

ТРАНСПОРТ

УДК 621.867.81.067.2

**М. Н. Чальцев¹, д-р техн. наук, профессор,
В. П. Тарасов², канд. техн. наук, профессор, Б. Е. Бугаев¹**

**1 – Автомобильно-дорожный институт ГВУЗ
«Донецкий национальный технический университет», г. Горловка;
2 – Алтайский государственный технический университет, г. Алтай**

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Составлена линейная математическая модель аэродисперсного неустановившегося потока в транспортном трубопроводе с использованием известных в теории пневмотранспорта зависимостей. Выполнен анализ этой модели методами теории автоматического управления с преобразованием Лапласа исходных уравнений, с построением передаточных функций и определением динамических характеристик, влияющих на устойчивость системы. Найдены постоянная времени реакции звена на возмущение и коэффициент усиления по давлению. Используются методы теории автоматического управления для анализа динамических характеристик пневмотранспортных систем.

***Ключевые слова:** пневматический транспорт, неустановившийся процесс, методы теории автоматического управления, динамические характеристики*

Введение

Одной из особенностей пневматического трубопроводного транспорта является сравнительная простота конструкции агрегатов и сложность протекающих в них процессов. Эти процессы характеризуются разнообразием параметров участвующих в них компонентов, сложностью кинематических структур аэродисперсных потоков. Кроме того, анализ процессов, происходящих в отдельных элементах системы в отрыве друг от друга, не позволяет учесть их взаимовлияние и оценить устойчивость работы системы в целом. Поэтому большинство известных моделей, методик расчета и проектирования пневмотранспортных систем базируются на условии стационарности процесса [1, 2, 3, 4, 5].

В то же время для выбора рациональных режимов транспортирования требуется знание динамических характеристик аэродисперсных потоков, поскольку зачастую именно на грани устойчивости реализуются наиболее экономически выгодные режимы.

В качестве примера на рисунке 1 приведена типичная для пневмотранспортирования угольной пыли фазовая диаграмма установившегося аэродисперсного потока в трубе диаметром $D = 50$ мм [1].

В качестве транспортируемого материала здесь использована угольная пыль.

Фазовая диаграмма построена в координатах $\Delta P / L = f(u)$ (удельные потери давления в зависимости от средней скорости воздуха). На диаграмме сплошными линиями обозначены опытные кривые, прерывистыми – результаты расчета. Точки перегибов фазовой диаграммы характеризуют критический режим для различных значений расхода угольной пыли. Параметры пыли: дисперсность $d_T = 50$ мкм; плотность угля $\rho_T = 1600$ кг/м³.

© Чальцев М. Н., Тарасов В. П., Бугаев Б. Е., 2012

Как видно из диаграммы, критический режим характеризуется наименьшими потерями давления и минимальными энергозатратами на транспортирование. Важной характеристикой критического режима является также то, что он является границей устойчивости. При скоростях выше критической (на диаграмме справа от критической скорости) частицы движутся во взвешенном состоянии, процесс транспортирования является устойчивым. При скоростях воздуха в трубе меньше критической скорости аэродинамических сил недостаточно, чтобы сохранять поток во взвешенном состоянии, в результате чего частицы выпадают в осадок на нижнюю стенку трубы. Устойчивость потока при этом нарушается, возможен завал трубопровода.

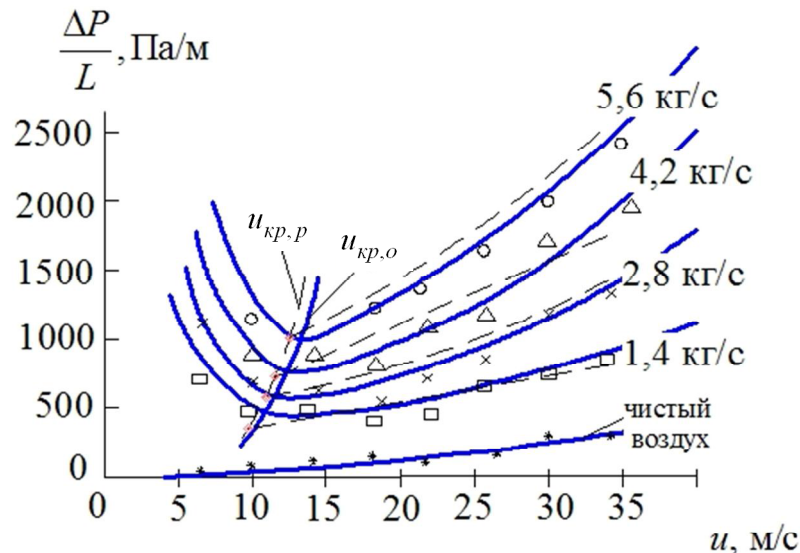


Рисунок 1 – Фазовая диаграмма аэродисперсного потока в горизонтальном трубопроводе [1]

Экспериментально установлено, что в нижних высококонцентрированных слоях взвесенесущего потока вязкие и турбулентные касательные напряжения аэросмеси существенно малы по сравнению с напряжением сил механического трения твердых частиц одна о другую и о стенку трубы. Поэтому в критическом или близком к нему режимах пневмотранспортирования осредненные касательные напряжения в донных высококонцентрированных слоях потока определяются в основном упомянутым механическим трением.

Пусть $\bar{\tau}_n$ и $\bar{\tau}_m$ – среднестатистическое касательное напряжение газозвеси на нижней стенке трубы и напряжение среднестатистической силы трения скольжения твердого материала о дно трубы.

Как утверждается в источнике [1], единственным условием, определяющим критический режим пневмотранспортирования, является равенство:

$$\bar{\tau}_n = \bar{\tau}_m. \quad (1)$$

Это условие выражает предельное динамическое равновесие между взвесенесущим потоком в целом и сплошным потоком твердых частиц, перемещающихся у дна трубы. Области стабильного (II) и нестабильного (I) режимов гидротранспортирования и критический режим, разделяющий эти области, приведены на рисунке.2. Здесь же через I' и I'' обозначены режимы с полным и частичным выпадением твердого материала в осадок, соответственно.

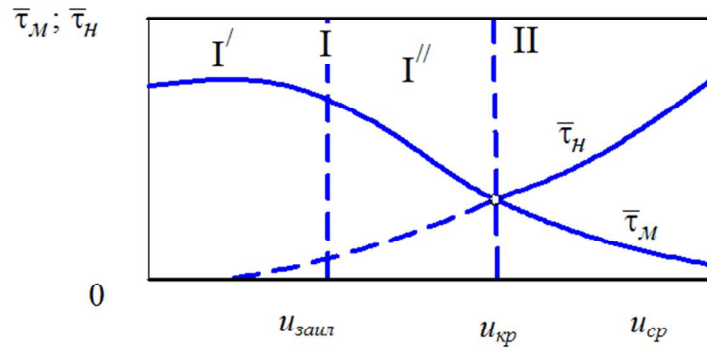


Рисунок 2 – Схема касательных напряжений на нижней стенке трубы:

$u_{заил}$ – скорость воздуха в начале заилиения; $u_{кр}$ – критическая скорость воздуха;

$u_{ср}$ – средняя скорость воздуха в процессе транспортирования

На основе равенства (1) в работе [1] получена математическая модель критического режима в виде системы нелинейных алгебраических уравнений, определены значения параметров $u_{кр}$ и $(\Delta P / L)_{кр}$.

С целью автоматизации вычислительных работ и повышения их точности разработана также методика, алгоритм и программное обеспечение расчетов критической скорости и удельных потерь давления, обеспечивающих минимальные затраты энергии на транспортирование [1]. Предлагаемая методика расчета критических режимов дает возможность провести численные исследования критических режимов при различных условиях транспортирования.

Что касается исследования аэродисперсных потоков при скоростях несущей среды выше критических, то их анализ может быть выполнен на основе уже отработанных методик расчета менее трудоемкими методами. Пример такого анализа представлен ниже.

Цель работы

Целью исследований является определение динамических характеристик и разработка математической модели неустановившегося аэродисперсного потока в горизонтальной трубке при скоростях несущей среды выше критических.

Для выполнения поставленной цели могут быть использованы методы, предлагаемые теорией автоматического управления [6]. Согласно этой теории любая техническая система может быть представлена в виде совокупности связанных между собой и взаимодействующих в общей структуре системы элементов (звеньев), отличающихся свойственными каждому из них динамическими характеристиками (передаточными функциями), учет которых при анализе системы дает положительное решение задачи. После определения по упомянутой методике передаточных функций каждого звена, синтезируется структурная схема всей системы, на основании которой производится анализ ее динамических характеристик, при условии, что процесс описывается дифференциальными уравнениями первого порядка.

Изложение основного материала

Итак, выделим из состава пневмотранспортной системы транспортный трубопровод, как динамическое звено и рассмотрим некоторые его динамические характеристики.

Пусть перепад давления в трубопроводе составляет $(p_1 - p_2)$. В установившемся потоке этот перепад давления уравнивается присутствующими в системе силами трения (f) и гравитации (g) следующим образом:

$$p_1 - p_2 = \Delta p_f + \Delta p_g, \quad (2)$$

где Δp_f и Δp_g – градиент сил трения и гравитации.

Для неустановившегося аэродисперсного потока баланс давления преобразуем при помощи второго закона Ньютона:

$$m \frac{du}{dt} + m_T \frac{dc}{dt} = A(p_1 - p_2) - A(\Delta p_f + \Delta p_g), \quad (3)$$

где m – масса воздуха в трубопроводе;

m_T – масса твердых частиц в трубопроводе;

u – скорость воздуха в трубопроводе;

c – скорость твердых частиц;

A – коэффициент.

При наличии в трубопроводе клапана или изгиба, к приведенному выше уравнению следует добавить соответствующие потери давления.

В условиях неустановившегося потока его параметры становятся переменными. Переменное значение каждого параметра состоит из величины его среднего значения в установившемся потоке и его переменной составляющей:

$$\begin{cases} p_1 = \bar{p}_1 + p_1^1; \\ p_2 = \bar{p}_2 + p_2^1; \\ \Delta p_f = \Delta \bar{p}_f + \Delta p_f^1; \\ \Delta p_g = \Delta \bar{p}_g + \Delta p_g^1; \\ u = \bar{u} + u^1; \\ c = \bar{c} + c^1, \end{cases} \quad (4)$$

где p_1^1 , p_2^1 – переменная составляющая давления;

Δp_f^1 , Δp_g^1 – переменная составляющая перепада давления;

u^1 , c^1 – переменная составляющая скорости воздуха и твердых частиц.

Так как

$$\bar{p}_1 - \bar{p}_2 = \Delta \bar{p}_f + \Delta \bar{p}_g,$$

уравнение баланса давления (3) принимает вид:

$$m \frac{du^1}{dt} + m_T \frac{dc^1}{dt} = (p_1^1 - p_2^1) - A(\Delta p_f^1 + \Delta p_g^1), \quad (5)$$

для дальнейшего анализа уравнение (5) преобразуем по Лапласу:

$$m [su(s) - u^1(0)] + m_T [sc(s) - c^1(0)] = A [p_1^1(s) - p_2^1(s)] - A [\Delta p_f^1(s) + \Delta p_g^1(s)], \quad (6)$$

где s – переменная преобразования Лапласа;

$u(s)$, $c(s)$ – изображение по Лапласу местной скорости;

$\Delta p(s)$ – изображение по Лапласу градиента давления.

Далее для определения передаточных функций используем дополнительные предположения:

1. Приравнявая $u^1(0)$ и $c^1(0)$ к нулю и принимая период гравитационных пульсаций пренебрежительно малым, имеем:

$$msu(s) + m_T sc(s) = A \left[p_1^1(s) - p_2^1(s) \right] - A \left[\Delta p_f^1(s) \right]. \quad (7)$$

2. В случае, если пульсации скорости воздуха меньше пульсаций скорости частицы, а пульсации скорости частицы преобладают над фрикционными колебаниями, запишем:

$$m_T sc(s) = A \left[p_1^1(s) - p_2^1(s) \right] - A \left[\frac{\partial(\Delta p_f)}{\partial c} \right] c(s). \quad (8)$$

Отсюда найдем параметр $c(s)$

$$c(s) = \frac{A \left[p_1^1(s) - p_2^1(s) \right]}{m_T s + A \partial(\Delta p_f) / \partial c}. \quad (9)$$

3. Допуская, что $\Delta p_f^1 = p_1^1(s) - p_2^1(s)$, получим:

$$\frac{c(s)}{\Delta p_f^1} = \frac{A^{-1} \partial c / \partial(\Delta p_f)}{1 + m_T s / A(\partial(\Delta p_f) / \partial c)} = \frac{K}{1 + \tau s}. \quad (10)$$

Таким образом, исходя из анализа передаточных функций, находим постоянную времени τ реакции звена

$$\tau = \frac{m_T / A}{\partial(\Delta p_f) \partial c} \quad (11)$$

и коэффициент усиления K

$$K = \frac{1}{A} \left(\frac{\partial c}{\partial(\Delta p_f)} \right). \quad (12)$$

Выражение $\partial(\Delta p_f) / \partial c$ записываем через коэффициент трения [2]:

$$\Delta p_f = \lambda_Z \rho_T (1 - \varepsilon) \frac{c^2 L}{2 D}, \quad (13)$$

где λ_Z – коэффициент трения аэродисперсного потока;

ρ_T – плотность материала частиц;

L – длина трубопровода;

D – диаметр трубопровода;

ε – концентрация потока.

Продифференцировав уравнение (13), имеем

$$\frac{\partial(\Delta p_f)}{\partial c} = \lambda_Z \frac{\rho_T}{D} c L (1 - \varepsilon). \quad (14)$$

Подставляем выражения (13) и (14) в (11) и (12) с некоторыми упрощениями, как, например $m_T = LA(1 - \varepsilon)\rho_T$, окончательно получаем:

$$\tau = \frac{D}{\lambda_z c}; \quad (15)$$

$$K = \frac{4}{\pi \lambda_z c \rho (1 - \varepsilon) L D}. \quad (16)$$

Выводы

Таким образом, методом передаточных функций определены динамические параметры пневмотранспортного трубопровода: время реакции аэродисперсной системы и коэффициент усиления звена.

Для фундаментальных исследований динамических характеристик пневмотранспортных систем целесообразно использование методов теории автоматического регулирования.

Список литературы

1. Чальцев М. Н. Развитие теоретических основ аэродинамического расчета и проектирования пневмотранспортных систем: дис. доктора техн. наук / М. Н. Чальцев. – Луганск, 2012. – 312 с.
Chaltsev M. N. Razvitiye teoreticheskikh osnov aerodinamicheskogo rascheta i proektirovaniya pnevmotransportnykh system (The development of theoretical bases of aerodynamic analysis and pneumatic conveyor systems engineering): dis. doktora tekhn. nauk / M. N. Chaltsev. – Lugansk, 2012. – 312 s.
2. Pneumatic conveying of solids / G. E. Klinzing, R. D. Marcus, F. Rizk, L. S. Leung. – London: Chapman and Hall, 1977. – 599 p.
3. Mills D. Pneumatic conveying design guide / D. Mills. – London: Butterworths, 1990. – 526 p.
4. Островский Г. М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности / Г. М. Островский. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.
Ostrovskiy G. M. Pnevmaticheskiiy transport sypuchikh materialov v khimicheskoy promyshlennosti (Pneumatic transport of bulk materials in chemical industry) / G. M. Ostrovskiy. – L.: Khimiya, 1984. – 104 s.
5. Волошин А. И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А. И. Волошин, Б. В. Пономарев. – К.: Наукова думка, 2001. – 520 с.
Voloshin A. I. Mekhanika pnevmotransportirovaniya sypuchikh materialov (Mechanics of pneumatic conveying of bulk materials) / A. I. Voloshin, B. V. Ponomarev. – K.: Naukova dumka, 2001. – 520 s.
6. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д. Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1976. – 424 с.
Popov D. N. Dinamika i regulirovaniye gidro- i pnevmosistem (Dynamics and control of hydraulic and pneumatic systems) / D. N. Popov. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 424 s.
7. Ковалев Р. В. Автоматизация технологических процессов пневмотранспортирования сыпучих строительных материалов при учете случайного характера изменения параметров аэросмеси: дис. к.т.н. / Р. В. Ковалев. – М., 2009. – 178 с.
Kovalev R. V. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov pnevmotransportirovaniya sypuchikh stroitelnykh materialov pri uchete sluchaynogo kharaktera izmeneniya parametrov aerosmesi (Automation of technological processes of pneumatic conveying of bulk materials considering the air-fuel mixture parameters change of random nature): dis. k.t.n. / R. V. Kovalev. – M., 2009. – 178 s.

Рецензент: канд. техн. наук, доц. М. А. Мастепан, АДІ ДонНТУ.

Стаття надійшла до редакції 16.07.12

М. М. Чальцев¹, В. П. Тарасов², Б. Є. Бугайов¹
1 – Автомобільно-дорожній інститут ДВНЗ
«Донецький національний технічний університет», м. Горлівка;
2 – Алтайський державний технічний університет, м. Алтай
Аналіз динамічних характеристик пневмотранспортних систем методами
теорії автоматичного управління

Складено математичну модель аеродисперсного потоку в пневмотранспортному трубопроводі, що включає лінеаризовані рівняння параметрів несталого процесу. Виконано аналіз цієї моделі методами теорії автоматичного управління з перетворенням вихідних рівнянь Лапласа, побудовою передавальних функцій динамічних ланок і визначенням динамічних характеристик пневмотранспортного потоку, що визначають стійкість системи. Визначено сталу часу реакції потоку на можливі збурення, а також коефіцієнт посилення по тиску. Зроблено висновок про доцільність використання методів теорії автоматичного управління для аналізу динамічних характеристик пневмотранспортних систем.

ПНЕВМАТИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, НЕСТАЛИЙ ПРОЦЕС, МЕТОДИ ТЕОРІЇ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ, ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

M. N. Chaltsev¹, V. P. Tarasov², B. E. Bugaev¹
1 – Automobile Transport and Highway Engineering Institute of
Donetsk National Technical University, City of Gorlovka;
2 – Altai State Technical University, City of Altai
Analysis of pneumatic conveying systems dynamic characteristics
by automatic control theory methods

Load variations in pneumatic piping cause fleeting transients that do not have the ability to self-leveling and lead to an unstable regime until clogging the pipeline. Effective pneumatic conveying primarily associated with the organization of sustainable modes of transportation, through the development and use, the time-optimal automatic control systems, excluding the possibility of loss of particles from the flow.

A mathematical model of a pneumatic conveying installation, based on the principles of design and methods for describing the systems used in the theory of automatic control. The model includes a system of linearized equations of unsteady process parameters pneumatic conveying through a horizontal pipeline.

The analysis of this model using the theory of automatic control methods with the Laplace transformation of the original equations, the construction of the transfer functions of dynamic elements and determining the dynamic characteristics of pneumatic flow in determining the stability of the system. The time constant of the flow reaction to possible disturbances, as well as the gain coefficient in pressure have been determined. The conclusion about the practicability of the automatic control theory methods use for analyzing the dynamic characteristics of pneumatic conveying systems.

PNEUMATIC CONVEYING, TRANSIENT PROCESS, AUTOMATIC CONTROL THEORY METHODS, DYNAMIC CHARACTERISTICS

**M. N. Chaltsev¹, D. Tech. Sc. Professor,
V. P. Tarasov², Cand. Tech. Sc., Professor, B. E. Bugaev¹**

**1 – Automobile Transport and Highway Engineering Institute of
Donetsk National Technical University, City of Gorlovka;**

2 – Altai State Technical University, Altai

**ANALYSIS OF PNEUMATIC CONVEYING SYSTEMS
DYNAMIC CHARACTERISTICS
BY AUTOMATIC CONTROL THEORY METHODS**

The linear mathematical model of the gas-solid unsettled flow in the conveying line is made up with the use of the dependences known in the pneumatic conveying theory. The model analysis by the methods of the automatic control theory with the basic equations Laplace transformations, transfer functions plotting and determination of the dynamic characteristics effecting the system stability is carried out. The time constant of the disturbance member reaction time and the pressure gain coefficient are determined. The automatic control methods are used for the pneumatic conveying systems analysis.

Key words: pneumatic conveying, unsettled process, automatic control theory methods, dynamic characteristics

Introduction

One of the pipeline pneumatic conveying system peculiarities is the devices comparatively simple design along with the complexity of the processes occurring in them. The processes are characterized by the variety of components involved in them and gas-solid flows kinematics complexity. Furthermore, the analysis of the processes occurring in the system separate elements, apart from each other, does not allow consider their interaction and value the system operation stability in general. Thus most of the known pneumatic conveying systems design and engineering models and techniques are based on the process stability condition [1, 2, 3, 4, 5].

Meanwhile choosing conveying rational modes requires information about gas-solid flows dynamic characteristics as the most cost effective modes are realized on the edge of stability.

As an example, the typical phase diagram of steady gas-solid flow in the pipe $D = 50$ mm [1] for coal dust pneumatic conveying is given in figure 1.

Coal dust is used here as the conveyed material.

The phase diagram is $\Delta P / L = f(u)$ plotted (specific pressure losses depending on the air mean velocity). The continuous lines in the diagram stand for experimental curves, the dashed lines – for design results. The phase diagram inflection points characterize the critical mode for different values of coal dust flow rate. The dust parameters: dispersibility $d_S = 50$ mkm ; the coal density $\rho_S = 1600$ kg/m³.

As seen from the diagram, the critical mode is characterized by the least pressure losses and minimal power consumption for conveying. The critical mode essential characteristic is its being the stability limit. At the velocities above the critical one (on the right of the critical velocity in the diagram) particles flow in the suspended state, the conveying process is stable. At the air velocities in pipes below the critical one the aerodynamic forces are not enough for maintaining the flow in the suspended state resulting in the particles forming the settled layer on the pipe lower wall. The flow stability is disturbed and the pipeline blockage may occur.

© Chaltsev M. N., Tarasov V. P., Bugaev B. E., 2012

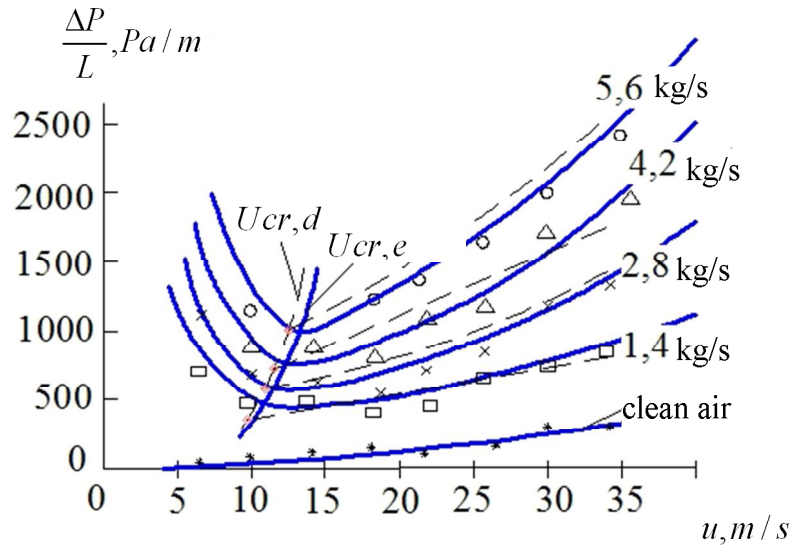


Figure 1 – Phase diagram of the gas-solid flow in the horizontal pipe [1]

It was experimentally proved that in the lower highly concentrated flow layers the viscous and turbulent shear stresses of the mixture are essentially small in comparison with the force of solids mechanical friction with each other and the pipe wall. Thus in the pneumatic conveying critical or close to it modes averaged shear stresses in lower highly concentrated flow layers are determined by means of the mentioned mechanical friction.

Let us assume that $\bar{\tau}_l$ and $\bar{\tau}_m$ are gas suspension average shear stress on the pipe lower wall and the stress of solids average sliding friction force with the pipe bottom.

As stated in the source [1], the only condition determining the pneumatic conveying critical mode is the equation:

$$\bar{\tau}_l = \bar{\tau}_m. \quad (1)$$

The condition expresses the limit dynamic equilibrium between the gas suspension flow all in all and the solids moving at the pipe bottom continuous flow. The areas of hydraulic conveying stable (II) and unstable (I) modes and the critical mode, separating the areas are given in figure 2. Here the modes with the full and partial solids saltation are denoted with I' and I''.

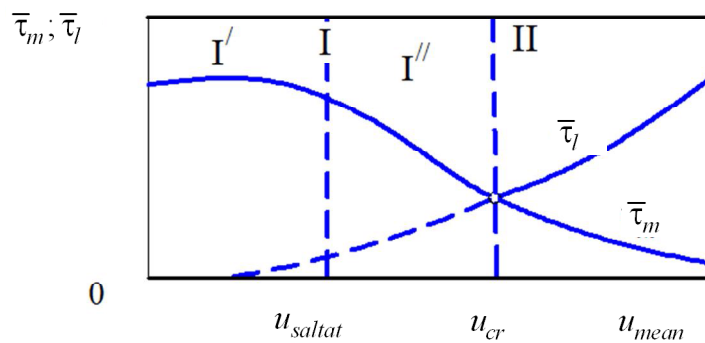


Figure 2 – Lower wall shear stress scheme:

u_{saltat} – air velocity in the beginning of saltation, u_{cr} – air critical velocity,

u_{mean} – mean air velocity during the conveying process

The critical mode mathematical model in the form of nonlinear algebraic equations system and u_{cr} and $(\Delta P / L)_{cr}$ parameters values were determined on the basis of the equation (1) in the work [1].

The critical velocity and specific pressure losses, ensuring minimal power consumption for conveying [1] technique, algorithm and software were engineered with the purpose of computing works automation and their accuracy increase. The suggested critical mode design technique enables carrying out numerical studies under different conveying conditions.

Regarding gas-solid flows studies at the velocities exceeding that of the carrier medium one their analysis can be performed on the basis of the developed less labour intensive design techniques.

Purpose of work

The research purpose is in determining of the dynamic characteristics and the mathematical mode engineering of the unstable gas-solid flow in the horizontal pipe at the carrier medium velocity exceeding the critical ones.

Various methods, offered by the automatic control theory [6] can be used for achieving the stated purpose. According to the theory any technical system can be expressed in the form of the group of interconnected system elements (members), differing from each other in dynamic characteristics (transfer functions), taking into account which during the system analysis gives the problem positive solution. After each member transfer functions determination by the mentioned technique the whole system structure diagram is generated. The system dynamic characteristics analysis is carried out on the basis of the generated diagram provided the process is described with differential equations of the first order.

Basic material presentation

Let us point out from the pneumatic conveying system the conveying line as the dynamic member and consider some of its characteristics.

Let the pressure drop in the pipeline be $(p_1 - p_2)$. In the settled flow the pressure drop is balanced by the forces of friction (f) and gravity (g) the following way:

$$p_1 - p_2 = \Delta p_f + \Delta p_g, \quad (2)$$

where Δp_f and Δp_g – gradient of gravity and friction force.

For the unsettled gas-solid flow the pressure balance is transformed by means of the Newton's second law:

$$m \frac{du}{dt} + m_s \frac{dc}{dt} = A(p_1 - p_2) - A(\Delta p_f + \Delta p_g), \quad (3)$$

where m – air mass in the pipeline;

m_s – solids mass in the pipeline;

u – air velocity in the pipeline;

c – solids velocity;

A – coefficient.

If there are any valves or elbows in the pipeline, pressure losses should be added the equation given above.

Under the conditions of the unsettled flow its parameters become variable. Each parameter varying value consists from its mean value in the settled flow and the variable component:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 = \bar{p}_1 + p_1^1 \\ p_2 = \bar{p}_2 + p_2^1 \\ \Delta p_f = \Delta \bar{p}_f + \Delta p_f^1 \\ \Delta p_g = \Delta \bar{p}_g + \Delta p_g^1 \\ u = \bar{u} + u^1; \\ c = \bar{c} + c^1, \end{array} \right. \quad (4)$$

where p_1^1, p_2^1 – pressure variable component;

$\Delta p_f^1, \Delta p_g^1$ – pressure drop variable component;

u^1, c^1 – air and solids velocity variable component.

As

$$\bar{p}_1 - \bar{p}_2 = \Delta \bar{p}_f + \Delta \bar{p}_g,$$

the balance equation (3) takes the form:

$$m \frac{du^1}{dt} + m_S \frac{dc^1}{dt} = (p_1^1 - p_2^1) - A(\Delta p_f^1 + \Delta p_g^1), \quad (5)$$

for the further analysis the Laplace transformation of the equation (5) is used:

$$m [su(s) - u^1(0)] + m_T [sc(s) - c^1(0)] = A [p_1^1(s) - p_2^1(s)] - A [\Delta p_f^1(s) + \Delta p_g^1(s)], \quad (6)$$

where s – Laplace transformation variable;

$u(s), c(s)$ – local velocity Laplace representation;

$\Delta p(s)$ – pressure gradient Laplace representation.

Next for transfer functions determination we use supplementary assumptions:

1. Equating $u^1(0)$ and $c^1(0)$ to zero and taking gravity fluctuation as negligibly small we have:

$$msu(s) + m_S sc(s) = A [p_1^1(s) - p_2^1(s)] - A [\Delta p_f^1(s)]. \quad (7)$$

2. In case if the air velocity fluctuations are smaller than the solid velocity fluctuations and the solid velocity fluctuations dominate over the friction fluctuations we will write:

$$m_S sc(s) = A [p_1^1(s) - p_2^1(s)] - A \left[\frac{\partial(\Delta p_f)}{\partial c} \right] c(s). \quad (8)$$

Hence we will find the parameter $c(s)$

$$c(s) = \frac{A [p_1^1(s) - p_2^1(s)]}{m_S s + A \partial(\Delta p_f) / \partial c}. \quad (9)$$

3. Assuming that $\Delta p_f^1 = p_1^1(s) - p_2^1(s)$, we will obtain:

$$\frac{c(s)}{\Delta p_f^1} = \frac{A^{-1} \partial c / \partial(\Delta p_f)}{1 + m_S s / A(\partial(\Delta p_f) / \partial c)} = \frac{K}{1 + \tau s}. \quad (10)$$

Therefore according to the transfer functions analysis, we find the member reaction time constant τ

$$\tau = \frac{m_S / A}{\partial(\Delta p_f) / \partial c} \quad (11)$$

and the gain coefficient K

$$K = \frac{1}{A} \left(\frac{\partial c}{\partial(\Delta p_f)} \right). \quad (12)$$

The expression $\partial(\Delta p_f) / \partial c$ we write in terms of the friction coefficient [2]:

$$\Delta p_f = \lambda_Z \rho_S (1 - \varepsilon) \frac{c^2 L}{2 D}, \quad (13)$$

where λ_Z – gas solid flow friction coefficient;

ρ_S – solids material density;

L – pipeline length;

D – pipeline diameter;

ε – flow concentration.

Having differentiated the equation (13) we have

$$\frac{\partial(\Delta p_f)}{\partial c} = \lambda_Z \frac{\rho_S}{D} c L (1 - \varepsilon). \quad (14)$$

Inserting the expressions (13) and (14) into (11) and (12) with several simplifications such as $m_S = LA(1 - \varepsilon)\rho_S$, we finally obtain:

$$\tau = \frac{D}{\lambda_Z c}; \quad (15)$$

$$K = \frac{4}{\pi \lambda_Z c \rho (1 - \varepsilon) L D}. \quad (16)$$

Conclusions

Hence pneumatic conveying pipeline dynamic parameters are specified the transfer function method: the gas-solid system reaction time and the member gain coefficient.

For pneumatic conveying systems dynamic characteristics fundamental researches the use of automatic control theory methods is reasonable.

References

1. Чальцев М. Н. Аналитические и экспериментальные исследования критических режимов пневмотранспортирования сыпучих материалов / М. Н. Чальцев, Б. Е. Бугаев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Науково-виробничий збірник. – Горлівка: АДІ ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – № 1(10).
- Chaltsev M. N. Analiticheskiye i eksperimentalnyye issledovaniya kriticheskikh rezhimov pnevmotransportirovaniya syuchikh materialov (Analytical and Experimental Studies of Bulk Materials Pneumatic Conveying) / M. N. Chaltsev, B. E. Bugaev // Visti Avtomobilno-dorozhnogo instytutu: Naukovo-vyrobnychiy zbirnyk. – Horlivka: ADI DVNZ "DonNTU", 2010. – № 1(10).
2. Pneumatic conveying of solids / G. E. Klinzing, R. D. Marcus, F. Rizk, L. S. Leung. – London: Chapman and Hall, 1977. – 599 p.

3. Mills D. Pneumatic conveying design guide / D. Mills. – London: Butterworths, 1990. – 526 p.
4. Островский Г. М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности / Г. М. Островский. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.
Ostrovskiy G. M. Pnevmaticheskiy transport syuchikh materialov v khimicheskoy promyshlennosti (Pneumatic Conveying of Bulk Materials in Chemical Industry) / G. M. Ostrovskiy. – L.: Khimiya, 1984. – 104 s.
5. Волошин А. И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А. И. Волошин, Б. В. Пономарев. – К.: Наукова думка, 2001. – 520 с.
Voloshin A. I. Mekhanika pnevmotransportirovaniya syuchkh materialov (Bulk Materials Pneumatic Conveying Mechanics) / A. I. Voloshin, B. V. Ponomarev. – K.: Naukova dumka, 2001. – 520 s.
6. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д. Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1976. – 424 с.
Popov D. N. Dinamika i regulirovaniye gidro- i pnevmosistem (Hydraulic and Pneumatic Systems Dynamics and Control) / D. N. Popov. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 424 s.
7. Ковалев Р. В. Обоснование систем управления процессом пневмотранспортирования / Р. В. Ковалев // Новые технологии производства и управления в промышленности и образовании // Сб. науч. тр. – М.: МАДИ(ГТУ), 2009. – С. 78–81.
Kovalev R. V. Obosnovaniye system upravleniya protsessom pnevmotransportirovaniya (Pneumatic Conveying Process Control Systems Justification) / R. V. Kovalev // Novyye tekhnologii proizvodstva i upravleniya v promyshlennosti i obrazovanii // Sb. nauch. tr. – M.: MADI (GTU), 2009. – S. 78–81.

The reader: Cand. Tech. Sc, docent M. A. Mastepan, ADI DonNTU.

Received 16.07.12