

УДК 621.867.82

ГУЩИН О.В., к.т.н., доцент,  
Донбасская государственная машиностроительная академия

## СТОХАСТИЧНОСТЬ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПНЕВМОТРАНСПОРТНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

*Динамические процессы, имеющие место при движении аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе, предложено рассматривать на базе стохастического подхода. Показано, что динамические процессы имеют случайный (стохастический) характер, обусловленный взаимодействием внешних и внутренних характеристик. Стохастичность явлений может иметь место как при стохастических, так и детерминированных внешних и внутренних параметрах транспортной установки. Режимы движения аэросмесей и их взаимные переходы предлагается описывать с использованием концепции частичной детерминированности.*

**Ключевые слова:** пневмотранспорт, динамический процесс, детерминированность, стохастичность

### Постановка проблемы

Строительство автомобильных дорог сопровождается перемещением огромного количества разнообразных сыпучих материалов. Для перемещения кварцевых песков в технологических агрегатах используется пневматический транспорт. Как известно, традиционные способы перемещения сыпучих материалов этим видом транспорта обладают рядом недостатков, в первую очередь, высоким расходом энергии на процесс транспортирования. Его традиционное исполнение с использованием режима движения отдельных частиц в полете во взвешенном состоянии предлагается заменить режимом перемещения сыпучих материалов в структурированном виде. Последнее позволит значительно улучшить технико-экономические показатели как пневматического транспорта, так и применяемого при строительстве автомобильных дорог технологического оборудования. Вышеизложенное позволяет говорить о необходимости разработки научной концепции совершенствования пневматического транспорта, основанной на использовании структурированных режимов перемещения сыпучих материалов в пневмотранспортном трубопроводе.

### Анализ последних исследований и публикаций

В ходе развития и дальнейшего совершенствования пневматического транспорта сыпучих материалов сложились определенные подходы к описанию физических процессов, протекающих в пневмотранспортном трубопроводе. Отмечается [1], что несущая способность потока зависит от соотношения компонентов смеси в единице объема и от разности скоростей движения твердых частиц и воздушного потока. При этом используется по два независимых уравнения переноса массы каждого компонента и уравнения энергии. Расчеты выполняются для каждого класса сыпучих материалов и базируются на установлении критической скорости движения аэросмесей. С использованием метода осреднения на основе гипотезы о ячеистой структуре двухфазной среды предложены уравнения движения для различных типов аэросмесей [2]. Рассмотрены уравнения движения для монодисперсной фазы в потоке жидкости, для газозвеси с хаотическим движением и столкновением твердых частиц, дано решение одномерной стационарной задачи «кипящего слоя». Изучение движения гетерогенных смесей выполнено с учетом исходной структуры смеси и физических свойств фаз. Дано детальное описание внутрифазовых и межфазовых взаимодействий в гетерогенных средах. Теория пневматического транспортирова-

ния сыпучих материалов для режимов движения аэросмеси в полете отдельных частиц во взвешенном состоянии предложена на основе дискретных математических моделей с учетом вращения частиц, движущихся в воздушном потоке [3]. Создание новых типов высокоэффективных пневмотранспортных установок базируется на синергетической концепции, позволяющей обосновать функционирование различных режимов движения аэросмесей и объяснить явления саморегулирования и самоорганизации массопереноса в пневмотранспортном трубопроводе [4,5].

### Цель работы

Целью данной статьи является дальнейшее изучение физики течения аэросмесей, разработка методики стохастического подхода к анализу динамических процессов в пневмотранспортном трубопроводе со структурированными режимами движения аэросмесей.

### Основной раздел

Перспективным представляется использование структурированных волнового и порционного режимов движения аэросмесей [6]. Процессы, протекающие в пневмотранспортном трубопроводе, отличаются сложностью и зависят от взаимодействия многих факторов. Как правило, динамические процессы носят случайный (стохастический) характер, обусловленный сложным взаимодействием внешних и внутренних случайных воздействий. Внешние (входные) случайные параметры имеют вид случайных функций времени, внутренние стохастические факторы проявляются в видимых изменениях параметров системы. Например, неустойчивый переходной режим волнового движения аэросмеси в порционный и наоборот. Стохастические процессы при движении аэросмеси в пневмотранспортном трубопроводе могут возникать и при детерминированных внешних или внутренних входных параметрах. При детерминированных внутренних факторах стохастические процессы обуславливаются только случайными входными параметрами и исследуются с использованием детерминированных математических модулей [6].

Режимы движения аэросмесей и их фазовые переходы могут быть описаны с использованием концепции частичной детерминированности. Она основана [7] на соглашении, что в качестве признака случайности (детерминированности) выбирается непредсказуемость (предсказуемость) наблюдаемого процесса на основе прогностического процесса. При таком подходе случайность и детерминированность не противопоставляются друг другу, а рассматриваются как полюса единого свойства детерминированности. Степень детерминированности (предсказуемости) можно оценить, используя коэффициент корреляции (характеристику между наблюдением и прогнозом).

В рамках предлагаемого подхода исследуемый процесс выступает как детерминируемый при  $|1 - D| \ll 1$ , как случайный – при  $|D| \ll 1$  и как частично детерминированный при  $0 < |D| < 1$ . В данном случае  $D$  – корреляционная мера качества прогноза, введенная как нормированная корреляционная функция (коэффициент корреляции между наблюдением и прогнозом)

$$D_{\tau} = \frac{\langle y(t)z(t) \rangle}{\langle y^2(t) \rangle \langle z^2(t) \rangle^{0.5}}, t = t_0 - \tau, \quad (1)$$

где  $y(t)$  – наблюдаемый процесс;  
 $z(t)$  – модельный процесс;  
 $t, \tau_0, \tau$  – параметры времени.

Время детерминированного протекания процессов в пневмотранспортной системе зависит не только от технических параметров и характеристик, но и от ряда факторов, присущих ей, как любой сложной системе. К последним следует отнести: флуктуационные воздействия на пневмотранспортную систему, измерительные шумы и неточности рассматриваемых моделей. С точки зрения иерархичности предсказательных моделей их точность и природа случайности зависят от вышерассмотренных трех факторов, вносящих наибольшие погрешности в прогноз на достижимо допустимую детальность описания реального процесса. При рассмотрении природы случайностей гипотеза о неточности, неполноте моделей должна рассматриваться как равноправная с предположениями о воздействии флуктуационных сил и измерительных помех. Помимо реальных помех и «шумов незнания» существенную роль играют возмущения, вносимые в исследуемый объект (пневмотранспортную систему) измерительными приборами, например, датчиками давления, скорости и др. По мере уточнения модели и снижения измерительных погрешностей главной и практически неустранимой помехой становятся флуктуационные силы: тепловые флуктуации и внешние поля. Их следует рассматривать как постоянный источник возмущений, в той или иной степени влияющий на течение реального процесса при пневматическом способе перемещения сыпучих материалов в транспортном трубопроводе.

Анализ обнаруженных в эксперименте картин течения воздушных струй и аэросмесей показывает, что воздействие дополнительных воздушных струй определяет динамику перемещения сыпучих материалов в пневмотранспортном трубопроводе. Для порционного и волнового режима движения аэросмесей, движущихся поступательно вдоль трубопровода [8,9], важным является исследование стохастических характеристик поля скоростей вдоль затопленной струи, в зонах формирования стелющейся струи и непосредственно в самой стелющейся струе. Для пневмотранспортных установок, работающих во вращательном режиме движения аэросмесей [10], помимо изучения движения в проточной (активной) части существенно важным является исследование входной пристенной струи в пневмотранспортный трубопровод, определяющий характер воздействия на частицы сыпучего материала и формирование в целом вращательно-поступательного режима движения.

Поле пульсаций скоростей в полуограниченной струе, истекающей из воздухоподводящего патрубка, представляет собой случайный процесс в пространстве и во времени. Первичное представление о случайном процессе дает математическое ожидание или среднее значение, определенное по времени или сочетанию при временном или пространственном осреднении случайных величин, определяющих заданный процесс, а также дисперсия. Плотность распределения пульсаций скорости представляет вероятность того, что значения пульсаций в произвольный момент времени будут заключены в определенном интервале. Знание плотности распределения случайной величины дает информацию об амплитудных особенностях изучаемых процессов, позволяет определить виды распределений этой случайной величины, установить методы для ее анализа.

Для анализа стохастических динамических процессов в пневмотранспортном трубопроводе как сложной технической системы [11] при случайных входных и случайных внутренних параметрах использована математическая модель в виде системы линейных дифференциальных уравнений:

$$a_n^* \frac{d^n Y^*}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dY^*}{dt} + a_0^* Y^* = b_0^* X^* + b_1^* \frac{dX^*}{dt} + \dots + b_m^* \frac{d^m X^*}{dt^m}, \quad (2)$$

где  $X^*$ ,  $Y^*$  – входной и выходной параметры, имеющие вид случайных функций времени;

$a_0^*, a_1^*, \dots, a_n^*$  – значения коэффициентов, характеризующих собственные колебания системы;

$b_0^*, b_1^*, \dots, b_m^*$  – значения коэффициентов, характеризующих вынужденные колебания системы.

Коэффициенты уравнения (2) могут быть зависимыми или независимыми между собой случайными величинами. В соответствии с методом Монте-Карло [12] принимается, что данные коэффициенты являются совокупностью  $k$  независимых случайных величин  $k_0^*, k_1^*, \dots, k_n^*$ , которые задаются в процессе математического моделирования с помощью генератора случайных чисел. Базовой совокупности независимых  $k_{1i}^*, k_{2i}^*, \dots, k_k^*$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) соответствуют конкретные значения коэффициентов  $a_{0i}^*, a_{1i}^*, \dots, a_{ni}^*$  и коэффициентов  $b_0^*, b_1^*, \dots, b_m^*$ . В этом случае дифференциальное уравнение (2) приводится к уравнению с постоянными коэффициентами для случайных функций:

$$a_{ni} \frac{d^n Y_i^*}{dt^n} + \dots + a_{1i} \frac{dY_i^*}{dt} + a_{0i} Y_i^* = b_{0i} X_i^* + b_{1i}^* \frac{dX_i^*}{dt} + \dots + b_{mi} \frac{d^m X_i^*}{dt^m}, \quad (3)$$

где  $Y_i^*$  – значения случайного выходного параметра, отвечающие  $i$ -й реализации базовой совокупности независимых случайных величин;

$X_i^*$  – значения случайного входного параметра, представляющего собой случайную функцию времени.

После преобразований по Лапласу уравнения (3) алгебраический аналог дифференциального уравнения, определяющего математическую модель процесса для  $i$ -й реализации, записывается:

$$Y_{is} = W_i(a_i, b_i, s) X(s), \quad i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

где  $X(s)$  – отображение по Лапласу случайного выходного параметра;

$X(s)$  – отображение по Лапласу  $i$ -й реализации выходного параметра;

$W_i(a_i, b_i, s)$  – трансформирующая функция технической системы,

$$W_i(a_i, b_i, s) = \frac{b_{0i} + b_{1i}s + \dots + b_{mi}s^m}{a_{ni}s^n + \dots + a_{1i}s + a_{0i}}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Данная функция позволяет описать ансамбль реализаций выходного параметра рассматриваемой системы при различных входных параметрах, являющихся случайными функциями.

Для случая, когда спектральная плотность входного параметра  $S_x(\omega)$ , дисперсия выходного параметра определяется:

$$G_{Yi} = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty W_i(a_i, b_i, j(\omega)) |S_x(\omega)| d\omega, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

где значение частотной трансформирующей функции  $W_i(a_j, b_j, j(\omega))$  получено из (5). Значения дисперсий, определяемых при реализации зависимости (5), формируют статистику при  $i = 1, 2, \dots, N$  ( $N$  – число рассмотренных реализаций).

Математическое среднее значение дисперсии:

$$G_Y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \sigma_{yi}^2. \quad (7)$$

Интегральные статистические характеристики выходного параметра определяются следующими соотношениями [12]:

$$G_Y^2 = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^\infty \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [W_i(a_i, b_i, j(\omega))] \right\} S_x(\omega) dx, \quad (8)$$

$$G_{\Delta i}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty |W_{\Delta i}(a_i, b_i, j(\omega))|^2 S_x(\omega) dx, \quad (9)$$

$$G_\sigma^4 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\sigma_{\Delta i})^2, \quad (10)$$

где уравнение (8) – дисперсия, (9) – дисперсия для  $i$ -й реализации и (10) – дисперсия выходного параметра.

Дисперсия спектральной плотности выходного параметра системы в функции частоты:

$$D_{SY}(\omega) = D_{QW}(\omega) S_x^2(\omega),$$

где  $D_{QW}$  – дисперсия квадрата модуля частотной трансформирующей функции;

$S_x(\omega)$  – спектральная плотность входного параметра.

Зависимости (8)...(11) позволяют вычислить спектральную плотность выходного параметра системы как случайную функцию частоты. Спектральная плотность зависит от статистических характеристик входного параметра. В качестве примера анализа стохастического процесса рассматривается расчет спектральной плотности изменения сопротивлений движению аэросмеси при различных ее режимах. Входным параметром является избыточное давление, выходным – динамическая погрешность обработки. Сравнение расчетных и экспериментальных данных спектральных плотностей позволяет дать количественную и качественную оценку исследуемых процессов.

Эффективность и достоверность прогнозирования моделей оцениваются посредством абсолютных, сравнительных и качественных показателей. Сравнительные показатели точности моделей и прогнозирования базируются на сравнении погрешности прогнозирования с определенными «эталонными» показателями. Оценка производится с использованием коэффициентов несоответствия, расхождения и корреляции. Качественные показатели позволяют анализировать ошибки прогнозов с разложением их значений на компоненты: смещения, дисперсии и ковариации.

## Выводы

1. Динамические процессы, протекающие в пневмотранспортном трубопроводе при движении сыпучих материалов в структурированном виде, предлагается рассматривать на основе стохастического анализа.

2. Динамические процессы, протекающие в пневмотранспортном трубопроводе, носят случайный (стохастический) характер, обусловленный сложным взаимодействием внешних и внутренних воздействий.

3. Стохастичность явлений может проявляться как при стохастических, так и при детерминированных внешних и внутренних параметрах транспортной установки.

## Список литературы

1. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. / Смолдырев А.Е. – М.: Недра, 1980. – 293 с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. / Нигматулин Р.И. – М.: Наука, 1987. – ч.1 – 464 с. – ч.2 – 359 с.
3. Волошин А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К.: Наук. думка, 2001. – 519 с.
4. Гуцин В.М. Нова концепція та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипучих матеріалів // *Машинознавство*. – 2000. – №2 (32). – С. 39-43.
5. Гуцин В.М. Современные тенденции совершенствования пневмотранспорта сыпучих материалов / Гуцин В.М. // *Сб. науч. трудов. Автомобильный транспорт. Вып. 5. Серия «Совершенствование машин для земляных и дорожных работ»*. – Харьков, 2000. – С. 33-35.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Вентцель Е.С. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
7. Кравцов Ю.А. Случайность, детерминированность, предсказуемость // *УФН*. 1989. т. 158. – С. 93-122.
8. Гуцин О.В. Пневмотранспорт сыпучих материалов в порционном режиме движения / О.В. Гуцин // *Сб. науч. тр. Национальной горной академии Украины*. – Днепропетровск: Навч. книга, 2002. – Т.2 № 13. – С. 22-25.
9. Гуцин О.В. Экспериментальные исследования массопереноса пневмотранспортной установкой с порционным движением сыпучих материалов / О.В. Гуцин // *Наук. вісн. будівництва*. – Харків, ХДТУБА-ХОТВАБУ, 2000. – Вип. 11. – С. 254-260.
10. Гуцин В.М. Пневматический транспорт с вращательным движением аэросмесей // *Наук. пр ДДТУ*. Вип. 42., Серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонДТУ, 2002. – С. 92-96.
11. Светлицкий В.А. Статистическая механика и теория надежности. / Светлицкий В.А. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 504 с.
12. Струтинский В.Б. Аналіз стохастичних динамічних процесів у технічних системах методом Монте-Карло з використанням частотних характеристик / Струтинский В.Б., Гуржий А.М. // *Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва*. – К.: Изд-во НТУУ «КПІ», 1998, т.1. – С. 119-123.

## Гуцин О.В. Стохастичність аналізу динамічних процесів у пневмотранспортному трубопроводі

*Анотація.* Динамічні процеси, які мають місце при русі аеросумішей у пневмотранспортному трубопроводі, запропоновано розглядати на базі стохастичного підходу. Показано, що динамічні процеси мають випадковий (стохастичний) характер, який обумовлено взаємодією зовнішніх та внутрішніх характеристик. Стохастичність явищ може мати місце як при стохастичних, так і детермінованих зовнішніх і внутрішніх параметрах транспортної установки. Режим руху аеросумішей та їх взаємні переходи пропонується описувати з використанням концепції часткової детермінованості.

**Ключові слова:** пневмотранспорт, динамічний процес, детермінованість, стохастичність

**Guschin O.V. Analyze of the stochastic dynamic processes in the tube of the pneumatic transport is done**

***Annotation.** Dynamic processes at motion of aeromixtures in a pneumatic pipeline it is suggested to examine on the basis of stochastic approach. It is rotined that flowings dynamic processes carry casual (stochastic) character, conditioned cooperation of external and internal influences. The stochastic of the phenomena can show up both at стохастичных and the determined external and internal parameters of a transport setting. It is suggested to describe the modes of motion of aeromixtures and their phase transitions with the use of conception of partial determinedness.*

**Keywords:** pneumatic transport, dynamic process, determinedness, stochastic

Стаття надійшла до редакції 24.10.2014 р.