

УДК 621.867.82

Гущин В. М., Гущин О. В.

### АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ АЭРОСМЕСЕЙ В ПНЕВМОТРАНСПОРТНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Пневмотранспортные установки, работающие по принципу перемещения отдельных частиц во взвешенном состоянии [1, 2], обладают рядом существенных недостатков: относительно небольшая производительность, высокая энергоемкость процесса транспортирования, большой износ трубопроводов и комплектующего оборудования, сложность очистки воздуха и значительный выброс пыли в окружающую среду, что часто ставит под сомнение целесообразность их применения в промышленности.

Энергоемкость процесса транспортирования при пневматическом способе перемещения сыпучих материалов, конструктивные особенности трубопроводов и комплектующего оборудования, технические параметры пневмотранспортных установок во многом зависят от режимов движения аэросмесей. Оптимизация режимов движения аэросмесей и, на данной основе, создание энергосберегающих способов пневматического транспорта, работающего в его нестабильных режимах, является актуальной задачей.

Целью данной работы является анализ режимов движения сыпучих материалов на горизонтальных участках пневмотранспортного трубопровода, выбор оптимальных режимов, разработка методов интенсификации процессов пневматического транспортирования и, на этой основе, решение задачи создания новых высокоэффективных энергосберегающих пневмотранспортных установок.

Движение сыпучих материалов в трубопроводе осуществляется под воздействием несущего газового потока в виде аэросмесей. Режимы движения гомогенных и гетерогенных потоков зависят от физико-механических свойств транспортируемых сыпучих материалов, конструкции пневмотранспортной установки, геометрии трубопровода и его трассы, рабочего давления и транспортной скорости движения несущего потока, равномерности подачи сыпучих материалов или аэросмесей в материалопровод. Твердые частицы (дисперсные частицы, дисперсная фаза), как правило, в процессе транспортирования сохраняют свою форму и массу. Дисперсионная фаза (воздух, газ) является поверхностью раздела твердых частиц. В процессе движения между дисперсной и дисперсионной фазами возникают сложные силовые взаимодействия, образующие поля быстро меняющихся скоростей и давлений. Эти процессы многообразны, что является следствием комбинаций фаз, их структур, межфазных и внутрифазных взаимодействий и процессов: вязкость и межфазное трение, фазовые переходы, измельчение частиц, теплопроводность и межфазный теплообмен, различие сжимаемости фаз, электростатические силы и магнитные поля, капиллярные силы и др.

Экспериментальные исследования пневмотранспортной установки, оборудованной прозрачным материалопроводом показали [4], что в трубопроводе можно выделить следующие основные формы движения аэросмесей: в полёте отдельных частиц во взвешенном состоянии, макробросками с отложениями и без отложений, дюнообразное перемещение со скольжением по нижней поверхности трубы и с отложениями, волновое течение, порционное перемещение неаэрированного или аэрированного сыпучего материала, движение аэрированным потоком и сдвигом сплошной массы (рис. 1). Массовая концентрация смеси при переходе от одной формы к другой возрастает. В пределах одного трубопровода могут существовать не более двух режимов движения с их взаимными переходами.

Основные области существования режимов движения аэросмесей на горизонтальном участке, принимая во внимание и анализируя ранее выполненные исследования по пневмотранспорту сыпучих материалов, могут быть представлены в виде диаграммы (рис. 2).

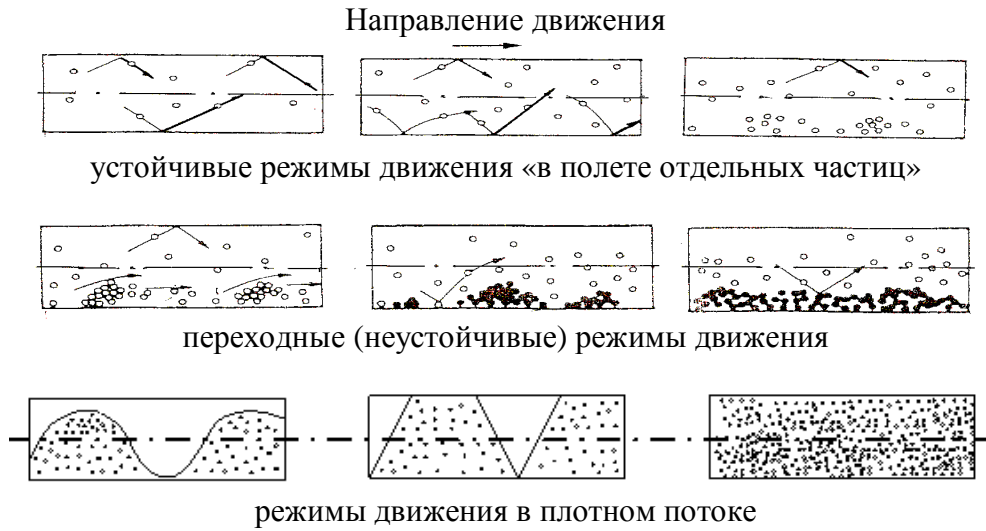


Рис. 1. Схема движения частиц сыпучего материала на горизонтальном участке пневмотранспортного трубопровода

На ней показаны зоны функционирования трёх способов перемещения сыпучих материалов в транспортном трубопроводе: А – сдвиг сплошной массой, В – пневмотранспорт в полете отдельных частиц во взвешенном состоянии, и С – промежуточные режимы движения. Кривые 1–1 и 4–4 на данной диаграмме соответственно ограничивают границы продувания столба сыпучего материала и чистого воздуха. Режимы движения аэросмесей, попадающие в область С, принято считать нестабильными, неустойчивыми. Границы существования областей А и В относительно устойчивы для каждого конкретного материала, зависят от его физико-механических свойств и технических параметров пневмотранспортных установок. Данная диаграмма имеет незамкнутый характер. Она приобретает замкнутость, если учесть транспорт в псевдооживленном состоянии и промежуточные состояния и переходы – кривую 1'–5' и кривую 2'–3', ограничивающую сверху зону порционного движения аэросмесей (рис. 3).

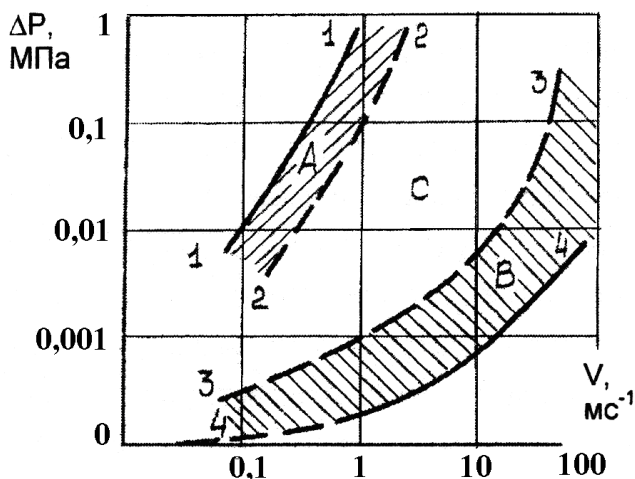


Рис. 2. Области существования основных режимов движения аэросмесей

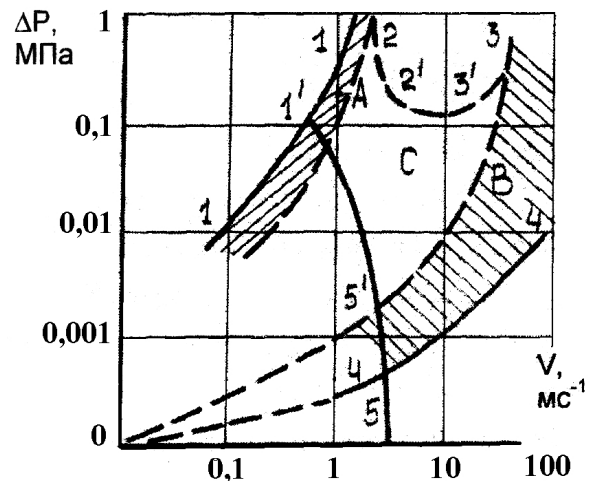


Рис. 3. Диаграмма режимов движения аэросмесей и их переходов

Итак, кривая 0–1' – ограничивает потери давления при продувании столба сыпучего материала; кривая 0–4 – продувание чистого воздуха; 1'–5 – пневмотранспорт в псевдооживленном состоянии; кривая 2–2'–3'–3 ограничивает переход от сдвига сплошной массой

к режиму движения частиц во взвешенном состоянии через промежуточные состояния и переходы. Диаграмма построена для кварцевого песка как модели идеально сыпучего тела. Следует ожидать, что для других сыпучих материалов она будет иметь аналогичный характер, но отличаться своими числовыми характеристиками.

Режимы движения частиц во взвешенном состоянии являются наиболее изученными применительно к трубопроводу круглого сечения [1–3]. Анализ перемещения частиц показал, что существует три типа движения одиночных частиц в горизонтальном трубопроводе: по нижней стенке, с ударами о нижнюю стенку и с ударами об обе стенки. При движении частицы в потоке газа по нижней стенке возможны различные вариации. Для движения частиц в горизонтальном трубопроводе с ударами об обе стенки характерна периодичность. Последнее хорошо согласуется с данными ранее выполненных исследований в предположении о движении частиц «вперёд – вдоль» трубопровода с их последовательными ударами о верхнюю и нижнюю стенки трубы (Гастерштадт, Успенский, Урбан, Дзядзио, Калинушкин и др.). Режим движения в полёте отдельных частиц во взвешенном состоянии характеризуется как устойчивое турбулентное течение. Перемещение частиц во взвешенном состоянии осуществляется при высоких скоростях несущей фазы  $u = 20\text{К}50$  м/с при концентрациях  $K_m = 5\text{К}30$ , что влечёт за собой высокий расход энергии на процесс транспортирования.

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, 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 упрощено 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. 4, а) и движущихся порциях (рис. 4, б) 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 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 трубопровода, 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.

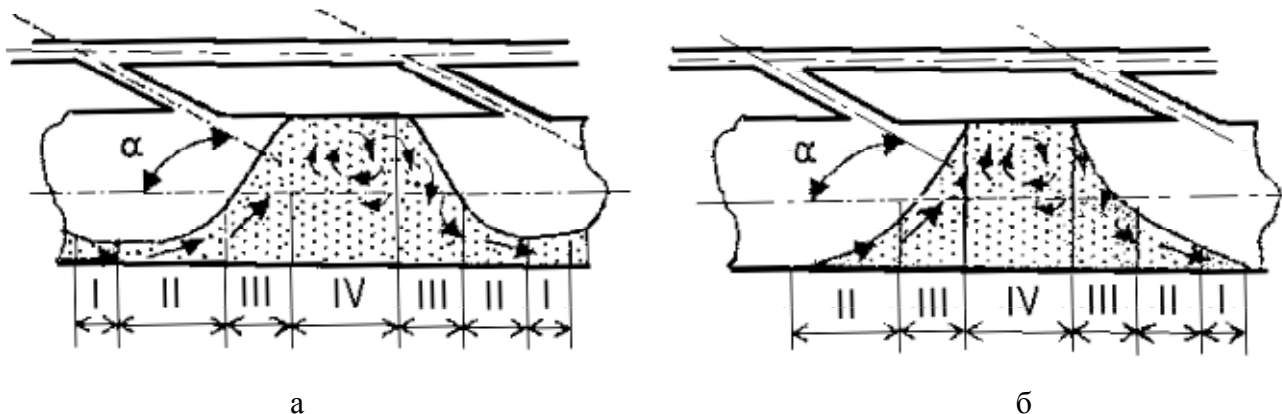


Рис. 4. Движение аэросмесей в транспортном трубопроводе:  
а – в виде волны; б – в виде отдельной порции

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. 5, а) 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 дюнообразное 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 диффузную 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 притяжения 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.

Целенаправленно сформированный режим волнового (или порционного) течения аэросмесей в транспортном трубопроводе лишен вышеперечисленных недостатков. На схеме (рис. 5, б) отдельной движущейся волны сыпучего материала, перемещающегося в транспортном трубопроводе, можно выделить три основных участка: пристенный аэрированный слой (1), гребень волны (2) и разделяющие их воздушные объемы (3).

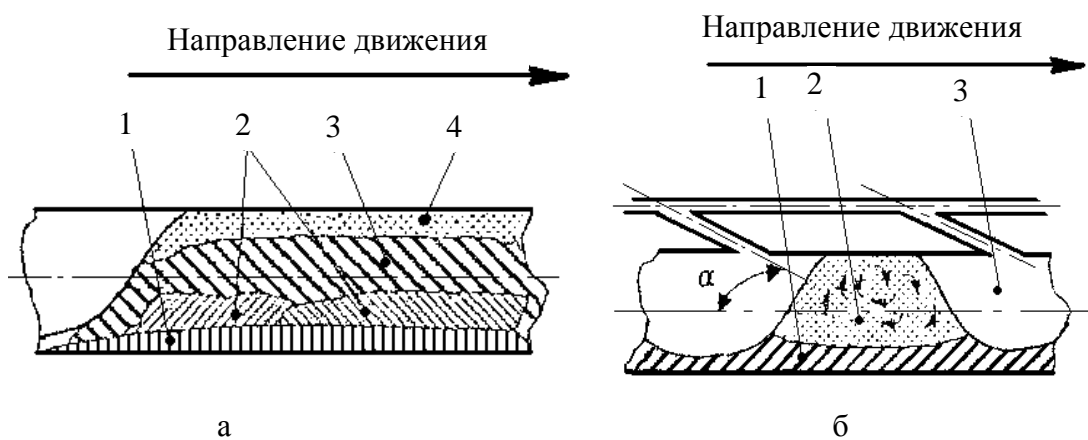


Рис. 5. Схема формирования в пневмотранспортном трубопроводе:  
а – осадка и закупорки трубопровода; б – волны

При определенных давлениях и скоростях движения воздушного потока помимо общего поступательного перемещения сыпучего материала в аэрированном 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. Общее устойчивое поступательное порционное перемещение сыпучего материала сопровождается дополнительным внутриволновым движением с одновременным возникновением местных вихрей. Волны и порции в процессе движения разрушаются с тем, чтобы сформироваться и восстановиться вновь. Процесс повторяется многократно на всем участке транспортирования. Сыпучий материал в трубе не залегают, следовательно, имеет место самовосстановление процесса движения.

Диаграмма фазовых состояний и переходов (рис. 6) [7] при транспортировании сухих кварцевых песков, как модели идеально сыпучего тела, дает качественную и количественную характеристику областей функционирования режимов движения и достигаемой при этом концентрации аэросмеси. Оптимальной, с точки зрения энергоемкости процесса перемещения представляются порционный и волновой режимы движения.

Анализ графиков, построенных по результатам исследований (рис. 7), показывает, что при скоростях движения в пределах  $1 \dots 10 \text{ мс}^{-1}$ , соответствующих волновому и порционному режимам, достигается достаточно высокая концентрация аэросмеси при относительно небольших удельных давлениях.

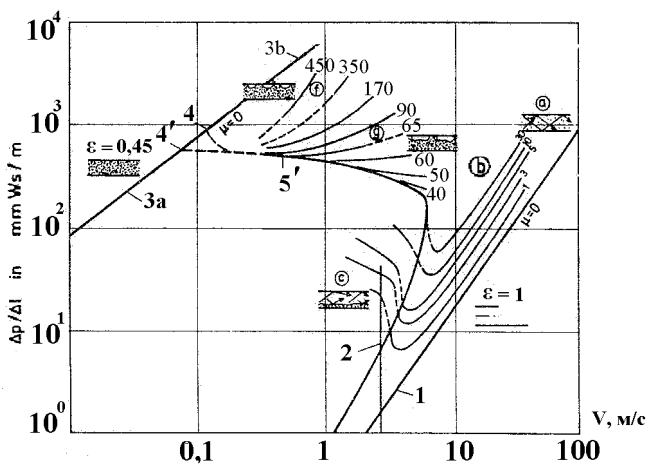


Рис. 6. Диаграмма фазовых состояний пневмотранспорта песка в горизонтальном трубопроводе:

1 – продувание пустой трубы; 2, 3 – при продувании столба неподвижного материала; a, b – транспортирование в полете отдельных частиц; c – транспортирование в полете с отложениями; d – волновой режим движения; e – порционный режим движения; g – движение сплошным потоком неподвижного материала

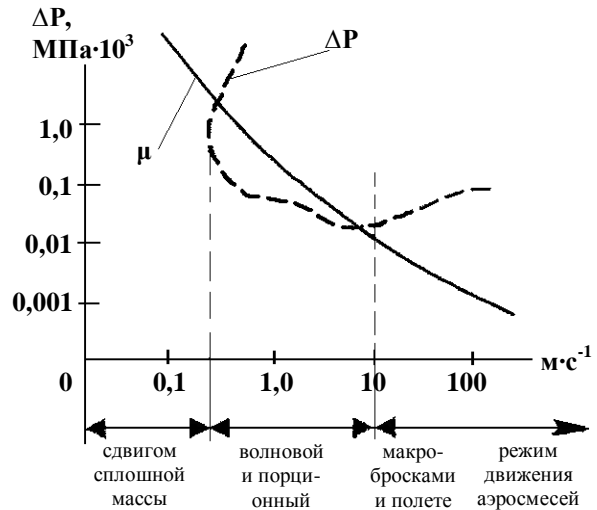


Рис. 7. Избыточное давление ( $\Delta P$ ) и массовая концентрация ( $\mu$ ) аэросмеси в пневмотранспортном трубопроводе в зависимости от режима движения газоматериального потока

### ВЫВОДЫ

Выполненный анализ режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе позволил обосновать оптимальность волнового и порционного режимов движения и рекомендовать их к использованию. Улучшение технико-экономических показателей пневмотранспортных установок может быть достигнуто использованием для работы в рассматриваемых режимах, что позволит увеличить массовую концентрацию аэросмеси при одновременном снижении скорости движения газоматериального потока.

Полученные результаты исследований использованы при разработке новых высокоэффективных энергосберегающих способов пневматического транспортирования сыпучих материалов в условиях промышленных предприятий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Смолдырев А. Е. Трубопроводный транспорт / А. Е. Смолдырев. – М. : Недра, 1980. – 293 с.
2. Волошин А. И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А. И. Волошин, Б. В. Пономарев. – К. : Наукова думка, 2001. – 519 с.
3. Потураев В. Н. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В. Н. Потураев, А. Ф. Булат, А. И. Волошин, С. Н. Пономаренко, А. А. Волошин. – К. : Наукова думка, 2001. – 176 с.
4. Гуцин О. В. Экспериментальные исследования пневмотранспортной установки с порционным движением сыпучих материалов / О. В. Гуцин // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск, 1998. – Вып. 4. – С. 154–159.
5. Гуцин В. М. Интенсификация процессов пневматического транспортирования сыпучих материалов / В. М. Гуцин // Промислова гідравліка і пневматика. Всеукраїнський наук.-техн. журнал. – 2004. – № 2 (4). – С. 28–31.
6. Фрост У. Турбулентность / У. Фрост, Т. Моулден. – М. : Мир, 1980. – 535 с.
7. Weber M. La Tecnica del trasportopneumatico e edraulico / M. Weber. – Milano : Edizione Technice, 1974. – 387 h.
8. Гуцин В. М. Особенности течения аэросмесей в пневмотранспортных установках с высокой концентрацией / В. М. Гуцин // Вест. НТУУ «КПИ». – Машиностроение. – 2002. – № 42. – Т. 1. – С. 103–106.