

Результаты проведенного исследования качественно подтверждаются ранее проведенными расчетами [1]. МКЭ анализ показал, что даже в случае возникновения обвала крепи ствола под местом заделки мембраны формируется сводообразная устойчивая область естественного равновесия. Для реализации максимального положительного эффекта, обязательно необходима активная пригрузка мембраны и распор крепи в окрестности ее заделки. Необходимый уровень давления создается при высоте засыпки порядка не более 20-30м. Мембрана трансформирует указанное давление в положительное распределение напряжений, которое переводит породы в опасном месте в устойчивое долговременное состояние.

В результате проведенных исследований установлено, что применение нового способа консервации ствола уменьшает уровень критических напряжений в прилегающем массиве пород в 3 раза, а в самой перегородке в 1,5 раза. Поэтому отжим и срез пород в полость ствола не провоцируется. Направление распространения и места возникновения изохром свидетельствуют о затухающем характере их развития для варианта со сводообразной перемычкой. Таким образом, независимым методом оптического моделирования подтверждена эффективность предложенного автором нового способа перекрытия погашенного вертикального ствола по сравнению с традиционным и оптимальность выбора формы самой перегородки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Звягильский Е.Л. Рациональная технология погашения вертикального ствола // Известия донецкого горного института, Донецк. - 1998. - №2(8). - С. 29-31.
2. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. - М.: Наука, 1973. - 576 с.
3. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику. - М.: Мир, 1970. - 484 с.

УДК 622.648.6:621.867.8:532.51.001.24

В.М. Гущин

### РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ В ТРАНСПОРТНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Наведені результати досліджень режимів руху двокомпонентного середовища у пневмотранспортному каналі, зокрема розглянуті хвильовий і порційний режими руху аеросуміщів та умови їх утворення.

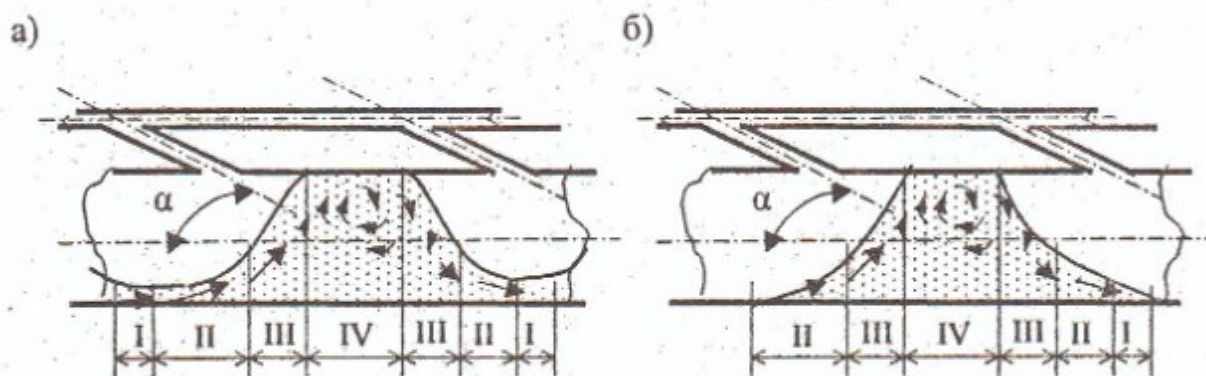
Перемещение сыпучих материалов при пневматическом способе транспортирования осуществляется в границах транспортного трубопровода в виде аэросмеси. При этом, перемещающиеся частицы, как правило, сохраняют массу и форму. Особенностью существования потоков движущихся аэросмесей является наличие внутренних поверхностей раздела твердых частиц несущим газовым потоком. Эти поверхностные разделы неустойчивы и быстро распадаются, образуя новые различные вихревые объемы и массы. В процессе движения возникают сложные силовые взаимодействия между несущей средой и несомой твердой компонентой, влияющие на поля скоростей и давления. Характер и величины взаимодействий зависят от режимов движения гетерогенных потоков, сте-

пени однородности транспортируемых сыпучих материалов, массовой концентрации транспортируемых аэросмесей, формы и границ транспортного канала, геометрической схемы трассы транспортирования и её протяженности, равномерности или неравномерности поступления сыпучих материалов или аэросмесей.

Из многообразия форм совместного движения сыпучего материала и несущей среды при пневматическом транспортировании следует выделить следующие основные: сдвигом сплошной массы, движением аэрированным потоком, волновое течение, порционное перемещение, дюнообразное перемещение с отложениями, макробросками без отложений и в полёте отдельных частиц во взвешенном состоянии [1-4]. В пределах одного трубопровода могут существовать одновременно два режима или более. В сочетании с их последовательными переходами. Анализ режимов движения и их последовательных переходов от перемещения аэрированным потоком к режиму полета отдельных частиц во взвешенном состоянии показывает, что, в общем случае, имеет место переход ламинарного течения аэросмеси в устойчивое турбулентное. При этом, по мере удаления от пункта загрузки давление в транспортном трубопроводе падает, скорость движения сыпучего материала резко возрастает, а массовая концентрация снижается. Изучение режимов движения аэросмесей показывает, что, с точки зрения снижения энергозатрат на процесс транспортирования перспективен диапазон транспортирования, в который входят волновой и порционный режимы движения [5]. Для них характерна небольшая разность (или практически равенство) скоростей движения твердой компоненты и несущей среды. Если движение в полете отдельных частиц во взвешенном состоянии, в общем случае упрощенно можно охарактеризовать как турбулентное течение аэросмеси, то движение в волновом и порционном режимах отличается особой сложностью протекающих процессов, при которых имеет место многократный переход ламинарного в турбулентный и наоборот. Эти процессы происходят в каждой волне и каждой отдельно взятой порции. В перемещающихся волнах (рис. 1а) и движущихся порциях (рис. 1б) течение сыпучего материала можно условно разделить на следующие переходы: I – область устойчивого ламинарного приграничного слоя; II – область линейного развития неустойчивых течений; III – область нелинейного развития возмущений; IV – область устойчивого турбулентного течения отдельной волны или порции. Внутрипорционная турбулентность характеризуется процессами диффузии и большими процессами завихренности. Эти процессы сопровождаются диссипацией энергии в масштабных вихревых образованиях. Энергия, необходимая для внутриволновой или внутрипорционной турбулентности, в данном случае, поступает от воздействия дополнительных энергетических источников.

Одной из наиболее сложных проблем в механике массопереноса, относящихся, в том числе, и к задаче формирования волн и порций при пневматическом транспортировании, является проблема перехода. Переход можно определить как явление, в процессе которого ламинарное течение становится турбулентным [6]. Течение в режиме перехода от ламинарного к турбулентному уже

утратило хорошо упорядоченную структуру, но еще не стало полностью беспорядочным. Турбулентность, в общем случае, характеризуется завихренностью течения и хаотичностью поля скоростей. Процесс перехода вызывается следующими основными возмущениями: турбулентностью набегающего воздушного потока, шероховатостью стенок материалопровода, формой и шероховатостью поверхности перемещаемых сыпучих материалов, вибрацией трубопровода, возмущением энтропии и звуковыми волнами. Турбулентность набегающего потока непосредственно связана с возмущениями завихренности. Трение частиц о нижнюю поверхность трубопровода приводит к возникновению особого приграничного слоя, вследствие чего в течение вводится добавочная завихренность. Шероховатость поверхности частиц сыпучих материалов, расположенных по поперечному сечению трубы, способствует формированию дополнительной завихренности. Возмущения энтропии воздействуют на теплопередачу через стенку трубы. В данном случае, при перемещении сыпучих материалов, имеют место все типы возмущения, приводящие к возникновению завихренности и, в какой-то мере, вихревому течению в трубопроводе.



а – в виде волны; б – в виде отдельной порции  
Рис. 1 - Движение аэросмесей в транспортном трубопроводе:

В проводимых лабораторных исследованиях по изучению волнового и порционного режимов движения аэросмесей завихренность течения наблюдается постоянно, как в случае волны сформированной с гребнем, так и усеченной приближающейся к порции. Прежде чем рассматривать устойчивое волновое движение, представляется целесообразным рассмотреть основные этапы формирования закупорки пневмотранспортного трубопровода традиционного типа, т.е. работающего в режиме полета отдельных частиц во взвешенном состоянии. Схема (рис. 2) позволяет рассмотреть и проанализировать основные стадии формирования осадка, переходящего в закупорку транспортного трубопровода.

При скоростях движения близких к критическим, на нижней поверхности трубопровода осаждаются мельчайшие частицы, образующие пристенный слой (1). Толщина этого слоя сопоставима с неровностями внутренней поверхности трубы и размерами мелких фракций сыпучего материала. Затем идет подвижная гряда (2), т.е. подвижный слой сыпучего материала, перемещающийся в форме

макробросков отдельных частиц, включая джообразное движение. При этом имеет место сужение эффективного канала течения, повышается скорость движения сыпучего материала. Так как пристенный слой и подвижная гряда как бы сформировали зону местного сопротивления, то сыпучий материал при попадании в диффузорную область теряет часть скорости, образуя местный вихрь, и отдельные частицы выпадают в осадок, формируя подвижную волну (3). Наступает состояние неустойчивого равновесия. Подвижная волна может перемещаться дальше, может разрушиться. При неблагоприятных условиях течения, сопровождающихся повышением сил сопротивления и некоторым падением давления в транспортном трубопроводе, за этой подвижной волной, как правило, происходит массовая седиментация частиц сыпучего материала, что приводит к дальнейшей закупорке трубопровода (4). Процесс осаждения сыпучего материала в транспортном трубопроводе зависит от физико-механических свойств сыпучих материалов и особенностей материалопровода. Осаждение начинается с адгезии мельчайших частиц на выступах шероховатой поверхности трубопровода. Покрытая мельчайшими частицами поверхность представляет хорошую основу для дальнейшего осаждения других частиц. Вступают в действие все известные механизмы связывания: механическое зацепление частиц неправильной формы, силы адгезии, твердые мостики, силы пригнетения между твердыми частицами (силы Ван-дер-Ваальса, электростатические и магнитные). Сыпучие материалы, обладающие высокими адгезионными и связными свойствами, оказываются практически неприемлемыми к перемещению традиционными пневмотранспортными установками.

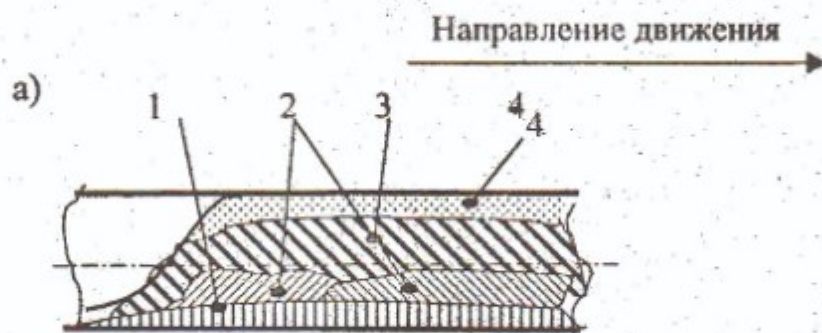


Рис. 2 - Схема формирования осадка и закупорки транспортного трубопровода

Целенаправленно сформированный режим волнового (или порционного) течения аэросмесей в транспортном трубопроводе лишен вышперечисленных недостатков. На схеме (рис. 3) отдельной движущейся волны сыпучего материала, перемещающегося в транспортном трубопроводе, можно выделить три основных участка: пристенный азрированный слой (1), гребень волны (2) и разделяющие их воздушные объемы.

При определенных давлениях и скоростях движения воздушного потока помимо общего поступательного перемещения сыпучего материала в азрирован-

ном состоянии вдоль трубопровода, в пределах гребня волны наблюдается значительная завихренность. Дополнительная энергия, затрачиваемая на поддержание аэрированного состояния пристенного движущегося слоя и внутриволновой завихренности (местной турбулентности) обеспечивается воздействием дополнительного воздушного потока, поступающего в материалопровод через воздухоподводящие патрубки. Патрубки установлены по всей трассе материалопровода с шагом, зависящим от геометрических параметров материалопровода и физико-механических свойств сыпучего материала. Волновое течение отличается высокой стабильностью, его скорость в модельном эксперименте находится в пределах 1,5... 2,5 м/с.



Рис. 3 - Схема формирования волны сыпучего материала в пневмотранспортном трубопроводе

В экспериментальных исследованиях [7] пневмотранспортной установки, оборудованной материалопроводом и дополнительным воздухопроводом соединенных между собой воздухопроводящими патрубками, предварительно флюидизированный сыпучий материал, загруженный в материалопровод, посредством воздействия воздушных импульсов расчленяется на отдельные объемы, чередующиеся с воздушными прослойками. Общее устойчивое поступательное порционное перемещение сыпучего материала сопровождается дополнительным внутриволновым волновым движением с одновременным возникновением местных вихрей. Волны и порции и в процессе движения разрушаются с тем, чтобы сформироваться и восстановиться вновь. Процесс повторяется многократно на всем участке транспортирования. Сыпучий материал в трубе не залегает, следовательно, имеет место самовосстановление процесса движения. Анализ течения сыпучего материала в перемещающихся волнах и порциях показывает, что помимо общего поступательного движения вдоль трубопровода наблюдается внутриволновая и внутриволновая турбулентность, характеризующаяся большими процессами завихренности. Рассматриваемые процессы сопровождаются диссипацией энергии не только на транспортирование, но и на движения в масштабных вихревых образованиях. Энергия, затрачиваемая на поддержание внутриволновой и внутриволновой турбулентности, поступает от воздействия дополнительного воздушного потока и обеспечивается его.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волошин А.Н., Пономарев Б.В. Теория и расчет современных пневмотранспортных систем для горнодобывающей промышленности // Геотехническая механика (НАНУ ИГТМ, межведомств. сборн. научн. трудов). – 1998. – №6 – С.3-14.
2. Пономарев Б.В. Движение вращающихся частиц в потоке газа по горизонтальному трубопроводу с ударами об обе стенки // Геотехническая механика (НАНУ ИГТМ, межведомств. сборн. научн. трудов). – 1998. – №7 – С.72-85.
3. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. – 292 с.
4. Гушин В.М. Пневмотранспортная установка с порционным движением песка// Литейное производство. – 1979. – №6. – С.25-26.
5. Гушин В.М. О массопереносе и его самоорганизации при пневматическом транспортировании сыпучих материалов // Нові матеріали в металургії та машинобудуванні. Зб.наук.пр.–Вип.3.–Запоріжжя, 1998. –С.52-54.
6. Фрост У., Моулден Т. Турбулентность. – М.: Мир, 1980. – 535 с.
7. Гушин О.В. Экспериментальные исследования пневмотранспортной установки с порционным движением сыпучих материалов// Совершенствование процессов и оборудование обработки давлением в металлургии и машиностроении. Вып.4. – Криваторск, 1998. – С.154-159.

УДК 622.648.6:621.867.8:532.51.001.24

О.В. Гушин

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ С ПОРЦИОННЫМ ДВИЖЕНИЕМ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В статті розглянуті основні результати досліджень переміщення сипучих матеріалів у пневмотранспортному трубопроводі з порційним режимом руху аеросумішів.

Одним из перспективных способов пневматического транспортирования сыпучих материалов является перемещение их в порционном режиме. Данный способ может найти широкое применение в горном деле, порошковой металлургии, литейном и химическом производстве, строительной индустрии.

Целью исследований является изучение процессов массопереноса при порционном режиме движения аэросмесей в транспортном трубопроводе и определение оптимальной скорости перемещения сыпучих материалов с разными физико-механическими свойствами.

Пневмотранспортная установка с порционным движением сыпучих материалов [1] в конструктивном отношении представляет собой материалопровод и дополнительный воздуховод, соединенные между собой воздухопроводящими патрубками, установленными по всей трассе с определенным шагом. Предварительно азрированный (псевдооживленный, флюидизированный) сыпучий материал посредством загрузочного устройства специального типа вводится в материалопровод. Дополнительный воздушный поток, поступающий в материалопровод через воздухоподводящие патрубки, поддерживает заданный порционный режим движения аэросмеси. Отличительной особенностью пневмотранспортных установок данного типа является высокая концентрация аэросмеси. Аэросмесь в трубопроводе движется с малыми скоростями при невысоких давлениях.

Одним из наиболее важных параметров, детерминирующих работоспособность пневмотранспортной установки в целом, является скорость движения аэросмеси, при которой, сохраняется заданный режим массопереноса на всей длине участка транспортирования. Скорость движения аэросмеси в транспорт-