

УДК 622.278

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106790

*Виконано дослідження явищ, що відбуваються в транспортному трубопроводі при переміщенні сумішей в нестационарних режимах масопереносу. Запропонована реологічна модель руху неньютонівських рідин. Показано, що стохастичні режими руху сумішей виникають при переході через перемишуваність, тобто є наслідком зіткнення асимптотично стійких і нестійких станів руху*

*Ключові слова: трубопровідний транспорт, сипучий матеріал, перемишуваність, режими руху, водовугільне паливо, енергозбереження*

*Выполнено исследование явлений, происходящих в транспортном трубопроводе при перемещении смесей в нестационарных режимах массопереноса. Предложена реологическая модель движения неньютоновских жидкостей. Показано, что стохастические режимы движения смесей возникают при переходе через перемеживаемость, то есть являются следствием столкновения асимптотически устойчивых и неустойчивых состояний движения*

*Ключевые слова: трубопроводный транспорт, сыпучий материал, перемеживаемость, режимы движения, водоугольное топливо, энергосбережение*

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ СМЕСЕЙ В МАТЕРИАЛОПРОВОДЕ

**Н. Б. Чернецкая-Белецкая**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*

**О. В. Гуцин**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: app@dgma.donetsk.ua

**А. М. Шворникова**

Кандидат технических наук, доцент\*

**И. О. Баранов\***

**М. В. Мирошникова**

Ассистент\*

\*Кафедра логистического управления и безопасности движения на транспорте

Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля

пр. Центральный, 59-а, г. Северодонецк, Украина, 93400

## 1. Введение

В настоящее время на промышленных предприятиях Украины широкое распространение получили высоконапорные пневмотранспортные установки, имеющие ряд недостатков:

- высокая скорость движения смесей в трубопроводе, отсюда высокий расход энергии на перемещение аэросмеси;
- большой износ трубопроводов и комплектующего оборудования;
- деградация частиц сыпучих материалов;
- закупорка трубопроводов;
- необходимость очистки больших объемов воздуха, выбрасываемого в окружающую среду;
- неустойчивая седиментация частиц материала в трубопроводе при гидравлическом транспорте.

В Украине остро стоит проблема дефицита нефти и газа. Альтернативой этим источникам энергии является водоугольное топливо (ВУТ), получаемое из тонкоизмельченного угля любых марок, воды и реагента пластификатора. Использование ВУТ в промышленности обладает рядом преимуществ:

– ВУТ является относительно экологически чистым энергоносителем, в продуктах его сгорания значительно меньше сажи, оксидов азота и серы;

– ВУТ является экономичным видом топлива;

– обладает достаточно высокой теплотой сгорания и позволяет сократить расходы на его перемещение путем использования трубопроводного транспорта. В то же время конструкция гидротранспортных систем для ВУТ имеет ряд специфических особенностей, которые учитываются в недостаточной степени.

Значительное количество промышленные предприятия Украины эксплуатируют высоконапорные пневмотранспортные установки, которые получили широкое распространение и при этом имеют недостатки, указанные ранее. Данные пневмотранспортные установки являются ключевым объектом в сложной цепи организации транспортирования сыпучих материалов на предприятии. Любые негативные факторы и сбои в работе установок приводят к вынужденным остановкам производства, нарушению технологий работы и повышению энергозатрат на их эксплуатацию и обслуживание.

Наиболее важной задачей гидротранспортных систем является транспортирование альтернативных

видов топлива, перспективным из которых является ВУТ. При этом рациональный выбор концентрации и гранулометрии твердого компонента ВУТ, а также выбор адекватного режима транспортирования, определяют эффективность работы всей гидротранспортной системы. Наибольшая потребность в усовершенствовании таких систем проявляется на фоне острого дефицита импортных энергоресурсов Украины.

Исходя из этого, разработка физических и научных основ создания новых, высокоэффективных энергосберегающих способов трубопроводного транспорта является актуальной задачей современной науки.

---

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работе [1] выведены дифференциальные уравнения динамики как для однородной, так и для неоднородной, гомогенной и гетерогенной сред, ставшие основой дальнейших исследований и разработок в области трубопроводного транспорта.

В работах [2, 3] рассмотрены закономерности движения сыпучих материалов при пневматическом и гидравлическом способах транспортирования. В основу данной теории положено разделение транспортируемых материалов на классы. Далее для каждого класса по гранулометрическому составу рассматриваются уравнения движения смесей и определяются основные параметры гидро-пневмотранспортных установок.

В работах [1, 4] описаны основные аспекты механики многофазных сред различной структуры (газовзвесей, пузырьковых жидкостей, газо- и теплоносителей парожидкостных котлов), рассматриваются методы описания межфазного взаимодействия в дисперсных средах. В работах [1, 2] дается теория звуковых, ударных и кинематических волн и колебательных движений в двухфазных средах. На основе методов и подходов, изложенных в источниках [5, 6], рассмотрена механика вибро- и вибропневмотранспортирования сыпучих материалов применительно к режиму движения одиночных частиц в полете во взвешенном состоянии. Обосновано и приведено уравнение баланса осредненной энергии  $i$ -й фазы, учитывающее действие поверхностных, объемных, межфазных и внутренних сил данного объема [6]. Однако, практическое использование данных подходов вряд ли осуществимо в силу необходимости использования огромного числа трудноопределяемых параметров.

В работах [7, 8] рассмотрены вопросы псевдосжижения однородных сред, а также прикладная механика неоднородных сред. В работах [9–11] рассматриваются результаты исследований различных параметров пневмотранспортных установок при турбулентном течении, движение газо-материального потока, скорости и потери давления.

Выполнены исследования, которые посвящены эффекту намыва плотин, что вызвано нестабильностью и седиментационной неустойчивостью гидросмесей. Эксперименты, представленные в работе [12] с тонкодисперсными водоугольными суспензиями, показали, что характер течения несколько отличается от течения идеальной вязкопластичной жидкости. Фактическое течение начинается при меньших напряжениях сдви-

га, это следует из теории вязкопластичного течения. Обнаружено также явление самопроизвольной остановки течения при малых скоростях.

Данному вопросу уделено достаточно много внимания в работах [13, 14]. Здесь выполнены исследования процессов гидротранспортирования высококонцентрированных суспензий при различных напряжениях сдвига, скоростях транспортирования и концентрациях твердого компонента. Кроме того, значительная часть исследований посвящена вопросам седиментационной устойчивости суспензий в зависимости от различных факторов. Из полученных данных следует, что рациональный выбор концентрации и гранулометрии твердого компонента, а также выбор адекватного режима транспортирования, определяют эффективность работы всей гидротранспортной системы [15, 16].

---

## 3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является исследование закономерностей движения смесей в материалопроводе и особенностей применительно к гидро- и пневмотранспорту. На основе их выявления становится возможной разработка физических и научных основ создания новых, высокоэффективных энергосберегающих способов трубопроводного транспорта.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- выполнить анализ процессов, протекающих в пневмотранспортном и гидротранспортном трубопроводах при транспортировании сыпучих материалов и водоугольного топлива соответственно;
- исследовать процесс самоорганизации массопереноса и явлений, происходящих в транспортном трубопроводе при перемещении смесей в нестационарных режимах массопереноса;
- предложить реологическую модель движения не-ньютоновских жидкостей;
- установить основные задачи новых технических решений, направленных на совершенствование трубопроводного транспорта.

---

## 4. Материалы и методы исследований закономерностей движения смесей в материалопроводе

Современный подход к разработке перспективных способов трубопроводного транспортирования [17–20] основан на исследованиях фазовых состояний и переходов аэро- и гидросмесей. Он также учитывает условия формирования и сохранения стабильности на разных участках транспортного трубопровода. Движение смесей сопровождается сложными процессами, являющимися следствием многообразия комбинаций фаз и структур, межфазных и внутрифазных взаимодействий и переходов.

Пневматический и гидравлический транспорт в процессе своей эксплуатации перемещают твердый материал посредством использования несущего потока (будь-то газ или жидкость). Следовательно, с определенной долей вероятности можно утверждать, что для них соблюдается общность основополагающих физических законов.

Были проведены исследования режимов движения в пневмотранспортном трубопроводе гомогенных и гетерогенных сред (газ-твердые частицы) [17–20]. Данные исследования показали, что в трубопроводе наблюдается переход от ламинарного в устойчивое турбулентное движение через ряд неустойчивых промежуточных состояний. В пределах одного трубопровода могут существовать два или более режимов движения с взаимными последовательными переходами. В пневмотранспортных установках происходит общее поступательное перемещение сыпучего материала вдоль транспортного трубопровода. Установки работают в волновом и порционном режимах движения аэросмесей. Помимо этого, имеет место внутриволновая и внутриволновая турбулентность, характеризующаяся образованием большого количества вихрей. При этом сохраняются характерные особенности турбулентного режима движения, т. е. его неравновесность, большое количество макроскопических степеней свободы. Сохраняется существенная, а во многих случаях определяющая роль гидродинамических флуктуаций, возникающих в силу возбуждения большого числа макроскопических степеней свободы, в значительной мере непредсказуемость.

Перемещение сыпучих материалов в транспортном трубопроводе под воздействием несущего потока можно рассматривать как открытую систему. Ей присуща неравновесность, связанная с поступлением энергии и сопротивлением движению. Открытой системе свойственно большое число взаимодействующих подсистем динамических переменных, вязкость и напряжение сдвига среды (ее внутренние свойства). Для нее характерно макроскопическое взаимодействие частиц между собой и с несущим потоком. Особенность этой системы – явление перемежаемости, т. е. последовательной смены регулярных и конечных временных состояний движения (процессы формирования и разрушения структур, переходы ламинарного течения в турбулентное и наоборот). При определенных условиях в пневмотранспортном трубопроводе имеет место возникновение упорядоченных структур и форм движения. Они возникают из первоначально неупорядоченных, нерегулярных форм движения. Для таких структур характерно отсутствие специальных упорядочивающих внешних воздействий на систему [21–23].

Основные постулаты синергетики [21–24] рассматривают относительную степень упорядоченности состояний в открытых системах. Данная степень упорядоченности позволяет отличить «порядок» от «хаоса» и критерий степени хаотичности или упорядоченности  $K$  – энтропия (энтропия Крылова-Колмогорова-Синяя). Для нее свойственны показатели Ляпунова, энтропия Больцмана-Гиббса-Шеннона ( $H$  – теорема теплового равновесия Больцмана,  $S$ -теорема). Принятие разности энтропий рассматривается в качестве функции Ляпунова и, того факта, что ламинарное течение, принятое за состояние хаоса, – неустойчиво. Согласно принципу производства энтропии, 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 обла-

стями новых макроскопических связей и существенное усложнение структуры. Все вышеперечисленные принципы позволяют предположить, что постоянно происходящие неравновесные фазовые переходы в пневмотранспортном трубопроводе осуществляются по схеме  $P \leftrightarrow X$  (порядок  $\leftrightarrow$  хаос), т. е. по схеме самоорганизации [24].

Состояние локального равновесия в ламинарном потоке характеризуется распределением [22]:

$$f_n(r, v) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left[ -\frac{m(vV_n(r))^2}{2kT} \right], \quad (1)$$

где  $V_n$  – средняя скорость ламинарного потока.

Производная по управляющему параметру (в качестве управляющего параметра принято число Рейнольдса):

$$\frac{d}{dRe}(S_n - S_T) > 0, \quad (2)$$

где  $S_n$  – локальная энтропия ламинарного течения;  $S_T$  – осредненная энтропия турбулентного течения, позволяет рассматривать переход от ламинарного течения к стационарному турбулентному течению как процесс самоорганизации режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе.

### 5. Результаты исследований методологических подходов совершенствования трубопроводного транспорта, основанных на синергетической концепции

Движение смесей в трубопроводе сопровождается диссипацией энергии на транспортирование и на движение в масштабных вихревых образованиях в пределах отдельно взятого объема. При установлении асимптотически устойчивого состояния движения в магистральном трубопроводе баланс внешних сил эквивалентен силам сопротивления движению:

$$\sum F_{\text{внешн}} = \sum F_{\text{сопр}}. \quad (3)$$

При установившемся движении наблюдается зависимость энергии объема смеси  $E$  от соотношения внешних сил и сил сопротивления движению ( $\epsilon_E$ ) и внешней энергетической силы ( $\epsilon_{EX}$ ). Данная зависимость показывает, что при значениях, близких к  $\epsilon_E \equiv \epsilon_{EX}$ , система находится в неустойчивом состоянии.

В случае пневматического транспорта 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, слабоперекрывающихся интервалах значений исследуемого параметра ( $\tilde{P}$ ). Стохастический режим должен установиться при таком значении

параметра ( $\tilde{\Pi}$ ), когда выходит за пределы  $[\tilde{\Pi}_1, \tilde{\Pi}_2]$  в сторону больших или меньших значений, например:

$$\tilde{\Pi}(t) = \frac{\tilde{\Pi}_1 + \tilde{\Pi}_2}{2} + (\tilde{\Pi}_1 - \tilde{\Pi}_2) \sin \epsilon t, \tag{4}$$

где  $\epsilon$  – малый параметр;  $t$  – интервал времени.

В данном случае стохастические режимы движения, как при пневматическом, так и при гидравлическом транспорте, возникают при переходе через перемеживаемость, т. е. являются следствием столкновения асимптотически устойчивых и неустойчивых состояний движения ( $\tilde{\Pi} = \tilde{\Pi}_1, \tilde{\Pi} = \tilde{\Pi}_2$ ). Другая причина перехода поясняется тем, что всегда найдется сколь угодно малое возмущение движения (сценарий Ландау). При этом подмножество фазового пространства динамической системы с большим числом независимых частот превращается в элемент, содержащий стохастические притягивающие траектории:

$$-\Pi = \beta \bar{\Theta}^2 \text{ или } \bar{\Theta}^2 = \frac{-\Pi}{\beta}, \tag{5}$$

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

На рис. 1 представлен график зависимости энергии объема аэросмеси  $\bar{E}$  установившегося состояния движения от показателя  $\tilde{\Pi}$ , где  $\tilde{\Pi} = \frac{\Pi}{\beta}$ . Пунктиром изображены соответствующие неустойчивым состояниям движения. На графике можно выделить три области. Таким образом:

– при  $\tilde{\Pi} < \tilde{\Pi}_1$  (область I) имеет место колебательное движение частиц материала без отрыва от поверхности трубы;

– при  $\tilde{\Pi} > \tilde{\Pi}_2$  (область III) – частицы находятся в полете (режим транспортирования во взвешенном состоянии);

– при  $\tilde{\Pi}_1 < \tilde{\Pi} < \tilde{\Pi}_2$  (область II) – 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  $\tilde{\Pi} < \tilde{\Pi}_1$  или  $\tilde{\Pi} > \tilde{\Pi}_2$ .

Анализ области II показывает, что отдельные частицы объема перемежающейся смеси обладают свойствами для перехода в перемеживающийся режим при медленном изменении параметра  $\tilde{\Pi}$ . Стохастический режим должен установиться при таком изменении  $\tilde{\Pi}$ , когда этот параметр выходит за пределы интервала  $[\tilde{\Pi}_1, \tilde{\Pi}_2]$ , 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.

Аналогичная зависимость энергии гидросмеси от соотношения внешних сил и сил сопротивления может быть построена и для случая гидравлического транспортирования.

Течение смесей с внутриволновыми и внутривихревыми турбулентными движениями рассматривается как процесс самоорганизации с коллективными

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

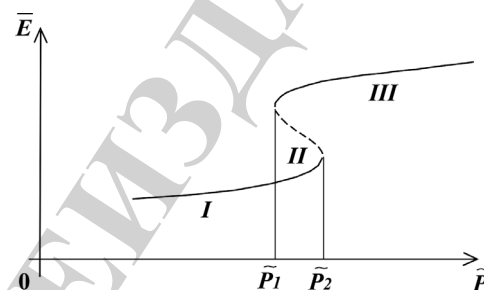


Рис. 1. Зависимость энергии аэросмеси от соотношения внешних сил и сил сопротивления:  $\tilde{\Pi}, \tilde{\Pi}_1, \tilde{\Pi}_2$  – исследуемые параметры колебательного движения частиц;  $\bar{E}$  – энергия объема аэросмеси установившегося состояния движения; I, II, III – области состояний частиц материала

Гидросмеси и водоугольные суспензии состоят из двух отдельных фаз: воды – непрерывной среды (континуум) и твердых частиц (дискретной среды). Каждая из этих фаз, в отдельности взятая, характеризуется своими особыми свойствами. Дискретная твердая фаза характеризуется своими механическими параметрами: гранулометрическим составом, углами естественного откоса и внутреннего трения. При смешивании жидкой непрерывной и твердой дискретной сред образуется новая непрерывная среда – суспензия, свойства которой отличаются от ее составляющих, взятых в отдельности. Каждая частица мелкофракционной твердой фазы в водной среде получает на своей поверхности жидкую оболочку, в результате чего образуется диполь, несущий положительный и отрицательный заряды. Ориентация диполей в объеме смеси определяется взаимодействием между собой. В результате этого взаимодействия образуется структура, и суспензию можно рассматривать как непрерывную среду. При воздействии на объем такой смеси силы  $F$  в начальный момент происходит деформация сольватных оболочек диполей. При этом проявляется начальное напряжение сдвига  $\tau_0$ , которое в данном случае является следствием упругой деформации. В дальнейшем происходит сдвиг отдельных слоев гидросмеси с проявлением пластической вязкости. Такой механизм проявления вязкопластических свойств характерен для смесей, включающих мелкие и практически однородные частицы.

ВУТ включает частицы мелких классов, но различных по размеру и форме. Вследствие этого некоторая часть твердых частиц не будет полностью покрыта сольватной оболочкой или утратит ее. При деформа-

ции объема такой суспензии к вязкопластическому трению добавляется чисто механическое трение частиц, утративших или не получивших сольватные оболочки на своей поверхности. Вязкость в таких смесях проявляется в виде суммарного эффекта от пластической вязкости, обусловленной сопротивлением сдвигу отдельных слоев суспензии. Суммарный эффект также зависит и от сопротивления трению твердых частиц, не имеющих сольватных оболочек. Таким образом, возникновение вязкопластических свойств в объеме суспензий обусловлено как физической природой (образование диполей), так и механической (трение). В соответствии с такой моделью проявления вязкопластического трения, возникающие сопротивления можно ассоциировать с некоторой эффективной (кажущейся) вязкостью [1].

Значение коэффициента вязкости зависит от величины структурной вязкости, которая связана с эффективной вязкостью соотношением:

$$\frac{\mu_{эф}}{\mu_{st}} = k_p, \quad \mu_p = \mu_{st} \cdot \frac{k_p}{k_{st}} \quad (6)$$

Эффективная вязкость выражает собой среднее значение вязкости и является функцией средней концентрации твердых частиц по сечению потока суспензии. Структурная вязкость проявляется при пластической деформации объема суспензии на границе ядра течения, постоянна по своей величине и имеет наибольшее значение. Эффект пластической вязкости возникает при деформации слоев суспензии и по своей величине зависит от структурной вязкости (рис. 2) [22].

С учетом особенностей проявления вязкопластических свойств высококонцентрированными мелкофракционными суспензиями, рассмотренными выше, модель Бингама для них может быть записана как:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p k_{st} \frac{dv}{dy} \quad (7)$$

или через структурную вязкость:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{st} \frac{k_p}{k_{st}} \cdot \frac{dv}{dy} \quad (8)$$

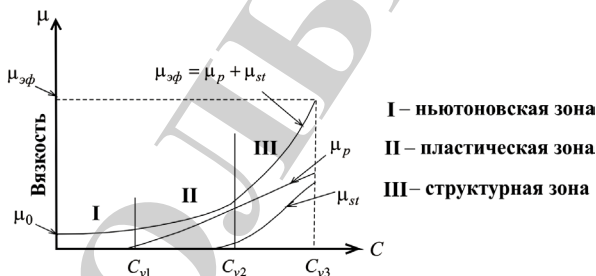


Рис. 2. Зависимость составляющей эффективной вязкости от концентрации угольных частиц в гидросмеси:  $\mu_{st}$  – структурная вязкость;  $\mu_{эф}$  – эффективная вязкость;  $\mu_p$  – пластическая вязкость;  $\mu_0$  – начальная вязкость;  $\mu$  – вязкость;  $C, C_{v1}, C_{v2}, C_{v3}$  – варианты концентрации угольных частиц в гидросмеси

Последнее отличается от модели Бингама-Шведова тем, что эффективная вязкость учитывает как структурные, так и пластические свойства деформируемого объема текучей среды (суспензии).

В работе сделана попытка уточнения реологической модели состояния неньютоновских жидкостей, в которых вязкость рассматривается как функция напряжения сдвига. Именно к такому классу жидкостей относится водоугольное топливо, которое в зависимости от свойств, концентрации и размера фракций твердого компонента может проявлять свойства бингамовского пластика, псевдопластика и даже тиксотропной жидкости.

Для многопараметрических моделей, к которым относится и модель реологически сложной среды (ВУТ), принимается модель, отражающая характер изменения твердого тела при динамической деформации:

$$\sum_{i=0}^m p_i \frac{\partial^i \tau}{\partial t^i} = \sum_{i=0}^n q_i \frac{\partial^i \epsilon}{\partial t^i}, \quad (9)$$

где  $p_i$  – давление в  $i$ -м сечении гидротранспортного трубопровода;  $q_i$  – компонента деформации.

В данном случае рассматривается вариант, когда скорость транспортирования постоянна во времени (стационарный режим транспортирования). Тогда уравнение для многопараметрической модели запишется в виде:

$$p_0 \tau + p_1 \dot{\tau} = q_0 \epsilon + q_1 \dot{\epsilon} + q_2 \ddot{\epsilon}. \quad (10)$$

Ограничившись тремя параметрами получено общее уравнение реологической модели водоугольного топлива:

$$e + ig = \frac{[(e_m s + ce_0)(s+c) + e_m t^2 + ict(e_m - e_0)]}{(s+c)^2 + t^2}, \quad (11)$$

где  $s + it, e + ig$  – комплексные числа;  $s, t$  и  $e, g$  – нормальные и сдвиговые компоненты напряжений и деформаций соответственно;  $e_m$  – сдвиговый компонент на границе области упругости;  $e_0$  – граница области пластичности.

Таким образом, из полученных соотношений определяется напряжение сдвига, скорость сдвига и вязкость водоугольного топлива независимо от того, к какому типу жидкостей относится исследуемая система.

Уточненная реологическая модель будет положена в основу математического моделирования течения водоугольного топлива в системах промышленного гидротранспорта, что позволит учитывать реологические параметры ВУТ при решении уравнений Навье-Стокса.

Течение водоугольного топлива в гидротранспортных системах, так же как и любой другой жидкости, описывается уравнениями Навье-Стокса и уравнением неразрывности. Применительно к условиям движения в трубах они переходят в уравнения типа уравнений пограничного слоя.

При достижении автомодельного режима течения водоугольного топлива в круглых трубах и с учетом предложенной реологической модели, уравнения Навье-Стокса в цилиндрической системе координат запишутся в виде:

$$\begin{aligned}
 u \frac{\partial u}{\partial x} + u_r \frac{\partial u}{\partial r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{xr}r)}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right], \\
 u \frac{\partial v}{\partial x} + u_r \frac{\partial v}{\partial r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{rr}r)}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} \right], \\
 \frac{\partial(ur)}{\partial x} + \frac{\partial(u_r r)}{\partial r} &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

где  $x$  – продольная ось трубы;  $r$  – радиус, отсчитываемый от оси трубы;  $u$  и  $u_r$  – составляющие скорости вдоль оси и по радиусу трубы.

Применительно к случаю течения неньютоновской жидкости в круглых трубах, после оценки соответствующих членов и отбрасывая члены второго порядка малости, получено:

$$\begin{aligned}
 u \frac{\partial u}{\partial x} + u_r \frac{\partial u}{\partial r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial(\tau_{xr}r)}{\partial r}, \\
 u \frac{\partial v}{\partial x} + u_r \frac{\partial v}{\partial r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{rr}r)}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} \right], \\
 \tau_{rr} &= 2Z \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \tau_{xr} = 2Z \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \dot{\epsilon} = \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right|.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Основное отличие системы уравнений от случая течения ньютоновской жидкости, связано с использованием предложенной реологической модели. Вследствие этого предложенное уравнение в общем случае не переходит в условие постоянства давления в поперечном направлении при больших числах Рейнольдса, как это происходит в случае ньютоновской жидкости  $n = m = 1$ ,  $\tau_0 = 0$ .

В случае установившегося по координате  $x$  течения нелинейно-вязкопластичной жидкости при ламинарном режиме течения уравнения принимают вид:

$$0 = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d(\tau_{xr}r)}{dr}, \tag{14}$$

$$0 = -\frac{dp}{dr}, \tag{15}$$

$$\tau_{xr} = \left[ \tau_0^{1/n} + \left| \mu \frac{du}{dr} \right|^{1/m} \right]^n. \tag{16}$$

Из выражения (15) следует, что условие постоянства давления: в поперечном направлении выполняется.

Выполним анализ уравнений движения при турбулентном режиме течения в предположении, что нелинейно-вязкопластичная жидкость является однородной средой.

Обозначив осредненные по времени значения скоростей  $u$  и  $v$  через  $u_0$  и  $v_0$ , пульсационные составляющие скоростей через  $u'$  и  $v'$ , давления через  $p_0$  и  $p'$ , то после стандартных преобразований получена система уравнений:

$$u_0 \frac{\partial u_0}{\partial x} + u_{r0} \frac{\partial u_0}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(\bar{\tau}_{xr}r - \rho \bar{u}'u'_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\bar{\tau}_{xx} - \bar{\rho}u'^2)}{\partial x} \right],$$

$$\begin{aligned}
 u_0 \frac{\partial u_{r0}}{\partial x} + u_{r0} \frac{\partial u_{r0}}{\partial r} &= \\
 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(\bar{\tau}_{rr} - \rho \bar{u}'r'^2)}{\partial r} + \frac{\partial(\bar{\tau}_{rx} - \bar{\rho}u'_r u'_x)}{\partial x} \right],
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$$\frac{\partial(u_0 r)}{\partial x} + \frac{\partial(u_{r0} r)}{\partial r} = 0.$$

Условие постоянства давления в поперечном сечении потока не соблюдается в случае, если силы пластического происхождения преобладают над вязкими и инерционными силами. Во всех остальных случаях условие постоянства давления в поперечном сечении потока приближенно выполняется.

### 6. Обсуждение результатов исследования процессов интенсификации в транспортном трубопроводе

Основные задачи, решаемые интенсификацией процессов в транспортном трубопроводе:

- повышение производительности, снижение расхода энергии;
- повышение сроков службы трубопроводов и комплектующего оборудования;
- исключение деградации частиц;
- улучшение седиментации;
- расширение технологических возможностей применения трубопроводного транспорта.

Интенсификация процессов, протекающих в магистральном трубопроводе, осуществляется воздействием на движущиеся смеси: дополнительных воздушных струй, вибраций, объемным действием двух названных факторов (рис. 3, 4).



Рис. 3. Схема реализации процессов интенсификации в трубопроводном транспорте

Режимы движения смесей и фазовые переходы могут быть предсказаны и описаны с использованием концепции частичной детерминированности. В рамках предлагаемого подхода наблюдаемый процесс  $y(t)$  выступает как детерминированный (предсказуемый) процесс при  $|1 - D| \ll 1$ , как случайный (непредсказуемый) процесс при  $|D| \ll 1$  или как частично детерминированный (частично предсказуемый) процесс при

$0 < |1 - D| \ll 1$ . В данном случае  $D$  – корреляционная мера качества прогноза, введенная как нормированная корреляционная функция (коэффициент корреляции между наблюдением и прогнозом):

$$D(\tau) = \frac{\langle y(t)z(t) \rangle}{\langle y^2(t) \rangle \langle z^2(t) \rangle^{0.5}}, \quad t = t_0 + \tau. \quad (18)$$

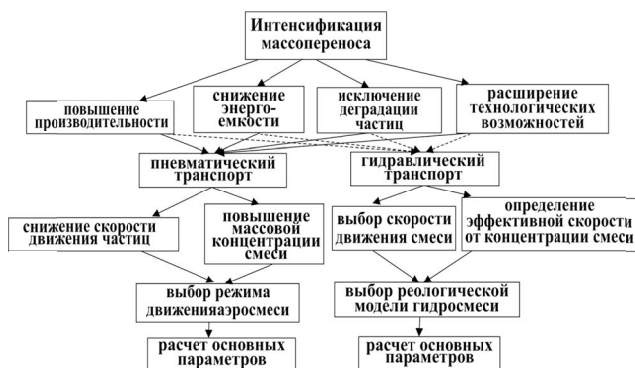


Рис. 4. Схема к определению основных параметров трубопроводного транспорта

Время детерминированного поведения зависит от флуктуационных воздействий на систему измерительных шумов и дефектов модели, что представляется в виде зависимости:

$$\tau_{det} = F(v, f, \Delta M), \quad (19)$$

где  $\Delta M$  трактуется как неточность модели.

Однако, как и в любой физической системе при движении в трубопроводе газоматериальных потоков сохраняются неустранимые помехи в виде тепловых процессов, электростатических сил, электромагнитных наводок, межфазного воздействия и превращений многокомпонентных сред. Эти неустранимые флуктуационные воздействия определяют пределы предсказуемости. Если  $v \rightarrow 0$  и  $\Delta M \rightarrow 0$ , то предельное значение (горизонт предсказуемости):

$$\tau_{lim} = \lim \tau_{det} = F(0, f, 0). \quad (20)$$

Горизонт предсказуемости  $\tau_{lim}$  характеризует время динамической памяти системы. В то же время величина  $\tau_{lim}$  характеризует время обратимого поведения и сравнимо со временем информационной памяти, в течение которого наблюдаемый процесс теряет информацию о шумах ранее воздействующих на систему. Концепция частичной детерминированности может быть применена при описании турбулентных потоков, поскольку у них имеется пространственная область совместности [24]. В данном случае, случайность и детерминированность не противопоставляются друг другу, а рассматриваются как полюса единого свойства – частичной детерминированности.

## 7. Выводы

1. Предложено дальнейшее развитие и совершенствование трубопроводного транспорта осуществлять на базе современных методологических подходов, ос-

нованных на синергетической концепции. Доказано, что перемещение сыпучих материалов в транспортном трубопроводе под воздействием несущего воздушного потока, можно рассматривать как открытую систему с присущими ей особенностями. Выдвинуто предположение, что постоянно происходящие неравновесные фазовые переходы в пневмотранспортном трубопроводе осуществляются по схеме  $P \leftrightarrow X$  (порядок – хаос), т. е. по схеме самоорганизации. Обоснована гипотеза возникновения стохастических режимов движения, которые возникают при переходе через перемеживаемость, т. е. являются следствием столкновения асимптотически устойчивых и неустойчивых движений аэросмесей. Установлено, что течение аэросмесей с внутриволновыми и внутринорциональными турбулентными движениями рассматривается как процесс самоорганизации с коллективными движениями. При этом определяются эффективные коэффициенты переноса импульса, силы и массы движущегося материального потока.

2. Отмечено, что на реологические характеристики и гидравлические параметры течения ВУТ больше всего влияют следующие факторы:

- качество исходного сырья;
- концентрация твердого компонента и его гранулометрический состав;
- тип и количество химических примесей;
- температурные и скоростные режимы.

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

4. Предложена реологическая модель движения неньютоновских жидкостей, которая учитывает особенности течения, что позволяет определить напряжение сдвига и вязкость ВУТ при различных значениях скорости сдвига. Математическая модель движения ВУТ учитывает независимые реологические параметры суспензии, которые зависят от концентрации и гранулометрического состава угля, а также скоростных режимов транспортирования.

5. Установлено, что интенсификация процессов, протекающих в магистральном трубопроводе, осуществляется воздействием на движущиеся смеси дополнительных воздушных струй и вибраций, объемным действием данных факторов.

6. Установлены основные задачи, решаемые интенсификацией процессов в транспортном трубопроводе:

- повышение производительности, снижение расхода энергии;
- повышение сроков службы трубопроводов и комплектующего оборудования;
- исключение деградации частиц;
- улучшение седиментации;
- расширение технологических возможностей применения трубопроводного транспорта.

## Литература

1. Pan, F. Full process control strategy of fuel based on water-coal ratio of ultra supercritical units [Text] / F. Pan, Y. Zhu, X. Zhang // 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC). – 2011. doi: 10.1109/icecc.2011.6068015
2. Savitskii, D. P. Liquid fuel based on coal slurries and brown coal [Text] / D. P. Savitskii, A. I. Egunov, A. S. Makarov, V. A. Zavgorodnii // Energotekhnol. Resursosber. – 2009. – Issue 1. – P. 13–17.
3. Родионов, Г. А. Исследование работы систем пневмотранспорта с камерными насосами [Текст]: III Всерос. науч.-практ. конф. / Г. А. Родионов, В. В. Бухмиров. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 101–105.
4. Ма, С. Методы измерения уровня и границ раздела многофазных жидких сред [Текст]: VI науч.-практ. конф. / С. Ма, А. Б. Степанов // Информационно-измерительная техника и технологии. – Томск: ТПУ, 2015. – С. 65–69.
5. Ленич, С. В. Экспериментальное исследование влияния основных факторов на процесс измельчения антрацита при пневмотранспортировании [Текст] / С. В. Ленич // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2015. – Т. 3, № 4 (64). – С. 164–167.
6. Мартыанова, А. Ю. Численное моделирование воздействия воздушного потока на шарообразные частицы в воздуховоде круглого сечения [Текст] / А. Ю. Мартыанова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2 (2). – С. 107–112.
7. Павлинова, И. И. Гидродинамика трехфазных псевдооживленных слоев [Текст] / И. И. Павлинова, А. И. Андрушин // Общество с ограниченной ответственностью. – 2008. – № 12. – С. 63–64.
8. Василевич, Ю. В. Теоретическая и прикладная механика [Текст] / Ю. В. Василевич, В. С. Вихренко, М. А. Журавков // Международный научно-технический журнал. – 2010. – Вып. 25. – С. 178–185.
9. Thompson, A. C. Basic hydrodynamics [Text] / A. C. Thompson. – Elsevier Science: Library of Congress Cataloging in Publication Data, 2013. – 190 p.
10. Herve, C. The basics of plant hydraulics [Text] / C. Herve // Journal of Plant Hydraulics. – 2014. – Vol. 1. – P. 001. doi: /10.20870/jph.2014.e001
11. Vostrikov, A. A. Conversion of brown coal in supercritical water without and with addition of oxygen at continuous supply of coal-water slurry [Text] / A. A. Vostrikov, O. N. Fedyaeva, D. Y. Dubov, S. A. Psarov, M. Y. Sokol // Energy. – 2011. – Vol. 36, Issue 4. – P. 1948–1955. doi: 10.1016/j.energy.2010.05.004
12. Asim, T. Optimal design of hydraulic capsule pipelines transporting spherical capsules [Text] / T. Asim, R. Mishra // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2016. – Vol. 94, Issue 5. – P. 966–979. doi: 10.1002/cjce.22450
13. Chernetskaya-Beletskaya, N. Define the operational hydro-solid waste handling system [Text] / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Kushchenko, E. Varakuta, A. Shvornikova, D. Kapustin // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2014. – Vol. 14, Issue 1. – P. 10–17.
14. Chernetskaya-Beletskaya, N. Experimental research of hydrotransporting concentrated residues at solid fuel burning [Text] / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Kuschenko, D. Kapustin // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2012. – Vol. 12, Issue 4. – P. 19–22.
15. Chernetskaya-Beletskaya, N. Technology of breakage of coal for the coal-water fuel production [Text] / N. Chernetskaya-Beletskaya, I. Baranov, M. Miroshnykova // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2015. – Vol. 15, Issue 2. – P. 63–68.
16. Kijo-Kleczkowska, A. Combustion of coal–water suspensions [Text] / A. Kijo-Kleczkowska // Fuel. – 2011. – Vol. 90, Issue 2. – P. 865–877. doi: 10.1016/j.fuel.2010.10.034
17. Гуцин, В. М. Анализ режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе [Текст] / В. М. Гуцин, О. В. Гуцин // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2010. – Т. 18, № 1. – С. 78–83.
18. Mills, D. Introduction to Pneumatic Conveying and the Guide [Text] / D. Mills // Pneumatic Conveying Design Guide. – 2016. – P. 3–32. doi: 10.1016/b978-0-08-100649-8.00001-9
19. Гуцин, В. М. Управление и интенсификация процессов пневматического транспортирования сыпучих материалов струйным воздействием воздушного потока [Текст] / В. М. Гуцин, О. В. Гуцин // Теорія і практика будівництва. – 2009. – № 5. – С. 6–15.
20. Guschin, O. Synergies in the motion processes of the structured aeromixtures in a pneumatic transport pipeline [Text] / O. Guschin, N. Chernetskaya-Beletskaya // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2015. – Vol. 15, Issue 3. – P. 21–28.
21. Niether, D. Heuristic Approach to Understanding the Accumulation Process in Hydrothermal Pores [Text] / D. Niether, S. Wiegand // Entropy. – 2017. – Vol. 19, Issue 1. – P. 33. doi: 10.3390/e19010033
22. Celletti, A. Order and chaos [Text] / A. Celletti // Stability and Chaos in Celestial Mechanics. – 2010. – P. 1–19. doi: 10.1007/978-3-540-85146-2\_1
23. Гуцин, О. В. Совершенствование пневмотранспорта сыпучих материалов на основе синергетической концепции [Текст] / О. В. Гуцин, Н. Б. Чернецкая-Белецкая // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2015. – № 1. – С. 12–16.
24. Miller, B. G. Introduction to Coal Utilization Technologies [Text] / B. G. Miller // Clean Coal Engineering Technology. – 2011. – P. 133–217. doi: 10.1016/b978-1-85617-710-8.00005-4