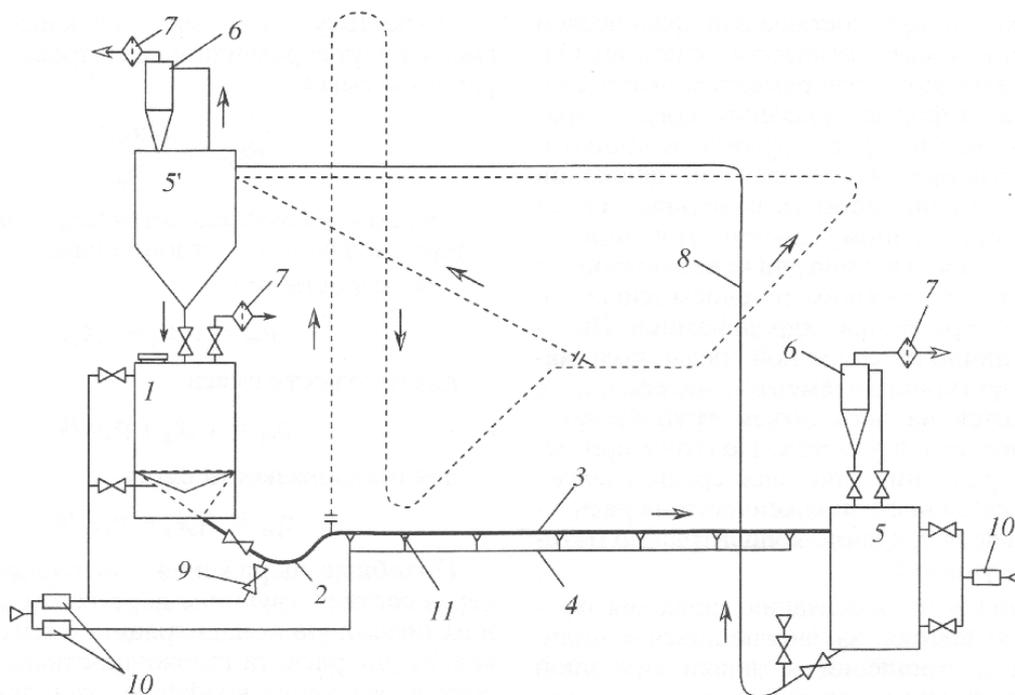


Рис. 4.64. Экспериментальная установка:

- 1 – камерный питатель; 2 – колено-накопитель; 3 – транспортный трубопровод;
- 4 – трубопровод дополнительной подачи аэрирующего воздуха в трубопровод;
- 3, 5, 5 – приемные бункеры; 6 – циклоны; 7 – фильтры; 8 – обратный трубопровод;
- 9 – вентиль; 10 – регулятор давления

Периодичность и продолжительность подачи сжатого воздуха в колено-накопитель регламентируются задатчиком импульсов. Если воздух подается в колено непрерывно, то материал транспортируется в виде

взвеси. Если воздух через клапан 9 не подавать, то при диаметре выходного патрубка, равном диаметру трубопровода, осуществляется транспорт в виде плотного слоя за счет подачи сжатого воздуха из камеры питателя. Как известно, транспорт плотным слоем возможен лишь на небольшие расстояния.

В случае образования длинного поршня с большим сопротивлением из трубопровода 4 через автоматически включаемый соответствующий клапан 11 подается воздух на разрушение такого поршня. Клапаны имеют защиту от попадания транспортируемого материала в их полость. При оптимальных режимах переуплотнения прямолинейного трубопровода обычно не происходит. На сложных трассах выявляются места возможных переуплотнений, куда проще непрерывно подавать небольшое количество аэрирующего воздуха.

По окончании опыта материал из приемного бункера 5, который одновременно является питателем, подается в приемник 5' для загрузки питателя 7.

Для транспортирования использовались сухие порошковые молочные продукты, мука пшеничная и рисовая, сахарный песок, крахмал, аспирин кристаллический. Это позволило проводить исследования в широком диапазоне изменения коэффициента внутреннего трения  $0,4 < f < 0,7$ .

Из всех рассматриваемых видов движения материала предельным является движение в виде сплошного слоя при истинной объемной концентрации  $\epsilon_n$  соответствующей насыпному слою при плотности  $\rho_n$  т. е.  $\epsilon_n = \rho_n / \rho_m$ . Поэтому, характеризуя структуру потока через среднюю концентрацию  $\epsilon_m$ , удобно сравнивать ее с предельной.  $\epsilon_n$  через коэффициент загрузки трубопровода  $\chi = \epsilon_m / \epsilon_n$ .

Для большинства порошковых и мелкозернистых материалов можно использовать любой вид пневмотранспорта. Поэтому вопрос о его выборе решается на основе анализа эффективности работы установки, оценку которой принято проводить по коэффициенту полезного действия  $\zeta$ , зависящему от удельных значений производительности и расхода воздуха, падения статического давления на магистрали и длины последней. При этом принимают во внимание, что в зависимости от соотношения параметров транспортирования каждому значению степени загрузки соответствует ряд значений  $\zeta$ . Поэтому выбирают наибольший из них, а затем для каждого из исследованных материалов строят графическую зависимость  $\zeta = f(\chi)$ , используемую для выбора оптимальной степени загрузки и вида пневмотранспорта. Так, при транспорте порошка полипропилена режимы при  $\chi < 10\%$  и  $\zeta < 60\%$  отвечают движению в виде взвеси; при  $10 < \chi < 30\%$  и  $60 < \zeta < 75\%$  наблюдается

перемещение материала в виде дюн и отдельных поршней, которые непрерывно разрушаются и снова образуются по длине магистрали. Этот участок кривой имеет максимум  $\zeta_{\max}$  при  $\chi = 20\%$ . При дальнейшем увеличении степени загрузки материал движется в виде поршней, наблюдается дальнейшее падение  $\zeta$  за счет значительного увеличения удельного статического давления несущей среды, что является следствием расклинивающего эффекта поршней с увеличением сопротивления трению. При  $\chi = 46\%$  и  $\zeta = 42\%$  устойчивость транспортирования нарушается, появляется опасность закупорки трубопровода. Для материалов с физико-механическими свойствами, отличающимися от порошка полипропилена, представленные численные значения иными.

Опыты, соответствующие условиям при  $\zeta_{\max}$ , отличаются высокой устойчивостью пневмотранспорта и воспроизводимостью. Поэтому для дальнейшего обобщения использованы экспериментальные данные, соответствующие этим условиям, и по полученным экспериментальным данным для каждого из исследуемых материалов по зависимостям (4.19) и находили значения  $Re_m$  и  $Eu$ .

Для получения обобщенной зависимости для расчета затрат энергии несущего потока на трение использовали опытные данные, полученные при смешанной структуре потока, когда не наблюдается сквозного прохода воздуха в верхней части поперечного сечения горизонтального трубопровода. При этом каждому материалу соответствуют свои средние значения параметров смеси, интервал изменения которых зависит от физико-механических свойств смеси:  $w_T = 3,31 - 10,1$  м/с,  $k = 0,5 - 0,8$ ,  $\rho_m = 48 - 190$  кг/м<sup>3</sup>,  $\eta_m = 214 - 380$  кг/(м·с). Для каждого из исследованных материалов определяли одно значение числа Эйлера в функции числа Рейнольдса. Графически эта зависимость представлена на рис. 4.65. Видно, что обобщение для исследованной группы материалов вполне корректно. Расчеты показали, что для прямого горизонтального трубопровода при скорости смеси  $w_T < 10$  м/с энергия несущего потока расходуется только на сопротивление трению смеси.

Рассчитанные по опытным данным значения функции близки к логарифмическому распределению и могут быть аппроксимированы зависимостью

$$Eu_f = \frac{0,0106}{Re_m^{0,72}},$$

которая получена для числа Рейнольдса  $Re_m = 0,12 - 8,0$ ; коэффициента внутреннего трения сыпучего материала  $f = 0,4 - 0,7$  при внутреннем диаметре  $D = 50, 58$  мм и длине  $L = 25 - 210$  м трубопровода. Экстраполяция представленной графической зависимости к скорости  $w_T > 10$  м/с

отвечает переходу к пневмотранспорту в виде взвеси, когда принятая модель псевдовязкого движения смеси становится неприемлемой.

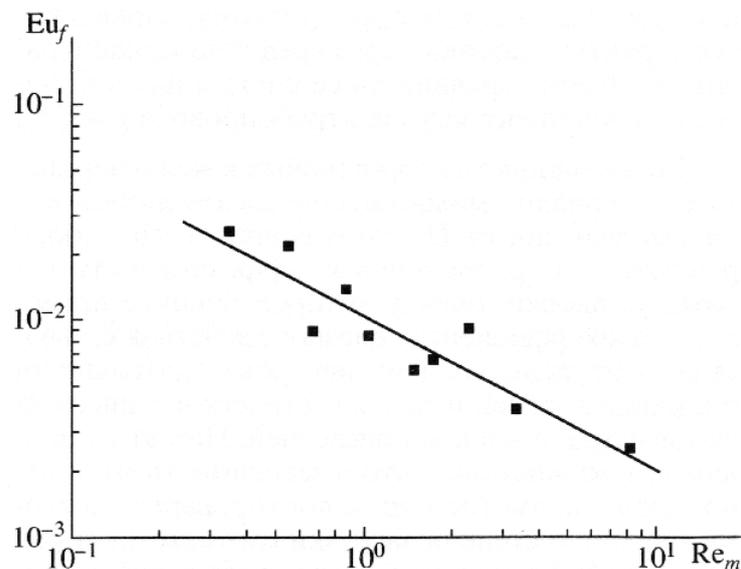


Рис. 4.65. Зависимость критерия Эйлера от числа Рейнольдса

На практике при расчетах гомогенных потоков обычно используют формальный коэффициент трения, который в два раза выше числа Эйлера. В общем случае при расчете суммарных затрат энергии несущей среды на перемещение смеси по наклонному участку трубопровода в критериальное уравнение движения входит число Фруда, учитывающее падение статического давления за счет подъема материала.

Затраты энергии несущей среды при перемещении материала на криволинейном участке зависят преимущественно от интенсивности взаимодействия частиц со стенкой и друг с другом, а также от высоты подъема [167]. Кроме того, затраты энергии зависят от плотности и скорости смеси, концентрации материала, радиуса и угла поворота колена. Оценка перепада статического давления за счет подъема проводится обычным способом в зависимости от плотности смеси и высоты подъема.

По аналогии с гидродинамическим методом расчета колен [80] падение давления в горизонтально расположенном колене можно разделить на потери от трения  $\Delta P_{fb}$  при движении на прямолинейном участке, равном периметру криволинейного участка по продольной оси симметрии, и местные потери  $\Delta P_b$ , которые в данном случае зависят от центробежной силы. Первая составляющая трения может быть определена по зависимости (4.19) через число  $Eu_f$ :

$$\Delta p_{fb} = \frac{l}{D} Eu_{fb} \rho_m u_m^2.$$

Коэффициент местного сопротивления определяется  $\xi_b = ABEu_b$ ,  $A = 1,32(r/D)^{-0,173}$ ,  $B$  зависит от угла поворота, для угла поворота  $90^\circ$   $B = 1$ .

Анализ опытных данных по транспортированию порошкообразных материалов показывает, что число  $Eu$  зависит от физико-механических свойств сыпучего материала и преимущественно от коэффициента внутреннего трения. Для исследованного диапазона  $0,4 < f < 0,7$  число  $Eu_b$  можно оценить по следующей эмпирической зависимости [167]:

$$Eu_b = 0,145f^{-3,47}, \quad \xi_b = 0,191f^{-3,47}(r/D)^{-0,173}$$

для поворота потока на  $90^\circ$  радиусом  $r$ .

При проектировании установок низкоскоростного пневмотранспорта принципиально важным является вопрос о сохранении структурных характеристик потока, реализующегося в промежутке между транспортом в виде взвеси и в виде поршней с тенденцией к их переуплотнению [167]. Особенно это важно при перемещении материала на большие расстояния или при движении по трубопроводам сложной конфигурации, когда степень расширения газа довольно велика. В этом случае если диаметр трубопровода постоянный, то скорость газа непрерывно увеличивается и может достичь такого значения, когда произойдет переход к транспорту в виде взвеси со всеми нежелательными последствиями. Сохранение значения скорости в определенном интервале обеспечивается при движении по расширяющемуся или ступенчатому трубопроводу.

Степень расширения трубопровода определяется следующим соотношением

$$\frac{dS}{S} = Eu_f \frac{u_m^2}{Da_m^2} dx + \frac{gdx \sin \alpha}{a_m^2}, \quad a_m = \sqrt{\frac{RT}{1+\mu}}. \quad (4.20)$$

Предварительно рассчитанное число  $Eu$  при диаметре  $D_0$  трубопровода в начале каждого расчетного участка  $\Delta x$  позволяет по уравнению (4.20) определить поперечное сечение каждого из последовательно рассчитанных участков.

### 4.3. Выделение дисперсной фазы из газовых потоков в фильтрах

В основе работы фильтров всех видов лежит процесс фильтрования газа через пористую перегородку, в ходе которого твердые частицы задерживаются, а газ полностью проходит сквозь нее. Фильтрующие перегородки газовых фильтров условно подразделяются на следующие типы.

Гибкие пористые перегородки:

- тканевые материалы из природных, синтетических или минеральных волокон;
- нетканые волокнистые материалы (войлоки, клееные и иглопробивные материалы, бумага, картон, волокнистые маты);
- ячеистые листы (губчатая резина, пенополиуретан, мембранные фильтры).

Жесткие пористые перегородки:

- зернистые материалы (пористая керамика или пластмасса, спеченные или спрессованные порошки металлов, пористые стекла, углеграфитовые материалы и другие);
- волокнистые материалы (сформированные слои из стеклянных и металлических волокон);
- металлические сетки и перфорированные листы.

Зернистые слои:

- неподвижные, свободно насыпанные материалы;
- периодически или непрерывно перемещающиеся материалы.

Современные фильтры в зависимости от назначения и величин входной и выходной концентраций улавливаемой дисперсной фазы условно делят на три класса.

*Фильтры тонкой очистки (высокоэффективные или абсолютные фильтры)* предназначены для улавливания с очень высокой эффективностью (обычно выше 99 %) в основном субмикронных частиц из промышленных газов и воздуха при низкой входной концентрации дисперсной фазы (менее 1 мг/м<sup>3</sup>) и малой скорости фильтрования (менее 0,1 м/с). Такие фильтры применяют для улавливания особо токсичных частиц, а также для ультратонкой очистки воздуха при проведении некоторых технологических процессов. Обычно эти фильтры не подвергаются регенерации.

*Фильтры для очистки атмосферного воздуха (воздушные фильтры)* используются в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха. Они рассчитаны на работу при концентрации пыли менее 50 мг/м<sup>3</sup>, часто при высокой скорости фильтрования (до 2,5–3 м/с). Фильтры этого класса бывают как нерегенерируемыми, так и периодически или непрерывно регенерируемыми.

*Промышленные (тканевые, зернистые, грубоволокнистые) фильтры* применяются для очистки промышленных газов в основном с высокой концентрацией дисперсной фазы (до 60 г/м<sup>3</sup>). Фильтры этого класса имеют устройства для периодической или непрерывной регенерации, позволяющие поддерживать производительность на заданном уровне

и возвращать ценные продукты в производство. Нередко такие фильтры являются составной частью технологического оборудования.

#### 4.3.1. Тканевые фильтры

В тканевых фильтрах применяют фильтрующие материалы двух типов:

- обычные ткани, изготавливаемые на ткацких станках (хлопчатобумажные, шерстяные, нитроновые, лавсановые, полипропиленовые и другие синтетические ткани, а также стеклоткани);
- нетканые материалы (фетры, войлоки, получаемые путем спайки или механического перепутывания волокон иглопробивным методом).

В типичных фильтровальных тканях размер сквозных пор между нитями достигает 100–200 мкм. Аэродинамические свойства чистых фильтровальных тканей характеризуются воздухопроницаемостью – расходом воздуха, проходящего через 1 м<sup>2</sup> ткани при определенном перепаде давления  $p_T$ , обычно равном 49 Па. Воздухопроницаемость выражается в м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> с) и численно равна скорости фильтрации в м/с при  $p_T = 49$  Па. По мере запыления аэродинамическое сопротивление ткани возрастает, а расход газа через фильтр уменьшается. При достижении  $p_T = 500–2000$  Па ткань регенерируют путем продувки газа в обратном направлении, механического встряхивания или другими методами. После нескольких циклов «фильтрация–регенерация» остаточное количество пыли в ткани стабилизируется и начинает соответствовать так называемому равновесному пылесодержанию ткани  $q$  (в кг/м<sup>2</sup>) и остаточному сопротивлению равновесно запыленной ткани  $p_p$ .

К тканям предъявляются следующие требования:

- высокая пылеемкость при фильтрации и способность удерживать после регенерации такое количество пыли, которое достаточно для обеспечения высокой эффективности очистки газов от тонкодисперсных твердых частиц;
- сохранение высокой воздухопроницаемости в равновесно запыленном состоянии;
- высокая механическая прочность и стойкость к истиранию при многократных изгибах;
- стабильность размеров и свойств при повышенной температуре и агрессивном воздействии химических примесей;
- способность к легкому удалению накопленной пыли;
- низкая стоимость.

Существующие материалы обладают не всеми указанными свойствами, и их выбирают в зависимости от конкретных условий очистки.

В зависимости от вида ткани допустимые значения удельной газовой нагрузки  $v_{\text{ф}}$  [ $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ мин})$ ] составляют: 0,6–1,2 – для хлопчатобумажной и шерстяной тканей; 0,5–1,0 – для синтетической; 0,3–0,9 – для стеклоткани. При запыленности газов до  $1 \text{ г}/\text{м}^3$  удельная нагрузка по газу может быть увеличена для шерстяных до 3, а для синтетических до  $2,5\text{--}2,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ мин})$ .

Тканевые фильтры подразделяются по следующим признакам:

- по виду используемой фильтровальной ткани – из натуральных или синтетических материалов;
- по форме тканевых фильтровальных элементов – рукавные или с плоской разверткой ткани;
- по месту расположения вентилятора или дымососа по отношению к фильтру – если вентилятор установлен до фильтра, то фильтр называют всасывающим, а если после фильтра – нагнетательным;
- по способу и устройству регенерации ткани – встряхивание механическое, вибрационное, импульсное сжатым воздухом, продувка обратным током воздуха или очищенного газа;
- по наличию и форме корпуса, в котором размещены тканевые фильтровальные элементы,
  - закрытые фильтры (камерные, с прямоугольным или цилиндрическим корпусом) или открытые (бескамерные);
  - по числу секций в одной установке – одно-и многосекционные;
  - по длительности работы – фильтры непрерывного и периодического действия.

Наиболее широко применяются рукавные фильтры (см. рис. 4.66). Корпус рукавного фильтра представляет собой металлический шкаф прямоугольного или круглого сечения, разделенный вертикальными перегородками на секции, в каждой из которых размещена группа фильтрующих рукавов. Верхние концы рукавов заглушены и подвешены к раме, соединенной со встряхивающим механизмом. Внизу имеется бункер для пыли со шнеком для ее выгрузки. При прохождении запыленного газа через фильтровальную ткань твердые частицы постепенно осаждаются в порах между волокнами, сцепляются друг с другом и образуют пористую перегородку, обеспечивающую совместно с тканью высокую степень очистки газа. При образовании пылевого слоя определенной толщины, когда резко увеличивается гидравлическое сопротивление аппарата (до 500–2000 Па), производят удаление пыли встряхиванием или продувкой рукавов обратным током воздуха. Регенерация рукавов проводится в каждой из секций поочередно.

Отношение длины рукава к диаметру составляет 16–20, а диаметр рукавов колеблется в пределах 125–300 мм. Такие фильтры используют

в качестве завершающих ступеней в комплексных установках по очистке газов.

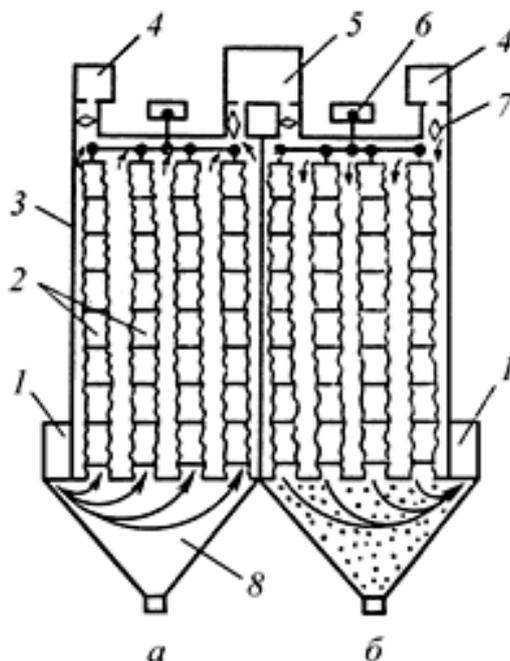


Рис. 4.66. Рукавный фильтр:

а) режим фильтрации; б) режим регенерации; 1 – газопровод запыленного газа; 2 – рукава; 3 – корпус; 4 – подвод продувочного воздуха; 5 – газопровод чистого газа; 6 – механизм встряхивания; 7 – клапан; 8 – бункер

Тканевые фильтры работают в диапазоне температур, верхний предел которых определяется температуростойкостью фильтровального материала, приведенной в табл. 4.10, а нижний – точкой росы очищаемого газа.

Степень очистки газа в тканевом фильтре не поддается расчету; ориентировочное ее значение определяют экспериментально в условиях опытов, аналогичных производственным.

Основные параметры наиболее распространенных рукавных фильтров [188] приведены в табл. 4.11 (ОСТ 26-14-2005–77). Индексация фильтров предусматривает следующие буквенные обозначения:

Ф – фильтр; О – обратная продувка;

Р – рукавный; К – каркасный;

И – с импульсной продувкой;

ДИ – с двухсторонней импульсной продувкой;

У – унифицированный; римские цифры – количество секций; цифры после буквенных обозначений – поверхность фильтрации, м<sup>2</sup>.

Таблица 4.10

## Эксплуатационные свойства фильтровальных тканей

Ткань	Химическая стойкость в различных средах				Допустимая температура, $T_d$ , °C
	кислоты	щелочи	окисляющие агенты	растворители	
Сукно № 2 (артикул 20), саржа 22, шерсть + хлопок	ОП	Х	У	ОХ	80
Байка ЧШ (артикул 21), саржа 22	У	ОП	У	Х	95
Нитрон (артикул 1609), саржа 22	У	У	Х	Х	120
Нитрон НЦМ, саржа 22 с начесом	У	У	Х	Х	120
Ткань ЦМ (шерсть + 30 % капрона, артикул 83), саржа 22	ОП	ОХ	У	Х	85
Лавсан (без начеса)	Х	У-П	Х	Х	130
Лавсан (с начесом) № 5386а	Х	У-П	Х	Х	130
Хлорин № 5231	ОХ	ОХ	ОХ	У-Х	70
Стеклоткань ТССНФ (О) (аппрет 1,5% раствор ГКЖ-94)	Х	У-П	ОХ	ОХ	240

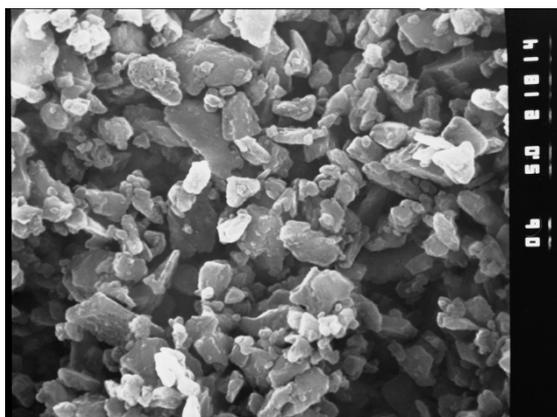
Таблица 4.11

## Основные параметры рукавных фильтров

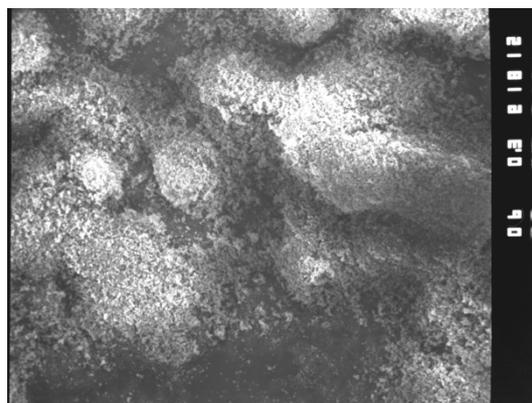
Марка фильтра	Общая площадь поверхности фильтра $F$ , м <sup>2</sup>	Число секций $n$ , шт.	Общее число рукавов $z$ , шт.	Диаметр рукава $d$ , мм	Длина рукава $L$ , м	Назначение
ФРО-1250-1	1266	6	252	200	8	Улавливание различных пылей из сухих газов в цветной и черной металлургии, в промышленности стройматериалов и т. п.
ФРО-2500-1	2530	12	504			
ФРО-4100-2	4104	8	432	300	10	
ФРО-24000-3	24 624	12	2592			
ФРКДИ-550	550	1	216	135	6	Улавливание нетоксичных и невзрывоопасных пылей с диаметром частиц не менее 3 мкм при температуре до 130 °С
ФРКДИ-1100	1100		432			
ФРКИ-30	30	1	36	135	2	Обеспыливание нетоксичных, пожаро- или взрывоопасных газов в химической и других отраслях промышленности
ФРКИ-360	360	8	228			
ФРУИ-15	15	2	28	130	1,5	Очистка различных газов в химической и других отраслях промышленности
ФРУШ-37,5	37,5	3	42			
ФРУИV-50	50	4	56			

Средний размер и форма пор фильтровальных перегородок определяется размерами и формами элементов, из которых они изготовлены, а также технологией изготовления. Для некоторых фильтровальных перегородок (ткани, волокнистые слои) характерна сжимаемость под воздействием разности давлений (толщина уменьшается, поры деформируются и уменьшаются). Частицы, увлекаемые потоком газа, попадают в различные условия. Частица может пройти через пору, задержаться в результате адгезии на поверхности от касания частицы при воздействии на нее инерционных сил при движении в искривленной поре [69]. Структура осажденного слоя определяется гидродинамическими и физико-химическими факторами: пористость слоя, размер частиц, сферичность частиц, относительная влажность несущей среды, образование двойного электрического слоя на границе дисперсных материалов – перегородка, степень агломерации частиц, деформация агломератов с закупоркой пор [69].

На рис. 4.67 показано микрофотография порошка, состоящего из микронных частиц увеличенных в 5000 раз. На рис. 4.68 показана микрофотография того же порошка с увеличением в 300 раз. Видно, что порошок представляет совокупности агрегатов с размерами 20–200 мкм [46].



*Рис. 4.67. Порошок М1 –  
увеличение 5000*



*Рис. 4.68. Порошок М1 –  
увеличение 300*

На рис. 4.69 показана микрофотография цементной пыли уноса из циклона с увеличением 2000, а на рис. 4.70 представлено микрофото – с увеличением 300. Гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки определяется в виде

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P' + \Delta P'', \quad (4.21)$$

где  $\Delta P'$  – гидравлическое сопротивление перегородки с оставшимся на ней после регенерации слоем пыли,  $\Delta P''$  – гидравлическое сопротивление слоев пыли, накапливающейся во время цикла фильтрации.

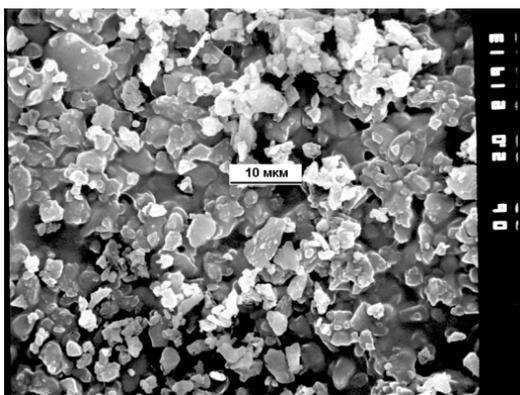


Рис. 4.69. Цемент унос –  
увеличение 2000

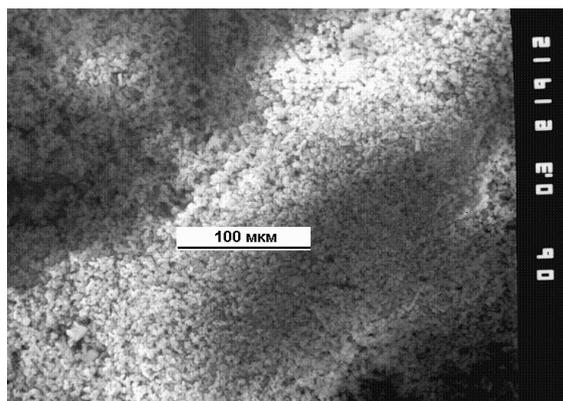


Рис. 4.70. Цемент унос –  
увеличение 300

Способность к агрегированию сказывается на процессе фильтрации запыленных газов через пористую перегородку. В процессе фильтрации на перегородке образуется пористый пылевой слой, который под действием осаждающихся частиц претерпевает изменения.

Уравнение (4.21) имеет вид [188]

$$\Delta P_{\Sigma} = K_0 \frac{\mu w (1 - \varepsilon)}{\delta_0^2 \varepsilon^3} \left[ \frac{g_0 \Psi^2}{\rho_n K_k^2} (1 - \varepsilon) + \frac{C_0 w K_c \tau}{\rho_m} \right] \quad (4.28)$$

где  $K_0$  – экспериментальный коэффициент, учитывающий характер упаковки частиц в слое,  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $w$  – скорость фильтрации,  $\varepsilon$  – пористость слоя,  $\delta_0$  – диаметр частиц в слое,  $g_0$  – равновесная масса пыли в порах перегородки на единицу поверхности,  $\Psi$  – коэффициент, учитывающий отношение скоростей в порах фильтровального материала и вне его,  $\rho_n$ ,  $\rho_t$  – плотности слоя и вещества частицы,  $K_k$  – коэффициент учитывающий извилистость пор фильтровального материала,  $C_0$  – концентрация пыли в газе перед фильтром,  $\tau$  – время фильтрации,  $K_c$  – коэффициент, учитывающий скорость роста гидравлического сопротивления после регенерации, который зависит от метода регенерации, свойств частиц и несущего потока.

Применение формулы (4.28) требует достоверных данных по коэффициентам, однако в самой формуле существуют неопределенности, поскольку отношение коэффициентов можно заменить одним коэффициентом. Экспериментальные коэффициенты определяются в результате пусконаладочных испытаний. Анализ (4.28) показывает, что наибольший вклад в сопротивление вносят величины  $\varepsilon$ ,  $\delta_0$ . Сформированный слой из частиц обладает свойством сжимаемости. Поэтому линейной зависимости сопротивления сформированного слоя от скорости фильтрации, как это представлено формулой (2.7), на практике не наблюдается.

В общем виде [69]

$$\Delta P_{\Sigma} = \mu(R_0 + R_{\tau})w, \quad (4.29)$$

где  $R_0 = r_0 h_0$  – сопротивление уравновешенного слоя (1/м);

$r_0 = k \frac{\phi(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \delta_0^2}$  – удельное сопротивление (1/м<sup>2</sup>);  $h_0 = g_0 / \rho_n$  – толщина

слоя (м);  $\phi = 1 / \psi^2$ ,  $\psi$  – фактор формы – отношение поверхности шара к поверхности тела, имеющего тот же объем.  $R_{\tau} = r_0 h_{\tau}$ ,

$h_{\tau} = \frac{V_{\text{пт}}}{F_{\phi}} = \frac{C_0 w \tau}{\rho_m (1-\varepsilon)}$  – переменная толщина слоя отфильтрованной пыли

(м),  $V_{\text{пт}}$  – объем отфильтрованного слоя (м<sup>3</sup>),  $F_{\phi}$  – поверхность фильтра.

Основной характеристикой тканевого фильтра является общая поверхность его рукавов

$$F = Z \pi d L, \quad (4.30)$$

где  $Z$  – общее число рукавов в аппарате.

Так как во время работы фильтра с обратной продувкой часть его рукавов  $z_{\text{пр}}$  отключается на регенерацию, общая площадь поверхности рукавов

$$F = \frac{Z}{z - z_{\text{пр}}}, \quad (4.31)$$

где  $F_{\phi}$  – расчетная поверхность фильтрования в аппарате, м<sup>2</sup>.

При импульсной продувке принимают  $F = F_{\phi}$ .

В фильтрах, имеющих  $n$  самостоятельных секций (см. табл. 4.11), количество рукавов, одновременно подвергающихся продувке,  $z_{\text{пр}} = Z / n$ .

Для односекционных фильтров можно принять  $z_{\text{пр}} = (0,15-0,20)Z$ . Расчет рукавного тканевого фильтра сводится к определению общей поверхности фильтрования  $F_{\phi}$  и числа фильтров или секций. Расчетная поверхность фильтрования определяется по формуле

$$F = \frac{Q_{\Gamma} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{п.в.}}}{v_{\phi}}, \quad (4.32)$$

где  $Q_{\Gamma}$  – расход запыленного газа, поступающего в аппарат, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{пр}} = (0,1-0,2)Q_{\Gamma}$  – расход продувочного воздуха, м<sup>3</sup>/с (меньшие значения принимают для синтетических тканей, чтобы предотвратить их переоочистку);  $Q_{\text{п.в.}}$  – расход подсасываемого в аппарат воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $v_{\phi}$  – допустимая удельная нагрузка тканевого фильтра по газу (значения этой величины для различных видов тканей приведены выше), м/с.

Расход подсасываемого воздуха зависит от температуры запыленного газа, поступающего в фильтр. Если запыленный газ подходит

к фильтру с высокой температурой  $T_{\Gamma}$ , которую необходимо снизить до температуры смеси  $T_{\text{см}}$  ниже допустимой температуры  $T_{\text{д}}$  для данного вида ткани за счет подсоса холодного воздуха, то количество этого воздуха можно рассчитать как

$$Q_{\text{пв}} = Q_{\Gamma} \frac{\rho_{\Gamma} (T_{\Gamma} - T_{\text{см}})}{\rho_{\text{в}} (T_{\text{см}} - T_{\text{в}})},$$

где  $\rho_{\Gamma}$  и  $\rho_{\text{в}}$  – соответственно плотность газа и подсасываемого из атмосферы воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;  $T_{\text{в}}$  – температура атмосферного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$  (для ориентировочных расчетов  $T_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$ ).

Если запыленный газ подходит к фильтру с температурой  $T_{\Gamma} < T_{\text{д}}$ , то количество подсасываемого воздуха принимают

$$Q_{\text{пв}} = (0,05 - 0,10) Q_{\Gamma}. \quad (4.33)$$

Рассчитанная по (4.33) поверхность фильтрации должна быть проверена на допустимую запыленность ткани

$$F \geq \frac{G_{\text{к}}}{G_{\text{д}}}, \quad (4.34)$$

где  $G_{\text{н}}$  – исходное количество пыли в газе, поступающем в рукавный фильтр,  $\text{кг/с}$ ;  $G_{\text{д}}$  – допустимая удельная запыленность ткани;  $G_{\text{д}} = (0,2-0,3) 10^{-3} \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ .

Периоды работы фильтра между регенерациями встряхиванием или продувкой ориентировочно можно определить в зависимости от входной запыленности по табл. 4.12.

Таблица 4.12

*Длительность фильтроцикла рукавного фильтра  
в зависимости от исходной запыленности газа*

Входная запыленность, $\text{г/м}^3$	5	10	20
Периоды между регенерацией, мин	10–12	8–9	4–7

#### **4.3.2. Оценки характеристик слоя на фильтре**

В технике очистки газов в качестве обеспыливателей применяют гибкие перегородки из тканей, металлических сеток. Процесс обеспыливания газа осуществляется в сформированном слое из отфильтрованных частиц [188]. Структура осажденного слоя определяется гидродинамическими и физико-химическими факторами: пористость слоя, размер частиц, сферичность частиц, относительная влажность несущей среды, образование двойного электрического слоя на границе дисперсных материал – перегородка, степень агломерации частиц, деформация агломератов [69, 73]. Механические характеристики сформированного

слоя частиц определяют методы регенерации фильтровальных перегородок, от которых зависит эффективность, устойчивость обеспыливания, надежность функционирования фильтра. Регенерация осуществляется механическими воздействиями, вызывающими сдвиг слоев пыли под влиянием ускорений, возникающих при встряхивании, вибрации, вращения, деформации гибких перегородок. Регенерация осуществляется аэродинамическими воздействиями продувками очищенного газа через перегородку в обратном направлении. Режимы регенерации, фильтрования через гибкие и жесткие перегородки подбирают для конкретной пыли опытным путем. В процессе обеспыливания пыль после регенерации может быть подхвачена потоком очищаемого газа и снова поступить на перегородку. Существует противоречие в организации процесса обеспыливания газа в фильтре непрерывного действия. С одной стороны для успешной регенерации пыль не должна обладать липкостью, с другой – пыль должна обладать достаточной связностью, чтобы она не диспергировалась после регенерации перегородки и осаждалась в приемнике под действием сил тяжести. Для эффективной работы фильтров их гидравлическое сопротивление поддерживают в диапазоне 1.5–2.5 кПа. Это большое сопротивление способствует образованию фильтрующего слоя достаточной плотности и аутогезионных взаимодействий частиц, которые способствуют эффективной фильтрации и регенерации [188].

В производственных условиях для оценки прочности слоев пыли на фильтрах, образующихся в процессе работы систем газоочистки, используют метод эрозийного разрушения слоя частиц. Эрозия – унос частиц с поверхности слоя золы – начинается при пороговой скорости [73]. Для того чтобы определить прочность слоя, используют прибор Е.И. Андрианова [6, 174]. С помощью этого прибора определяют ряд значений прочности слоев исследуемых частиц на разрыв при различных значениях уплотняющей нагрузки. Затем определяют пороговое значение эрозийного разрушения слоев, сформированных при тех же значениях уплотняющей нагрузки, и строят график зависимости значений прочности от пороговой скорости. Метод трудоемок и требует высокой квалификации оператора.

В технологиях получения различных продуктов с помощью фильтрования суспензий применяют методы оценки состояния сформированных дисперсных слоев, в которых основное значение имеет величина удельного сопротивления слоя и сопротивление перегородки. В [69] приведен анализ способов определения удельного сопротивления осадка. По первому способу проводятся опыты по разделению исследуемой суспензии в заданных условиях на небольшом фильтре. Для заданной суспензии с известными физическими параметрами жидкости, содержанием

дисперсной фазы в процессе опыта по фильтрованию определяются расход, время, объем осадка, перепад давления. Каждую кривую фильтрации строят либо при постоянном заданном давлении, либо при постоянной заданной скорости, причем разные кривые строятся при различных давлениях или скоростях. Используются графические методы. По этим данным определяется удельное сопротивление осадка и сопротивление перегородки. Полагают, что давление, требуемое для прокачивания необходимого количества жидкости в единицу времени через единицу площади фильтра, зависит от сопротивления фильтровальной перегородки  $R_{\phi}$  и сопротивления слоя  $R_{\text{сл}}$  [69]. Суммарное сопротивление  $R_{\Sigma} = R_{\text{сл}} + R_{\phi}$ ,  $1/\text{м}$ . Для несжимаемого слоя и фильтрующей перегородки  $P_{\Sigma} = \mu R_{\Sigma} W$ , Па, где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с. Величина  $R_{\text{сл}} = r_0 H_{\text{к}}$ , где  $r_0$  – величина удельного сопротивления слоя,  $1/\text{м}^2$ . По второму способу удельное сопротивление определяется на предварительно сформированном на фильтре осадке. На фильтре осаждением частиц силой тяжести формируют осадок, создают давление над слоем, определяют количество фильтрата прошедшего через слой частиц, время. Опыты проводят при разной высоте слоя частиц. Это позволяет определить искомые величины. Результаты определения удельного сопротивления по способам обоих видов совпадают. По третьему способу величину удельного сопротивления вычисляют по эмпирическим данным как функцию пористости осадка, удельной поверхности, среднего размера, или сферичности частиц, а также по модулю сдвига твердых частиц. При этом вводятся различные упрощения – разграничение слоя на плотную и рыхлую часть, а увеличение сопротивления является следствием перегруппировки и деформаций под действием сдвигающих усилий. Приводятся различные аппроксимации пористости и коэффициента удельного сопротивления от давления. В [69] не рассмотрен вопрос о напряжениях, возникающих в сформированном на пористой перегородке слое, которые зависят от перепада давления. Напряжение в дисперсном теле увеличивается по направлению к перегородке, следовательно, уменьшается порозность слоя и увеличивается удельное сопротивление. В [69] величина удельного сопротивления по высоте слоя принимается осредненной, постоянной, но зависит от давления.

Нами проведены опыты по определению фильтрационных и механических характеристик дисперсных тел сформированных засыпкой в цилиндры тонкодисперсных порошков, состоящих из агломератов частиц. Опыты проводились с использованием устройства (см. рис. 4.72). Выяснилось, что насыпная плотность в цилиндре зависит от метода подготовки материала к засыпке, относительной влажности воздуха,

от материала цилиндра, от высоты цилиндра. Для классифицированных материалов с узкой фракцией воспроизводимость опытов удовлетворительна. Воспроизводимость достигалась при просеивании материала через сито  $1 \text{ мм}^2$ . Полидисперсный материал – цемент имел большой разброс значений насыпной плотности после просеивания.

В табл. 4.13 приведены диапазоны плотности порошков в насыпном (после просеивания) состоянии  $\rho_n$ , пикнометрическая плотность  $\rho_T$ , и плотность порошка  $\rho_p = 2$  при его уплотнении плунжером нагрузкой 2 кПа в цилиндре диаметром 25 мм, высотой 48 мм. Высота рабочей секции менялась с целью выяснения влияния ограничивающих поверхностей цилиндра на механические характеристики слоя. Внутренний диаметр цилиндра 26 мм, высота 10, 40 мм. Материал сталь 3. Аналогичные опыты проведены с цилиндрами из металлопластика. Материал после просеивания через сито с ячейкой  $1 \text{ мм}^2$  состоит из агломерированных частиц и после засыпки в рабочий цилиндр имеет насыпную плотность, которая обуславливается аутогезионными взаимодействиями между частицами.

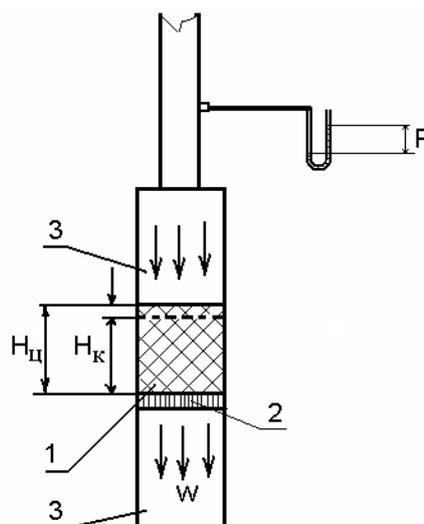


Рис. 4.72. Устройство для определения параметров дисперсного материала:  
1 – рабочая секция;  
2 – фильтр;  
3 – вспомогательные секции

Таблица 4.13

Диапазоны плотности порошков

Порошок				
Плотность	M1	M2	M5	Цемент
$\rho_T \text{ г/см}^3$	3,4–3,7	3,5–3,8	3,7–3,9	2,9–3,1
$\rho_n \text{ г/см}^3$	0,46–0,48	0,57–0,6	0,8–0,82	0,98–1,05
$\rho_{p=2} \text{ г/см}^3$	0,55–0,58	1,05–1,1	1,58–1,59	1,15–1,2

На рис. 4.73 представлена установка для определения уплотнения материала при фильтрации воздуха через слой дисперсного материала на фильтре [51].

Скорость фильтрации в диапазоне  $H = 50\text{--}100 \text{ см}$

$$W = \left( \frac{Sh}{t} \frac{P_H + B}{0,5 \cdot P_y + B} \right) / S_{\phi}, \text{ см/с,}$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения сосудов 2, 3;  $h = 1$  см – фиксированное изменение уровня при перетечке воды из верхнего бачка в нижний;  $S_{\phi}$  – площадь прохода рабочего цилиндра,  $t$  – время изменение уровня на 1 см.  $P_H$  – избыточное давление столба жидкости высотой  $H$ , кПа,  $P_y$  – избыточное давление воздуха перед измерительным участком с дисперсным телом кПа,  $B$  – барометрическое давление кПа.

Регистратор давления «Тесто–512» позволяет фиксировать минимальное и максимальное давления и время изменения давления на исследуемом участке. Уплотнение материала характеризуется отклонением кривой зависимости давления от скорости фильтрации воздуха от линейной. Изменение средней по высоте слоя пористости рассчитывается по соотношению

$$\Delta \epsilon = \Delta V_m / V_{\text{ц}} = (H_{\text{ц}} - H_{\text{к}}) / H_{\text{ц}},$$

где  $H_{\text{ц}}$ ,  $H_{\text{к}}$  – высота цилиндра, высота слоя после фильтрации. Средняя плотность дисперсной среды после уплотнения  $\rho_2 = \rho_n (1 - \Delta \epsilon)$ ,  $\rho_n = G_n / V_{\text{ц}}$ .  $G_n$  – вес насыпного слоя в цилиндре объемом  $V_{\text{ц}}$ .

На рис. 4.74, 4.75 показаны экспериментальные зависимости изменения давления от скорости фильтрации и изменение порозности от давления для различных порошков в цилиндре из металлопластика высотой 48 мм с одним и тем же фильтром из ткани, который после каждого опыта освобождался от слоя частиц. Порошок М1 – сильно агломерирован, образует рыхлый слой, обладает сопротивляемостью к деформации и разрушению агломератов при фильтрации. Силы аутогезии препятствуют взаимному перемещению и разъединению частиц. Под влиянием аутогезии возрастают силы механического взаимодействия между частицами (трение, зацепление), что увеличивает способность сыпучего материала противостоять сдвигающим напряжениям. Поро-

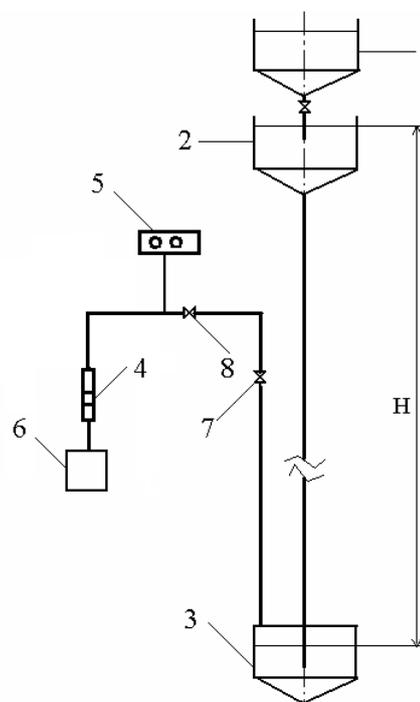


Рис. 4.73. Схема установки:  
1, 2, 3 – сосуды; 4 – исследуемый участок; 5 – регистратор давления; 6 – фильтр; 7 – дроссель; 8 – запорный вентиль

шок М2 – после просеивания состоит из агломератов, имеет хорошую текучесть при заполнении формы, в большей степени, чем М1, подвержен деформациям и разрушениям агломератов при увеличении скорости фильтрации. Порошок М40 имеет линейную характеристику фильтрации, практически несжимаем. Цемент – полидисперсный материал, слабо агломерирован, хотя и имеет большое количество мелких частиц, заполняющих поры между крупными частицами. При просеивании и заполнении формы порошка происходит сегрегация частиц, при фильтрации происходит закупоривание пор. Порошок М5 – материал, имеющий склонность к агрегированию.

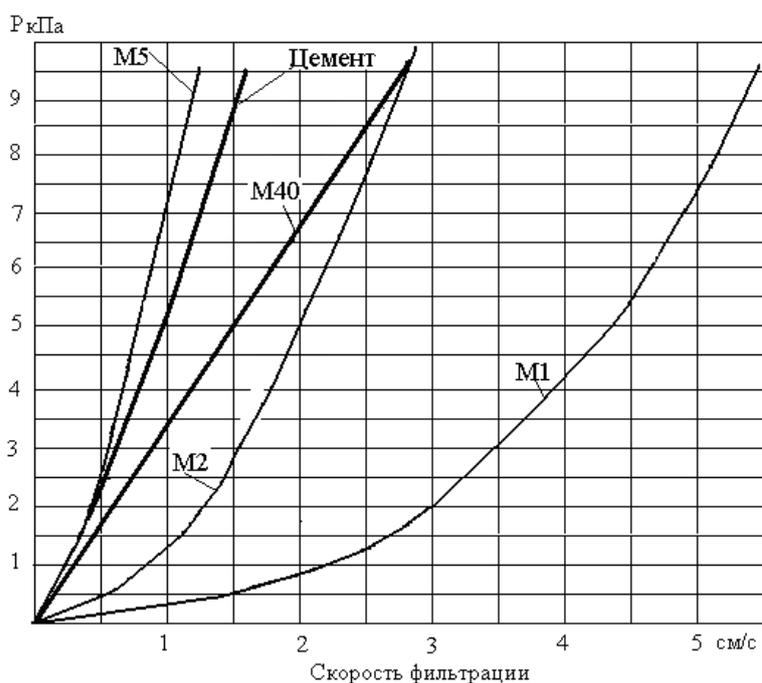


Рис. 4.74. Давление воздуха перед рабочим цилиндром высотой 4,8 см от скорости фильтрации

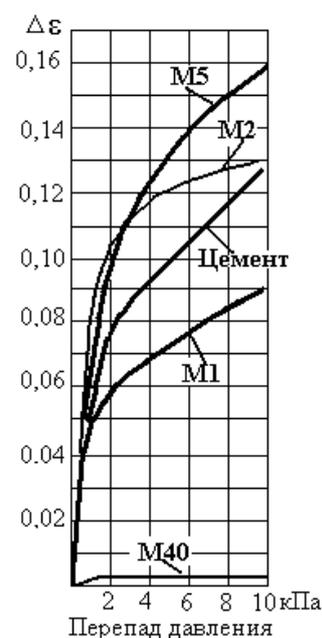


Рис. 4.75. Изменение средней пористости от давления

Агрегаты имеют различные размеры, деформируются, разрушаются, закупоривают поры между крупными агрегатами. Порошок имеет повышенное сопротивление при фильтрации.

Отклонение от линейности с увеличением перепада давления может быть объяснено повышением плотности слоя и уменьшением просвета фильтра.

При фильтрации воздуха частицы проникают в поры фильтра, уплотнение порошка происходит в окрестности фильтра, причем на фильтре напряжение в самом материале имеет максимальное значение. Качественная оценка уплотнения порошка М2 в металлопластиковом

цилиндре с фильтром может быть выполнена следующим образом. Высота цилиндра  $H = 4,8$  см; диаметр цилиндра  $D = 2,5$  см; давление воздуха над слоем  $P_{y\phi} = 3,2$  кПа. Оценка степени уплотнения порошка проводилась в процентном отношении к массе порошка в рабочем цилиндре переворачиванием устройства (рис. 4.72) на угол в диапазоне  $130\text{--}180^\circ$ . С увеличением угла поворота фрагменты обрушенной пыли представляли комкообразные сгустки. Остаток в рабочем цилиндре в опытах находился в диапазоне  $7\text{--}10\%$ . Плотность уплотненной части в цилиндре  $\rho_\phi$  рассчитывалась по измеренному объему этой части и по весу этой части  $G_y$ . Объем определялся следующим образом. В цилиндр с уплотненной частью материала засыпался порошок М2 вровень с торцом и цилиндр взвешивался. Объем засыпанного (неуплотненного) материала определялся по формуле

$$V_n = \frac{G_\Sigma - G_y}{\rho_n} = \frac{G_\Sigma - G_y}{G_n} V_{ц},$$

где  $G_\Sigma$  – вес порошка в цилиндре после досыпки,  $G_y$  – вес уплотненного порошка в цилиндре после его переворачивания,  $\rho_n$  – плотность насыпного (неуплотненного) порошка.

Плотность уплотненного фильтраций порошка

$$\rho_\phi = \frac{G_y}{V_{ц} - V_n} = \frac{G_y}{V_{ц}} \frac{1}{1 - \frac{G_\Sigma - G_y}{G_n}}.$$

Оценки показали, что при  $G_y = 0,1G_n$ ,  $G_\Sigma = 1,04G_n$ ,  $\rho_\phi / \rho_n = 1,66$ . При  $G_y = 0,05G_n$ ,  $G_\Sigma = 1,03G_n$ ,  $\rho_\phi / \rho_n = 2,5$ . Т. е. на фильтрующей перегородке плотность слоя увеличиваетсякратно, тогда как на остальной части слоя уплотнение менее заметно.

Для оценки влияния боковых стенок на состояние материала рассмотрим дисперсное тело в равновесии под воздействием фильтрации на рис. 4.76.

Напряжение  $\sigma$  возникает вследствие взаимодействия частиц от воздействия силы тяжести, фильтрации воздуха и возрастает по на-

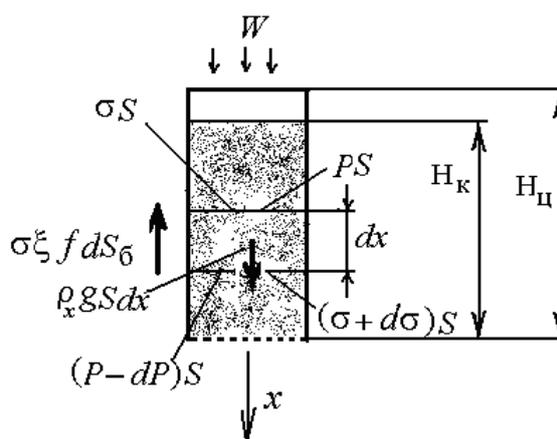


Рис. 4.76. Схема действующих сил на элемент дисперсного тела при фильтрации воздуха

правлению к перегородке, давление воздуха  $P$  падает по направлению к перегородке. Здесь  $S = \pi R^2$ ,  $dS_6 = 2\pi R dx$ ,  $R$  – радиус цилиндра.

Уравнение после сокращения на  $S$ , в предположении, что падение давления линейно по длине, имеет вид

$$-d\sigma - \sigma \xi f (2 / R) dx + \rho g dx + (P / H) dx = 0, \quad (4.35)$$

где  $\rho$  – плотность слоя в первом приближении величина постоянная;  $\xi, f$  – коэффициенты бокового давления и трения дисперсного материала о стенку. Значение величины нормального напряжения в материале на перегородке найдется из решения уравнения (4.35)

$$\begin{aligned} \sigma &= \left( \frac{P}{H} + g\rho \right) \frac{R}{2\xi f} \left[ 1 - \exp\left( -\frac{2\xi f H}{R} \right) \right] = \\ &= (P + g\rho H) \frac{R}{2\xi f H} \left[ 1 - \exp\left( -\frac{2\xi f H}{R} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Величина коэффициент трения скольжения  $f$  для твердых материалов в газообразной среде находится в диапазоне 0,1–0,5; коэффициент бокового давления  $\xi$  находится в диапазоне 0,2–0,6 [70]. Так что  $\xi f$  находится в диапазоне 0,02–0,3. Однако экспериментально определенные величины  $\xi f$  в проточных плотных суспензиях в [172] имеют меньшие значения. Из (4.36) следует, что при  $2\xi f H / R \rightarrow 0$ ,  $\sigma \rightarrow \rho g H + P$ , и в коротких цилиндрах силами трения слоя частиц о стенку при фильтрации можно пренебречь.

Заменим сопротивление перегородки со слоем уплотненной пыли сопротивлением несжимаемого слоя эквивалентной толщины. Положим, что в процессе фильтрации дисперсное тело состоит из несжимаемых дисперсных тел с различной пористостью. Для оценки распределения плотной и неплотной частей по длине дисперсного тела воспользуемся кривыми фильтрации на рис. 4.77 Кривые 1 и 2 показывают, что слой сжимаем. Проведем линию  $P = S = \text{const}$  таким образом, чтобы касательные к линиям 1 и 2 в точках пересечения пересекали ось ординат в одной точке. При этом значения  $a_1 \approx a_2 \approx a = 2,68$  кПа. В диапазоне давлений  $P = 1,5–2,5$  кПа эта линия соответствует значению  $P = S \approx 2$  кПа. Обозначим:

$$P' \Big|_{2W=0} = (dP / dW) \Big|_{2W=0} \text{ – производная при } W = 0 \text{ кривой 2;}$$

$$P' \Big|_{W_2} = (dP / dW) \Big|_{W_2} \text{ – производная при } W = W_2 \text{ кривой 2;}$$

$$P' \Big|_{1W=0} = (dP / dW) \Big|_{1W=0} \text{ производная при } W = 0 \text{ кривой 1;}$$

$$P' \Big|_{W_1} = (dP / dW) \Big|_{W_1} \text{ – производная при } W = W_1 \text{ кривой 1.}$$

Запишем соотношения фильтрации для плотного и неплотного дисперсного тела в виде  $P'|_{W=0} = H_k \mu r_{0н}$ ,  $P'|_{W_2} = H_k \mu r_{0у}$ . Общее давление складывается из потерь давления на участке неплотной части дисперсного тела и потерь давления на участке плотной части тела.

Для дисперсного тела 2 (цилиндр длиной 40 мм)

$$P = W_2 \left( h_{н1} \mu r_{0н} + (H_k - h_{н1}) \mu r_{0у} \right), \text{ или } P = W_2 \left[ P'|_{W=0} \frac{h_{н1}}{H_k} + P'|_{W_2} \frac{H_k - h_{н1}}{H_k} \right],$$

где  $h_{н1}$  – высота неплотной части дисперсного тела, откуда

$$\frac{h_{н1}}{H_k} = \frac{P'|_{W_2} - \frac{P}{W_2}}{P'|_{W_2} - P'|_{W=0}}. \quad (4.37)$$

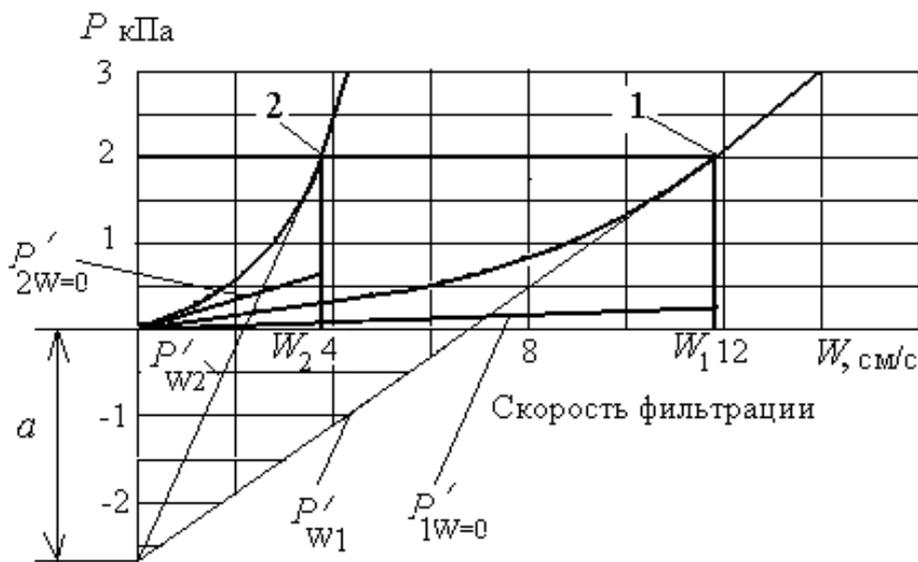


Рис. 4.77. Схема определения производных

Например из рис. 4.77 следует

$$P'|_{W_2} = 2 / (3,75 - 2,2) = 1,$$

$$P'|_{2W} = 0 = 0,70 / 3,75 = 0,186;$$

$$P / W_2 = 2 / 3,75 = 0,533.$$

Подставляя эти величины в формулу (4.37), получим  $h_{н2} / H_{к2} = 0,69$ . Следовательно, высота плотной части дисперсного тела составляет менее трети высоты цилиндра. Аналогично для дисперсного тела 1 (длина цилиндра 10 мм).

$$P'|_{W_1} = 4,68 / 11,8 = 0,4;$$

$$P'|_{1W=0} = 0,20 / 11,8 = 0,017;$$

$$P / W_1 = 2 / 11,8 = 0,17;$$

$$h_{н1} / H_{к1} = 0,6.$$

Величины удельных сопротивлений определяются из соотношений

$$r_{0н} = \frac{P'|_{2W=0}}{H_{к\mu}}, \quad r_{0у} = \frac{P'|_{W2}}{H_{к\mu}}.$$

Учитывая, что  $1 \text{ см/с} = 10^{-2} \text{ м/с}$ ,  $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$ , получим

$$r_{0н2} = 0,186 \cdot 10^5 / 0,04 \cdot 0,9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} = 2,58 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}^2,$$

$$r_{0у2} = 1,29 \cdot 10^5 / 0,04 \cdot 0,9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} = 2 \cdot 10^{11} \text{ 1/м}^2,$$

$$r_{0н1} = 0,017 \cdot 10^5 / 0,01 \cdot 0,9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} = 1,05 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}^2,$$

$$r_{0н1} = 0,017 \cdot 10^5 / 0,01 \cdot 0,9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} = 1,05 \cdot 10^1 \text{ 1/м}^2,$$

$$r_{0у1} = 0,4 \cdot 10^5 / 0,01 \cdot 0,9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} = 1,05 \cdot 10^{10} = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ 1/м}^2.$$

Эти данные позволяют провести расчет сопротивления слоя пыли на фильтре. Например, слой толщиной 5 мм пыли типа *M2* при скорости фильтрации 10 см/с будет обладать сопротивлением

$$P = \mu r_{0у1} HW = 1,8 \cdot 10^{-5} 2,5 \cdot 10^{11} 0,005 \cdot 0,1 = 2250 \text{ Па}.$$

Оценки показывают, что сила трения дисперсного тела о стенки в соответствии с формулой (2) уменьшает напряжение на перегородке в цилиндре высотой 40 мм на 10–50 %, в цилиндре высотой 10 мм на 1,5–14 %.

Величина напряжения в материале в окрестности перегородки определяется формулой (4.36). Для коротких цилиндров  $P \gg \rho g H$ ,  $P \gg s2\xi fH / R$  и напряжение в слое вблизи перегородки  $\sigma = P$ . Следовательно, слой пыли на перегородке имеет напряжение, аналогичное напряжению, возникающему в материале при воздействии механической нагрузки плунжером на слой с давлением  $P$ . В этом случае можно провести оценку связности пыли, ее прочностных свойств методом экструзии, с использованием результатов [41].

**Выводы.** Слой состоит из плотной и рыхлой частей. Соотношение толщин слоев этих частей определяется по кривой фильтрации. Рыхлая часть слоя имеет на порядок меньшее удельное сопротивление. Перепад давления на слое может быть определен по удельному сопротивлению слоя пыли в сжатом состоянии. Напряжение в слое пыли их агрегированных частиц на пористой перегородке определяется перепадом давления на фильтре. По напряжению методом экструзии определяется связность и прочность слоя на перегородке.

## ГЛАВА 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ С ЧАСТИЦАМИ В ВИХРЕВЫХ КАМЕРАХ И КРИВОЛИНЕЙНЫХ КАНАЛАХ

Вихревые камеры с твердыми частицами нашли широкое применение в различных областях техники и технологий для интенсификации физико-химических процессов. В теплоэнергетике вихревые камеры используются как топки и предтопки [90, 65] для улучшения сгорания топлива, в металлургии – для интенсификации процессов плавки руды; используются в реакторах, процессах измельчения, сушки, классификации частиц, обеспыливания газов в химических технологиях и. т. д.

Закрученный поток в вихревой камере совершает работу по вовлечению части газа в возвратное движение. Чем сильнее крутка потока, тем большее количество газа приводится в возвратное движение. Именно благодаря эжекционным эффектам в противоточных циклонах осуществляется часть газа транспортировка пыли в приемник и выход из приемника этой части газа в рабочее пространство циклона. Характер течения, интенсивность возвратных течений, определяется параметром крутки потока  $\Phi = G_\phi / G_x R_n$ , где  $G_\phi$  – осевая компонента момента количества движения,  $G_x$  – осевая компонента потока количества движения.

$$G_\phi = \int_0^{R_n} (\rho W_\phi W_x + \rho \overline{W'_\phi W'_x}) R^2 dR, \quad G_x = \int_0^{R_n} [\rho W_x^2 + \rho \overline{W_x'^2} + P] R dR,$$

где  $W_x$ ,  $W_\phi$ , – осредненные аксиальная и тангенциальные скорости газа,  $W'_x$ ,  $W'_\phi$  – пульсационные аксиальные и тангенциальные скорости газа,  $R$  – переменный радиус,  $\rho$  – плотность газа.

### 5.1. Камеры сгорания горючих частиц и обжига руд

Вихревые камеры имеют следующие основные характеристики:

1. Длительное время пребывания, которое зависит от параметра закрутки и длины камеры.

2. Наличие длинной тонкой кольцевой зоны рециркуляции, образующейся в потоке вблизи стенок, которая может быть использована для улучшения стабилизации пламени [65].

3. Из-за очень сильной закрутки поступающая топливновоздушная смесь подвергается действию чрезвычайно высокого центробежного ускорения, что сопровождается значительным повышением скорости распространения пламени [65].

4. В циклонной камере можно получить достаточно высокую эффективность сепарации частиц [65].

5. Циклонные камеры могут быть объединены в двухступенчатое устройство, в котором поток используется в процессе дожигания, обеспечивающем полное сгорание топлива [65].

Параметр закрутки в циклонных камерах существенно выше, чем в вихревых горелках. Обычно в практических устройствах значения параметра закрутки  $\Phi$  лежат в диапазоне от 3 до 20:  $3 < \Phi < 11$  – для камер, тип I (рис. 5.1);  $8 < \Phi < 20$  – для камер тип II (рис. 5.2), и для камер, базирующихся на конструкции пылеочистителя (рис. 5.3);  $3 < \Phi$  – для комбинации топки и вихревого генератора, тип IV (рис. 5.4).

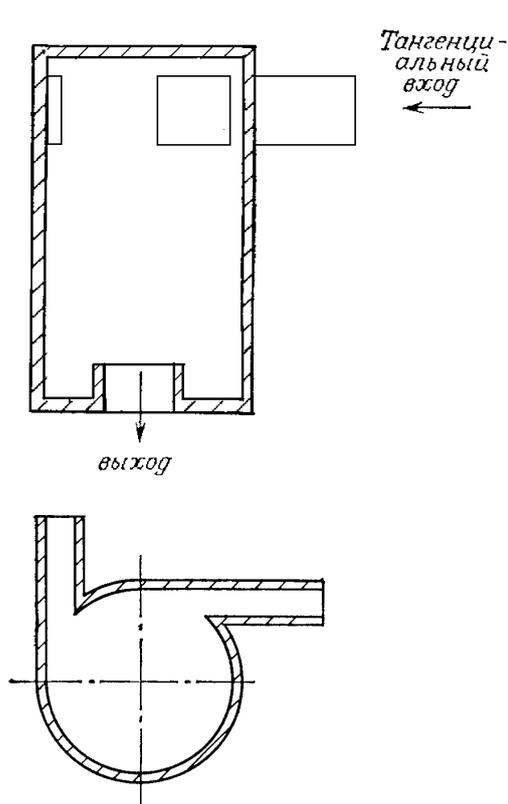


Рис. 5.1. Циклонная камера сгорания типа I:  $L / De = 1...3$ ;  $De / D_0 = 0,4...0,7$ ;  $\Phi = 2...11$ , имеется не менее двух тангенциальных патрубков, подача топлива, как правило, тангенциальная

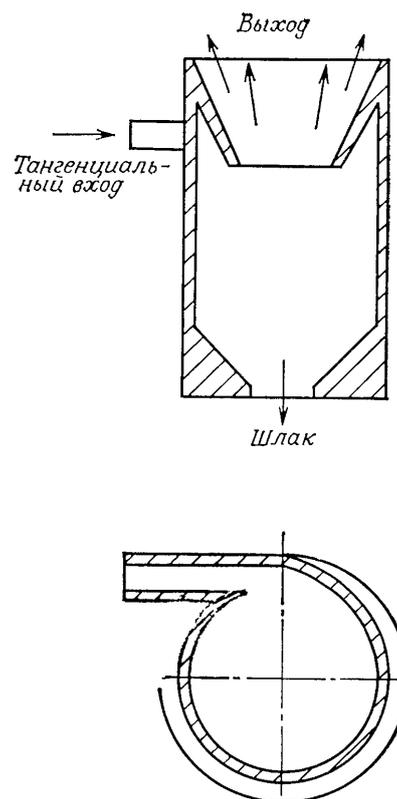


Рис. 5.2. Циклонная камера сгорания типа II:  $L / De = 1,0...1,25$ ;  $De / D_0 = 0,4...0,5$ ;  $\Phi = 5-8...20$ : имеется от одного до четырех тангенциальных входных патрубков, подача топлива, как правило, тангенциальная

Тип I используется для топлив высокой калорийности, иногда содержащих много летучих веществ, при сжигании которых образование шлака и золы и их удаление не представляют серьезной проблемы. Камера типа II хорошо работает при высоких параметрах закрутки и используется для топлив с высоким содержанием золы, когда возникают

проблемы, связанные с образованием шлака и выносом взвешенной золы. Циклон такого типа представляет очевидную модификацию стандартного циклонного пылеочистителя, в котором тангенциальные входные патрубки заменены на горелки.

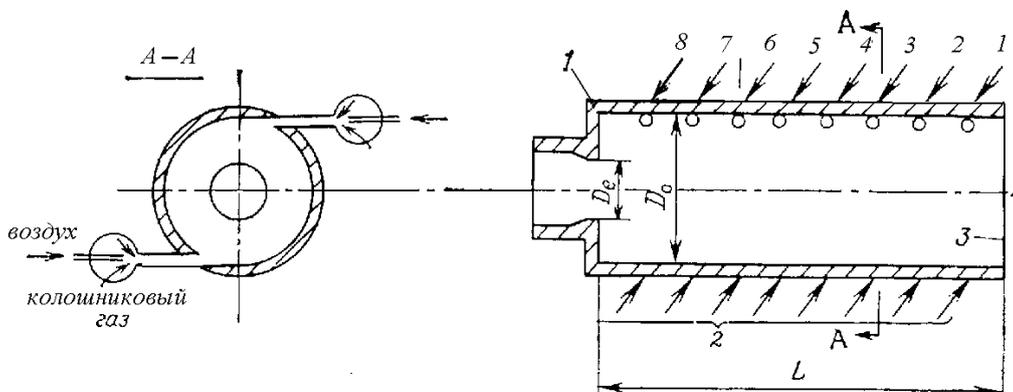


Рис. 5.3. Циклонная камера сгорания типа III с распределенными входными патрубками [66]: размеры:  $D_0 = 1,22$  м,  $D_e = 0,457$  м или  $0,61$  м,  $L = 3,2$  м; 16 тангенциальных входных патрубков, 2 симметричных ряда по 8 штук, № 7 и 8 наклонены к торцевой стенке на  $11^\circ$ ; расчетная максимальная нагрузка по колошниковому газу  $2,1$  кг/с, по воздуху  $1,05$  кг/с; потери полного давления  $5$  кПа. 1 – литая огнеупорная облицовка; 2 – тангенциальная подача колошникового газа и воздуха; 3 – торцевая стенка; 4 – подача с торца закрученного или незакрученного потока газа или воздуха с помощью небольшой вихревой горелки

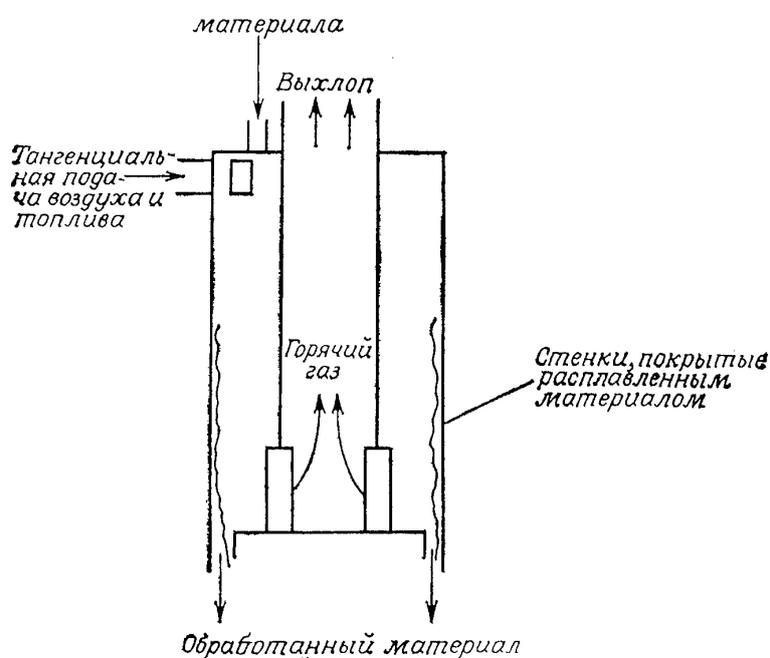


Рис. 5.4. Общая схема технологического циклона типа IV для обработки материалов

Камера типа III разработана для генерации пара путем сжигания овощных отходов (часто содержащих много летучих веществ), которые предварительно осушаются выхлопными газами (рис. 5.3). Здесь необходимо распределить тангенциальные патрубки по всей длине камеры для обеспечения однородности и стабильности потока. Циклоны типа IV (рис. 5.4) [65] разработаны для плавки руды (например, медных концентратов) и несколько отличаются по конструкции от четырех других типов. Преимущества циклонных камер следующие:

1. Отличное перемешивание топлива и окислителя.
2. Тепловыделение концентрируется в уменьшенном объеме (высокая теплонапряженность).
3. Работа при малом избытке воздуха; высокий уровень температуры при подаче низкокалорийных топлив.
4. Возможность сжигать частицы диаметром вплоть до 5 мм.

#### **5.1.1. Струйные измельчители [2]**

Струйные измельчители с плоской помольной камерой (СПК) относятся к группе аппаратов с вихревым стационарным течением гетерогенной среды (см. рис. 5.5). Измельчитель состоит из плоской камеры, по периферии которой установлены сопла, соединенные с газораспределительным кольцом. Число сопел обычно составляет 6–8, в некоторых случаях до 20, устанавливаются их под углом 30–70°, что обеспечивает пересечение газовых струй внутри камеры при подаче сжатого газа в газораспределительное кольцо. В центральной части камеры расположен вихревой пылеосадитель, образованный посредством коаксиального расположения выходного патрубка в цилиндрическом корпусе пылеосадителя.

Подлежащий измельчению материал с помощью инжекторного устройства подается в помольную камеру, где частицы его, увлекаемые струями, газа, в местах пересечения струй соударяются с большой скоростью и измельчаются. Кроме того, измельчение происходит в образующихся между струями вихрях.

На каждую из частиц, находящихся в помольной камере, действуют центробежная сила, обусловленная циркуляцией газового потока в камере, и сила аэродинамического сопротивления, направленная по радиусу к центру помольной камеры. Равнодействующая этих сил определяет процесс сепарации материала. Крупные частицы отбрасываются к периферии камеры на доизмельчение, а более мелкие движутся к центру помольной камеры и попадают в щель, образованную патрубком и корпусом пылеосадителя. Высокая скорость потока приводит к образованию

в коаксиальной щели мощного нисходящего вихря, обеспечивающего осаждение 80 % измельченного материала в бункер. Выходящий из аппарата по патрубку пылегазовый поток направляется на дальнейшую очистку. Описанная конструкция является базовой, так как отличительные признаки других известных конструкций измельчителей этого типа не затрагивают основного принципа ее построения – организации вихревого течения гетерогенной среды посредством сопловых элементов, установленных по периферии помольной камеры.

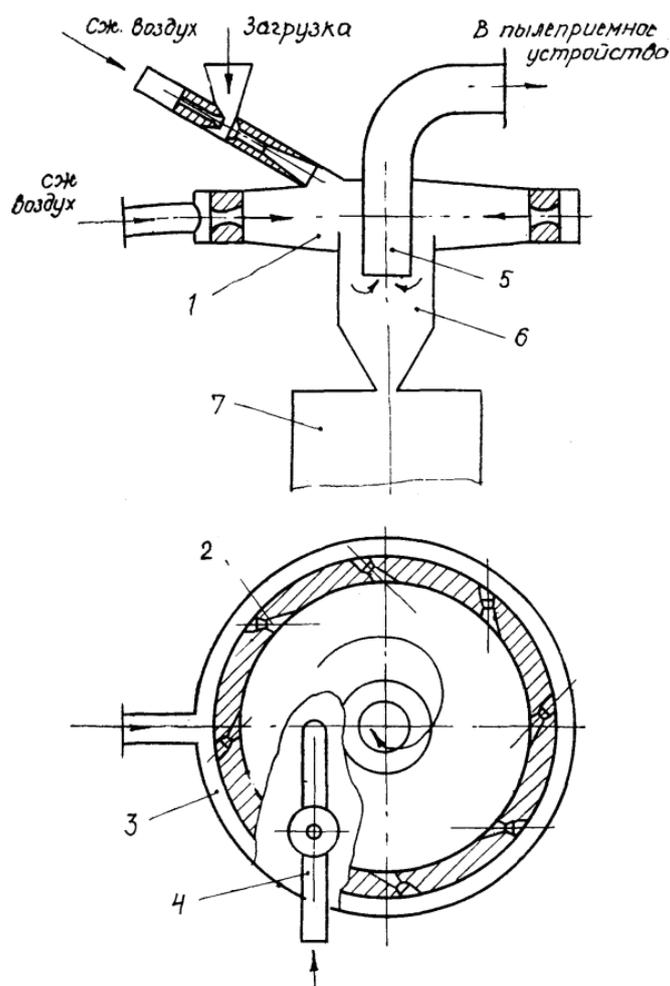


Рис.5.5. Струйный измельчитель: 1 – вихревая камера измельчения; 2 – сопла; 3 – распределительная камера; 4 – инжекторное устройство; 5 – выходной патрубок; 6 – пылеосадитель; 7 – бункер

Пневмоизмельчители компактны, сочетают процессы измельчения и сепарации, обеспечивают тонкий помол с широким диапазоном физико-химических свойств: мягких, средней твердости, твердых, пластичных, кристаллических, аморфных. Они наиболее экологичны – в наименьшей степени загрязняют окружающую среду.

## 5.2. Аппараты с криволинейными каналами и вихревые сушилки

### 5.2.1. Пневмосушилки с плоским спиральным каналом

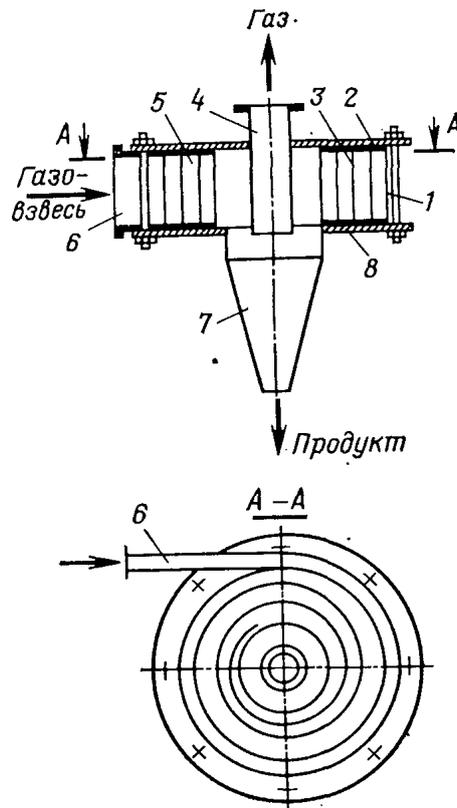
Пневмосушилки с плоским спиральным каналом в горизонтальной плоскости, плавно переходящим в сепарирующую камеру, конструктивно оформленную в виде циклона (см. рис. 5.6). Аппарат состоит из корпуса 1, в котором днище 8, крышка 2 и спиральная лента 3 образуют спиральный канал 5, плавно переходящий в сепарирующую камеру 7. Достоинства данной сушилки в том, что она компактна и относится к аппаратам безуносного типа. Причем эффективность ее оказалась значительно выше эффективности типовых циклонов при одинаковом диаметре сепарирующей части. Так, при сушке суспензионного ПВХ ( $\delta_{50} = 100$  мкм) эффективность разделения дисперсной и газовой фаз в этой сушилке составила 99,99 %, что позволило исключить из технологической схемы установки циклоны и фильтры для санитарной очистки отработанного сушильного агента перед выбросом его в атмосферу и, таким образом, существенно уменьшить общие энергетические затраты на сушку. Столь резкое возрастание степени улавливания продукта из потока воздуха в циклонной части спиральной пневмосушилки можно объяснить эффектом концентрирования высушиваемого материала в пристенном слое при движении газозвеси в спиральном канале и коагуляцией наиболее мелких частиц по градиентному, турбулентному и кинематическому механизмам [120].

Недостатком спиральных пневмосушилок с плоской спиралью, закрученной к сепарирующей камере, является ограничение верхнего предела производительности. С ростом производительности повышается расход сушильного агента и соответственно возрастают проходное сечение канала, диаметр сепаратора и максимальный предельный радиус сушилки.

Расчет показывает, что практическое использование сушилок этого типа с приемлемым радиусом 1,5–2 м ограничено расходом сушильного агента 12–15 тыс м<sup>3</sup>/ч. Гидравлическое сопротивление этих сушилок 1500–3000 Па, причем 30–40 % его приходится на сопротивление циклонного сепаратора. Длина спирального канала в зависимости от высушиваемого материала составляет 10–20 м, что обеспечивает время пребывания материала в сушилке 1–2 с.

В другом устройстве сушильный тракт выполнен в виде плоской бифилярной спирали, расположенной в вертикальной плоскости (см. рис. 5.7). Сушильный спиральный канал 1 прямоугольного сечения образован спиральными лентами 2 и 3, стенкой 5 и крышкой 6. Спиральные листы навиты концентрически так, что образуют в центре

плавный S-образный переход 4, а на периферии корпуса – входной и выходной патрубки. Влажный материал, взвешенный в газе, транспортируется от входного патрубка к выходному и высушивается, проходя путь от периферии к центру, а затем от центра к периферии. Изменение кривизны траектории частиц создает условия нестационарности гидродинамического режима и интенсификации тепло- и массообмена при идеальном вытеснении фаз, т. е. при максимальной движущей силе процесса сушки. Бифилярная навивка канала обеспечивает рекуперацию тепла по длине сушильного канала и снижение тепловых потерь в окружающую среду.



*Рис. 5.6. Пневмосушилка с плоским спиральным каналом и циклонным сепаратором: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – спиральная лента; 4 – выхлопная труба; 5 – спиральный канал; 6 – входной штуцер; 7 – сепарирующая камера; 8 – днище*

Кроме того, при такой навивке выравнивается и существенно увеличивается движущая сила процесса по сравнению с движущей силой в сушилках с идеальным вытеснением фаз других типов. Действительно, начальные витки канала контактируют с выходными, поэтому заключительная стадия процесса конвективной сушки протекает в условиях дополнительного подвода тепла через спиральную перегородку. Высокие технико-экономические показатели спиральных сушилок

с бифилярным каналом позволяют получить значительный экономический эффект при их использовании для производства продуктов химической, пищевой, сельскохозяйственной и других отраслей промышленности [120].

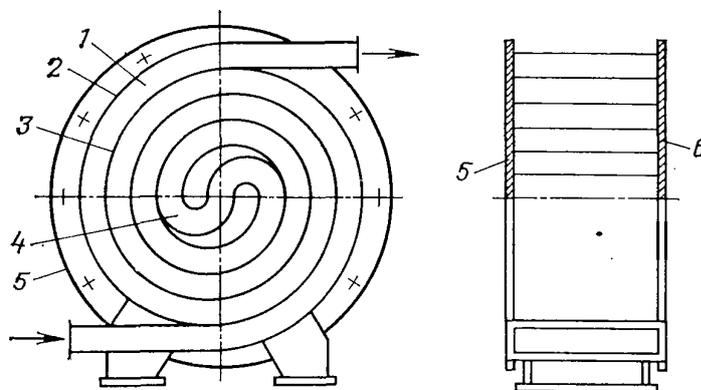


Рис. 5.7. Пневмосушилка с каналом в виде плоской бифилярной спирали:  
1 – спиральный канал; 2, 3 – спиральные ленты; 4 – S-образный переход;  
5 – стенка; 6 – крышка

### 5.2.2. Циклонные сушилки

Циклонные сушилки НИИхиммаша представляют цилиндроконический аппарат с тангенциальным вводом газозвеси в верхнюю часть цилиндра, снабженного опущенной почти до дна выводной трубой (рис. 5.8). Поток дисперсного материала движется спиралеобразно вниз и выносится газом через выводную трубу в систему пылеулавливания. Такая конструкция позволяет обеспечить нестационарные условия взаимодействия фаз (и, следовательно, высокую интенсивность тепло- и массообмена), а также гарантированное время пребывания материала в аппарате, достаточное для высушивания продуктов со слабосвязанной влагой.

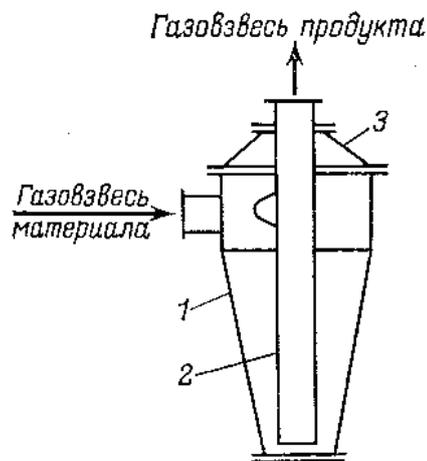


Рис. 5.8. Циклонная сушилка:  
1 – корпус; 2 – выводная труба;  
3 – крышка

Недостатком циклонных сушилок является то, что их можно успешно использовать только для хорошо сыпучих материалов, не обладающих заметными адгезионно-когезионными свойствами.

Для подобных материалов необходим прямой участок пневмотранспорта, чтобы обеспечить их подсушку, либо нужно применять рециркуляцию продукта [120].

Вихревые сушилки более компактны по сравнению с циклонными, характеризуются лучшей сепарирующей и большей удерживающей способностью. На рис. 5.9 показана вихревая сушилка системы «Конвекс» [120]. Аппарат с вертикальной осью закрутки газозвеси представляет собой цилиндрическую камеру 3 с входным патрубком 1 и съемной крышкой 4. Отверстие в днище камеры соединяет ее с улиткой 6 и выходным патрубком 7. Отбойное кольцо 5, имеющее экранный выступ овальной формы, выполнено сменным для регулирования удерживающей способности камеры. Труба 2 служит для перекрытия мертвой зоны вихря. Газозвесь влажного материала входит тангенциально в вихревую камеру и закручивается. Частицы больше определенного критического размера сепарируются, образуя вращающееся кольцо. Вновь вводимый материал постоянно вытесняет циркулирующие во внутренних слоях частицы, которые захватываются воздухом и выносятся через центральное отверстие в улитку 6, из которой через выходной патрубок 7 выводятся наружу. Циркулирующее кольцо газозвеси характеризуется высокой концентрацией материала, поэтому удельная поверхность контакта фаз в аппарате возрастает. Кроме того, сепарационное действие центробежного поля способствует более длительному нахождению крупных частиц в зоне сушки, что обеспечивает равномерное остаточное влагосодержание материала. Сушилки данного типа можно применять для сушки большого числа продуктов. Так, хорошие результаты получены при сушке древесной щепы, суспензионного ПВХ, а также ряда продуктов с очень тонкопористой структурой [120].

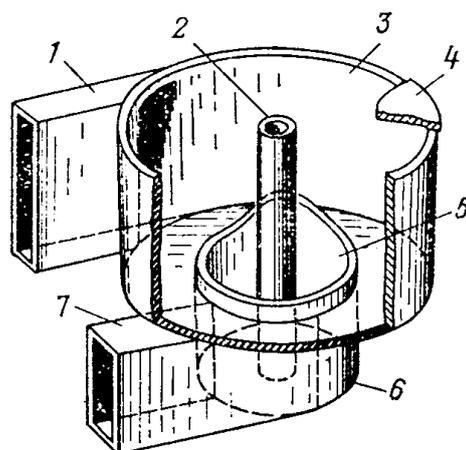


Рис. 5.9. Вихревая сушилка системы «Конвекс»:

- 1 – входной пат-рубок; 2 – труба;
- 3 – вихревая камера; 4 – крышка;
- 5 – отбойное кольцо; 6 – улитка;
- 7 – выходной патрубок

В НИИхиммаше разработана вихревая сушилка безуносного типа со встречными закрученными потоками ВЗП [120]. В МТИ под руководством Б. С. Сажина отработан ряд типовых конструкций ВЗП разного назначения. Основы теории и методы расчета представлены в книге [120]. Типичная конструкция аппарата со встречными закрученными

потоками теплоносителя изображена на рис. 5.10. Аппарат представляет собой вертикальную цилиндрическую камеру 2, в нижнюю часть которой по трубе 6 подводится первый поток теплоносителя, закручиваемый лопастным завихрителем 3 с вытеснителем, предотвращающим проскок материала по центральной части камеры. На трубе ввода первичного потока ниже завихрителя укреплена отбойная шайба 4. Второй поток теплоносителя вводится тангенциально в верхнюю часть камеры. Ввод второго потока может быть сосредоточенным (через один тангенциальный канал 8, как показано на рис. 5.10) и рассредоточенным (по нескольким тангенциальным каналам-соплам, которые могут быть наклонены к вертикальной оси аппарата). Отработанный в аппарате теплоноситель выводится через выхлопную трубу 1, расположенную в верхней части аппарата.

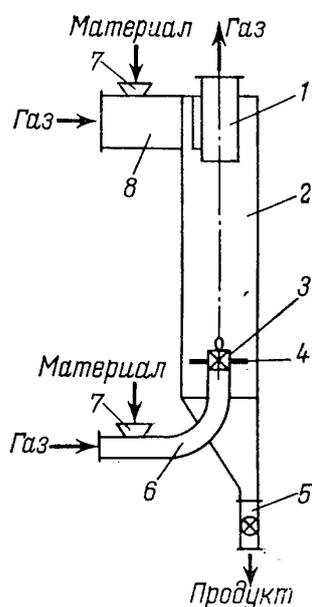


Рис. 5.10. Сушилка со встречными закрученными потоками теплоносителя ВЗП:

- 1 – выхлопная труба; 2 – сушильная камера; 3 – завихритель; 4 – отбойная шайба; 5 – выгрузочное устройство; 6 – газоподводящая труба первого потока теплоносителя; 7 – питатели; 8 – тангенциальный газоввод второго потока

Дисперсный материал может подаваться в аппарат с первым, со вторым, а также с обоими потоками теплоносителя одновременно через питатели 7. Высушенный дисперсный материал выводится из нижней камеры через выгрузочное устройство 5.

Влажный дисперсный материал образует с подаваемым в камеру воздухом газозвесь, которая закручивается лопаточным или тангенциальным завихрителем. Причем первичный закрученный поток газозвеси направлен вверх по центральной части аппарата, а вторичный,

закрученный в ту же сторону, направлен вниз. Частицы дисперсного материала из внутреннего потока под действием центробежных сил отбрасываются к периферии аппарата и транспортируются вторичным потоком в нижнюю часть камеры, откуда удаляются в бункер. Взаимодействие двух встречных закрученных потоков создает благоприятные условия для разделения дисперсной и газовой фаз, что обуславливает высокую эффективность пылеулавливания в этих аппаратах.

### 5.3. Извлечение примеси из зерновых и гранулированных материалов

На рис. 5.11 изображено устройство, которое может быть использовано в качестве центробежного сепаратора. Данное устройство состоит из улиточного корпуса 1 с приёмником 2 очищенного материала, в котором закреплена коническая втулка в виде подвижного отражательного конуса 3, большое основание которого находится в конической обечайке 4. Под основанием корпуса 1 установлена улиточная камера 5 дополнительной продувки, охватывающая коническую обечайку 4, с образованием щели 6, сообщённой с приёмником 2. К верхней стенке корпуса 1 прикреплена криволинейная пластина 7, охватывающая патрубков для вывода примесей. В корпусе 1 расположена шторка с полкой 8 и шарнир 9. К корпусу прикреплены патрубки 10 и 11, а к камере 5 – продувочный патрубок 12 дополнительного воздуха.

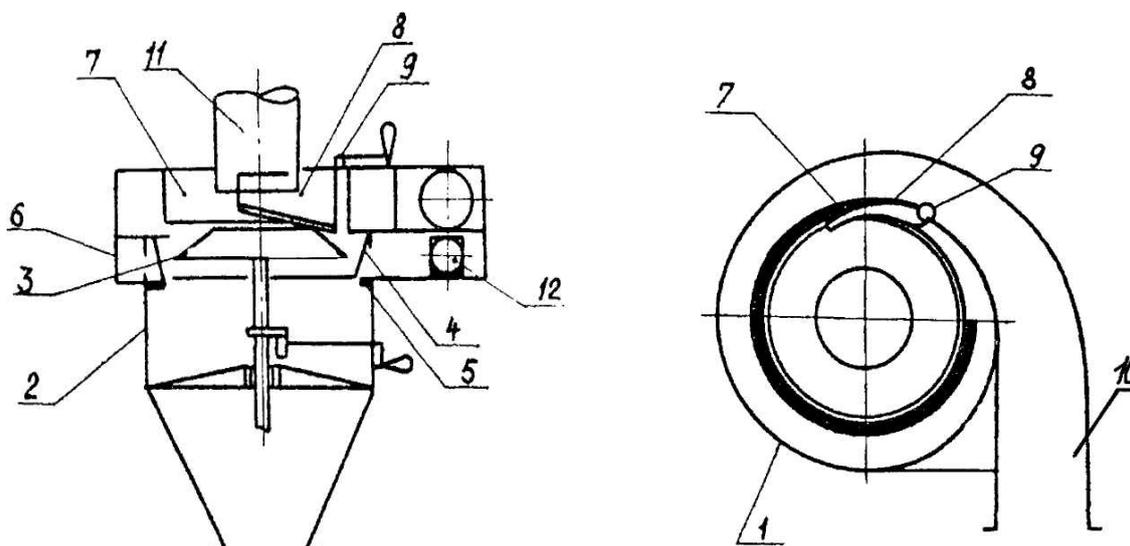


Рис. 5.11. Центробежный сепаратор:

- 1 – корпус; 2 – приемник; 3 – отражательный конус; 4 – обечайка; 5 – щель;  
6 – камера дополнительной продувки; 7 – пластина; 8 – шторка с полкой;  
9 – шарнир; 10 – пневмотранспортный трубопровод

Устройство работает следующим образом [14].

Материал с примесью из патрубка 10 транспортируется в канале переменного сечения, образованного криволинейной поверхностью корпуса 1 и пластиной 7. Зерновой материал за счёт взаимодействия со стенками канала и магнусовых сил распределяется по сечению равномерно, тогда как примесь сепарируется на криволинейную поверхность канала.

Материал по ходу потока через зазор между нижней стенкой корпуса 1 и пластиной 7 сдувается воздухом на отражательный конус 3, откуда он попадает на поверхность обечайки 4 и затем в приёмник 2. Продувочный воздух в количестве 5–20 % от транспортного подаётся через продувочный патрубок 12 в камеру 5, где распределяется равномерно по окружности. Продувочный газ многократно обдувает сыпучий материал и запирает транспортный вихрь в корпус 1, препятствуя его проникновению в приёмник 2. Крупная примесь из транспортного канала по криволинейной стенке и посредством шторки с полкой 8 выводится в патрубок 11, мелкая примесь сдувается с гранул струёй транспортного газа, натекающей через зазор между пластиной 7 и стенкой корпуса 1, а также многократным воздействием продувочным воздухом.

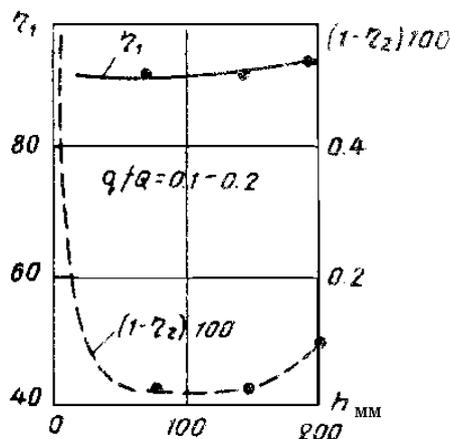


Рис. 5.12. Эффективность отбрасывания примеси ( $\eta_1$ ) и степень уноса гранул ( $1-\eta_2$ ) в зависимости от положения отражательного конуса

Таким образом, установка пластины 7 обеспечивает лучшую транспортирующую способность, более интенсивное обдувание гранул при электростатической адгезии на них пыли; установи обечайки 4 и камеры 5 обеспечивает равномерную подачу по зазорам продувочного воздуха, многократно обдувающего пересыпающиеся гранулы и запирающего транспортный вихрь в корпусе 1, что позволяет надёжно проводить отбрасывание в широком диапазоне положения отражательного конуса 3 при

высоких концентрациях продукта в транспортной магистрали и условиях электризации материала.

Эффективность работы сепаратора оценивалась по степени удаления из исходного продукта стружки, пыли и мелких гранул, а также по величине потерь гранул (рис 5.12) [27].

#### 5.4. Оценки параметров потоков [52]

Основным параметром, определяющим интенсивность тепломассообменных процессов и сепарационных эффектов в вихревой камере является уровень вращательной компоненты скорости газа и скорости частиц. Вращательная компонента определяется из соотношения  $V^2 = \frac{R}{\rho} \frac{dp}{dR}$ , где  $\rho$  – плотность газа,  $R$  – текущий радиус,  $V$  – окружная скорость газа. Одним из параметров, определяющих крутку потока, является интенсивность вращательного движения

$$\Delta p_0 = p(R_2) - p(0) = \rho \int_0^1 \frac{V^2}{\bar{r}} d\bar{r},$$

где  $\bar{r} = \frac{R}{R_2}$ ,  $R_2$  – радиус камеры [169].

При введении дисперсного материала в камеру уровень окружных скоростей и перепад статического давления уменьшаются. В [55] приведены результаты исследования влияния стационарного вращающегося слоя частиц песка на аэродинамику осесимметричной вихревой камеры с гиперболическими торцевыми крышками. В [116] исследовалось время пребывания сыпучего материала в аппарате циклонного типа. Время пребывания частиц материала в аппарате складывается из времени сепарации и времени их движения по стенке камеры аппарата или в пристенной области до выхода из него. Как показали экспериментальные данные, время движения сыпучего материала в пристеночной области в десятки и сотни раз больше времени сепарации [116]. В [165] показано, что критическая концентрация частиц во входящем потоке в циклон, при которой происходит образование жгута, определяется выражением

$$\mu_{кр} = 12,7 \text{Re}^{-0,33} Fr^{0,6},$$

где  $\text{Re} = \frac{V_{вх} D_{вх}}{\nu}$  – критерий Рейнольдса,  $Fr = \frac{v^2}{gR_{ср}}$  – критерий Фруда,

$D_{вх}$  – эквивалентный диаметр входа,  $R_{ср}$  – средний радиус циклона,  $v$  – скорость материала в циклоне вблизи стенки. При  $\mu > \mu_{кр}$  преобладает трение скольжения, при  $\mu < \mu_{кр}$  преобладает трение качения.

В [29] полагается, что механизм образования жгутов связан с особенностями течения неоднородных по плотности смесей вблизи вогнутой криволинейной стенки. Здесь течение ламинаризируется, усиливается интенсивность вихрей Тейлора-Гёртлера, а устойчивость распределения по плотности определяется числом Ричардсона. В работе приведены данные по визуальным наблюдениям за движением жгутов, определены окружные скорости газа в разных сечениях, приведены расчеты потерь момента импульса потока. Оказалось, что величины циркуляций газовой фазы по высоте циклона различаются во много раз, особенно это относится к пылевыводному отверстию конической части циклона.

В [23] представлены сведения и исследования в области двухфазного пограничного слоя. В отличие от классических представлений о структуре погранслоя, механизме генерирования турбулентности, распределения пульсационных характеристик, пограничный слой не делится на области вязкого подслоя и область развитой турбулентности, а определяется по времени на периоды медленного вязкого развития и быстрого невязкого разрушения. При этом зависимость между частотой разрушения и динамической скоростью определяется соотношением

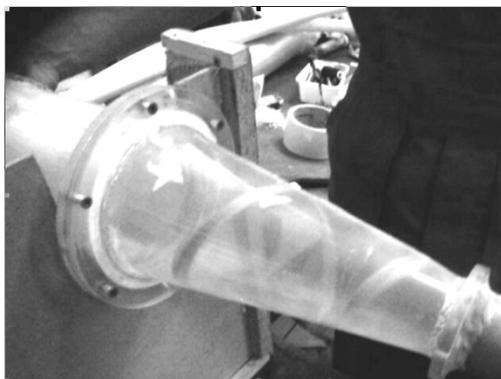
$$\frac{\omega v}{v_*^2} = 0,056 \text{ и, кроме того, выделяются первичная турбулентность, свя-}$$

занная с выбросами, и вторичную, обусловленную неустойчивостью и распадом струй. Такие процессы обуславливают возникновение вторичных течений. Присутствие частиц приводит к перераспределению касательных напряжений, а переток молей газа в поперечном направлении обусловлен градиентом касательных напряжений в этом же направлении [130]. Это приводит к тому, что в местах с большими касательными напряжениями продольные скорости уменьшаются, а касательные напряжения выравниваются. По данным исследований характера формирования отложений частиц из суспензий в гидравлических лотках, на дне образуются структуры с неравномерным слоем частиц в поперечном направлении [130].

Процессы течения двухфазной среды в циклонном аппарате сложны и до сих пор нет физически обоснованной модели превращения дисперсной среды из аэрозольного состояния в насыпное в пылеприемнике. При отсутствии образования отложений пыли, в области пылевыводного отверстия противоточного конического циклона концентрация частиц пыли увеличивается в сотни раз, вследствие чего возникают торможения потока из-за повышенного значения касательного напряжения на стенке.

В [147] приведены данные распределения давлений на двухфазном потоке с малой концентрацией частиц в вихревой камере, по которым можно рассчитать распределение окружных скоростей воздуха.

Для определения времени прохода материала через циклон и сопоставления его со временем пребывания газа были проведены измерения скорости воздуха на входе в аппарат при отводе всего воздуха через пылевыводное отверстие, расход сыпучего материала. Проводилось мгновенное отсоединение циклона от коллектора разрежения, определялось количество пыли выпавшей в циклоне. Визуально было видно (рис. 5.13), что пыль в конусе движется в виде полосовых жгутов. Количество витков, их длина, определялась визуально, а также расчетом. Скорость воздуха в витках определялась с учетом ускорения потока в конусе и усреднялась по длине витка.



*Рис.5.13. Конфигурация дисперсной фазы в конусе циклона*

Определялось время прохода воздуха через конус циклона, как объем конуса, деленный на расход, а также время как длина витка, деленная на скорость жгута. Определялось время пребывания материала, как масса, выпавшая в циклоне при отсечке потока, деленная на весовой расход. Опыты проводились на порошке М40 (корунд).

Расход материала составлял 1,1 г/с, расход воздуха 9–17 г/с, скорость воздуха во входном сечении 7–13 м/с. Отношение времени прохождения материала ко времени прохода воздуха в зависимости от концентрации и скорости воздуха находилось в диапазоне  $2 \div 30$  [146].

Для того чтобы определить параметры сгусткообразований (распределение пыли М40 в окружном направлении) в противоточном циклоне, с помощью поворотной секции были отобраны пробы воздуха с различной концентрацией частиц (или количеством отведенной пыли по отношению к количеству введенной пыли) по окружности циклона на фиксированной высоте, равной 1,5 диаметру от ввода. Оказалось, что распределение концентраций по окружности неравномерно (имеются всплеск и провалы концентраций) (см. рис. 5.14).

Введем коэффициент неравномерности распределения частиц в окружном направлении  $K_n = q_{\max} / q_{\min}$ . При концентрации пыли 2–4 г/м<sup>3</sup> монофракционной пыли  $K_n \approx 3$ , при концентрации этой же пыли 70–95 г/м<sup>3</sup> во входном потоке  $K_n \approx 5$ . Для полифракционной пыли

с концентрацией  $11\text{--}19 \text{ г/м}^3$   $K_n \approx 7$ . При концентрациях пыли более  $200 \text{ г/м}^3$  неравномерность распределения частиц по окружности проявляется в виде жгутов, которые движутся с малой скоростью в окружном направлении и обнаруживаются визуально. Расчетная модель концентрирования частиц в противоточном цилиндрическом циклонном аппарате представлена в [43].

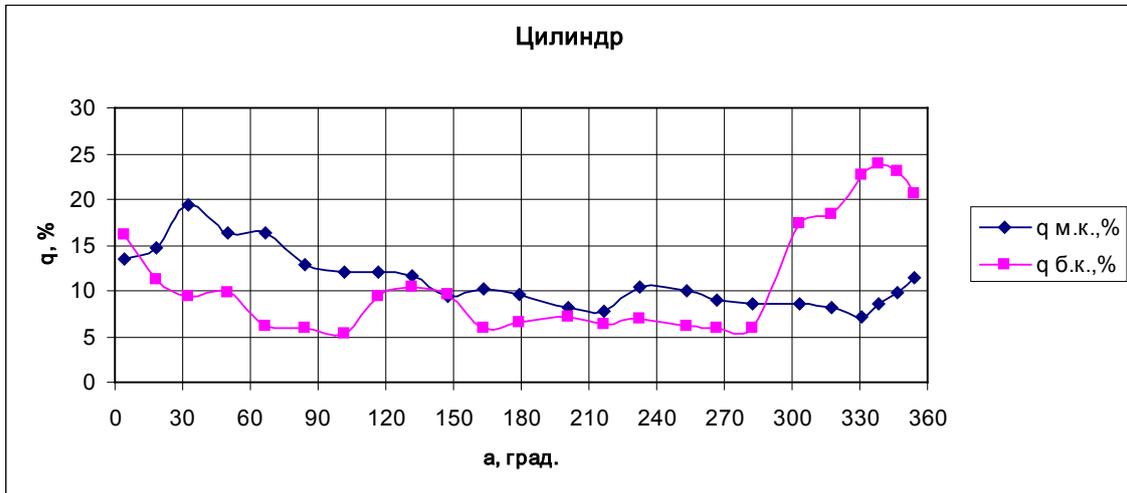


Рис. 5.14. Относительное количество монофракционной пыли, выводимое с периферии цилиндрической части циклона 15 %-ым количеством воздуха в зависимости от угловой координаты (направление отсчета по направлению вращения потока, начало отсчета – сопряжение ввода с цилиндром камеры):  $\blacklozenge$  – концентрация  $2\text{--}4 \text{ г/м}^3$ ,  $\blacksquare$  – концентрация  $70\text{--}95 \text{ г/м}^3$

Относительный выход цементной пыли представлен на рис. 5.15.

Образование жгутов играет положительную роль в процессах обеспыливания газов [175], но препятствует проведению процессов классификации [160], распределению пыли с сушильным агентом из вихревого концентратора по горелкам [97].

Частицы гранулированных и зерновых материалов в вихревой камере стремятся распределиться равномерно в окружном направлении. Визуальные наблюдения за распределением частиц показали, что при транспортных концентрациях (более  $2000 \text{ г/м}^3$ ) гранулы имеют малые окружные скорости и их траектории отклоняются от вертикального направления на  $25\text{--}35^\circ$ .

В [4] приведены результаты исследования аппаратов для очистки гранулированных материалов от пыли, волокон, стружки. На рис. 5.16 представлена схема аппарата вихревого типа.

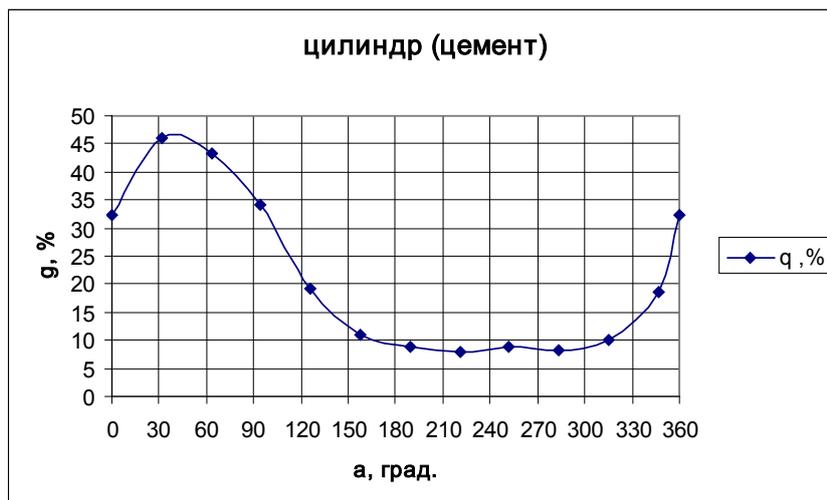


Рис. 5.15. Относительное количество полифракционной пыли, выводимое с периферии цилиндрической части циклона 15 %-ым количеством воздуха в зависимости от угловой координаты (направление отсчета по направлению вращения потока, начало отсчета – сопряжение ввода с цилиндром камеры):  
 ◆ – концентрация 11–19 г/м<sup>3</sup>

Транспортируемый материал с примесью через патрубок 1 улиточного ввода поступает в корпус 2, гранулы за счет сил инерции концентрируются на периферии и проходят в щель между корпусом и диском 3. Примесь в виде стружки пыли волокон, сгустковых переплетений попадает в область интенсивных радиальных токов на поверхности с радиусом патрубка для вывода примеси 4, и выносятся из аппарата.

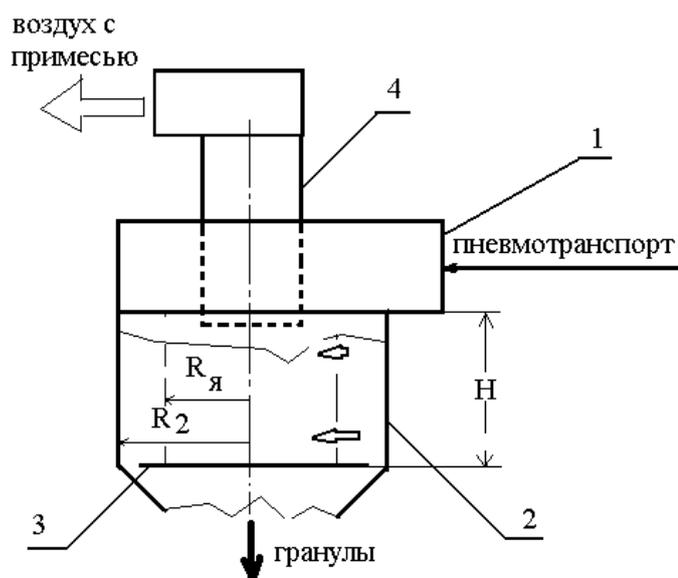


Рис. 5.16. Схема переноса момента количества движения в радиальном направлении

Интенсивность радиальных токов за счет формирования вынужденного вихря у поверхности отражательного диска наибольшая. Газ распространяется в области между поверхностями наружного цилиндра и цилиндра с радиусом  $R_я$  и вытекает через поверхность с радиусом  $R_я$  во внутреннюю область. При этом момент крутки газа уменьшается от взаимодействия газа и частиц с наружной криволинейной поверхностью. Окружная скорость гранул на порядок меньше окружной скорости воздуха, поэтому сила тяжести, действующая на слой гранул, оказывается больше центробежной прижимающей гранулы к поверхности силы.

Силы, действующие на элемент слоя, представлены на рис. 5.17. На элемент слоя действует сила тяжести  $\delta F_g$ , увлекающая сила потока в окружном направлении  $\delta F_s$ , и сила трения  $\delta R_{fr}$  гранул об ограждающую поток криволинейную поверхность.

Слой образуется за счет сепарации частиц к ограждающей поверхности. Частицы имеют форму коротких цилиндров. Коэффициент взаимодействия слоя с поверхностью аналогичен коэффициенту кулоновского трения, однако механизм взаимодействия частиц слоя с поверхностью отличается от сухого трения: гранулы рикошетируют, вращаются, сталкиваются между собой.

В системах трубопроводного транспорта полимерных гранулированных материалов взвесью при взаимодействии гранул с поверхностью образуются пыль, стружка, ленты, что свидетельствует о сильных адгезионных связях при контактах. Чем больше коэффициент внешнего трения, тем больше адгезионное взаимодействие. Среднее значение коэффициента внешнего трения [162]:

- полипропилен по стали – 0,26; по алюминию – 0,28;
- полиэтилен высокого давления по стали – 0,30; по алюминию – 0,33;
- сополимер этилена с винилаустатом по стали – 0,4; по алюминию 0,42.

Газ обтекает слой из гранул в окружном направлении со скоростью равной разнице скоростей потока и слоя гранул. Увлекающая сила потока определяется силой трения потока о поверхность слоя гранул:

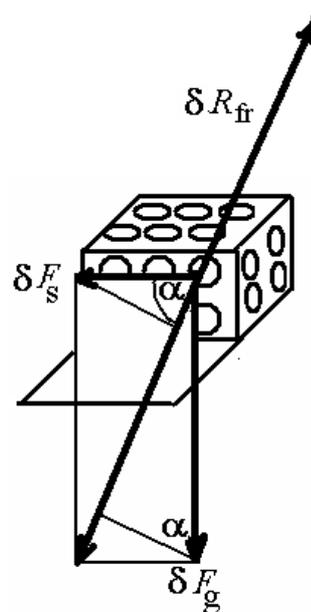


Рис. 5.17. Схема сил, действующих на элемент слоя

$$\frac{\tau_t}{\rho u_k^2} = \left( \frac{v_*}{u_k} \right)^2 = f \left( \frac{ku_k}{v} \right),$$

где  $k$  – величина обтекаемых бугорков,  $u_k$  – скорость обтекания бугорков,  $v_*$  – динамическая скорость трения газа о бугорки [103].

Обозначим:  $\Omega$  – масса материала в слое,  $u_t$  – окружная скорость слоя,  $u_z$  – вертикальная скорость слоя,  $V_\Delta$  – окружная скорость воздуха у поверхности слоя гранул,  $[(\pi/2) - \alpha]$  – угол отклонения от вертикали вектора скорости частиц.

Увлекающая сила материал потоком в окружном направлении равна  $F_s = St_t = \rho S [v_* \Phi(kv_*/v)]^2 = S\rho(V_\Delta - u_t)^2 / 8,5$  [104], где  $S = 2\pi R_2 H$ . Увлекающая сила материал потоком в окружном направлении уравновешивается силой трения материала о поверхность  $F_s = (\Omega u_t^2 / R_2) \phi_s$ , в вертикальном направлении – сила  $F_g = g\Omega$ ,  $\Omega = S \cdot \Delta \cdot \rho_\delta \cdot (1 - \varepsilon) = G_m H / u_z$ , где  $\Delta$  – толщина слоя,  $\rho_\delta$  – плотность гранулы,  $\varepsilon$  – порозность слоя,  $\phi_s$  – коэффициент взаимодействия слоя гранул с поверхностью,  $\rho$  – плотность воздуха,  $G_m = \rho Q \gamma$  – подача материала,  $\gamma$  – массовая расходная концентрация гранул в потоке на входе в аппарат;  $Q$  – расход воздуха.

Запишем баланс потоков моментов импульса в радиальном направлении для транспортного потока в центробежном концентраторе (концентрация примеси на два-три порядка меньше концентрации гранул и ее не учитываем).

$$M_{\text{вх}} = M_{\text{я}} + M_{\text{т}} + M_{\text{г}}, \quad (5.1)$$

где  $M_{\text{вх}} = G_m u_{\text{вх}} R_2 + \rho Q V_{\text{вх}} R_2 = \rho Q R_2 (\gamma u_{\text{вх}} + V_{\text{вх}})$ ;

$M_{\text{я}} = V_{\text{я}} R_{\text{я}} 2\pi R_{\text{я}} H V_r = V_{\text{я}} R_{\text{я}} Q \rho r$  – поток момента количества движения через поверхность  $2\pi R_{\text{я}} H$ ;

$u_{\text{вх}}, V_{\text{вх}}$  – скорости входа частиц и воздуха;

$V_{\text{я}} R_{\text{я}} = V_\Delta R_2$ ;  $V_{\text{я}}, V_r$  – окружная и радиальная скорости воздуха на радиусе ядра  $R_{\text{я}}$ ;

$\rho$  – плотность воздуха;

$M_{\text{т}} = F_s R_2$ ;  $M_{\text{г}} = \tau_t S R_2$ ;  $\tau_t = S\rho(V_\Delta - u_t)^2 / 8,5$  – тангенциальное напряжение трения воздуха о движущийся слой гранул.

Величина  $M_{\text{вх}}$  зависит от значения скорости гранул во входном сечении. В [195] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований пневмотранспорта крупнозернистых материалов в горизонтальных трубах. Отношение скорости гранул к скорости пото-

ка воздуха уменьшается с уменьшением числа  $Fr_T$  и массовой концентрации материала  $\gamma$ .  $Fr_T = \frac{V_T^2}{D_T g}$ , где  $V_T$  – скорость потока в подводящей трубе,  $D_T$  – диаметр подводящей трубы. При  $\gamma = 5$  отношение  $u_{\text{вх}} / V_{\text{вх}}$  находится в интервале 0,07–0,12 при значениях  $\sqrt{Fr_T} = 27 - 40$ .

Запишем очевидные соотношения

$$u_z = u_t \operatorname{tg} \alpha, \quad F_s = \Omega g \cdot \operatorname{ctg} \alpha, \quad u_t = \sqrt{\frac{g R_2 \operatorname{ctg} \alpha}{\varphi_s}}, \quad \Omega = G_M H / u_z, \quad \Omega = \frac{G_M H \sqrt{\varphi_s}}{\sqrt{g R_2 \operatorname{tg} \alpha}}.$$

Введем безразмерные параметры по соотношениям:  $F_{\text{вх}} = \overline{F_{\text{вх}}} \pi R_2^2$  – входное сечение ввода потока в камеру,  $V_\Delta = \overline{V_\Delta} V_{\text{вх}}$ ,  $H = \overline{H} R_2$ ,  $u_t = \overline{u}_t V_{\text{вх}}$ ,  $Fr = \frac{V_{\text{вх}}^2}{g R_2}$ .

Подставляя приведенные соотношения в уравнения балансов моментов сил, действующих на слой (5.1), получим

$$\gamma \overline{u}_{\text{вх}} + 1 = \overline{V_\Delta} + \gamma \overline{H} \frac{\operatorname{ctg}^{\frac{3}{2}} \alpha}{\sqrt{Fr}} + \frac{(\overline{V_\Delta} - \overline{u}_t)^2}{8,5} 2 \frac{\overline{H}}{\overline{F_{\text{вх}}}}. \quad (5.2)$$

Расчетное уравнение имеет вид

$$\overline{V_\Delta} = \frac{\sqrt{1 + 4a(b - \overline{u}_t)} - 1}{2a} + \overline{u}_t, \quad (5.3)$$

где  $a = \frac{2\overline{H}}{8,5\overline{F_{\text{вх}}}}$ ;  $b = \gamma \left( \overline{u}_{\text{вх}} - \overline{H} \frac{\operatorname{ctg}^{\frac{3}{2}} \alpha}{\sqrt{Fr}} \right) + 1$ .

Для определения величины  $\varphi_s$  были проведены оценочные исследования движения гранулята, подаваемого с определенной скоростью в лоток с регулируемым углом наклона (рис. 5.18).

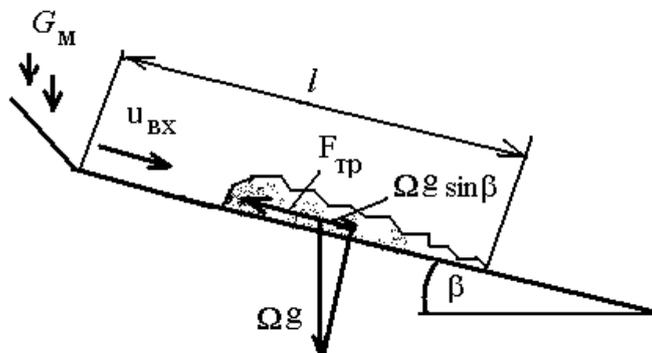


Рис. 5.18. Схема определения коэффициента взаимодействия частиц материала с поверхностью

Угол подбирался таким образом, чтобы при заданном весовом расходе  $G_M$  образовывался слой материала с незначительным количеством скатываемых частиц за пределы лотка. Движущийся материал при взаимодействии частиц с поверхностью и друг другом останавливается. При этом эффективная сила трения определяется выражением  $F_{тр} = \varphi_s \Omega g \cos \alpha$ . На основании уравнения импульсов для материала, который имеет скорость на входе  $u_{вх}$ , а на выходе нулевое значение, находится величина коэффициента взаимодействия материала с подложкой  $\varphi_s$ :

$$\varphi_s = \frac{\left( \frac{u_{вх}}{gt} + \sin \beta \right)}{\cos \beta},$$

$\Omega$  – вес материала на лотке,  $t$  – время истечения материала ( $t = \Omega / G_M$ ). Для налипающих частиц величина  $\varphi_s$  неограниченно возрастает с увеличением угла  $\beta$ .

Пусть  $R_2 = 0,5$  м;  $\varphi_s = 0,4$ ;  $\alpha = 60^\circ$ ;  $\text{ctg } \alpha = 0,577$ ;  $V_{вх} = 20$  м/с;  $\bar{F}_{вх} = 0,15$ ;  $\bar{H} = 1,5$ ;  $\gamma = 5$ . Получим  $F_r = 82$ ;  $u_t = 2,67$  м/с;  $\bar{u}_t = 0,13$ . Из уравнения (3) получим  $\bar{V}_\Delta = 0,72$ . Крутка потока оказывается достаточной для отвеивания примеси.

Расчеты и эксперименты показывают, что основными параметрами, определяющие процесс отвеивания примеси из гранул, являются величины  $\gamma$ ,  $\bar{H}$ ,  $\bar{F}_{вх}$  [14].

На рис. 5.19 представлен первый вариант аппарата для извлечения примеси – центробежный разделитель [14]. На рис. 5.20 представлены сплошными линиями эффективность отвеивания примеси  $\eta_c$ , пунктиром процент уноса гранулята  $(1 - \eta_r) 100$  % в зависимости от производительности аппарата и концентрации гранул. Было установлено влияния электризации гранул на эффективность отвеивания примеси и уноса гранул. Были проведены исследования влияния различных факторов на эффективность работы аппарата [27, 14].

Метод проектирования промышленного аппарата приведен в [162].

**Выводы.** Дисперсный материал в вихревой камере концентрируется у ограничивающей поток криволинейной поверхности, образует структуры в зависимости от крупности частиц и их концентрации. При концентрациях пылевидных материалов менее  $10 \text{ г/м}^3$  распределение частиц по окружности при улиточном вводе в вихревую камеру близко к равномерному. При концентрациях частиц более  $200 \text{ г/м}^3$  происходит жгутообразование. Частицы зерновых и гранулированных материалов распределяются в окружном направлении равномерно. При транспортных концентрациях крупнозернистых частиц крутка потока в вихревой

камере значительно уменьшается, но оказывается достаточной для проведения процесса извлечения примеси из материала.

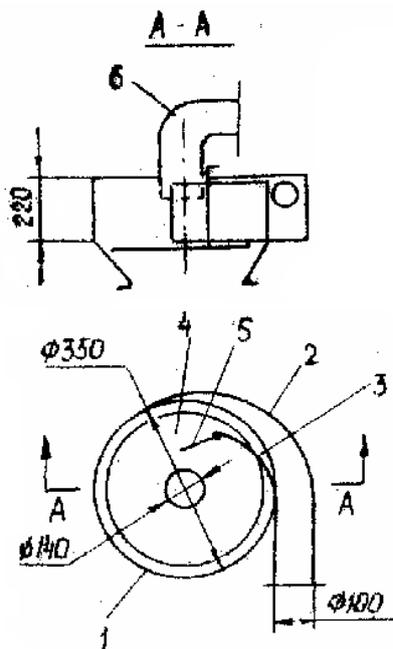


Рис.5.19. Центробежный разделитель: 1—корпус, 2—пневмотранспортный ввод гранулята, 3—направляющая пластина, 4—диск формирования вынужденного вихря, 5—регулирующая шторка, 6—патрубок вывода воздуха с примесью

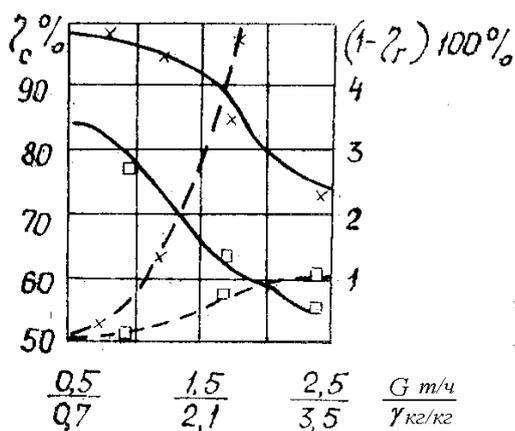


Рис.5.20. Эффективность отвеивания и вынос гранулята в зависимости от производительности аппарата и концентрации:

x — диаметр отражательного диска 320 мм,

□ — диаметр отражательного диска 280 мм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наименьшими энергозатратами на транспортировку дисперсного материала обладают транспортеры с несущими элементами. Однако они приспособлены для транспортировки хорошо сыпучих, не налипающих на несущие элементы, материалов. При этом требуются эффективные системы аспирации из-за интенсивного пылеобразования при пересыпках, разгрузки, выгрузки материалов. Системы занимают большие объемы.

Универсальным средством транспортировки являются транспортеры с волоочильными элементами, скребкового типа. Они приспособлены для транспортировки дисперсных материалов любого вида. Но материал на выходе из транспортера обладает другими свойствами: изменяется дисперсный состав, проявляется электризация частиц, и изменяются аутогезионные взаимодействия. Эти транспортеры подвержены абразивному износу, обладают повышенным энергопотреблением. Винтовые транспортеры приспособлены для транспортировки хорошо сыпучих материалов, обладают повышенным энергопотреблением. Должны выполняться повышенные требования к эксплуатации из-за возможности заклинивания шнеков при попадании посторонних предметов. Дальность транспортирования не превышает 50 м.

Приведенные результаты исследования по пневмотранспорту противоречивы в оценке параметров потоков, надежности процессов. Существующие методы сравнительной оценки энергопотребления объективны только для транспортеров вертикального подъема материалов, где четко выражена полезная работа потока. Для горизонтального транспорта полезная работа определяется работой против сил трения. Поэтому для сопоставления требуется сравнение с энергозатратами на транспортировку «стандартного» транспортера, например, ленточного, у которого силы трения определены. При таком сопоставлении, оказывается, пневмотранспорт проигрывает механическим транспортерам.

При пневмотранспорте «взвесью» существуют критические параметры потока и длины трубопровода, которые определяются начальной скоростью потока и концентрацией частиц. При приближении к критическим параметрам темп увеличения скорости и сопротивления возрастает. Это обстоятельство ограничивает дальность транспортирования взвесью. Перспективны эжекторные системы с кольцевыми соплами.

Существуют противоречия в оценке применения грузочных устройств в трубопроводы транспорта. Одни авторы дают предпочтение винтовым насосам, другие – камерным питателям. По энергопотреблению предпочтительны системы с камерными питателями. Однако загрузка связных материалов в трубопроводы является трудной проблемой,

которая решается усложнением устройств. При нестабильном истечении материала из бункеров возникают низкочастотные пульсации, которые снижают надежность транспортных систем. Это связано с тем, что перепад давления в сопловом аппарате изменяется, изменяется расход воздуха. Изменение расхода воздуха ведет к образованию завалов. При пульсациях меняется мощность насоса.

При поршневом транспорте диаметр трубопровода является лимитирующим параметром устойчивости транспортировки. В горизонтальных трубопроводах необходимый перепад давления на поршне зависит от относительной длины поршня и от силы тяжести, которая проявляется при диаметрах трубы более 100 мм. Имеются противоречия в оценке нарастания потока фильтрации и распределения давления в поршне при скачкообразном перепаде давления и постепенном увеличении перепада давления. По нашему мнению поршневой транспортер должен быть оборудован на постах поддува в спутном трубопроводе емкостями, объем которых должен быть больше объема поршня. В этом случае нарастание фильтрационного потока, который является движущей силой поршня, происходит кратковременно (сотые доли секунды), а инерционного уплотнения поршня не происходит. Поэтому движение поршня осуществляется стабильно. Без применения емкостей давление в клапане ввода резко уменьшается из-за большого гидравлического сопротивления спутной трубы.

Вихревые камеры могут работать при транспортных концентрациях частиц. При этом интенсивно осуществляются процессы теплопереноса, сепарации. В транспортных системах они являются завершающими элементами выделения материала из потока. В частности они могут быть использованы для извлечения примеси из гранулированных и зерновых материалов. Вихревые камеры циклонного типа являются эффективным средством обеспыливания газов.

Характерной особенностью циклонного процесса является образование жгутов пыли на периферии, которые в зависимости от зарядов частиц могут разбухать, либо, наоборот, сжиматься и давать отложения. Эта особенность определяет устойчивость работы циклона. В предложенных вариантах обеспыливания воздуха имеется возможность создания условий для эффективной работы циклонов. Успешно проверены следующие технические решения:

- для пульсирующих потоков применялись аппараты с фильтрующими приемниками, в которые проходят потоки с концентратом пыли; в этом случае использовались регулирующие элементы;

- для связных пылей применялись циклоны с увеличенными пылевыводными отверстиями и длинными транзит – приемниками, в которых крутка потока с концентратом пыли падает до нуля;

- для пылей и примесей, обладающих электростатическими зарядами и склонных образовывать облакообразные скопления, применялся ввод частиц, диспергирующих скопления и улучшающих контакт примеси с ограничивающими поток поверхностями, причем количество вводимых частиц контролировался перепадом давления в циклоне.

Альтернативой батарейным циклонным обеспыливателям может быть применена установка на базе вихревого разгрузителя – концентратора. В этой установке осуществляется разгрузка потока от крупных включений, двойное концентрирование примеси, вывод концентратов в выносные циклоны. Регулирование установки позволяет циклонам работать в оптимальном режиме в широком диапазоне нагрузки транспортеров. Запыленность очищенных газов в этой установке в пять раз меньше, чем при обеспыливании батарейным газоочистителем.

Фильтры являются наиболее эффективным средством выделения частиц из газового потока. Механические характеристики сформировавшегося слоя частиц определяют методы регенерации фильтровальных перегородок, от которых зависит эффективность, устойчивость обеспыливания, надежность функционирования фильтра. Представлен метод определения состояния слоя на пористой подложке газоочистительного фильтра, что дает возможность оценивать режимные параметры фильтра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений / Под ред. И.П. Мухленова, О.С. Ковалева. – М.: Химия, 1987. – 208 с.
2. Акунов В.И. Струйные мельницы. – М.: Машиностроение, 1967. – 262 с.
3. Александров М.П.. Подъемно-транспортные машины: учеб. для машиностроит. спец. вузов / М.П. Александров. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с.
4. Анисимов Ж.А., Василевский М.В., Свищев Б.Г. Сравнительные характеристики аппаратов для очистки зерновых и гранулированных материалов от примесей. //Вопросы аэрогидромеханики теплообмена. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1986. – С. 24–29.
5. Анисимов Ж.А., Василевский М.В., Юрин Е.Г. Повышение надёжности и эффективности работы газодувок //Тезисы докладов 2-го отраслевого совещания «Проблемы и перспективы развития производственного объединения «Томский нефтехимический комбинат» – Томск, 1988, С. 67–68.
6. Андрианов Е.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. – М.: Металлургия, 1982. – 256 с.
7. Андрианов Е.И. Оборудование для выгрузки, транспортировки и обработки уловленной пыли. Обзорная информация сер. ХМ-14 ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. – М., 1987.
8. Арабажи И.Н., Стельмах Г.П. Увеличение эффективности очистки газов циклонами, работающими в условиях пылевых камер // ИФЖ. – 1960ю – Т. 3. – № 9. – С. 113–116.
9. Антонянц Г.Р. Топливо-транспортное хозяйство тепловых электростанций / Г.Р. Антонянц, В.П. Черников, О.Ф. Райфельд. – М.: Энергия, 1977. – 231 с.
10. А.С. 664893. Способ пневматического транспортирования сыпучих материалов / О.Ю. Розанов, В.А. Смоловик, В.М. Егоров, А.В. Трушников // Б. И., 1979, № 20.
11. А.С. 676513 Установка для пневматического транспортирования сыпучих материалов / О.Ю. Розанов, А.В. Трушников, В.А. Смоловик, В.М. Егоров. // Б. И., 1979, № 28.
12. А.С. № 721365. Устройство для стабилизации истечения сыпучих материалов из емкостей / О.Ю. Розанов, А.В. Трушников, В.А. Смоловик, В.М. Егоров. //Б. И., 1980, № 10.

13. А.С. N 950 632 (СССР). Способ транспортирования сыпучих материалов / Воронин В.Н., Егоров В.М., Квеско Б.Б. // Б.И. 1982, № 30.
14. А.С. № 1256816 (СССР). Устройство для очистки зерновых и гранулированных материалов от примесей / М.В. Василевский, А.Т. Росляк, Ж.А. Анисимов, Б.Г. Свищев, Н.А. Кочетков, В.К. Гордеев. // Б. И., 1986, № 34.
15. А.С. (СССР) 1554985 Способ сепарации из воздушного потока наэлектризованной полимерной примеси / Василевский М.В., Анисимов Ж.А., Свищев Б.Г., Кочетков Н.А., Гордеев В.К. // Б.И. 1990, № 13.
16. А.С. № 1691240. Установка для пневматического транспортирования сыпучих материалов. / Романдин В.И. Воронин В.Н., Трушников А.В., Осинников Н.Н. // Б.И.1991, № 42.
17. Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979. – 511 с.
18. Аэродинамические основы аспирации: / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. – Санкт- Петербург: Химиздат, 2005. – 659 с.
19. Бакланов Г.М. Снижение запыленности на цементных заводах / Г.М. Бакланов, С.Б. Перли, И.Е. Эдельман. – Киев : Будівельник, 1965. – 95 с.
20. Баскаков А.П. Проточные псевдооживленные системы. В кн. Псевдооживление / В.Г. Айнштейн, А.П. Баскаков, Б.В.Берг и др. – М.: Химия, 1991. С. 333–375.
21. Бесчастнов М.В. Взрывобезопасность и противоаварийная защита химико-технологических процессов. – М.: Химия, 1983. – 427 с.
22. Большаков В.П., Ермаков В.В., Кунтулов Б.М. Результаты исследования метода пневмотранспорта золы из бункеров золоуловителей в импульсном режиме // Теплоэнергетика, 2006. – № 5. – С. 41–44.
23. Борщевский Ю.Т. Теория одно и двухфазного потока турбулентного пограничного слоя. – К.: «Вища школа», 1975. – 192 с.
24. Бретшнайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль: Пер. с англ. / Под ред. А.Ф. Туболкина. – Л.: Химия, 1989. – 288 с.
25. Василевский М.В., Анисимов Ж.А., Росляк А.Т., Акчурин Р.И. Повышение производительности линии транспорта полипропилена в анализные бункеры / Тезисы докладов 2-го отраслевого совещания «Проблемы и перспективы развития производственного объединения «Томский нефтехимический комбинат». – Томск, 1988. – С. 8–9.

26. Василевский М.В., Анисимов Ж.А., Свищев Б.Г. Характеристики центробежного аппарата для очистки гранулированного материала от волокнистой примеси и пыли // Вопросы прикладной аэрогидромеханики и тепломассобмена. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1989. – С. 194–203.
27. Василевский М.В., Анисимов Ж.А., Свищев Б.Г. Результаты исследования опытно-промышленного сепаратора очистки гранулированного полиэтилена высокого давления // Вопросы прикладной аэрогидромеханики и тепломассобмена. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1989. – С. 84–91.
28. Василевский М.В., Никульчиков В.К., Анисимов Ж.А., Ледовских А.К., Сохарев В.Г. Применение циклонных пылеуловителей в производстве радиоактивных материалов. Тезисы докладов международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды». – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1995. – Т 3. – С. 312.
29. Василевский М.В., Мальцев А.А., Перков В.В., Танков Н.К., Богданов А.Л. Эффективность сепарации частиц в вихревых камерах // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. – С. 276–277.
30. Василевский М.В., Танков Н.К., Богданов Л.Н., Романдин В.И. Гидродинамические параметры вихревой камеры при повышенной концентрации частиц // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады Всеросс. науч. конф. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2000. – С. 219–220.
31. Василевский М.В., Росляк А.Т., Зыков Е.Г. Исследование батарейного сепаратора с циклонными элементами для очистки газа от примеси // Известия Томского политехнического университета, 2002. – Т. 305, вып. 8, С. 124–132.
32. Василевский М.В., Зыков Е.Г. Методы повышения эффективности систем обеспыливания газов с групповыми циклонными аппаратами в малой энергетике. // Промышленная энергетика. – 2004. – № 9. – С. 54–57.
33. Василевский М.В., Зыков Е.Г. Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 88 с.
34. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С. Устойчивость газоочистки в циклонном пылеуловителе // Изв. РАН Энергетика. – 2005. – № 5. – С. 113–124.

35. Василевский М.В. Опыт определения оптимальных соотношений циклонного обеспыливателя в сублиматном производстве. // Материалы двенадцатой Всеросс. науч.-техн. конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность.» – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 312–315.
36. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С., Разва А.С. Очистка воздуха от аэрозольных частиц в установках напорного пневмотранспорта цемента. // Цемент и его применение. – 2007. – № 6. – С. 133–134.
37. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Разва А.С. Обеспыливание воздуха циклонными аппаратами в пневмотранспортных установках // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 1. – С. 46–49.
38. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Разва А.С., Логинов В.С. Обеспыливание воздуха циклонами в аспирационных сетях // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 2. – С. 2–6.
39. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С., Разва А.С., Снежко В.Д. Очистка газов от золы за котлом КЕ-10/14 // Промышленная энергетика. – 2008. – № 1. – С. 49–52.
40. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 248 с.
41. Василевский М.В., Некрасова К.В., Разва А.С., Зыков Е.Г. Оценка связности дисперсного материала из агрегированных частиц // Заводская лаборатория. – 2009. – Т. 75. – № 5. – С. 32–36.
42. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С., Разва А.С., Некрасова К.В., Литвинов А.М., Глушко А.Ф., Кузнецов В.А.. Устойчивость обеспыливания воздуха инерционными аппаратами в аспирационных сетях конвейерных систем. // Цемент и его применение. – 2009. – № 1. – С. 17–19.
43. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Разва А.С. Расчетная модель концентрирования частиц в противоточном цилиндрическом циклонном аппарате. // Теоретич. основы хим. технологии. – 2011. – Т. 45. – № 3. – С. 321–328.
44. М.В. Василевский, Е.Г. Зыков, В.А. Полюшко, В.И. Романдин, А.С. Разва. Корректирующие оценки эффективности циклона фактором формы частиц // Материалы семнадцатой Всеросс. науч.-техн. конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность.» – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 265–268.
45. Василевский М.В., Романдин В.И., Разва А.С., Зыков Е.Г., Полюшко В.А.. Влияние аутогезионных свойств тонкодисперсных мате-

- риалов на характеристики фильтрующего слоя в пылеуловителе // *Материалы семнадцатой Всеросс. науч.-техн. конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность.»* – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 260–262.
46. Василевский М.В., Разва А.С., Романдин В.И., Зыков Е.Г. Оценки фактора связности дисперсной среды в процессах пневмотранспорта твердых частиц и обеспыливания воздуха. *Контроль. Диагностика*, 2011, специальный выпуск. С. 115–120.
  47. Василевский М.В. Практикум по методам защиты атмосферы от вредных выбросов: учебное пособие / М.В. Василевский, А.С. Разва; Томский политехнический университет. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 223 с.
  48. Василевский М.В., Волкова Д.В.. Безопасность установок конфекционирования в производстве гранулированного полиэтилена высокого давления // *Материалы восемнадцатой Всеросс. науч.-техн. конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность.»* – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 209–213.
  49. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Полюшко В.А., Романдин В.И., Разва А.С. Расчет дисперсного состава пыли в потоке газа по эффективности пробоотборного циклона // *Материалы восемнадцатой Всеросс. науч.-техн. конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность.»* – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 170–173.
  50. Василевский М.В., Романдин В.И., Зыков Е.Г. Оценки состояния дисперсной среды с несвязными частицами в установке поршневого пневмотранспорта // *Материалы восемнадцатой Всеросс. науч.-техн. конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность.»* – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 154–158.
  51. Василевский М.В., Романдин В.И., Зыков Е.Г., Полюшко В.А., Разва А.С. Метод определения характеристик слоя дисперсного материала на пористой фильтрующей перегородке // *Материалы восемнадцатой Всеросс. науч.-техн. конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность.»* – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 303–306.
  52. Василевский М.В., Романдин В.И., Зыков Е.Г., Полюшко В.А., Разва А.С. Характеристика потока с дисперсной фазой в вихревой камере // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика.* – 2013. – № 3(23). – С. 66–75.
  53. Вельшоф Г. Пневматический транспорт при высокой концентрации частиц перемещаемого материала. Пер. с нем. – М.: Колос, 1964. – 160 с.

54. Волчков Э.П., Кардаш А.П., Терехов В.И. Гидродинамика вихревой гиперболической камеры при наличии твердой фазы // Изв. СО АН СССР, 1984. № 10. Сер. техн. наук. Вып. 2, С. 90–98.
55. Воронин В.Н., Егоров В.М., Квеско Б.Б. Особенности процесса фильтрации при поршневом пневматическом транспорте. // Вопросы аэрогидромеханики и тепломассообмена в приложении к некоторым технологическим процессам. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1979. – С 90–96.
56. Воронин В.Н., Егоров В.М. Поршневой пневмотранспорт с малой скоростью. // Вопросы аэрогидромеханики и тепломассообмена в приложении к некоторым технологическим процессам. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981. – С. 112–124.
57. Воронин В.Н., Егоров В.М., Экспериментальное исследование особенностей трения тонкодисперсных сыпучих материалов // Вопросы аэрогидромеханики и тепломассообмена. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983. – С. 85–91.
58. Воронин В. Н. Исследование стабильности дисперсных потоков поршневой структуры применительно к работе пневмотранспортных установок: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / В.Н. Воронин; Томский государственный университет. – Томск : Изд-во ТГУ, 1996. – 19 с.
59. Втюрин Ю.Н., Михайлов Н.М. Работа пневмовинтовых и камерных насосов системы пневмотранспорта угольной пыли. // Электрические станции. – 1977. – № 1. – С. 16–20.
60. Втюрин Ю.Н. Пульсации давления и их устранение в трубопроводах дальнего пневмотранспорта угольной пыли. // Теплоэнергетика. – 1984. – № 6. – С. 48–53.
61. Гафнер Л.А., Бутковский В.А., Родюкова А.М. Основы технологии приема, хранения и переработки зерна. – М.: «Колос», 1975. – 400 с.
62. Гольдштик М.А. Вихревые потоки Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1981. – 366 с.
63. Григорьев А. М. Винтовые конвейеры / А. М. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
64. Гречко Н.Ф. Моделирование истечения сыпучего материала в бункере. // Теплоэнергетика. – 1977. – С. 15–17.
65. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588с.
66. Гячев Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах. – М.: Машиностроение, 1968.

67. Демиденко А.А. Рециркуляционные газовые потоки и пути их исследования для интенсификации работы сепарационных элементов пневматических аппаратов порошковой технологии // Вопросы прикладной гидроаэрогидромеханики и тепломассообмена. Томск: Изд.-во Томск. ун-та, 1989. – С. 170–177.
68. Dodonova I., Razva A.S., Vasilevsky M.V. , Zykov E.G. The Connectedness Effect of Dispersed Materials on Gas Dedusting Systems Efficiency The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST 2012 Tomsk Polytechnic University VOLUME I September 17-21, 2012. – P. 70–73.
69. Жужиков В.А. Фильтрование: Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1980. – 400 с.
70. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. – М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.
71. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.
72. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 432 с.
73. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов. – М.: Металлургия, 1978. – 288 с.
74. Золотарева, Н. К. Обоганительное оборудование : каталог-справочник / Н. К. Золотарева, Н. А. Карпекина; Росглавтяжмаш-снабсбыт при ВСНХ. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 164 с.
75. Зыков Е.Г., Василевский М.В. Устойчивость потоков в циклонных аппаратах пыле- и золоулавливающих систем. // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Материалы докладов 9-й всероссийской научно-технической конференции. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2003. – Т. 2. – С. 99–102.
76. Зыков, Е. Г. Очистка воздуха от аэрозольных частиц в установках пневмотранспорта тонкодисперсных материалов / Е. Г. Зыков, М. В. Василевский // Энергетика: экология, надежность, безопасность : материалы докладов девятой всероссийской научно-технической конференции, Томск, 3-5 декабря 2003. – Т. 2. – С. 103–105.
77. Зыков Е.Г., Василевский М.В. Измерение запыленности нестационарных потоков в узле обеспыливания пневмотранспортной установки // Энергетика экология, надежность, безопасность. Материалы докладов 9-й всероссийской научно-технической конференции. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2003. – Т. 2. – С. 105–108.
78. Зыков Е.Г., Разва А.С., Василевский М.В. Образование отложений в вихревых камерах // Материалы двенадцатой Всеросс. науч.-техн.

- конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность.» – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 315–318.
79. Зыков Е.Г., Разва А.С., Василевский М.В. Исследование характеристик инерционных пылеотделителей // Материалы двенадцатой Всеросс. науч.- техн. конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 348–353.
80. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов (подвод, отвод и равномерная раздача потока). – М.: Энергия, 1964. – 289 с.
81. Идельчик И.Е., Александров В.П., Коган Э.И. Исследование прамоточных циклонов системы золоулавливания ГРЭС. // Теплоэнергетика, 1968. – № 8. – С. 45–48.
82. Идельчик И.Е., Мальгин А.Д. Гидравлическое сопротивление циклонов НИИОГАЗ. // Промышленная энергетика, 1969. – № 8. – С. 45–48.
83. Идельчик И.Е. К вопросу о гидравлическом сопротивлении циклонов. // ИФЖ. – 1969. – Т. 16. – № 5. – С. 899–901.
84. Идельчик И.Е. Гидравлическое сопротивление циклонов, его определение, величина и пути снижения. // Механическая очистка газов/ НИИОГАЗ. М.: Машиностроение. 1974. – С. 135–159.
85. Калинушкин М.П. Пневмотранспортное оборудование. Справочник. Л.: Машиностроение, 1986. – 286 с.
86. Карнаушенко Л.И., Платонов П.Н. Критериальные уравнения сыпучести и слеживаемости сыпучих материалов при оптимизации процесса дозирования. // Технология сыпучих материалов – химтехника 86. Тезисы докладов, Белгород, 1986. – Ч. 2. – С. 60.
87. Кизин М.Г. Методы расчета и рекомендации по газовым циклонным аппаратам. – Владимир: Владимирский НИИ синтетических смол. – 1970. – 244 с.
88. Кирпичёв Е.Ф., Царькова А.А. Сравнительные испытания различных циклонов на стенде. // Теплоэнергетика. – 1957 – № 10.
89. Klinzing G.E., Risk F., Marcus R., Leung L.S. Pneumatic Conveying of Solid – Springer, 2010.
90. Кнорре Г.Ф. Теория топочных процессов. – М.: Госэнергоиздат, 1966.
91. Коновалов В.К., Яшкин В.В., Ермаков В.В. Автоматизированная система удаления и пневмотранспорта золы из бункеров электрофильтров. // Электрические станции, 2008. – № 2. – С. 26–30.
92. Коузов П.А., Иофинов Г.А. Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей для очистки вентиляционного воздуха. Л., ВНИИОТ, 1967. – 103 с.

93. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия, 1982. – 256 с.
94. Кропп Л.Д., Потапов О.П. Оптимальное расположение элементов в батарейном циклоне. // Теплоэнергетика. – 1980. – № 1. – С. 51–54.
95. Кузнецов И.Е., Шмат К.И., Кузнецов С.И. Оборудование для санитарной очистки газов: Справочник / Под общ. ред. И.Е. Кузнецова. – К.: Техника, 1989. – 304 с.
96. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и теплообмен в ограниченных вихревых потоках. – Новосибирск. ИТФ СО АН СССР, 1987. – 282 с.
97. Лебедев В.Д., Маслов В.Е., Ключин А.В., Лейкин В.З. Отработка и исследование конструкции делителя – концентратора пыли для блоков 500 МВт Экибастузской ГРЭС-2. // Теплоэнергетика. – 1985. – № 2. – С. 35–37.
98. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз. – 1959. – 699 с.
99. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.–Л.: Госуд. изд-во техн.- теоретич. литературы. – 1947. – 214 с.
100. Леусенко А.В. Скребковые конвейеры: Справочное пособие / А.В. Леусенко, Г.В. Высоцкий, Б.А. Эйдерман. – М.: Недра, 1993. – 221 с.
101. Лифшиц С.П. Высоконапорные дутьевые машины центробежного типа. Л., «Машиностроение» (Ленинг. отд-е), 1976. – 296 с.
102. Логачев А. П. Исследование процесса пылеобразования и оптического метода контроля запыленности газа при сушке угольного концентрата: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : Спец. 05.17.08 / А.П. Логачев; Томский политехнический институт ; науч. рук. В.М. Витюгин. – Томск, 1974. – 205 л
103. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
104. Малевич И.П., Серяков В.С., Мишин А.В. Транспортировка и складирование порошкообразных строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1984. – 184 с.
105. Максимов Б.К. Статическое электричество в промышленности и защита от него / Б.К. Максимов, А.А. Обух. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 95 с.
106. Малис А. Я. Пневматический транспорт сыпучих материалов при высоких концентрациях / А.Я. Малис. – М.: Машиностроение, 1969. – 184 с.

107. Мальгин А.Д. Очистка дымовых газов котлов, работающих на фрезерном торфе. // Электрические станции. – 1971. – № 2. – С. 32–34.
108. Мальгин А.Д. Аэродинамические исследования циклонного элемента батарейного циклона, работающего с отсосом и рециркуляцией газов. // Механическая очистка промышленных газов. – НИИОГАЗ, Машиностроение. – 1974. – С. 171–177.
109. Маслов В.Е. Пылеконцентраторы в топочной технике. – М.: Энергия, 1977. – 206 с.
110. Мацнев В.В., Ушаков С.Г. Эффективность прямоточных циклонов. // Теплоэнергетика. – 1976. – № 9. – С. 80–82.
111. Машины непрерывного транспорта: Отраслевой каталог. 13-92-08 / ЦНИИТЭИТЯЖМАШ. – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1992. – 112 с.
112. Машины и оборудование для шахт и рудников: Справочник / МГГУ. – 6-е изд. – М.: Изд-во Московского гос. горного ун-та, 2001. – 471 с.
113. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Наука, 1981. – 176 с.
114. Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов. ЗАО «НИПИОТСТРОМ». – Новороссийск 2000. – 28 с.
115. Механика контактных взаимодействий / Под ред. И.И. Воровича, В.М. Александрова. – М.: Физматлит, 2001. – 672 с.
116. Миклин Ю.А., Романков П.Г., Фролов В.Ф. Время пребывания сыпучего материала в аппарате циклонного типа. // Журн. прикл. химии. – 1969. – Т. 42. – вып. 5. – С. 1081–1084.
117. Минко В.А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов / В.А. Минко. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1981. – 176 с.
118. Михайлов Н.М. Влияние процессов, происходящих в пневмовинтовых насосах, на их производительность. // Теплоэнергетика. – 1975. – № 7. – С. 71–75.
119. Муштаев В.Н., Ульянов В.М., Тимонин А.С. Сушка в условиях пневмотранспорта. – М.: Химия, 1984. – 232 с.
120. Муштаев В.Н., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
121. Назмеев Ю. Г. Системы топливоподачи и пылеприготовления ТЭС: справочное пособие / Ю.Г. Назмеев, Г.Р. Мингалеева. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 480 с.

122. Назмеев Ю.Г. Системы золошлакоудаления ТЭС / Ю.Г. Назмеев. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 571 с.
123. Нейков О.Д. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков / О.Д. Нейков, И.Н. Логачев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgy, 1981. – 192 с.
124. Nekrasova K.V., Rasva A.S., Zikov E. G., Vasilevsky M.V. Estimation of Dust Cohesion for Analysis of Reliability of the Environmental Protective Systems from Dust Pollution.– The Third International Forum on Strategic Technologies, IFOST Novosibirsk-Tomsk, Russia, Session 6 - Environmental Protection and Conservancy, June 23-29, 2008, p. 660–662.
125. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий : в 2 ч. – СПб.: Профессионал, 2004-2006. – (Профессионал). Ч. 1 / Под ред. Г.М. Островского. – 2004. – 841 с.
126. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий: в 2 ч. – СПб.: Профессионал, 2004-2006. – (Профессионал). Ч. 2 / Г.М. Островский [и др.]. – 2006. – 916 с.
127. Обеспыливание промышленных газов / Э.М. Соколов, Н.И. Володин, О.М. Пискунов и др. – Тула: Гриф и К, 1997. – 376 с.
128. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности / Г.М. Островский. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.
129. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред / Г.М. Островский. – СПб.: Наука, 2000. – 359 с.
130. Офицеров А.С. Вторичные течения. – М.: Госстройиздат. – 1959. – 163 с.
131. Папоян Р.Л. Оборудование для охраны атмосферного воздуха от промышленной пыли : учебное пособие / Р.Л. Папоян; Московский государственный горный университет. – М.: Изд-во Московского гос. горного ун-та, 2004. – 121 с.
132. Патент РФ № 1423478 Установка для пневмотранспорта сыпучих материалов /Смоловик В.А., Дмитриев О.Н., Мельник Л.Ф.// Б.И. 1988, № 4.
133. Патент РФ № 2200064 Устройство для отделения сыпучего материала от транспортирующего газа / Никульчиков В.К.; Василевский М.В.; Смоловик В.А.; Ледовских А.К.; Косарев А.Е. // БИ 2003, № 10.
134. Патент РФ № 2217367 Установка для пневматического транспортирования сыпучих материалов из области пониженного давления

- в область повышенного давления / Никульчиков В.К., Романдин В.И., Ледовских А.К., Лазарчук В.В. // 2003, Б.И. № 33.
135. Патент РФ № 2250798 Способ очистки воздуха от аэрозольных частиц в установках напорного пневмотранспорта дисперсных материалов: / Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С. // Б.И. 2005, № 12.
  136. Патент РФ № 2325953 Пылеотделитель / М.В. Василевский, Е.Г. Зыков, А.С. Разва, В.С. Логинов.// Б.И. 2008, № 16.
  137. Патент РФ № 2366516 Батарейный циклон /Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С., Разва А.С., Некрасова К. // Б.И. 2009, № 25.
  138. Патент РФ № 2392605 Способ экспресс– индикации связности дисперсных материалов / Василевский М.В., Некрасова К.В., Разва А.С., Зыков Е.Г. //БИ 2010, № 17.
  139. Патент РФ № 2397800 Пылеотделитель: / Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С., Разва А.С., Некрасова К.В., // Б.И. 2010, № 24,.
  140. Пертен Ю. А. Пневмотранспортные машины: обзор / Ю.А. Пертен, М.М. Шапунов; Научно-исследовательский институт информации по тяжелому, энергетическому и транспортному машиностроению. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1968.
  141. Пневмотранспортные установки: справочник / А.А. Воробьев [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1969. –200 с.
  142. Подъемно-транспортное оборудование: Номенклатурный каталог. 01-02 / ЦНИИТЭИТЯЖМАШ; сост. и ред. А.В. Авиев, Н.А. Ванюков. – М.: Изд-во ЦНИИТЭИтяжмаш, 2002. – 104 с.
  143. Полиэтилен высокого давления: научно-технические основы промышленного синтеза / А.В. Поляков, Ф.И. Дунтов, А.Э. Софиев, Н.Я. Тумаркин, Ю.Н. Кондратьев, Н.М. Домарева, А.Л. Гольденберг, В.М. Кобяков, В.С. Зернов. – Л: Химия: Ленингр. отд-ние, 1988. – 199 с.
  144. Потапов О.П, Кропп Л.Д. Батарейные циклоны. – М.:Энергия, 1977. –152 с.
  145. Производство цемента по сухому способу / Под ред. Ф.Г. Банита. – М.: Стройиздат, 1971. – 204 с.
  146. Разва А.С., Некрасова К.В., Зыков Е.Г., Василевский М.В. О трансформации дисперсной фазы в циклонном пылеуловителе // Материалы тринадцатой Всеросс.науч.-техн. конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность.» – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 241–244.

147. Разва А.С., Некрасова К.В., Зыков Е.Г., Василевский М.В. Распределение давлений в циклонном двухфазном потоке // Материалы четырнадцатой Всеросс. науч.-техн. конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность.» – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 146–150.
148. Разумов И.М., Сычёва С.М. Циклонные сепараторы, конструкции и методы их расчёта. – М.: ЦБТИ «ГИПРОНЕФТЕМАШ», 1961. – 72 с.
149. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов / И.М. Разумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1972. – 239 с.
150. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. Пер с англ. – М.: Химия, 1987. – 280 с.
151. Резник В.А., Мацнев В.В. Сравнительные характеристики элементов батарейных циклонов. – Теплоэнергетика. – 1971. – № 12. – С. 23–26.
152. Резник В.А., Лузин П.М., Прокофичев Н.Н. Новый батарейный циклон для улавливания пыли каменных и бурых углей. – Теплоэнергетика. – 1988. – № 9. – С. 14–18.
153. Розанов О.Ю., Смоловик В.А., Трушников А.В. Экспериментальное исследование работы камерного питателя с аэровибромеханической системой стабилизации истечения // Вопросы аэрогидромеханики и тепломассообмена в приложении к некоторым технологическим процессам. Томск: Изд-во Томск, ун-та, 1979.
154. Розанов О.Ю., Смоловик В.А. О физических основах стабилизации напорного движения плотного слоя сыпучего материала в каналах. / Вопросы прикладной аэродинамики и тепломассообмена – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983. – С. 76–81.
155. Романдин В.И., Танков Н.К., Грязев А.В. Ручной пневмоперегрузчик зернистых и пылевидных материалов // Доклады IV Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 2008. – С. 317–318.
156. Романдин В.И. К вопросу об анализе эффективных напряжений в слое сыпучего материала при напорном и вакуумном пневмотранспорте // Доклады VI Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 2008 г. – С. 387–389.
157. Романдин В.И. Технологический пневмотранспорт токсичных и экологически опасных сыпучих материалов. // Тезисы докладов

- Всероссийской научной конференции «Фторидные технологии». Изд. ТПУ, г. Томск, 2009. – С. 19.
158. Романдин В.И., Василевский М.В. Перспективы развития пневматического транспорта на основе использования эжекторов с кольцевыми соплами. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Сборник материалов конференции. Томск: Томский государственный университет, 2011. – С. 369–370.
  159. Романдин В.И., Василевский М.В. Анализ состояния дисперсной фазы в поршнеобразных структурах систем пневмотранспорта. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Сборник материалов конференции. Томск: Томский государственный университет, 2011. – С. 367–368.
  160. Росляк А.Т., Зятиков П.Н., Муштаев И.В., Мизинов А.Ю., Дедков Б.В., Стрелкова Л.Д., Морозов И.В., Василевский М.В., Черников А.И. Применение метода воздушно-центробежной сепарации частиц в производстве поливинилхлорида. – М., Химическая промышленность, 1989. – № 3. – С. 209–212.
  161. Росляк А.Т., Бирюков Ю.А., Пачин В.Н. Пневматические методы и аппараты порошковой технологии.- Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1990. – 272 с.
  162. Руководящие технические материалы. Пневмотранспорт сыпучих материалов (гранулированных и порошкообразных) взвесью, с поршневой структурой и сплошным потоком материала // МХП СССР. – Томск: из-во Томск. ун-та. 1987. –188 с.
  163. Сабуров Э.Н., Карпов С.В., Осташев С.И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах. – Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. –286 с.
  164. Севастьянов А.Т. Появление и пути ликвидации поршнеобразования при пневмотранспорте плотным слоем. // Вопросы прикладной аэрогидромеханики и тепломассообмена – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983. – С. 69–74.
  165. Систер В.С., Муштаев В.И., Тимонин А.С. Экология и техника сушки дисперсных материалов. – Калуга: Изд-во Н.Бочаровой, 1999. – 670 с.
  166. Смоловик В.А., Егоров В.М., Мельник Л.Ф. Импульсный пневмотранспорт гранулированных материалов. // Вопросы прикладной аэродинамики и тепломассообмена – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983. – С. 92–95.

167. Смоловик В.А., Росляк А.Т. Расчет низкоскоростного пневмотранспорта при высокой концентрации сыпучего материала // Теор. основы химич. технологии. – 2004. – Т 38. – № 2. – С. 202–208.
168. Смоловик В.А., Росляк А.Т. Влияние основных свойств сыпучих материалов на характеристики низкоскоростного пневмотранспорта. // Теор. основы химич. технологии. – 2007. – Т. 41. – № 6. – С. 630–633.
169. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. – Новосибирск: ВО «Наука», 1992. – 301 с.
170. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 350 с.
171. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 176 с.
172. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. Пер. с англ. – М.: Изво «Мир». – 1971. – 536 с.
173. Спиваковский А.О. Транспортирующие машины: учеб. пособие для машиностроительных вузов / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.: ил.
174. Справочник по пыле- и золоулавливанию // Под ред. М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. Под общей ред. А.А. Русанова – 2 изд. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
175. Страус В. Промышленная очистка газов: Пер с англ. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
176. Тадольдер Ю.А. Об изнашивании металлов при повышенных скоростях струи. – Труды Таллинского политехнического института. – 1975. – № 381. – С. 83–85.
177. Тарасов Ю. Д. Загрузочные и разгрузочные устройства ленточных конвейеров / Ю. Д. Тарасов. – М.: Недра, 1995. – 202 с.
178. Теверовский Е.Н., Дмитриев Е.С. Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
179. Ter Linden A.J. Investigation Into Cyclone Dust Collectors // Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, vol. 160, 1949, p. 233.
180. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета технологического и природоохранного оборудования: справочник / А.С. Тимонин; Московский государственный университет инженерной экологии. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2001.
181. Троянкин Ю.В., Балувев Е.Д. Аэродинамическое сопротивление и совершенство циклонной камеры. // Теплоэнергетика, 1969. – № 6. – С. 29–32.

182. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
183. Указания по проектированию аспирационных установок предприятий по хранению и переработке зерна и предприятий хлебопекарной промышленности. Утверждены приказом Минсельхозпрода России от 26.03.98 № 169. Дата введения 1998-05-01.
184. Урбан Я. Пневматический транспорт / Пер. с чешского. – М.: Машиностроение, 1967. – 229 с.
185. Урьев Н.Б., Семенов В.А., Калинин Н.Н. Об определении структурно механических свойств высокодисперсных гигроскопичных порошков // Колл. журн. – 1975. – Т. 37. – вып. 5 – с 1021–1022.
186. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
187. Успенский В.А., Кузнецов Ю.М. Струйные вакуумные насосы. – М.: Машиностроение, 1973 г. 144 с.
188. Фильтры для улавливания промышленных пылей / М.Г. Мазус, А.Д. Мальгин, М.Л. Моргулис. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
189. Фортье А. Механика суспензий. Пер. с франц. Мир, 1971, 264 с.
190. Фукс Н.А. Влияние пыли на турбулентность потока // ЖТФ.1951, вып. 6, С. 704–707.
191. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.
192. Циклоны НИИОГАЗ Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. – Ярославль, 1970 – 95 с.
193. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высш. шк., 1983. – 288 с
194. Шваб В.А. К вопросу обобщения полей скорости турбулентного потока в циклонной камере // Инж.- физич. журн. – 1963. – Т. 6. – № 2. – С. 102–108.
195. Шваб В.А. Аэромеханические методы в технологии производства порошковой продукции. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. – 161 с.
196. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Пер. с немецкого. М., Наука, 1974. –711 с.
197. Штокман Е.А Очистка воздуха. – М.: Изд-во АСВ,1999. – 320 с.
198. Штым А.Н. Аэродинамика циклонно-вихревых камер. – Владивосток: Дальневосточный ун-т, 1985. –200 с.
199. Экотехника: Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов / Холдинговая группа «Кондор Эко – СФ

- НИИОГАЗ»; Под ред. Л.В. Чекалова. – Ярославль: Русь, 2004. – 424 с.
200. Энергетическое оборудование для тепловых электростанций и промышленной энергетики. Ч. 1: номенклатурный каталог: 12-92-03 / Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по тяжелому и транспортному машиностроению (ЦНИИТЭИТЯЖМАШ). – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1992. – 180 с. – (Энергетическое машиностроение).
201. Энергетическое оборудование для тепловых электростанций и промышленной энергетики. Ч. 2: номенклатурный каталог: 22-96 / Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по тяжелому и транспортному машиностроению (ЦНИИТЭИТЯЖМАШ). – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1996. – 96 с. – (Энергетическое машиностроение).
202. Янковский С.С. Средства измерения массы и дисперсного состава частиц, взвешенных в газовом потоке. Обзорная информация: серия ХМ–IV –ЦНИТИ Химнефтемаш. М., 1990.
203. <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-44/16.htm>.
204. <https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:xB0rm9oea9wJ:www.metaltek.ru/files/pneumotransport>.
205. <http://www.pole-news.ru/news-agro/news/tech-news/26-hi-tech/481-vliyanie-skorostnogo-rezhima-raboty-norij-na-ikh-moshchnostnye-pokazateli>.

Научное издание

ВАСИЛЕВСКИЙ Михаил Викторович  
РОМАНДИН Владимир Иванович  
ЗЫКОВ Евгений Геннадьевич

**ТРАНСПОРТИРОВКА И ОСАЖДЕНИЕ  
ЧАСТИЦ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ  
ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Монография

**Издано в авторской редакции**

Научный редактор *доктор технических наук,  
профессор А.И. Сечин*

Компьютерная верстка *В.Д. Пяткова*  
Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

Подписано к печати 10.12.2013. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл.печ.л. 16,75. Уч.-изд.л. 15,15.  
Заказ 1254-13. Тираж 500 экз.

---

**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)