

УДК 669.162.262

к.т.н. Русанов И. Ф.,
к.ф-м.н. Русанова Н. И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)
(rusanova-2011@inbox.ru)

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЛИФРАКЦИОННОГО СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СЛОЯ

Приведены результаты анализа применимости степенного и параболического уравнений для описания зависимости перепада давления в слое полифракционного материала от скорости движения газа в нем. Предложены формулы для расчета газодинамического сопротивления слоя материала по обобщенным характеристикам его ситового состава. Проанализировано влияние крупности и однородности материала на его газодинамическое сопротивление.

Ключевые слова: газодинамика, слой полифракционных материалов, обобщенные характеристики ситового состава, средний размер кусков, коэффициент вариации размера кусков.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Газодинамическое сопротивление слоя сыпучих материалов во многих процессах, протекающих в агрегатах со стационарным или подвижным слоем в присутствии газовой фазы, играет важную, а иногда и определяющую роль. Во всех случаях оно определяет скорость движения газа через слой материалов, эффективность протекания физико-химических процессов и теплообмена, стабильность и эффективность работы агрегатов.

Оценка газодинамического сопротивления слоя осуществляется по перепаду давления газа в нем. Зависимость же перепада давления газа ΔP в слое от его скорости движения ω является основой любых оценок газодинамики процессов.

Математически эта зависимость описывается уравнением Дарси-Вейсбаха, преобразованным для реального слоя. Сложность применения этого уравнения для решения практических задач заключается в том, что входящий в него коэффициент газодинамического сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса, не может быть определен аналитически. В результате эта зависимость представляется в степенном или же параболическом виде. В итоге к

настоящему времени сложилась парадоксальная ситуация: одна и та же зависимость в разных работах аппроксимируется существенно различающимися функциями, а их адекватность изучаемому явлению до сих пор не сопоставлена, и поэтому остается неясным, какая именно функция действительно описывает явление, а какую следует рассматривать лишь как удобную аппроксимацию истинной зависимости.

При изучении газодинамики слоя обычно рассматривают его газодинамические свойства и характер движения газа в нем. Для учета особенностей структуры реального слоя в уравнение Дарси-Вейсбаха вводят обобщенные характеристики слоя: его пористость, эквивалентный диаметр каналов, коэффициент, характеризующий форму частиц, образующих слой. Численные значения этих характеристик могут быть рассчитаны по известным формулам. Однако при этом необходимо экспериментально определить кажущуюся и сыпучую массу материала, коэффициент формы кусков, объемную долю всех фракций.

Газодинамические характеристики слоя определяются гранулометрическим (ситовым) составом полифракционного сыпучего материала, образующего этот слой. Поэтому целесообразно установить влияние

на газодинамическое сопротивление слоя таких характеристик материала, как средний размер кусков d_{cp} и коэффициент вариации их размера v , которые обобщенно характеризуют его ситовый состав, и для их вычисления достаточно только знать последний. Эти характеристики, как показано в работе [1], однозначно определяют ситовый состав полифракционного материала.

Постановка задачи. В связи с вышеизложенным в данной работе решались две задачи.

Первая – это оценка точности описания экспериментальных данных зависимости $\Delta P = f(\omega)$ с помощью степенной и двухчленной функций и выбор функции, наиболее адекватной процессу.

Вторая – определение зависимости коэффициентов выбранной аппроксимирующей функции $\Delta P = f(\omega)$ от величины параметров, обобщенно характеризующих ситовый состав полифракционного материала во всем его многообразии.

Изложение материала и его результаты.

Для реального слоя полифракционных сыпучих материалов уравнение Дарси-Вейсбаха имеет следующий вид:

$$\Delta P = \lambda \cdot h \cdot \frac{1}{d_s \cdot \phi} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \omega^2, \quad (1)$$

где ΔP – перепад давления в слое, Па;

λ – коэффициент газодинамического сопротивления; h – высота слоя, м; d_s – эквивалентный диаметр частиц, м; ϕ – коэффициент формы частиц; ε – пористость слоя, м³/м³; ρ – плотность газа, кг/м³; ω – приведенная скорость движения газа через слой, м³/(м²·с).

Зависимость коэффициента газодинамического сопротивления от числа Рейнольдса чаще всего описывается одной из функций:

$$\lambda = \frac{C}{Re^m} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{A}{Re} + B.$$

В первом случае зависимость перепада давления (в расчете на 1 м высоты слоя) от расхода газа через единичное сечение слоя (1 м²) описывается степенным уравнением:

$$\Delta P = M \cdot \mu^m \cdot \rho^{1-m} \cdot \omega^{2-m}, \quad (2)$$

$$\text{где } M = \frac{C}{\varepsilon^3} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\phi \cdot d_{cp}} \right)^{1+m}.$$

Во втором случае уравнение (1) преобразуется в параболическое уравнение:

$$\Delta P = K_1 \cdot \mu \cdot \omega + K_2 \cdot \rho \cdot \omega^2, \quad (3)$$

где

$$K_1 = \frac{A}{\varepsilon^3} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\phi \cdot d_{cp}} \right)^2, \quad K_2 = \frac{B}{\varepsilon^3} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\phi \cdot d_{cp}} \right);$$

μ – коэффициент динамической вязкости газа, кг/(м·с).

Для решения поставленных задач обработано большое количество экспериментальных данных (как самих авторов, так и взятых из литературных источников), в которых производились замеры перепада давления газа при разных расходах воздуха в слое полифракционных материалов.

Обработка данных проведена корреляционным анализом в двух вариантах: в координатах $\ln \Delta P = f(\ln \omega)$ и $\Delta P / \omega = f(\omega)$, в которых, соответственно, уравнения (2) и (3) линеаризуются.

Для обоих вариантов парные коэффициенты корреляции оказались сравнительно высокими – не менее 0,997 для степенной и 0,972 для параболической функций. Однако остаточная дисперсия в первом случае оказалась примерно на порядок ниже, чем во втором. Таким образом, следует признать, что степенная функция более адекватна фактической зависимости $\Delta P = f(\omega)$, нежели параболическая. Однако для аппроксимации экспериментальных данных предпочтительнее использовать параболическое уравнение (3).

По результатам обработки всех данных, в которых был известен ситовый состав материалов, вычислены также коэффициенты M и m уравнения (2) и K_1 и K_2 уравнения (3). Анализ зависимости этих коэффициентов от обобщенных характеристик ситового состава (средневзвешенного размера кусков d_{cp} и коэффициента вариации размера кусков v) показал следующее.

Коэффициент M обнаруживает четкую зависимость от обобщенных характеристик ситового состава: уменьшается с увеличением d_{cp} и возрастает с увеличением v . Взаимосвязь M с этими параметрами характеризуется множественным коэффициентом корреляции около 0,97.

В отличие от этого коэффициент m , характеризующий развитие ламинарной составляющей газового потока, от опыта к опыту изменялся в пределах 0,3-0,7 и проявлял слабую корреляцию с обобщенными характеристиками ситового состава материала, хотя с увеличением v и уменьшением d_{cp} он возрастал, однако соответствующий множественный коэффициент корреляции составил только 0,63. В этом, как отмечено в ряде работ, и состоит неудобство формулы (2) при ее практическом использовании.

Коэффициенты же параболической зависимости K_1 и K_2 более тесно связаны с обобщенными характеристиками ситового состава материала. При увеличении d_{cp} и уменьшении v оба коэффициента уменьшались. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что соответствующие взаимосвязи удовлетворительно описываются уравнениями:

$$K_1 \cdot 10^{-5} = \left(\frac{4,9}{d_{cp}} \right)^2 + 2,6 \cdot d_{cp}^{0,25} [f(v) - 1];$$

$$K_2 = \frac{10,4}{d_{cp}} \cdot f^2(v), \quad (4)$$

$$\text{где } f(v) = \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right) \right]^{1/8}.$$

При расчете коэффициентов K по формулам (4) средний размер кусков материала d_{cp} следует выражать в мм, а при последующем расчете величины ΔP по уравнению (3) численное значение величины μ преобразовывать к виду $\mu \cdot 10^5$.

Коэффициент вариации размера кусков v_0 характеризует максимальную однородность ситового состава материала. Для агломерата он равен 0,45.

Вычисленные по этим формулам значения коэффициентов тесно коррелированы с фактическими данными: для $K_1 \cdot 10^{-5}$ коэффициент корреляции составил 0,98, а для $K_2 - 0,99$. Среднеквадратичная погрешность расчета коэффициентов $K_1 \cdot 10^{-5}$ и K_2 по опытными данным равна 0,24 и 0,38 соответственно, а относительная погрешность составляет 8,0 и 6,9% соответственно.

Следовательно, для практических целей можно рекомендовать использовать двухчленную параболическую зависимость. При этом определение перепада давления в слое неоднородного сыпучего материала различного ситового состава может быть выполнено чисто расчетным путем на основании уравнений (4).

Некоторые процессы, например агломерация руд, протекают при одинаковом перепаде давления в слое. При этом скорость движения газа через слой различная. Так, при спекании агломерата на конвейерных агломашинах в слоях, расположенных у бортов тележек, скорость газа в 1,1-1,2 раза выше, чем в остальном слое [2]. Последнее является следствием того, что в результате сегрегации шихты у бортов располагается материал повышенной крупности и более однородный по размеру гранул шихты.

Для оценки таких особенностей процесса целесообразно установить влияние ситового состава материала на газопроницаемость слоя.

В результате обработки специально проведенных исследований установлено, что при одинаковой скорости фильтрации воздуха через слой (в условиях экспери-

ментов она равнялась $1,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, т. е. была близка к реальной) перепад давления в нем возрастает с уменьшением средней крупности кусков агломерата и повышением его неоднородности по крупности. При этом зависимость перепада давления от средней крупности материала в первом приближении описывается гиперболой – чем меньше $d_{\text{ср}}$, тем значительнее влияет на газопроницаемость этот параметр. Увеличение же коэффициента вариации размера кусков материала ν сопровождается практически линейным повышением перепада давления в слое.

Статистическая обработка полученных данных показала, что величина ΔP тесно коррелирована с характеристиками $1/d_{\text{ср}}$ и ν : парные коэффициенты корреляции соответственно равны 0,515 и 0,831, частные составляют 0,924 и 0,969, а множественный коэффициент корреляции равен 0,987. В исследованном диапазоне варьирования параметров $d_{\text{ср}}$ и ν зависимость ΔP от этих параметров при скорости воздуха $1,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ в расчете на 1 м высоты слоя описывается уравнением:

$$\Delta P = \frac{69}{d_{\text{ср}}} + 43 \cdot \nu - 28, \text{ кПа/м.} \quad (5)$$

Библиографический список

1. Русаков, П. Г. Обобщенные характеристики ситового состава неоднородного сыпучего материала [Текст] / П. Г. Русаков, И. Ф. Русанов // Заводская лаборатория. — 1990. — № 2. — С. 68–69.
2. Петрушов, С. Н. Спекание агломерата с вводом в прибортовой слой чугуновой стружки [Текст] / С. Н. Петрушов, И. Ф. Русанов, С. Н. Куберский, Д. В. Лупанов // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2011. — Вып. № 34. — С. 99–105.

© Русанов И. Ф.

© Русанова Н. И.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М.,
нач. сталеплавильной лаборатории ПАО «АМК» Сбитневым С. А.*

Статья поступила в редакцию 23.11.16.

к.т.н. Русанов І. Ф., к.ф-м.н. Русанова Н. І. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ВПЛИВ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПОЛІФРАКЦІЙНОГО СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ НА ГАЗОДИНАМІЧНИЙ ОПІР ШАРУ

Наведені результати аналізу застосовності степеневого й параболічного рівнянь для опису залежності перепаду тиску в шарі поліфракційного матеріалу від швидкості руху газу в ньому. Запропоновані формули для розрахунків газодинамічного опору шару матеріалу за узагальненими характеристиками його ситового складу. Проаналізовано вплив крупності й однорідності матеріалу на його газодинамічний опір.

Ключові слова: газодинаміка, шар поліфракційних матеріалів, узагальнені характеристики ситового складу, середній розмір кусків, коефіцієнт варіації розміру кусків.

PhD Rusanov I. F., PhD In Physics and Maths Rusanova N. I. (DonsTU, Alchevsk, LPR)

INFLUENCE OF GRAIN SIZE OF POLYFRACTION LOOSE MATERIAL ON GAS-DYNAMIC LAYER RESISTANCE

The research results of using exponential and parabolic equations are given for describing the dependence of pressure drop in layer of polyfraction material on gas flow rate inside it. Calculating formulas for gas-dynamic resistance of material layer are proposed due to generalized characteristics of its fractional composition. Influence of material size and homogeneity on its gas-dynamic resistance has been analyzed.

Key words: gas-dynamic, layer of polyfractional material, generalized characteristics of fractional composition, average lumps size, variation coefficient of lumps size.