

Kowalski Boleslav – Professor FGAOU HPE "Siberian Federal University," Oil and Gas Institute, Department of "Fuel supply and fuels and lubricants", E-mail: Labsm@mail.ru

Scar Vyacheslav – graduate FGAOU HPE "Siberian Federal University," Oil and Gas Institute, Department of "Fuel supply and fuels and lubricants", E-mail: shram18rus@mail.ru

УДК 691.001.24:621.86

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ПНЕВМОТРАНСПОРТА СЫПУЧИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Монгуш С.Ч., Шиманова А.А.

*Тувинский государственный университет, Кызыл
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет, Санкт-Петербург*

METHODS OF CALCULATION PROCESS OF PNEUMATIC CONVEYING LOOSE MATERIALS

Mongush S.CH., Shimanova A.A.

*Tuvin state University, Kyzyl
Saint-Petersburg state University of architecture and construction,
Saint-Petersburg*

В статье приведены сведения о современном состоянии пневматического транспорта в строительстве и о причинах сдерживания его применения в различных технологических процессах. Проведен анализ существующих моделей расчета основных параметров пневматических транспортных установок. Даны рекомендации по наиболее перспективному методу исследования двухфазовых потоков. Приведен сравнительный анализ существующих математических моделей двухфазовых потоков.

Ключевые слова: пневмотранспорт, математический эксперимент, математическая модель, двухфазовый поток, строительные материалы.

This article provides information about the current state of air transport in the construction and the reasons for its containment applications in various industrial processes. The analysis of existing models of key parameters of pneumatic conveying systems. Recommendations on the most promising method of investigating two phase flows. A comparative analysis of the existing mathematical models of two-phase flows.

Key words: pneumatic transport, mathematical experiment, mathematical model, two-phase flow building materials.

Пневматический транспорт (ПТ) сыпучих материалов благодаря таким преимуществам перед другими видами транспорта, как экологичность, чистота, доступность в загруженных пространствах находит широкое применение в различных отраслях промышленности.



Применение пневмотранспорта в технологических процессах сдерживается рядом объективных причин. Одной из них является отсутствие единого научного обоснования процесса пневмотранспорта и, как следствие, отсутствие общей методики расчета и конструирования пневматических транспортных установок. Это объясняется сложностью физических явлений, происходящих при пневматическом транспортировании материалов (в трубопроводе обычно используются турбулентные воздушные потоки, которые сами по себе еще далеко не изучены, особенно области течения вблизи стенок трубопровода), разнообразием пневмотранспортных операций и разнородностью транспортируемых материалов.

Существуют десятки расчетных методик разных авторов. Их можно классифицировать по типу рассчитываемого оборудования, по видам перемещаемого материала, по отраслям промышленности, где используется оборудование и т.д.

Методы, используемые в строительной отрасли, создавались и отрабатывались на основе экспериментальных исследований транспортирования отдельных материалов (чаще всего цемента) на определенных установках. Поэтому они основываются на эмпирических зависимостях и расчетных формулах. Последние включают опытные коэффициенты, функции которых не определены, а их числовые значения у разных авторов различаются. Применение подобных методик ограничено диапазоном параметров и условий, в которых проводились эксперименты. Какими бы масштабными ни были экспериментальные исследования, на основе которых были получены опытные коэффициенты, они не могут учитывать все многообразие факторов, способных оказывать влияние на процесс пневмотранспортирования. Ввиду этого достоверность при наличии малейших различий исходных данных и внешних условий очень низка.

Наибольший интерес представляют работы С.А.Евтюкова, М.Д. Барского, А.А. Надеина, М.П. Калинушкина, В.Ф. Крамского, Шапунова М.М., Серякова В.С., Малевича И. П. и др., на основе анализа которых можно сформулировать (условно) «классическую» теорию расчета пневмотранспортных установок.

Основные зависимости «классической» теории расчета получены для движения одиночной частицы в ламинарном или турбулентном потоке и тем или иным способом распространяются на движение дисперсной среды двухкомпонентного потока. Основными допущениями здесь являются:

- распределение частиц по сечению материалопровода равномерное;
- концентрация твердого компонента исключает взаимодействие между частицами;
- влияние частиц на движение несущей среды не учитывается.

Такой подход достаточно слабо отражает процессы, происходящие в пневмотранспортных системах.

Немаловажное влияние на достоверность результатов, получаемых при расчетах по этой теории, оказывает превалирование эмпирического подхода. Для

упрощения расчетов рекомендуется использовать графики и номограммы, которые определяют многочисленные опытные коэффициенты, используемые в уравнениях. При изменении исходных данных точность и достоверность расчетов, проведенных по этой методике, априори снижена.

Однако проведение экспериментальных исследований при изменении исходных данных нельзя считать панацеей в виду их сложности, длительности и высокой стоимости.

В связи с широким распространением вычислительной техники и пакетов программ, позволяющих производить решение сложных систем уравнений, стала широко развиваться область математического эксперимента. При проведении подобных экспериментов важным фактором становится выбор исходных уравнений и замыкающих соотношений, позволяющих корректно описать рассматриваемый технологический процесс в широком диапазоне изменения технологических параметров.

Исследование процессов пневматического транспортирования методом математического моделирования позволит выработать научно-обоснованные подходы повышения его эффективности путем анализа динамических процессов, происходящих при перемещении твердых материалов потоком газа.

В настоящее время наиболее перспективным представляется исследование динамики двухфазового потока, основанное на гетерогенной теории, в соответствии с которой каждая фаза потока рассматривается самостоятельно.

В рамках этого подхода все существующие на сегодняшний день математические модели двухфазовых потоков можно разбить на два больших типа. Модели первого типа описывают движение несущей газовой фазы и движение множества взвешенных частиц, основываясь на эйлерово-континуальном представлении. Их называют 2-х жидкостными, поскольку обе фазы рассматриваются как взаимопроникающие континуумы, сосуществующие в каждой точке пространства. Каждая фаза описывается уравнениями континуальной механики. К другому типу моделей относятся модели, основанные на эйлерово-лагранжевом или континуально-дискретном описании движения гетерогенной среды, а именно: уравнения движения газовой фазы решаются в эйлеровой постановке, в то время как движение частиц описывается лагранжевыми уравнениями, которые интегрируются вдоль их траекторий.

Рассмотрим вкратце преимущества и ограничения эйлеровых (2-х жидкостных) и эйлерово-лагранжевых моделей описания движения потоков газа с твердыми частицами.

Преимуществом 2-х жидкостных моделей является использование похожих уравнений для описания движения газовой и дисперсной фаз. Это позволяет использовать большой опыт моделирования однофазных турбулентных течений и применять одни и те же численные методы решения всей системы уравнений. К недостаткам моделей этого типа можно отнести некоторую «потерю» информации о движении отдельных частиц, а также сложности в постановке граничных условий для дисперсной фазы на ограничивающих течение поверхностях. Преимуществом эйлерово-лагранжевых моделей является получение детальной статистической информации о движении отдельных частиц



в результате интегрирования уравнений движения (теплообмена) частиц в известном (предварительно рассчитанном) поле скоростей (температур) несущего газа. Однако с увеличением концентрации дисперсной фазы возникают сложности в их использовании. Можно выделить два обстоятельства. Во-первых, рост концентрации приводит к обратному влиянию частиц на параметры несущего газа, и расчеты приходится выполнять в несколько итераций, что усложняет вычислительную процедуру. Во-вторых, с увеличением концентрации возрастает вероятность столкновений частиц между собой, что ведет к запутанности их траекторий. С уменьшением размера частиц использование траекторных методов для расчета их движения также усложняется. Это связано с тем, что для получения корректной информации об осредненных характеристиках дисперсной фазы необходим учет взаимодействия частиц с турбулентными вихрями несущего газа все меньших и меньших размеров. Отмеченное обстоятельство также сильно усложняет процесс вычислений [1].

Среди исследователей гетерогенных потоков нет единого мнения о том, какому из рассмотренных выше методов следует отдать предпочтение.

Одни авторы [2] считают, что описание двухфазных газодисперсных потоков возможно лишь при раздельном описании жидкой и твердой фаз. Т.е. утверждается, что уравнения континуума могут быть составлены только для жидкой фазы, а для твердой – уравнения дискретного типа. Другие [3,5] делают вывод о том, что применение моделей, основанных на смешанном эйлерово-лагранжевом описании движения газодисперсного потока, требует значительных затрат вычислительного времени на определение нескольких тысяч траекторий отдельных частиц, что затрудняет применение таких моделей в практических расчетах.

Авторы [4] проводили сравнение эйлерового-эйлерового и эйлерово-лагранжевого подходов к моделированию турбулентных течений смеси газа и частиц. Наряду с этим рассматривались два важных аспекта взаимодействия частиц и жидкости: турбулентная дисперсия частиц (влияние турбулентности газовой фазы на частицы) и влияние «модуляции» (влияние частиц на турбулентность газовой фазы). На основе полученных результатов был сделан вывод, что эйлеров-эйлеров подход является более экономичным и дает лучший результат для твердых частиц диаметром $d < 200$ мкм. Для смесей же газа и частиц, размер которых изменяется вдоль траектории (т.е. предположение о монодисперсности не выполняется) единственно возможным является применение эйлерово-лагранжевого подхода.

В работе [1] Вараксин А.Ю. делает вывод о том, что «...с ростом концентрации частиц и уменьшением их инерционности использование континуального эйлерового представления для описания динамики дисперсной примеси оказывается предпочтительным», а применение статистических моделей наиболее рационально при изучении турбулентных газодисперсных потоков, содержащих крупные частицы малой концентрации [4].

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для математического моделирования процессов пневмотранспорта сыпучих строительных материалов с размерами частиц в пределах от 0,02 до 0,3 мм и при концентрациях материала от 50 до 200 кг/кг наиболее эффективно разрабатывать математическую модель, в основу которой положено предположение о том, что дисперсный поток может быть представлен в виде двух взаимодействующих и взаимопроникающих континуумов.

Основные уравнения теории взаимопроникающих континуумов для описания движения двухкомпонентного потока газ – твердые частицы можно записать следующим образом:

Уравнение сохранения масс:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho_1 \varepsilon_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 \varepsilon_1 v_1) = 0 \\ \frac{\partial(\rho_2 \varepsilon_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_2 \varepsilon_2 v_2) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\begin{cases} \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) = -\varepsilon_1 \frac{\partial p}{\partial x} - f + \frac{\mu_{\square}}{\square} \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} \\ \rho_2 \left(\frac{\partial v_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) = -\varepsilon_2 \frac{\partial p}{\partial x} + f \end{cases}, \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\begin{cases} \rho_1 \left(\frac{\partial e_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial e_1}{\partial x} \right) = \frac{\varepsilon_1 p d_1 \rho_1}{\rho_1 \partial x} + \frac{\mu_{\square}}{\square} \left(\frac{\partial v_1}{\partial x} \right)^2 k_1 f (v_2 - v_1) - q + \lambda \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \\ \rho_2 \left(\frac{\partial e_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial e_2}{\partial x} \right) = k_2 f (v_1 - v_2) + q \end{cases}, \quad (3)$$

Для замыкания системы уравнений записывается уравнение состояния газа:

$$P = \rho_1 R T_1, \quad (4)$$

где P – давление потока; ρ_1, ρ_2 – плотности фаз, индекс 1 соответствует газовой (дисперсионной) фазе, 2 – твердой (дисперсной); v_1, v_2, T_1, e_1, e_2 – скорости, температура и внутренние энергии фаз; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – объемные доли фаз; R

– универсальная газовая постоянная; f – сила межфазного взаимодействия; $\frac{\mu_{\square}}{\square}$ – вязкость, которая учитывает эффект присутствия частиц в потоке; q – поток тепла между фазами; λ – коэффициент теплопроводности газа; k_1, k_2 – коэффициенты, учитывающие долю тепла, возникающую в результате трения.

Для полного замыкания системы уравнений необходимо выбрать модель турбулентности. Не существует универсальной модели турбулентности для широкого диапазона задач. Её выбор зависит от характера турбулентного потока, требуемой точности, доступных вычислительных ресурсов. Кроме этого необходимо поставить физически корректные граничные условия.



Несмотря на сложность систем уравнений (1 – 3), их решение можно получить численными методами. Проведение вычислительного эксперимента позволяет получать необходимые для исследования зависимости. Корректная постановка начальных условий позволяет проследить влияние различных параметров на процесс транспортирования и определить возможность повысить эффективность работы пневмотранспортных систем.

Библиографический список

1. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами. М.: Физматлит, 2003. 192 с.
2. Голобурдин А.И., Донат Е.В. Пневмотранспорт в резиновой промышленности. М.: Химия, 1983. 160 с.
3. Деревич И.В. Статистическое описание турбулентного потока газозвеси крупных частиц, соударяющихся со стенкой канала // Инженерно-физический журнал. 1994. т. 66. №4. С. 387-397.
4. Мухопад К.А., Тарасов В.П. Анализ физических и математических моделей пневмотранспорта сыпучих материалов// Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: сб. докл. 8-ой научно-практич. конф. Барнаул: 2005. С. 3 – 12.
5. Рычков А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988. 222 с.

Bibliograficheskij spisok

1. Varaksin A.Yu. Turbulentnye techeniya gaza s tverdymi chastitsami. M.: Fizmatlit, 2003. 192 s.
2. Goloburdin A.I., Donat E.V. Pnevmotransport v rezinovoj promyshlennosti. M.: Khimiya, 1983. 160 s.
3. Derevich I.V. Statisticheskoe opisaniye turbulentnogo potoka gazovzvesi krupnykh chastits, soudaryayuschikhsya so stenкой kanala // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 1994. t. 66. №4. S. 387-397.
4. Mukhopad K.A., Tarasov V.P. Analiz fizicheskikh i matematicheskikh modelej pnevmotransporta sypushikh materialov// Sovremennyye problemy tekhniki i tekhnologii pischevykh proizvodstv: sb. dokl. 8-oj nauchno-praktich. konf. Barnaul: 2005. S. 3 - 12.
5. Rychkov A.D. Matematicheskoe modelirovaniye gazodinamicheskikh protsessov v kanalakh i soplakh. Novosibirsk: Nauka, 1988. 222 s.

Монгуш Сылдыс Чамбаевич – кандидат технических наук, декан инженерно-технического факультета, доцент кафедры «Транспортно-технологические средства» Тувинского государственного университета, г. Кызыл, E-mail: mongushsyldys@yandex.ru

Шиманова Анна Андреевна – аспирант Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, г. Санкт-Петербург, E-mail: Shimanova @yandex.ru

Mongush Syldys – candidate of engineering, Dean of Engineering and Technology Department of the Tuva State University, Kyzyl, E-mail: mongushsyldys@yandex.ru

Shimanova Anna – graduate student of the St. Petersburg State University of Architecture and Construction, E-mail: Shimanova @yandex.ru