

ному на горизонті водовідливу  $Q_{нас}$ , коефіцієнт корисної дії насоса  $\eta_{нас}$ , еквівалентний опір трубопроводу на горизонті водовідливу  $R_{тр}$ , кількість паралельно працюючих насосів на горизонті водовідливу  $N_{пр}$ , споживана електрична потужність одного двигуна на горизонті водовідливу  $P_{нас}$ ;  $V_{вод}$  – об'єм водозбірника на горизонті водовідливу,  $m^3$ .

Дана модель описує будь який погоризонтний шахтний водовідлив, що дозволяє застосовувати її для вже існуючих шахт, а також для проектування нових. Параметри математичної моделі погоризонтного шахтного водовідливу поділяються на два типи: нерегульовані  $Q_{пр}$  параметри, під які необхідно підлаштувати режими роботи споживачів, та регульовані  $Q_{под}$ ,  $V_{вод}$  параметри, які можна змінювати для досягнення мінімальних витрат на електроенергію.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Визначена загальна модель погоризонтного шахтного водовідливу дає можливість змодельовати режими роботи водовідливу, визначити можливий потенціал регулювання водовідливом, а також визначити заходи для покращення обладнання (заміна насосів, дооснащення їх, збільшення водозбірника) що призведе до більшої економії витрат на електроенергію.

Аналіз роботи системи шахтного водовідливу для зниження витрат на електроенергію необхідно: провести вибір сукупності ефективного обладнання, визначити оптимальний об'єм водозбірника, сформувані ефективні режими електричних споживачів.

#### Список літератури

1. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А. В. Праховник, В. П. Розен, В. В. Дегтярев // Москва: «Недра», 1985. – 232 с.
2. Тарифы на электрическую энергию (кроме населения) [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <https://kyivenergo.ua/ru/ee-company/tarifi>.
3. Роздрібні тарифи на електроенергію для непобутових споживачів [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.nerc.gov.ua/?id=29658>.
4. Данильчук Г. И. Автоматизация электропотребления водоотливных установок / Г. И. Данильчук, С. П. Шевчук, П. К. Василенко // Киев: «Техніка», 1981. – 102 с.
5. Попов В. М. Рудничные водоотливные установки / В. М. Попов // Москва: Недра, 1972. – 304 с.
6. Синчук О. Н. Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография / И.О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко; под редакцией доктора техн. наук, профессора О.Н. Синчука // Кременчуг: Изд. ЧП Щербатых А.В., 2015. – 296с.
7. Хронусов Г. С. Формирование эффективных режимов электропотребления промышленных предприятий / Г. С. Хронусов // Екатеринбург: УГГГА, 1998. – 340 с.
8. Правила безпеки у вугільних шахтах [Електронний ресурс]. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0398-10>.
9. Стожков Д. С. Обоснование зависимости затрат на электропривод насосных агрегатов от высоты ступени в многоступенчатом шахтном водоотливе / Д. С. Стожков // Известия УГГУ. – 2013. – № 1 (29). – С. 59-62.
10. Тимухин С. А. О необходимости более полного учета максимальных притоков воды в проектных решениях комплексов главного водоотлива / С. А. Тимухин, Е. П. Иващенко, А. Ю. Марченко, М. Ю. Марченко, С. Н. Салтанов, И. М. Баринев, Е. А. Викулов // Известия УГГУ. – 2015. – №4(40). – С.41-45.

Рукопис подано до редакції 13.04.2018

УДК 622.686

И. И. АНТОНЕНКО, А. И. КУЧМА, кандидаты техн. наук, доценты  
Криворожский государственный педагогический университет

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ СО СТЕНКАМИ ОТВОДОВ ПНЕВМОТРАСПОРТНОГО ТРУБОПРОВОДА

**Цель.** В большинстве случаев транспортирование сыпучих материалов на промышленных предприятиях наиболее эффективно выполняется с помощью пневмотранспортных установок. Основными недостатками пневмотранспорта являются износ пневмопровода на участках поворота (отводах), а также повреждение транспортируемого материала, обусловленное интенсивным взаимодействием частиц со стенками отводов. Исследование взаимодействия частиц со стенками отводов позволит разработать более совершенную конструкцию участка поворота пневмотранспортного трубопровода.

**Методы.** При исследовании взаимодействия частиц со стенками отводов пневмотранспортного трубопровода применялась скоростная киносъемка камерой СКС – 1М, электрические датчики давления ДД – 10 в комплекте с осциллографом Н 041.2 – 3, жидкостные U – образные манометры.

© Антоненко И. И., Кучма А. И., 2018

**Научная новизна.** Установлен характер движения аэросмеси в отводах: удар при входе и последующее трение вдоль внешней стенки отвода. Рекомендованы оптимальные геометрические параметры радиуса закругления отводов. Разработана новая конструкция отвода пневмотранспортного трубопровода признанная изобретением.

**Практическое значение.** На основании результатов исследований рекомендован оптимальный радиус закругления отводов, позволяющий увеличить срок их службы и уменьшить измельчение транспортируемого материала.

**Результаты.** В статье приведены результаты исследований взаимодействия частиц со стенками отводов разного радиуса закругления. Экспериментально определены механические нагрузки на стенки и энергозатраты в отводах разного радиуса закругления. Ударные нагрузки снижаются при увеличении радиуса отвода до восьми диаметров пневмопровода. Для снижения энергозатрат зону трения отводов рекомендуется выполнять с радиусом закругления равными пяти диаметрам пневмопровода. Для уменьшения интенсивности взаимодействия частиц предложено часть транспортирующего воздуха использовать для отклонения материала от внешней стенки отвода. Разработана новая конструкция отвода с поддувом воздуха признанная изобретением.

**Ключевые слова:** пневмотранспорт, отвод, параметры взаимодействия, оптимальный радиус закругления.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-46-60-64

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** В большинстве случаев транспортирование сыпучих материалов на промышленных предприятиях наиболее эффективно выполняется с помощью пневмотранспортных установок [1].

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.

Учитывая, что отказ от отводов в сетях пневмотранспорта промышленных 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. 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]. 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.

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

Специальной работы по изучению взаимодействия и повреждения тех или других 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, рассматривает 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.

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 задачи.** Анализ выполненных исследований не позволяет точно установить характер взаимодействия частиц материала со стенками отводов пневмотранспортных систем.

Специальной работы по оптимизации конструктивных параметров отводов пневмопроводовне 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 2Д, 5Д, 8Д, 11Д, где Д – диаметр трубопровода. 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, рис. 1.

Важной динамической характеристикой ударного процесса является величина углов встреч. Зависимость угла удара от относительного радиуса закругления отвода иллюстрируется на рис.2. Из графика, приведенного на рис.2 видно, что углы удара частиц при входе в отвод уменьшаются при увеличении радиуса кривизны до 8Д, а в дальнейшем остаются практически постоянными. Это позволяет в качестве оптимального выбрать радиус кривизны отвода равными 8Д. Оптимизация радиуса кривизны отвода позволит свести к минимуму ударные нагрузки, действующие в отводе.

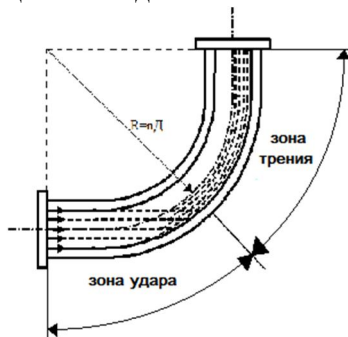


Рис.1. Характер движения транспортируемого материала в отводе

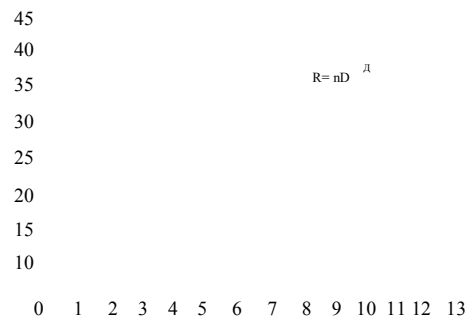


Рис 2. Зависимость угла удара от относительного радиуса закругления отвода

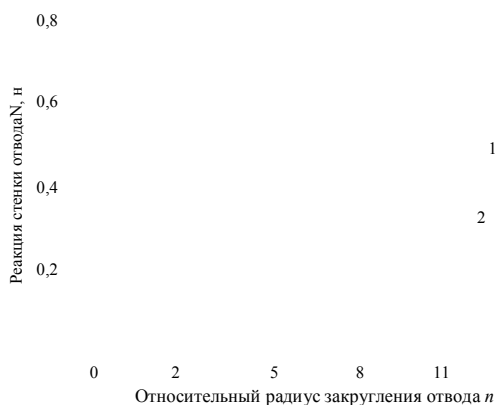


Рис.3. Зависимость реакции стенки отвода от радиуса закругления: 1 – в зоне удара, 2 – в зоне трения

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

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. 3 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 табл. 1.

Таблица 1

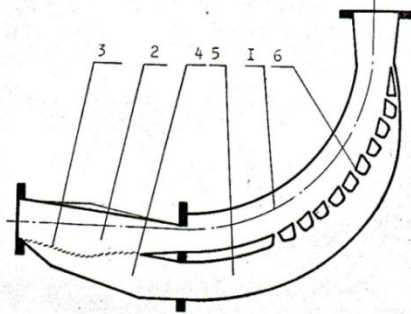
Потери давления в отводах				
Относительный радиус закругления отвода, $n=R/D$	2	5	8	11
Потери давления в отводе, кПа	3,92	2,94	2,96	3,98

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 желательнее применение компактных отводов с меньшим радиусом закругления, поскольку всегда существуют местные условия накладывающие ограничения на конфигурацию и габариты трассы. 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 отводе 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 транспортируемого воздуха использовать для отклонения материала от внешней стенки отвода. Схема такой конструкции отвода пневмотранспортного трубопровода показана на рис. 4.



**Рис. 4.** Схема отвода пневмотрубопровода с поддувом воздуха: 1 – основной канал; 2 – диффузно-конфузорный переходник; 3 – жалюзийная решетка; 4 – расширительная камера; 5 – обводной воздуховод; 6 – щелевые сопла

Предлагаемое устройство состоит из установленного перед основным каналом 1 диффузно-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. Эта конструкция участка поворота пневмотрубопровода признана изобретением [15].

**Выводы и направление дальнейших исследований.** На основании результатов исследований можно утверждать, что оптимальным является переменный радиус закругления отвода: в зоне удара –  $8D$ , а в зоне трения –  $5D$ , где  $D$  – диаметр пневмотрубопровода. 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.

## Список литературы

1. Успенский В.А. Пневматический транспорт / В.А. Успенский – Свердловск, Металлургиздат, 1959.– 229с.
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. – 127с.
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. на соиск. науч. степени канд.тех. наук./ А.Ф. Зайцев – Ленинград, 1970. – 24 с.
9. Зуев Ф.Г. Исследование сопротивлений отводов при пневматической транспортировании зерна и продуктов его переработки: дис. ... канд. 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. ... канд. тех. наук./ К.Р.Репп.– Барнаул, 1971. –132 с.
11. Неборак И.Г. Исследование взаимодействия твердых частиц со стенками вертикального пневмотранспортёра: автореф. на соиск. науч. степени канд.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. Дзязю А.М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях / А.М. Дзязю. – 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.

Рукопись поступила в редакцию 18.04.2018

УДК 669.162.22-52

В.П. ЛЯЛЮК, д-р техн. наук, проф., Криворожский национальный университет  
Д.А. КАССИМ, канд. техн. наук, доц., Криворожский металлургический институт

## ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДУТЬЯ И ГОРНОВОГО ГАЗА ПО ОКРУЖНОСТИ ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

**Цель.** Целью данной работы является определение влияния неравномерности расхода дутья по фурмам, а соответственно и теоретической температуры горения кокса перед фурмой, выхода горнового газа, полной энергии потока комбинированного дутья, отвечающей за размеры зон горения, и полной энергии потока горнового газа, отвечающей за глубину проникновения горнового газа к центру горна, на производительность доменной печи и удельный расход кокса в доменной плавке.

**Методы исследования.** Выполнены теоретические и эмпирические исследования, основанные на основных фундаментальных положениях теории доменной плавки с использованием при обработке результатов эмпирических исследований методов математической статистики. С целью определения влияния неравномерности распределения количественных и энергетических показателей дутьевого режима по фурмам доменной печи на производительность и удельный расход кокса использовали метод восстановления одномерных зависимостей.

**Научная новизна.** Получены результаты учета влияния коэффициентов вариации входящих дутьевых параметров при их изменении на 1% на производительность и удельный расход кокса, которые могут быть использованы при выполнении факторного анализа периодов работы доменных печей с различными значениями технологических параметров доменной плавки.

**Практическая значимость.** Теоретически обоснована актуальность и необходимость поиска и разработки технических решений, обеспечивающих равномерное распределение дутья с постоянной температурой по фурмам доменной печи.

**Результаты.** Выявлено наличие окружной неравномерности дутьевого режима в горне доменной печи. Установлена закономерность ее образования, развития и изменения под влиянием технологических и конструктивных факторов доменной плавки. Определено существенное влияние неравномерности дутьевых параметров работы доменной печи на расход кокса и производительность печи. Обоснована необходимость дальнейшего изучения процессов с выявлением глубинных причин образования окружной неравномерности распределения газового потока и разработки методов управления ими.

**Ключевые слова:** коэффициент вариации, неравномерность, распределение дутья, теоретическая температура, полная механическая энергия, выход горного газа, фурма.

© Лялюк В.П., Кассим Д.А., 2018