

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА СРЕДСТВ  
ТРАНСПОРТА. СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И ТЕХНИЧЕ-  
СКИЙ ОСМОТР АВТОМОБИЛЕЙ**

УДК 622.686

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ СО СТЕНКАМИ ОТВОДОВ  
ПНЕВМОТРАНСПОРТНОГО ТРУБОПРОВОДА**

**И.И. Антоненко, доцент, кт.н., ГВУЗ**

**«Криворожский государственный педагогический университет»**

***Аннотация.** Установлен характер движения аэросмеси в отводах пневмотранспортного трубопровода. Экспериментально определены механические нагрузки на стенки и энергозатраты в отводах разного радиуса закругления. Обоснован оптимальный радиус закругления отводов пневмотранспортного трубопровода. Предложена новая конструкция отвода пневмотранспортного трубопровода.*

***Ключевые слова:** пневмотранспорт, отвод, параметры взаимодействия, оптимизация радиуса закругления.*

**ВЗАЄМОДІЯ ЧАСТИНОК ЗІ СТІНКАМИ ВІДВОДІВ  
ПНЕВМОТРАНСПОРТНОГО ТРУБОПРОВОДУ**

**І.І. Антоненко, доцент, к.т.н., ДВНЗ**

**«Криворізький державний педагогічний університет»**

***Анотація.** Установлено характер руху аеросуміші у відводах пневмотранспортного трубопроводу. Експериментально визначені механічні навантаження на стінки й енерговитрати у відводах різного радіуса закруглення. Обґрунтовано оптимальний радіус закруглення відводів пневмотранспортного трубопроводу. Запропоновано нову конструкцію відводу пневмотранспортного трубопроводу.*

***Ключові слова:** пневмотранспорт, відвід, параметри взаємодії, оптимізація радіуса закруглення.*

**INTERACTION OF PARTICLES WITH WALLS OF WITHDRAWAL  
OF THE PNEVMOTRANSPORT PIPELINE**

**I. Antonenko, assistant professor, cand. eng. sc., GHEI**

**«Kryvyi Rih State Pedagogical University»**

***Abstract.** The character of the movement aero mix in pnevmotransport pipeline's withdrawal is established. The mechanical loads on the walls and energy consumption in withdrawal of different rounding radius are experimentally defined. The optimum radius of rounding withdrawal of the pnevmotransport pipeline is founded. The new structure of pnevmotransport pipeline's withdrawal is offered.*

***Key words:** pnevmotransport, branch, interaction parameters, optimization of rounding radius.*

**Введение**

В большинстве случаев транспортирование сыпучих материалов на промышленных предприятиях наиболее эффективно выпол-

няется с помощью пневмотранспортных установок [1]. Герметичность пневмопровода позволяет исключить потери материала и загрязнение окружающей среды при высоком уровне автоматизации транспортных опера-

ций и низких капитальных затрат. В условиях существующей застройки предприятий часто пневмотранспорт оказывается единственным возможным транспортным средством между цехами по причине большого количества расположенных между ними различных коммуникаций и сооружений.

Основными недостатками этого прогрессивного вида транспорта является износ пневмопровода на участках поворота (отводах), а также повреждение транспортируемого материала, обусловленное интенсивным взаимодействием частиц со стенками отводов.

При проектировании пневмотранспортных установок стремятся обеспечить, по возможности, прямолинейность транспортного трубопровода. Однако полный отказ от отводов невозможен. Изменение направления потока позволяет увеличить плотность застройки на генплане сооружений и объектов, а также отказаться от промежуточных перегрузок материала, неизбежных при других видах транспорта.

Учитывая, что отказ от отводов в сетях пневмотранспорта промышленный предприятий практически невозможен, необходимо уменьшить интенсивность взаимодействия частиц транспортируемого материала со стенками поворота пневмопровода.

Отсутствие достаточных экспериментальных и теоретических данных по характеру движения аэросмеси в отводах, а также различные рекомендации для выбора их геометрических параметров, привели к необходимости детально изучить этот вопрос.

#### **Анализ исследований и публикаций**

Одним из первых теоретический анализ процесса движения частицы в отводе сделал проф. К. И. Страхович [2]. Он считает, что частица продолжает свое прямолинейное движение до встречи с внешней стенкой отвода. В результате абсолютно упругого удара о стенку частица отражается и вновь летит прямолинейно до встречи со стенкой трубы. То есть частицы отвода движутся скачкообразно. Этой же гипотезы о скачкообразном движении частиц в отводе придерживаются Зеглер Г., Шредер П., [3], Круглов А. Н. [4], Дорфман М. Х. [5].

Более поздние работы многих исследований по пневматическому транспорту доказывают, что скачкообразная схема движения одиночных частиц в отводе не может быть распространена на случай движения в отводе массы материала. Бурсиан В. Р. [6], Урбан Я. [7] и Зайцев А. Ф. [8] утверждают, что при входе аэросмеси в отвод под действием центробежной силы нарушается структура потока, вся масса частиц отбрасывается сразу к стенке и уплотненным слоем перемещается вдоль всего отвода.

К этой же группе работ можно отнести исследования, проведенные Ф. Г. Зуевым при пневматической транспортировке зерна [9]. Он доказывает, что трению материала в отводе предшествует удар частиц при встрече с его внешней стенкой. Точка встречи частицы материала со стенкой трубопровода определяется величиной угла между радиусом вектором, проведенным из центра кривизны отвода к началу отвода и к месту встречи частицы со стенкой трубопровода.

Автором рассматривается удар частицы как не вполне упругий, а угол отражения таков, что частица после удара скользит вдоль стенки отвода. Таким образом, Зуев Ф. Г. характер взаимодействия транспортируемого материала со стенкой отвода разделяет на два вида – удар и трение.

Такая схема взаимодействия зерна со стенками отвода подтверждена исследованиями К. Р. Реппа [10].

Все вышеперечисленные работы посвящены аэродинамическим исследованиям отводов. Поэтому авторы, изучая характер движения аэросмеси, не полностью исследовали вопрос взаимодействия материала со стенкой отвода, для решения которого необходимы специальные исследования.

Специальной работы по изучению взаимодействия и повреждения тех или иных материалов в отводах систем пневмотранспорта в доступной нам литературе не обнаружено. Однако этой области исследований касается И. Г. Неборак [11], исследуя взаимодействие зерна со стенками вертикального пневмотранспорта, рассматривая вопросы взаимодействия и повреждения зерна в криволинейных каналах пневмопровода. И. Г. Неборак также подтверждает гипотезу

об ударном входе материала и последующем трении частиц в отводе.

Рассматривая далее влияние геометрических параметров отводов на процессы взаимодействия материала со стенкой пневмопровода, он приходит к выводу, что основным параметром отвода, влияющим на повреждение транспортируемого материала, является угол встречи. Так как угол встречи уменьшается с увеличением радиуса кривизны отвода, то рекомендуется применять отводы с радиусом закругления  $8D$ , где  $D$  – диаметр трубопровода.

Следует отметить, что некоторые специалисты рекомендуют использовать отводы с радиусом  $R = (5-8)D$  [12; 13]. Другие высказывают мнение о необходимости использования отводов с радиусом кривизны  $R = 20D$  [14].

#### Постановка целей и задач статьи

Анализ выполненных исследований не позволяет точно установить характер взаимодействия частиц материала со стенками отводов пневмотранспортных систем. Специальной работы по оптимизации конструктивных параметров отводов пневмопроводов не проведено. Имеющиеся немногочисленные и противоречивые рекомендации величины радиуса закругления отвода основаны, главным образом, на аэродинамических исследованиях и опыте эксплуатации пневмотранспортных установок.

Целью данной работы является раскрытие основных зависимостей и явлений, происходящих при взаимодействии частиц материала со стенками колен-отводов, что позволит обосновано подойти к выбору оптимальной геометрии и конструкции участков поворота пневмопровода.

#### Изложение материала и результатов исследований

Экспериментальные исследования проводились на полупромышленном стенде. В качестве источника сжатого воздуха использовалась турбовоздуходувка ТВ 80. Транспортный трубопровод с внутренним диаметром 250 мм имел горизонтальный участок длиной 20 м, к концу которого присоединялись отводы с разными радиусами закругления равными  $2D$ ,  $5D$ ,  $8D$ ,  $11D$ , где  $D$  – диаметр тру-

бопровода. Верхние стенки отводов были изготовлены из прозрачного оргстекла, что позволило изучить с помощью скоростной киносъемки камерой СКС-ИМ характер движения аэросмеси в отводах.

В результате анализа киноматериалов установлена общая картина движения аэросмеси в отводах. Характер взаимодействия частиц транспортируемого материала со стенкой отвода можно разделить на два вида: удар и трение.

При входе в отвод частицы материала по инерции сохраняют прямолинейное направление движения до встречи со стенкой. В результате удара о преграду и взаимных столкновений друг с другом частицы материала под действием центробежной силы прижимаются к внешней стенке отвода и в дальнейшем скользят вдоль нее, см. рис. 1. На рис. 1 приведена схема удара транспортируемых частиц о стенку поворота пневмопровода (отвода). Стенка отвода представлена в виде кривой второго порядка, имеющей радиус кривизны:

$$r = R + D/2, \text{ м}$$

где  $R$  – радиус закругления отвода, м;  
 $D$  – диаметр пневмопровода, м.

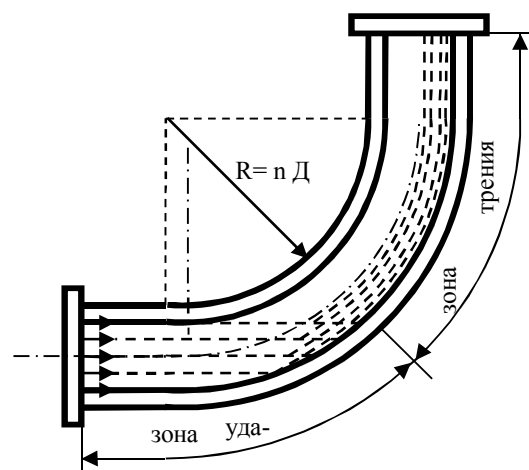


Рис.1. Характер движения транспортируемого материала в отводе

Важной динамической характеристикой ударного процесса является величина углов встреч. Из рис. 2 видно, что угол встречи (удара) равен углу, заключенному между радиусами – векторами, проведенными из центра кривизны в точку удара и начало криво-

линейного канала. Угол встречи можно определить из соотношения

$$\cos \alpha = R_r/R + D/2,$$

где  $R_r$  – расстояние частицы от центра закругления в момент ее входа в отвод, м.

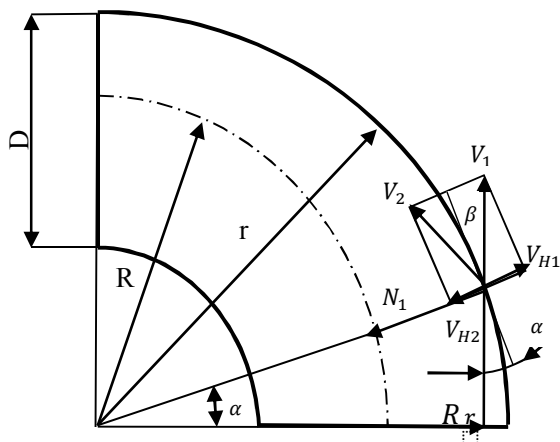


Рис 2. Схема удара частиц о стенку отвода пневмопровода

Таким образом, удар частицы о стенку отвода произойдет под углом, град

$$\alpha = \arccos R_r/R + D/2$$

Радиус закругления отвода в несколько раз превышает его диаметр  $R = nD$ , где  $n$  – относительный радиус закругления отвода.

Учитывая также, что поток трансформируемых частиц имеет центр масс на оси пневмопровода, когда  $R_r = R$ , угол удара будет равен

$$\alpha = \arccos 2n / (2n + 1), \text{ град.}$$

Зависимость угла удара от относительного радиуса закругления отвода иллюстрируется на рис. 3.

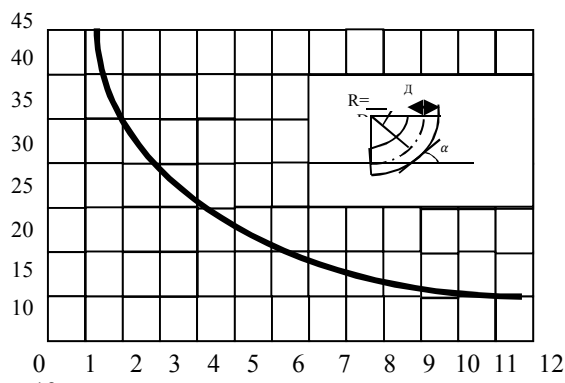


Рис 3. Зависимость угла удара от относительного радиуса закругления отвода

Из графика, приведенного на рис. 3 видно, что углы удара частиц при входе в отвод уменьшается при увеличении радиусе кривизны до  $8D$ , а в дальнейшем остаются практически постоянными. Это позволяет в качестве оптимального выбрать радиус кривизны отвода равными  $8D$ . Оптимизация радиуса кривизны отвода позволит свести к минимуму ударные нагрузки, действующие в отводе.

Силовое давление материала на стенки отводов определялось с помощью датчиков давления ДД-10, электрические сигналы с которых передавались на усилитель УТС-12/35-1 и затем на шлейфный осциллограф Н041.2-3. Эксперименты проводили при скорости воздуха  $38$  м/с и концентрации аэросмеси  $4$  кг/кг. Обработка осциллограмм позволила определить величину реакции стенки отводов различного радиуса закругления, см. рис.4.

При математической обработке опытных данных получены следующие эмпирические зависимости для реакции стенки отвода в зоне удара и зоне трения

$$N_y = c \cdot \sin \arccos \frac{2n}{2n+1} n,$$

$$N_T = \frac{g_0 n}{(2n+1)^2} n,$$

где  $c$ ,  $g_0$  – опытные коэффициенты, зависящие от режима пневмотранспортирования и физико-механических свойств материала;  $n = R/D$  – относительный радиус закругления отвода.

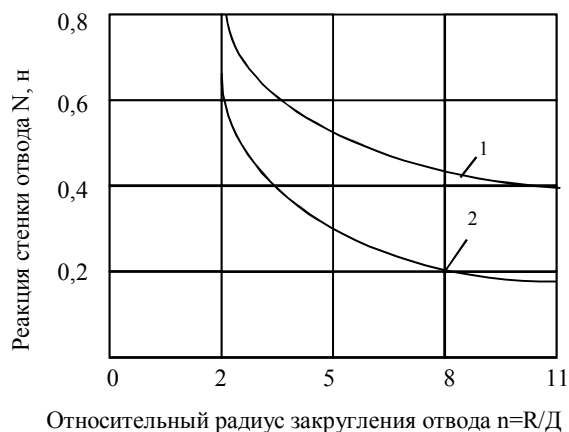


Рис 4. Зависимость реакции стенки отвода от радиуса закругления: 1 – в зоне удара, 2 – в зоне трения

Как показали исследования, силовое давление материала на стенку отвода в зоне удара существенно превышает по величине аналогичный показатель для зоны трения и поэтому является определяющим при выборе оптимального радиуса закругления отвода. Из графика на рис. 4 видно, что ударные нагрузки существенно снижаются при увеличении радиуса отвода до  $8D$ , а в дальнейшем практически не изменяются. При этом величина нагрузки на стенку отвода с радиусом закругления  $5D$  в зоне трения остается меньше величины нагрузки в зоне удара отвода с радиусом закругления  $8D$ .

Для окончательного решения вопроса оптимизации геометрических параметров отводов дополнительно проводились замеры потерь давления (энергии) сжатого воздуха в отводах разного радиуса закругления с помощью жидкостных U-образных манометров.

Результаты определения энергозатрат в отводах с радиусами закругления  $2-11D$  приведены в таблице 1.

Как видно из табл. 1, наименьшую энергоемкость имеют отводы с радиусом закругления в диапазоне  $5-8D$ .

С точки зрения удобства проектирования и эксплуатации пневмотранспортных установок желательно применение компактных отводов с небольшим радиусом закругления, поскольку всегда существуют местные условия накладывающие ограничения на конфигурацию и габариты трассы.

Таблица 1 Потери давления в отводах

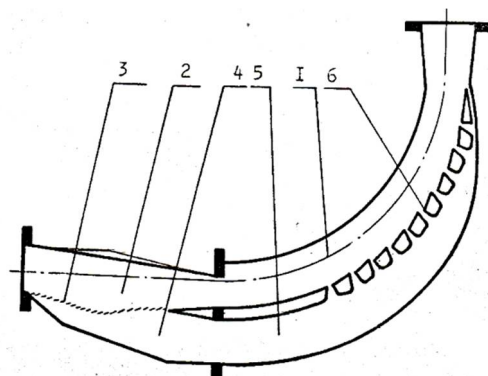
Относительный радиус закругления отвода, $n=R/D$	2	5	8	11
Потери давления в отводе, кПа	3,92	2,94	2,96	3,98

Отсюда следует, что более предпочтительными являются отводы с радиусом закругления  $5D$ . Однако, как установлено выше, для устранения интенсивных ударных нагрузок радиус закругления отвода должен быть не менее  $8D$ .

Повреждения движущегося по внешней стенке отвода материала в зоне трения зависит от величины центробежной силы и длины участка трения. С увеличением радиуса отвода центробежная сила уменьшается, но

возрастает длина участка трения. Кроме того, всегда существуют местные условия, накладывающие ограничения на конфигурацию и габариты трассы. Таким образом, увеличение радиуса не может быть беспредельным и не является эффективным мероприятием по устранению повреждения материала в процессе пневмотранспортирования.

Для уменьшения повреждения материала в зоне трения предлагается часть транспортирующего воздуха использовать для отклонения материала от внешней стенки отвода. Схема такой конструкции отвода пневмотранспортного трубопровода показана на рис. 5.



1 – основной канал; 2 – диффузорно-конфузорный переходник; 3 – жалюзийная решетка; 4 – расширительная камера; 5 – обводной воздуховод; 6 – щелевые сопла.

Рис.5. Схема отвода пневмопровода с поддувом воздуха

Предлагаемое устройство состоит из установленного перед основным каналом 1 диффузорно-конфузорного переходника 2, сообщаемого через щели жалюзийной решетки 3 с расширительной камерой 4, которая имеет отверстие для присоединения обводного воздуховода 5, с установленными на его выходном конце щелевыми соплами 6. Поворот транспортируемого материала в трубопроводе осуществляется следующим образом: поток сжатого воздуха, постепенно расширяясь, заполняет пространство расширительной камеры, проходя при этом по щелям жалюзийной решетки.

Через обводной воздуховод и специальные сопла, позволяющие при данном напоре сохранить расход и увеличить скорость истечения, сжатый воздух проходит в зону поворота материала и образует прослойку между

потоком транспортируемого материала и внешней стенкой поворота транспортного трубопровода. Для отбора и пропуска по обводному воздуховоду достаточного количества сжатого воздуха и эффективного отклонения материала от внешней стенки основного канала отвода, поперечные сечения щелей жалюзийной решетки, как и сечения обводного воздуховода выполнены равными, а выходного конца диффузорно-конфузорного канала и щелевых сопел меньшими в 1,5 раза чем у основного канала транспортного трубопровода. Данная конструкция участка поворота пневмопровода признана изобретением [15].

Отвод с поддувом воздуха может применяться в сетях пневмотранспорта технологической щепы при производстве бумаги, а также для предотвращения повреждения зернопродуктов в пищевой промышленности.

### Выводы

На основании результатов исследований можно утверждать, что оптимальным является переменный радиус закругления отвода: в зоне удара – 8Д, а в зоне трения – 5Д, где Д – диаметр пневмопровода. Использование рекомендуемых отводов переменного радиуса кривизны позволит увеличить срок их службы и уменьшить измельчение транспортируемого материала. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание опытного образца отвода с поддувом воздуха.

### Литература

1. Успенский В. А. Пневматический транспорт / В. А. Успенский – Свердловск : Metallurgizdat, 1959. – 229 с.
2. Страхович К. И. Основы теории и расчёта пневматических транспортных установок / К. И. Страхович – Москва : ОНТИ, 1934. – 112 с.
3. Зеглер Г. Транспортирование зерна пневматическим способом / Г. Зеглер, П. Шредер – Харьков : ГОНТИ, 1937. – 151 с.
4. Круглов А. Н. Пневматический транспорт зерна и его отходов / А. Н. Круглов. – Москва: Заготиздат, 1944. – 127 с.
5. Дорфман М. Х. Пневматический транспорт зерна и продуктов его переработки / М. Х. Дорфман. – Москва : Хлебоиздат, 1960. – 222 с.
6. Бурсиан В. Р. Пневматический транспорт на предприятиях пищевой промышленности / В. Р. Бурсиан – Москва : Пищепромиздат, 1960. – 217 с.
7. Урбан Я. Пневмотранспорт / Я. Урбан – Москва : Машиностроение, 1967. – 256 с.
8. Зайцев А. Ф. Аэродинамические исследования отводов в системах пневмотранспорта измельченной древесины : Автореф. дис... к-та тех. наук / А. Ф. Зайцев. – Ленинград, 1970. – 24 с.
9. Зуев Ф. Г. Исследование сопротивлений отводов при пневматической транспортировке зерна и продуктов его переработки : Дис.... к-та тех. наук / Ф. Г. Зуев. – Москва, 1961. – 200 с.
10. Репп К. Р. Исследование гидравлических сопротивлений колен и отводов при пневмотранспорте зерна и зернистых материалов : Дис.... к-та тех. наук / К. Р. Репп. – Барнаул, 1971. – 132 с.
11. Неборак И. Г. Исследование взаимодействия твердых частиц со стенками вертикального пневмотранспортёра : Автореф. дис... к-та тех. наук / И. Г. Неборак. – Москва, 1971. – 27 с.
12. Коробов В. В. Пневматический транспорт и погрузка щепы / В. В. Коробов. – Москва : Лесная промышленность, 1974. – 176 с.
13. Дзязио А. М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях / А. М. Дзязио. – Москва : Заготиздат, 1961. – 327 с.
14. Калинушкин Н. П. Пневматический транспорт в строительстве / Н. П. Калинушкин, Е. З. Орловский, И. С. Сегаль. – Москва : Стройиздат, 1961. – 162 с.
15. Антоненко И. И. Пневмотранспортный трубопровод для сыпучих материалов / И. И. Антоненко, Н. Е. Новиков, А. В. Житков, В. И. Беспалов // А. С. 816912 (СССР) // Бюллетень изобретений. – 1981. – № 12. – С. 20.

Рецензент: А.А. Тропина, профессор, д.т.н., ХНАДУ.