

УДК 621.867.82

Гущин В. М.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из направлений дальнейшего развития и совершенствования пневматического транспорта сыпучих материалов является разработка новых высокоэффективных энергосберегающих способов перемещения сыпучих материалов [1]. Современный подход к созданию пневмотранспортных установок, работающих при нетрадиционных режимах движения аэросмесей, базируется на исследованиях фазовых состояний и превращений аэросмесей, условий их формирования и сохранения на различных участках транспортного трубопровода. Области нестабильного движения аэросмесей, традиционно считавшиеся нерабочими и аварийными, представляют значительный научный и практический интерес. Движение аэросмесей в транспортном трубопроводе сопровождается сложными процессами, являющимися следствием как многообразия комбинаций фаз, структурных и взаимофазных воздействий, своеобразных волновых течений, так и следствием воздействия дополнительных воздушных или вибрационных импульсов.

Исследования режимов движения гомогенных и гетерогенных сред (газ-твердые частицы) [2–5] показали, что в трубопроводе наблюдается переход от ламинарного в устойчивое турбулентное движение через ряд промежуточных неустойчивых состояний. В пределах одного трубопровода могут существовать два или более режима движения с их взаимными последовательными переходами. В пневмотранспортных установках, работающих в волновом и порционном режимах движения аэросмесей, помимо общего поступательного перемещения сыпучего материала вдоль транспортного трубопровода имеет место внутриволновая и внутрипорционная турбулентность, характеризующаяся большими процессами завихренности. При этом сохраняются характерные особенности турбулентного режима движения.

Анализ выполненных исследований показал, что протекающие в пневмотранспортном трубопроводе процессы при нетрадиционных режимах движения аэросмесей исследованы недостаточно. Их дальнейшее изучение имеет существенный научный интерес.

Целью данной работы является разработка физических основ создания новых высокоэффективных энергосберегающих способов пневматического транспортирования сыпучих материалов на основе анализа процессов, протекающих в материалопроводе при нетрадиционных режимах движения аэросмесей.

Перемещение сыпучих материалов в транспортном трубопроводе под воздействием несущего газового потока можно рассматривать как открытую систему, которой присуща неравномерность, связанная с поступлением энергии и сопротивлением движению, большое число взаимодействующих подсистем динамических переменных, вязкость среды (ее внутреннее свойство), макроскопическое взаимодействие частиц между собой и несущим потоком. Особенность этой системы – явление перемеживаемости, т. е. последовательной сменяемости регулярных на конечных временных состояниях движения (процессы формирования и разрушения волн и порций, переходы ламинарного течения в турбулентное и наоборот). При определенных условиях, в пневмотранспортном трубопроводе, имеет место возникновение упорядоченных структур и форм движения из первоначально неупорядоченных, нерегулярных форм движения без специальных упорядочивающих их внешних воздействий на систему.

Принятие основных постулатов синергетики [7–9]: относительная степень упорядоченности состояний в открытых системах, позволяющая отличить «порядок» от «хаоса»; критерий степени хаотичности или упорядоченности  $K$  – энтропия (энтропия Крылова-Колмогорова-Синяя); показатели Ляпунова; энтропия Больцмана-Гиббса-Шеннона ( $H$  –

теорема теплового равновесия Больцмана,  $S$  – теорема);  $(S_{\text{Л}} - S_{\text{T}})$  – разность энтропий является функцией Ляпунова и ламинарное течение, принятое за состояние хаоса, – неустойчиво; принцип производства энтропии  $G_{\text{неуст}} > G_{\text{уст}}$  – система идет по пути уменьшения производства энтропии; турбулентное течение более упорядочено, чем ламинарное; по критерию  $S$  – теоремы переход от ламинарного течения к турбулентному есть процесс самоорганизации (self-organization); установление между отдельными областями новых макроскопических связей и существенное усложнение структуры позволяет предположить, что постоянно происходящие неравновесные фазовые переходы в пневмотранспортном трубопроводе осуществляется по схеме  $\text{П} \leftrightarrow \text{Х}$  (порядок  $\leftrightarrow$  хаос), т. е. по схеме самоорганизации.

Движения аэросмесей в трубопроводе сопровождаются диссипацией энергии на транспортирование и на движения в масштабных вихревых образованиях в пределах отдельно взятой волны или порции. При установлении асимптотически устойчивого состояния движения баланс внешних сил эквивалентен силам сопротивления движению:

$$\sum F_{\text{внеш}} = \sum F_{\text{соп}}.$$

Зависимость энергии объема аэросмеси  $W$  при установившемся движении от соотношения внешних сил и сил сопротивления, выраженная через соотношения коэффициентов сопротивления движению аэросмеси ( $e_{\text{Е}}$ ) и внешней энергетической силы ( $e_{\text{ЕХ}}$ ) показывает, что при значениях близких к  $e_{\text{Е}} \cong e_{\text{ЕХ}}$  система находится в неустойчивом состоянии. Структуры легко разрушаются, переходя в одно из устойчивых состояний: транспортирование в режиме полета отдельных частиц во взвешенном состоянии или флюидизированным потоком. Отдельные частицы объема движущейся смеси обладают свойствами необходимыми для перехода в перемеживающийся режим. Наличие внутреннего трения в данной системе влечет за собой существование аттрактора, т. е. асимптотического предела ( $t \rightarrow \infty$ ) решений, предела, на который не оказывает прямого влияния начальное условие – исходная точка. Колебательные движения частиц существуют на ограниченных слабо перекрывающихся интервалах значений исследуемого параметра ( $\tilde{\Gamma}$ ). Стохастический режим должен установиться при таком значении параметра  $\tilde{\Gamma}$ , когда он выходит за пределы  $[\tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma}_2]$  в сторону больших или маленьких значений, например:

$$\tilde{\Gamma}(t) = \frac{\tilde{\Gamma}_1 + \tilde{\Gamma}_2}{2} + (\tilde{\Gamma}_1 - \tilde{\Gamma}_2) \sin et,$$

где  $e$  – малый параметр;  $t$  – интервал времени.

В данном случае стохастические режимы движения возникают при переходе через перемеживаемость, т. е. являются следствием столкновения асимптотически устойчивых и неустойчивых состояний движения ( $\tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}_2$ ). Другая причина перехода поясняется: всегда найдется сколь угодно малое возмущение движения (сценарий Ландау), когда аттрактор с большим числом независимых частот превратится в так называемый «странный аттрактор», содержащий стохастические притягивающие траектории:

$$-\Gamma = b \cdot \bar{\Theta}^2 \quad \text{или} \quad \bar{\Theta}^2 = -\frac{\Gamma}{b},$$

где  $b$  – числовой коэффициент;  $\bar{\Theta}$  – скорость движения частиц.

На рис. 1 представлен график зависимости энергии объема аэросмеси  $\bar{W}$  в установившемся состоянии движения от показателя  $\tilde{\Gamma}$ , где  $\tilde{\Gamma} = \Gamma/b$ . Пунктиром изображены  $\tilde{\Gamma}_1 < \tilde{\Gamma} < \tilde{\Gamma}_2$ , соответствующие неустойчивым состояниям движения. На графике можно

выделить три области. При  $\tilde{\Gamma} < \tilde{\Gamma}_1$  (область I) имеет место колебательное движение частиц материала без отрыва от поверхности трубы;  $\tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}_2$  (область III) – частицы находятся в полете (режим пневмотранспортирования во взвешенном состоянии);  $\tilde{\Gamma}_1 < \tilde{\Gamma} < \tilde{\Gamma}_2$  – частицы находятся в неустойчивом состоянии. В последнем случае частицы совершают условно-периодические поступательные и вращательные движения. Структура обладает малым запасом устойчивости и легко разрушается, переходя в состояние  $\tilde{\Gamma} < \tilde{\Gamma}_1$  или  $\tilde{\Gamma} > \tilde{\Gamma}_2$ .

Анализ области II показывает, что отдельные частицы объема перемещающейся смеси обладают свойствами для перехода в перемеживающийся режим при медленном изменении параметра  $\tilde{\Gamma}$ . Стохастический режим должен установиться при таком изменении  $\tilde{\Gamma}$ , когда этот параметр выходит за пределы интервала  $[\tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma}_2]$  как в сторону больших, так и в сторону меньших значений. Данный подход делает возможным объяснение стохатизации движения достаточно сложных с большим количеством переменных таких неконсервативных динамических систем, как пневмотранспортные установки для перемещения сыпучих материалов.

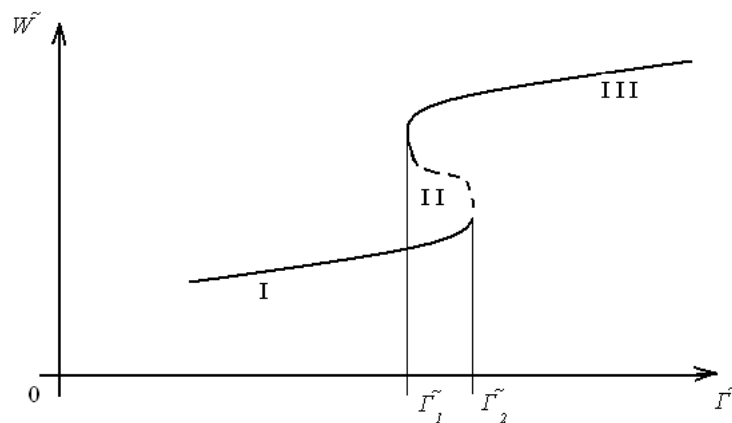


Рис. 1. Зависимость энергии аэросмеси от соотношения внешних сил и сил сопротивления

Новый концептуальный подход в изучении протекающих процессов в пневмотранспортном трубопроводе, рассматриваемом в качестве открытой системы, подчиняющейся общим законам синергетики, позволяет обосновать явления саморегулирования и самоорганизации массопереноса в материалопроводе. Регулирование в этом случае осуществляется через набор управляющих параметров, в качестве которых приняты числа Рейнольдса, Фруда. Движение гетерогенных потоков представляется как процесс самоорганизации с коллективными связями, которые определяют эффективные коэффициенты переноса импульса, силы и массы движущегося материального потока.

Процесс самоорганизации массопереноса в пневмотранспортном трубопроводе осуществляется дополнительной подпиткой движущегося материального потока. Энергетическая подпитка реализуется несущим газом, вибрацией или объединенным действием нескольких факторов. Созданию дополнительной завихренности потока также способствуют форма и шероховатость частиц и стенок трубопровода, турбулентность несущего потока, энтропия системы, осцилляционные процессы, наблюдающиеся при движении сыпучих материалов в транспортном трубопроводе.

Экспериментальные исследования режимов движения аэросмесей в области неустойчивых состояний (волновое, порционное, дюнообразное и микробросками) показывают, что даже малые возмущения начальных условий для динамической переменной или параметров самой динамической системы (давления, скорости воздушного потока, угла атаки воздушной струи и т. д.) в значительной мере приводят к непредсказуемости результирующего движения.

Исследование процессов, протекающих при пневматическом транспортировании сыпучих материалов, представляется целесообразным осуществлять на основе общих подходов к проблеме предсказуемости, основанных на представлении о частично детерминированных процессах, допускающих динамический прогноз на ограниченных интервалах времени.

Сохраняются характерные особенности турбулентного течения: неравномерность, большое число макроскопических степеней свободы, существенная, а во многих случаях, и определяющая роль гидродинамических флуктуаций, в значительной мере его непредсказуемость. Можно предположить, что постоянно происходящие неравновесные фазовые переходы в пневмотранспортном трубопроводе осуществляются по схеме самоорганизации. Концепция частичной детерминированности (случайность и детерминированность не противопоставляются друг другу, а рассматриваются как полюса единого свойства – частичной детерминированности) применима при описании турбулентных потоков, поскольку у них имеется пространственно-временная область совместимости.

Нестационарные режимы движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе сопровождаются сложными осцилляционными процессами. В результате наложения многих волн образуются спекл-неоднородные поля, характеризующиеся высокой степенью неоднородности интерференционной картины. Данная картина изменения колебательных процессов наблюдается при транспортировании мелкозернистых сыпучих материалов, таких как сухой кварцевый песок, кальцинированная сода, измельченные каменный уголь и руда, частицы шаровой формы полиэтилена, пластмасс и др. Следует ожидать, что случайный характер спекл-полей не препятствует их предсказуемости. Расчеты показывают, что корреляционные функции поля практически нечувствительны к неоднородностям среды.

Детерминистическую предсказуемость можно рассматривать, начиная с определенного уровня – уровня эффектов, регистрируемых макроскопическими приборами. Придерживаясь разных уровней описания, возникает своеобразная структура иерархии моделей, отличающихся степенью подробности изучаемых явлений. Соответственно, возникает и иерархия степеней детерминированности:  $D_1 > D_2 > D_n$ . Причем предсказуемость тем выше, чем более крупными деталями оперирует модель. Природу случайностей следует искать в факторах, вносящих наибольшие погрешности в прогноз, который претендует на предельно допустимую детальность описания. Как в общем случае изучаемых явлений, так и в случае пневмотранспорта сыпучих материалов, эти факторы могут принадлежать любому из основных классов погрешностей прогноза: неточностям моделей, флуктуационным силам и измерительным шумам.

Трансформация структуры течения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе путем управляемой генерации вихревых структур позволяет интенсифицировать процессы массопереноса. Основой разработки пневмотранспортных установок с волновым и порционным движением аэросмесей является использование явления сверхтекучести сыпучих материалов, имеющего место при воздействии воздушных потоков и струй на сыпучий материал эффекта вибрации или объединенного действия этих факторов. Интенсификация массопереноса достигается созданием завихренности потока, энергетической подпиткой, вибрационным воздействием на материал или объединенным действием нескольких факторов.

Улучшение технических показателей пневмотранспортных установок, предназначенных для перемещения сыпучих материалов с разными физико-механическими свойствами, достигается увеличением массовой концентрации перемещаемых аэросмесей при одновременном снижении скорости их движения. Дополнительное вибрационное возбуждение сыпучих материалов также может быть положено в основу повышения производительности и снижения энергоемкости пневматического транспорта с порционным и волновым режимами движения аэросмесей, использования для перемещения увлажненных и влажных сыпучих материалов, и создания специальных типов загрузочных устройств, обеспечивающих их работу. Использование явления сверхсыпучести легкоподвижных материалов при вибрационном воздействии в период формирования режима загрузки транспортного трубопровода повышает пропускную способность трубопровода в 1,5–2 раза и снижает энергоемкость на участке разгона частиц.

Особую группу составляют пневмотранспортные установки с вращательным движением сыпучего материала в форме сплошного потока и в порционном режиме. В этом случае дополнительное воздействие на сыпучий материал осуществляется импульсами сжатого воздуха на всей длине транспортного трубопровода по винтовой линии касательно к поверхности трубы. На основе математической модели выполнен машинный эксперимент и определены ожидаемые параметры установок данного типа. При скоростях движения несущей среды 25–50 м/с создаются условия движения сыпучего материала по поперечному сечению трубы в форме кольца без его соприкосновения с внутренней поверхностью трубопровода. Высокоскоростные пневмотранспортные установки данного типа открывают возможность использования газопроводов для перемещения сыпучих материалов на большие расстояния при больших грузопотоках.

### ВЫВОДЫ

Современный подход к созданию новых высокоэффективных способов пневматического транспортирования сыпучих материалов, работающих при нетрадиционных режимах движения аэросмесей, базируется на:

- исследованиях фазовых состояний и фазовых переходов движущихся аэросмесей в пневмотранспорте трубопроводе;
- принятие постулатов синергетики позволяет предположить, что постоянно происходящие неравновесные фазовые переходы в пневмотранспортном трубопроводе осуществляются по схеме  $П \leftrightarrow X$  (порядок  $\leftrightarrow$  хаос), т. е. по схеме самоорганизации;
- стохастические режимы движения возникают при переходе через перемеживаемость, т. е. являются следствием столкновения асимптотически устойчивых и неустойчивых движений аэросмесей;
- течение аэросмесей с внутриволновыми и внутриволновыми турбулентными движениями рассматривается как процесс самоорганизации с коллективными движениями, определяющими эффективные коэффициенты переноса импульса, силы и массы движущегося материального потока.

Объяснение явлений, имеющих место в пневмотранспортном трубопроводе при перемещении аэросмесей в нестационарных режимах массопереноса при нетрадиционном исполнении материалопровода, позволяет наметить и осуществить ряд новых технических решений, направленных на создание высокоэффективных пневмотранспортных установок для перемещения сыпучих материалов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуцин В. М. Новые пневмотранспортные установки для перемещения сыпучих материалов / В. М. Гуцин // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини* : зб. наук. праць. – 2000. – Вип. 55. – С. 70–73.
2. Гуцин В. М. Анализ режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / В. М. Гуцин, О. В. Гуцин // *Вісник ДДМА : темат. зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 1 (18). – С. 78–83.
3. *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 В. М. Нова концепція та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипких матеріалів / В. М. Гуцин // *Машинознавство*. – 2000. – № 2 (23). – С. 39–43.
5. Гуцин В. М. Восстановление структуры движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / В. М. Гуцин // *Вестник НТУУ «КПИ»*. – К. : Машиностроение, 2000. – Вып. 38. – Т. 2. – С. 158–162.
6. Гуцин В. М. Движение аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / В. М. Гуцин // *Вестник НТУУ «КПИ»*. – К. : Машиностроение, 1999. – Вып. 36. – Т. 1. – С. 79–86.
7. Хакен Г. *Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам* / Г. Хакен; пер. с англ. – М., 1991. – 204 с.
8. Климонтович Ю. Л. *Турбулентное течение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытых систем* / Ю. Л. Климонтович. – М. : Наука, 1990. – 320 с.
9. Берже П. *Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности* / П. Берже, И. Помо, К. Видаль; пер. с франц. – М. : Мир, 1991. – 368 с.