

УДК: 669.163.27:669.046.516

**В.И.Елисеев, А.П.Толстопят, Л.А.Флеер, Т.А.Рузова,
А.Ф.Шевченко, И.А.Маначин, С.А.Шевченко**

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ПРЯМОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ ФУРМЫ

Представлена расчетная модель движения газо– магниевого потока в цилиндрическом канале фурмы с учетом взаимодействия его со стенкой канала. Показано, что согласно представленной модели величина влияния стенки на скорость движения потока, в условиях аналогичных реальным, достигает 20 %.

Инжекция, канал фурмы, частица магния, двухфазный поток, математическая модель, изменение скорости.

Введение. При проектировании инжекционных и пневмотранспортных систем выбор рациональной компоновки, параметров работы и другое удобно использовать расчетные модели, описывающие движение многофазных сред в каналах. Так, например, данная работа направлена на совершенствование расчетной модели движения двухфазного потока (гранулы магния + транспортирующий газ) в цилиндрическом канале фурмы применительно к процессу инжекционного рафинирования расплава чугуна в ковшах диспергированным магнием [1]. Особенностью рассматриваемого потока является движение достаточно крупных частиц ($d_{ch} \approx 1,5$ мм) близких к сферической форме в узком канале диаметром 7–12 мм.

Исследования движения многофазных потоков получили широкое распространение в различных отраслях промышленности. При разработке теоретических основ модели движения гетерогенных сред важным направлением было описание взаимодействия внутри дисперсной среды и с несущим потоком [2]. Другим практическим и не менее важным направлением было получение экспериментальных данных и создание методов расчета взаимодействия несущих потоков и дисперсной составляющей со стенками того или иного технологического аппарата. Пневмотранспортные системы являются довольно протяженными и разветвленными системами, в которых основной вклад в сопротивление и, соответственно, в потери энергии, вносит взаимодействие гетерогенных потоков со стенками каналов. В связи с этим при рассмотрении гидро– и пневмотранспортных систем основным вопросом является определение потерь давления или величин сопротивления движению сред в каналах. Этой проблеме и сопутствующей ей другим вопросам посвящено значительное количество работ, например, [3,4]. Учитывая сложность движения переносимых потоком частиц и практическую непредсказуемость физических свойств (формы частиц, морфология поверхности, адсорбционные свойства), основным направлением исследования является эксперимент, который позволяет определять необходимые параметры. Согласно принципу наложе-

ния Гастерштадта [4] суммарные потери давления могут быть представлены как сумма

$$\Delta p = \Delta p_w + \Delta p_r + \Delta p_{tr} + \Delta p_p, \quad (1)$$

где Δp_w – потери давления на перемещение воздушного потока; Δp_r – потери давления на разгон транспортируемого материала; Δp_{tr} – потери давления на восстановление скорости частиц материала после взаимодействия их со стенками материалопровода и между собой; Δp_p – потери давления на подъем частиц транспортируемого материала. Большой теоретический материал, посвященный соударению частиц о стенку, дан в работе [5]. Здесь предлагается несколько иной подход, основанный на введении в уравнение движения силы Бусройда, которая для горизонтального канала записывается как

$$F_B = Bg\alpha_{ch}\rho_{ch}\frac{u_{ch}}{u}, \quad (2)$$

где α_{ch} – объемная доля частиц; ρ_{ch} – плотность твердого материала; u , u_{ch} – скорость газа и частиц соответственно; g – ускорение свободно падающего тела; B – коэффициент Бусройда. Авторами данной работы в результате теоретического рассмотрения различных вариантов взаимодействия частицы со стенкой удалось замкнуть задачу и показать, что коэффициент Бусройда в горизонтальных каналах может быть определен в виде

$$B = 2,325 \frac{f(1+k_n)D}{m(1-k_n)r_{ch}}, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения скольжения; k_n – коэффициент восстановления при ударе; m – отношение массовых расходов частиц и газа; D – диаметр трубы; r_{ch} – радиус частицы. Такой подход позволяет с помощью уравнений движения определить скорость частиц в канале и на выходе из него, что важно для понимания общего процесса.

Математическая модель движения частиц в канале с учетом их взаимодействия со стенкой. Выпишем уравнения одномерного движения газа и дисперсного материала в следующей форме, которую можно получить из уравнений [2] с учетом силы Бусройда:

$$\alpha\rho u = G, \quad (4)$$

$$\alpha_{ch}\rho_{ch}u_{ch} = G_2, \quad (6)$$

$$\alpha_{ch}\rho_{ch}u_{ch}\frac{du_{ch}}{dx} = \alpha_{ch}\left(\frac{d\delta}{dx} - f_T\right) + \alpha n f_{g-ch} + \alpha_{ch}(\rho_{ch} - \rho)g - F_B \quad (7)$$

где α, α_{ch} – объемные доли соответственно газа и дисперсной фазы;
 $f_T = \frac{1}{2} \lambda \rho u^2$ – сила трения газового потока о стенки канала; $f_{g-ch} = f_m + f_\mu$,
 $f_m = \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi r_{ch}^3 \rho \left(u \frac{du}{dx} - u_{ch} \frac{du_{ch}}{dx} \right)$ – сила действия присоединенной массы;
 $f_\mu = \frac{1}{2} \rho c_\mu |u_{ch} - u| (u_{ch} - u)$ – сила газового потока, действующая на частицу.

Исключая из этих уравнений величину $\left(\frac{d\delta}{dx} - f_T \right)$, получим:

$$\left(\rho_{ch} + \frac{1}{2} \rho \right) u_{ch} \frac{du_{ch}}{dx} = \frac{3}{2} \rho u \frac{du}{dx} + \frac{n}{\alpha_{ch}} f_\mu + g \cos \theta \cdot (\rho_{ch} - 2\rho) - \alpha_{ch}^{-1} F_B. \quad (8)$$

Рассмотрим теперь величину F_B , выписанную в (2). Ускорение свободно падающего тела g в этой формуле указывает на то, что сама сила Бусройда возникает из-за действия силы тяжести на частицу, которая приводит ее к падению на стенку канала. Подкорректируем формулу для нашего случая. Будем считать, что эту силу можно представить в виде двух слагаемых

$$F_B = F_B^G + F_B^W, \quad (9)$$

где F_B^W – сила, связанная с взаимодействием со стенкой за счет турбулентных пульсаций газового потока; F_B^G – сила Бусройда, связанная, помимо турбулентности, с силой тяжести частиц, которая является причиной интенсивного взаимодействия частицы со стенкой. Для горизонтального потока частиц сила F_B^G должна быть выражена также как и указанная выше сила (2). Примем, что для наклонных труб с углом отклонения оси трубы от вертикали θ взаимодействие определяется также углом между силой тяжести и нормалью к поверхности внутренней стенки канала, поэтому в более общем случае

$$F_B^G = B_G g \cdot \sin \theta \cdot \alpha_{ch} \rho_{ch} \frac{u_{ch}}{u}, \quad (10)$$

где B_G – постоянная, зависящая от свойств поверхности канала и самой частицы. Ее можно записать в несколько измененном виде, чем это записано в (3), чтобы сохранить физическую сущность, как для разреженного потока, так и для сравнительно концентрированного:

$$B_G = Z_G \frac{1 - \exp(-m)}{m} \frac{f(1 + k_n) D_{tr}}{(1 - k_n) R_{ch}}. \quad (11)$$

При малых m , этот коэффициент будет иметь конечную величину, а для больших перейдет к виду (3), Z_G – постоянная, определяемая из эксперимента. Величина F_B^W , как было условлено, зависит от пульсаций га-

зового потока, вследствие чего не должна зависеть от направления по отношению к вертикали, т.е. не должна содержать величины g (это видно и по формулам (2), (3)). Поэтому необходимо произвести обратную операцию, которая была сделана в [4], т.е. умножить эту величину на число Фруда $F_r = \frac{u^2}{gD_r}$, тогда эту часть силы Бусройда запишем в виде:

$$F_B^W = B_W \alpha_{ch} \rho_{ch} \frac{uu_{ch}}{D_r}, \quad (12)$$

где B_W – представим также как и (11), т.е.

$$B_W = Z_W \frac{1 - \exp(-m)}{m} \frac{f(1 + k_n)D_r}{(1 - k_n)R_{ch}}. \quad (13)$$

Проведение расчетов проводилось по выписанным уравнениям, при этом величина m в эксперименте допускала довольно грубую оценку, поэтому в расчетах она принималась в виде двух значений 0,1 и 1,0. Скорость на выходе из трубы подгонялась под величину скорости, найденную из эксперимента и соответствующую максимальной вероятности. Значения k_n и f не определялись, хотя грубая оценка показала, что для магния $k_n \approx 0,1$, а для полистирола $k_n \approx 0,5$. Эти величины были оценены после опытного определения высоты подскока частиц магния и полистирола после удара о металлическую плиту. Разброс этой величины практически никак не оценивался, т.к. это требовало дополнительных многочисленных экспериментов. Учитывая, что коэффициенты B_W и B_G содержат в себе величины, входящие сомножителями, можно считать их одним коэффициентом, который и определялся из основных экспериментов по нахождению скоростей частиц на выходе из трубы. Поэтому величины $fZ_W \frac{1 + k_n}{1 - k_n}$ и $fZ_G \frac{1 + k_n}{1 - k_n}$ рассматривались как коэффициенты, соответственно f_W и f_G .

Выписанные коэффициенты неизвестны, они должны быть найдены из эксперимента, но для их нахождения необходимо определиться с той величиной, к которой должны привязываться расчетные параметры для этих коэффициентов. Как правило, такой величиной является некоторое значение в данном случае значение скорости, которое соответствует максимальной вероятности. Используя экспериментальный материал, полученный на лабораторном стенде, были определены вероятные скорости для частиц магния и полистирола в выходном сечении канала для узкого интервала диаметров, которые представлены в табл.1.

Здесь приведены следующие значения: $u_{p=\max}$ – экспериментальная величина скорости частицы, соответствующая максимальному значению вероятности; $u_{анп}$ – значение скорости, взятое по аппроксимационным

кривым при получении средних значений; u_{\max} – максимальное значение скорости частицы полученное в эксперименте; u_{cv} – скорость частицы в конце канала, рассчитанная без учета взаимодействия ее со стенкой; $u_{расч}$ – скорость на выходе, определяемая по выписанным выше уравнениям, при этом коэффициенты f_w и f_G имеют следующие значения: для магнитных частиц $f_w = 3,077 \cdot 10^{-5}$, $f_G = 1,5$; для частиц полистирола $f_w = 1,538 \cdot 10^{-4}$, $f_G = 1,0$.

Таблица 1. Сравнение экспериментальных лабораторных данных скоростей движения твердых частиц с рассчитанными по модели

Угол	Материал	м/с	D = 1,0 мм					D = 1,5 мм				
			$u_{p=\max}$	u_{appr}	u_{\max}	u_{cv}	$u_{расч}, m=0,1/1,0$	$u_{p=\max}$	u_{appr}	u_{\max}	u_{cv}	$u_{расч}, m=0,1/1,0$
$\alpha = 0^\circ$	Магний	P = 0,150 МПа Q = 20,8 м ³ /час	19,0	18,0	23,7	25,7	23,2 24,0	19,5	19,00	22,5	22,8	21,1 21,6
		P = 0,265 МПа Q = 30 м ³ /час	24,0	23,5	36,0	36,5	32,9 34,1	–	26,00	35,0	32,3	29,8 30,6
	Полистирол	P = 0,150 МПа Q = 20,8 м ³ /час	19,9	20,6	21,5	29,3	20,0 22,5	21,0	20,1	26,6	26,4	19,3 21,4
		P = 0,265 МПа Q = 30 м ³ /час	–	26,0	26,5	41,8	28,5 32,1	30,8	28,5	34,5	37,6	27,5 30,4
$\alpha = 45^\circ$	Магний	P = 0,150 МПа Q = 20,8 м ³ /час	18,8	16,0	25,5	25,7	18,2 20,3	17,5	17,00	23,8	22,8	17,2 18,9
		P = 0,265 МПа Q = 30 м ³ /час	26	23,8	34,8	36,5	29,3 31,4	27,0	26,50	38,0	32,3	27,1 28,7
	Полистирол	P = 0,150 МПа Q = 20,8 м ³ /час	–	18,0	21,0	29,3	18,0 20,8	18,0	18,0	23,5	26,4	17,5 19,9
		P = 0,265 МПа Q = 30 м ³ /час	26,0	27,0	29,5	41,8	27,0 30,9	24,5	27,2	34,0	37,6	26,2 29,4

Анализ результатов. Из анализа данных таблицы можно сделать следующие выводы. Стенки канала оказывают значительное влияние, причем даже для вертикальных труб взаимодействие частиц со стенкой приводит

к заметным изменениям выходных скоростей по сравнению со свободным движением частиц в канале (без взаимодействия). Это видно при сравнении максимальных величин скоростей u_{\max} или расчетных скоростей без взаимодействия со стенкой канала $u_{св}$ с определяемыми скоростями при максимальной вероятности, т.е. $u_{p=\max}$. Между скоростями u_{\max} и $u_{св}$ также наблюдается в некоторых случаях существенное отличие, что также указывает на сильное влияние стенки канала. Угол наклона трубы оказывает влияние менее существенное. Обращает также на себя внимание тот факт, что $u_{p=\max}$ магния и полистирола слабо отличаются друг от друга. К сожалению, необходимо указать, что некоторое несоответствие, которое проглядывается в таблице, например, что $u_{\max} > u_{св}$ или для магния $u_{p=\max}$ для наклонной трубы больше, чем для вертикальной говорит, во-первых, о погрешностях самого эксперимента и, во-вторых, о недостаточном количестве экспериментов. В целом, видно, что при определении скоростей частиц в фурмах необходимо учитывать взаимодействие частиц со стенками канала. Что касается методики расчета, то она, по крайней мере, с соответствующей эксперименту точностью, дает возможность определять значения скоростей в каналах при движении газа и частиц. При дальнейшей работе она может быть уточнена. Покажем теперь графики изменения скоростей газа и частиц в каналах. На рис.1. приведены две кривые, характеризующие изменение скорости газа в канале для различных объемных расходов. Из рисунка видно, что скорости по мере движения газа по каналу увеличиваются. На следующих рисунках (рис.2–5) показаны кривые изменения скоростей частиц для магния (рис.2,3) и полистирола (рис.4,5).

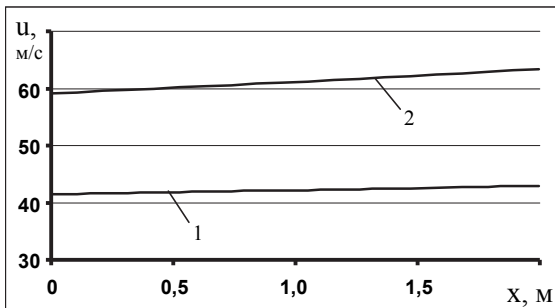


Рис.1 Изменение скорости газа в канале.

1 – $Q = 20,8 \text{ м}^3/\text{час}$; 2 – $Q = 30,0 \text{ м}^3/\text{ч}$.

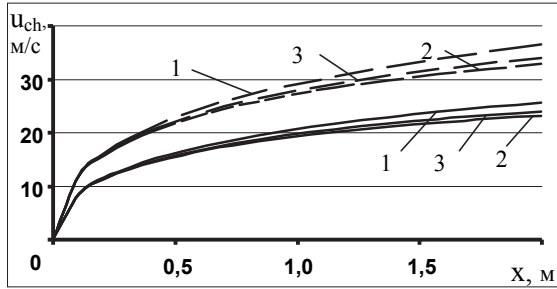


Рис.2 Изменение скорости частицы магния с диаметром 1 мм вдоль канала при $Q = 20,8 \text{ м}^3/\text{час}$ (—) и при $Q = 30,0 \text{ м}^3/\text{час}$ (---).

1 – без взаимодействия со стенкой, 2 – $m = 0,1$, 3 – $m = 1,0$.

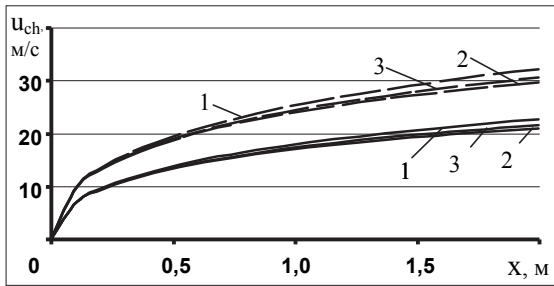


Рис.3 Изменение скорости частицы магния с диаметром 1,5 мм вдоль канала при $Q = 20,8 \text{ м}^3/\text{час}$ (—) и при $Q = 30,0 \text{ м}^3/\text{час}$ (---).

1 – без взаимодействия со стенкой, 2 – $m = 0,1$, 3 – $m = 1,0$.

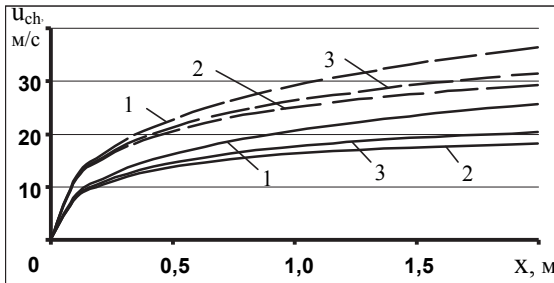


Рис.4 Изменение скорости частицы полистирола с диаметром 1,0 мм вдоль канала при $Q = 20,8 \text{ м}^3/\text{час}$ (—) и при $Q = 30,0 \text{ м}^3/\text{час}$ (---).

1 – без взаимодействия со стенкой, 2 – $m = 0,1$, 3 – $m = 1,0$.

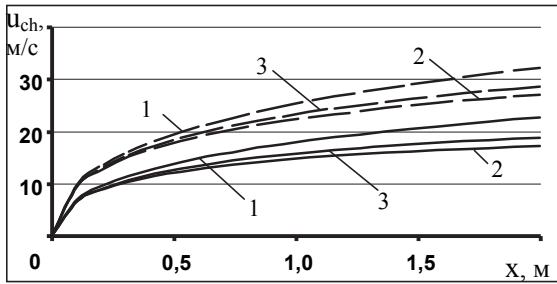


Рис.5 Изменение скорости частицы полистирола с диаметром 1,5 мм вдоль канала при $Q = 20,8 \text{ м}^3/\text{час}$ (—) и при $Q = 30,0 \text{ м}^3/\text{час}$ (---).

1 – без взаимодействия со стенкой, 2 – $m = 0,1$, 3 – $m = 1,0$

В заключение, используя найденные значения коэффициентов f_w и f_G , приведем кривые изменения скоростей газа и частиц магния в канале фурмы длиной 9 м (рис. 6).

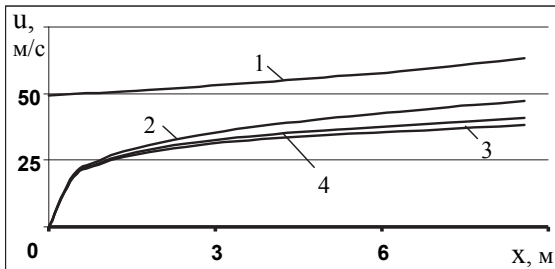


Рис.6. Изменение скорости газа и частиц магния вдоль фурмы при

$Q = 30,0 \text{ м}^3/\text{час}$ для $d_{ch} = 1 \text{ мм}$.

1 – скорость газа; 2 – скорость частиц без взаимодействия со стенкой;
3 – скорость частиц при $m = 0,1$; 4 – скорость частиц при $m = 1,0$.

Из рисунка следует, что учет взаимодействия частицы со стенкой фурмы в рамках данной модели приводит к уменьшению выходной скорости примерно на 7–10 м/с (до 20 %).

1. Оценка скорости истечения магниесодержащей струи при варьировании условий и параметров инжектирования. / С.А.Шевченко, В.И.Елисеев, А.Ф.Шевченко, [и др.]. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, Сб. ИЧМ. – 2006. – № 12 – С.118–122.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред [Том.1] / Р.И.Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – 464с.

3. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / С.Соу. – М.: Мир, 1971. – 320с.
4. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях / Ф.Г.Зуев – М.: Колос, 1976. – 344с.
5. Волошин А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И.Волошин, Б.В.Пономарев. – К.: Наукова думка, 2001. – 520с.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук А.С.Вергуном*

***В.І.Єліссєв, О.П.Товстоп'ят, Л.О.Флєєр, Т.О.Рузова,
А.П.Шєвченко, І.О.Маначин, С.А.Шєвченко***

Розрахунок руху частинок в прямолінійному каналі фурми

Представлено розрахункову модель руху газо–магнієвого потоку в циліндричному каналі фурми з урахуванням його взаємодії із стінкою каналу. Згідно представленої моделі показано, що величина впливу стінки на швидкість руху потоку, в умовах аналогічних реальним, сягає 20%.