

УДК: 669.163.27:669.046.516

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ В КАНАЛЕ ПОСТОЯННОГО ДИАМЕТРА

Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке скорости движения частиц магния в канале фурмы при ковшевом рафинировании чугуна. Показано, что движущаяся частица магния ($d_{\text{чп}} \approx 1$ мм) в стальной трубе ($D_{\text{вн}} \approx 8$ мм) теряет более 25% своей скорости.

рафинирование чугуна, фурма, скорость движения частиц магния

Введение. Устойчивое вдувание диспергированного магния в расплав, при ковшевом рафинировании чугуна, обусловлено надежным пневмотранспортированием и разгоном газо–магниевого потока в магистрали до необходимой скорости для беспрепятственного истечения струи [1], что в итоге сводится к обоснованному выбору параметров инжектирования и конфигурации тракта магниепровода. Как правило, ввод магния на глубину ванны расплава осуществляют через погружную фурму. Поскольку тракт фурмы является конечным высокоскоростным участком на пути движения потока (скорость газа на выходе составляет более 70 м/с), то он представляет собой одну из наиболее важных деталей в общей системе пневмотранспортирования и является объектом повышенного внимания и постоянного совершенствования.

В связи с этим, помимо конструкторских проблем, возникает ряд научно–технических вопросов, связанных с оценкой параметров движения двухфазного потока на участках выходного тракта фурмы. Исследованию движения частиц в трубах посвящено значительное количество работ, например [2,3]. Сотрудниками ИЧМ НАНУ проведены в разное время глубокие исследования в этом направлении [1,4], однако новые требования к разработке технологий, а также наличие современных аппаратурно–технических средств делают необходимым продолжить данные исследования. В настоящей работе приведены результаты по экспериментальному определению скорости частиц в прямых трубах. Основной задачей проведенной работы является определение скорости частиц, выходящих из прямого участка фурмы, нахождение величины сопротивления стенки канала движущемуся потоку частиц. Принимая во внимание, что геометрические размеры частиц и сам материал частиц, стенки канала фурмы играют важную роль в процессе транспортирования, в эксперименте были подобраны размеры частиц и канала таким образом, чтобы они максимально соответствовали реальным объектам.

Описание экспериментального стенда. Экспериментальная установка (рис.1) включает основным элементом трубу с внутренним диамет-

ром $D=13$ мм из нержавеющей стали и длиной 1,97 м. Труба располагалась вертикально, с возможностью ее отклонения на угол α . В верхней части трубы установлен плунжер–дозатор дисперсного материала – 2 и расходомер газа – 3 с расходной шайбой, на вход которой подавался от компрессора через ресивер сжатый воздух. Расход воздуха определялся по перепаду давления на расходной шайбе, регистрируемого манометрами 4 и 5. У нижнего конца трубы была установлена цифровая видеокамера 6 (Sanyo VPC–HD1000) и два осветителя 7 мощностью по 500 Вт. Осветители и видеокамера ориентировались и фокусировались так, чтобы держать в обзоре срез трубы и зону ниже его (длиной 100 мм) как продолжение этой трубы, в которой в отраженном свете регистрировались во время проведения эксперимента вылетающие из трубы дисперсные частицы. Ниже установлен приемный бункер 8 для сбора вылетающих из трубы частиц.

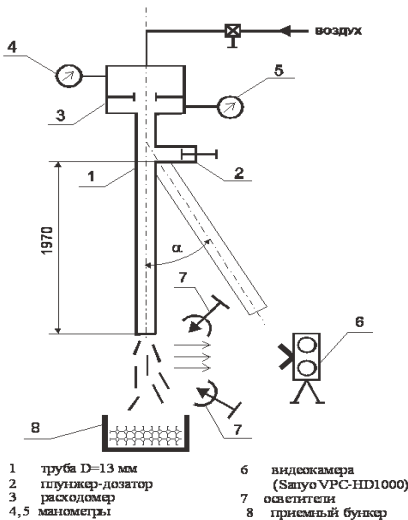


Рис.1 Схема экспериментального стенда

В качестве дисперсного материала использовался гранулированный магний и полистирол суспензионный. Оба дисперсных материала просеивались на ситах 1 мм и 2 мм. При этом частицы магния имели шероховатую поверхность и неправильную произвольную форму. Частицы полистирола имели практически идеальную гладкую поверхность и форму шара.

Плунжер–дозатор 2 представлял собой цилиндрическую емкость с поршнем в которую перед экспериментом загружались навески в 5–10 г дисперсного материала. После подачи на установку требуемого расхода газа загруженная в дозатор навеска в течение 5–10 секунд поршнем выгружалась (выталкивалась) в трубу.

Использование в качестве измерительного инструмента цифровой видеокамеры предполагает определение скорости, вылетающих из трубы дисперсных частиц (в зоне 100 мм), по длине трека, «прорисованного» этими частицами в кадрах снимаемого видеоматериала, соответствующего заданному режиму эксперимента. Технические характеристики камеры позволяют получать видеоизображение с частотой 60 кадр/с и выдержками 1/100с; 1/125с; 1/250с; 1/500с; 1/1000с. Для тарировки указанных вели-

чин были проведены поверочные эксперименты со съёмкой вращающегося диска $d_d = 300$ мм, $n = 3000$ об/мин. Эксперименты показали, что величины выдержки и частоты кадров при съёмке выдерживаются с большой точностью, что определяется цифровой схемой задатчика и электронной системой камеры. Вместе с тем было установлено, что величины регистрируемых треков различаются в зависимости от соответствия положения монитора видеокамеры направлению движения дисперсных частиц (треков). Это связано с продольной (вдоль большой стороны монитора) строчной разверткой сигнала на мониторе видеокамеры. Так при установке камеры, при которой треки ориентированы и регистрируются по направлению большей стороны монитора, мы получаем заданный тестовым экспериментом результат. При регистрации треков вдоль меньшей стороны монитора отклонение от тестового задания могло составлять больше 100%.

Обработка видеоизображения. Методика статистической обработки материала. Полученный в процессе записи эксперимента видеоматериал раскадровывался. Отдельные кадры были обработаны специально разработанной программой позволяющей, путем преобразования точечного изображения в бинарный вид (рис.2), выделить на изображении контуры отдельных треков и определить их геометрические параметры [5].

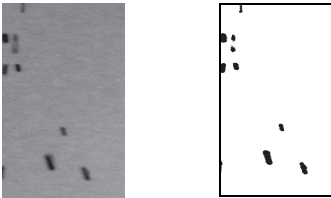


Рис.2 Обработка видеоизображений треков

Для получения статистических характеристик измеренных треков проводилась математическая обработка их длин [6]. Для этого был проанализирован ряд изображений, длины представленных на них треков объединены в одну выборку. Проведен статистический анализ полученной выборки. Выборка разбивалась на классы k , число

которых определяется по формуле

$$k = \sqrt{n}, \quad (1)$$

где n – число элементов выборки.

Тогда ширина интервала Δx

$$\Delta x = \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{k}, \quad (2)$$

где X_{\max} , X_{\min} , соответственно, наибольшее и наименьшее значения выборки.

Сначала выборка разбивается на интервалы постоянной ширины Δx . Для каждого интервала определяется частота f_i – число треков, попавших в заданный интервал, при этом $\sum_{i=1}^m f_i = n$. В соответствии с принятыми схе-

мами статобработки [7, 8] соседние интервалы с $f_i < 5$ объединяются. Разбив, таким образом, выборку на классы и определив частоты f_i попадания

элементов выборки для каждого класса, определяем серединные значения X_i^* (значения, лежащие посредине между границами интервала), частоты $f_i^* = f_i/n, i = \overline{1, k}, (\sum_{i=1}^k f_i^* = 1)$. Эти данные для выборки диаметров частиц полистирола (гравитация, $D = 13$ мм, $h = 2,1$ м, $\alpha = 0^\circ$) в качестве примера представлены в таблице.

Таблица. Данные для выборки диаметров частиц полистирола

Номер интервала	Границы интервалов, мм		Серединные значения, мм	Частоты	Частоты
	от	до			
1	1,97	2,48	2,23	9	0,087
2	2,48	2,74	2,61	10	0,097
3	2,74	2,99	2,87	19	0,184
4	2,99	3,25	3,12	33	0,320
5	3,25	3,51	3,38	18	0,174
6	3,51	3,76	3,63	8	0,078
7	3,76	4,53	4,14	6	0,058

Анализ результатов. Для предварительного рассмотрения вопроса о взаимодействии частицы со стенкой трубы, а также для тестирования отдельных измерительных приборов был проведен цикл экспериментов с гравитационным падением частиц в трубе. Эксперименты проводились с частицами магния и со стальными шариками аналогичного размера в трубах с внутренним диаметром 8 мм и 10 мм. В результате статистической обработки экспериментальных данных были получены следующие кривые, показанные на рис.3.

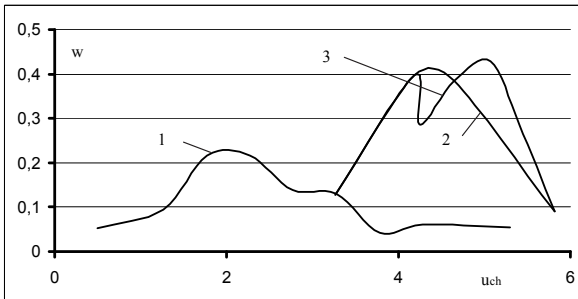


Рис.3. Распределение вероятности по скорости частиц u_{ch} (м/с), $d_{ch} = 1 \div 2$ мм. 1 – магний $D = 8$ мм; 2 – магний $D = 10$ мм; 3 – стальные шарики $D = 10$ мм.

Из этого рисунка следует, что диаметр трубы даже при вертикальном ее расположении оказывает значительное влияние на движение частиц

(кривые 1 и 2 для магниевых частиц). Для достаточно большого количества бросков (более сотни раз), видимо, выполняется нормальный закон распределения. Это видно по кривой 2, для которой $u_{\max} = 4,3$ м/с, а средняя $\bar{u}_{\text{ch}} = 4,39$ м/с, т.е. эти значения довольно близки друг к другу. Для кривых 1 и 3 количество бросков раза в 2–3 было меньше. Теоретические расчеты падения частиц $d_{\text{ch}} = 1,5$ мм без учета и с учетом сопротивления воздуха показали следующие значения скорости частиц на длине 1,86 м соответственно: 6,02 м/с и 5,65 м/с. Из этого следует, что частица в трубе диаметром 8 мм теряет в скорости более одного м/с (25%), что указывает на необходимость учета взаимодействия частиц со стенкой канала.

Эксперименты с напорными течениями проводились на трубе длиной 1,97 м и внутренним диаметром 13 мм для магниевых частиц $d_{\text{ch}} = 1 \div 2$ мм и шариков полистирола $d_{\text{ch}} = 3$ мм. На рис.4,5 приведены результаты экспериментального определения величин скоростей магниевых частиц на выходе из вертикальной трубы при перепаде давления $\Delta P = 0,150$ МПа ($Q = 20,77$ м³/ч) и $\Delta P = 0,265$ МПа ($Q = 30,00$ м³/ч) соответственно. Кривые, приведенные на этих рисунках, являются аппроксимациями показанных точек.

Аналогичные результаты получены для наклонной трубы с углом отклонения от вертикали равным 45° (на рис.6 ($\Delta P = 0,150$ МПа); 7 ($\Delta P = 0,265$ МПа)).

Т.к. для отработки математической модели значительный интерес представляет различные варианты с диаметрами шариков и их материалом, то эксперименты были повторены на шариках полистирола диаметром $d_{\text{ch}} = 3$ мм.

На рис.8–11. показаны аналогичные кривые для полистирола.

На приведенных рисунках диаметры частицы были разбиты на подклассы, вследствие чего значения скоростей на рисунках А выразились в виде вертикальных цепочек. Кривые, проведенные на этих рисунках, отражают средние значения. Из рисунков хорошо видно следующее: разбросы в значениях скоростей довольно большие, что привело к пологим распределениям вероятностей. Важно отметить, что распределения вероятностей для магния и для полистирола не имеют каких-то качественных отличий. Более того, средние скорости магниевых частиц мало отличаются от средних скоростей частиц полистирола, хотя частицы и по размерам и по форме сильно отличаются друг от друга. Следующий эффект заключается в том, что, как для вертикальной трубы, так и для наклонной средние скорости и скорости, соответствующие максимальным значениям вероятностей, и для частиц магния и для частиц полистирола соответственно мало отличаются друг от друга.

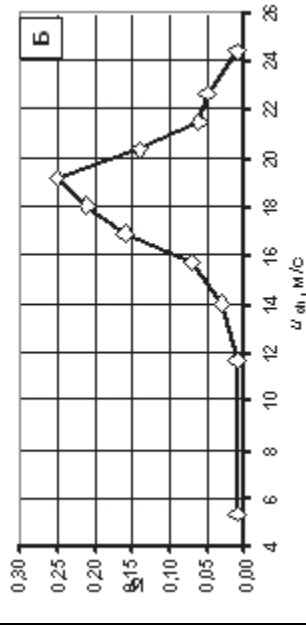
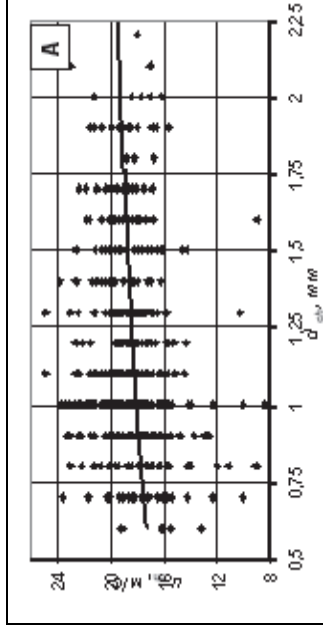


Рис.4. Распределения скоростей (u_{ch}) и вероятностей (W) для частиц при скорости газа $u_r=45$ м/с, $L=1,97$ м, $D=13$ мм, $\alpha=0^\circ$. А – Скорость частиц Mg в потоке газа от их диаметра. Б – Вероятные значения скорости частиц Mg в потоке газа.

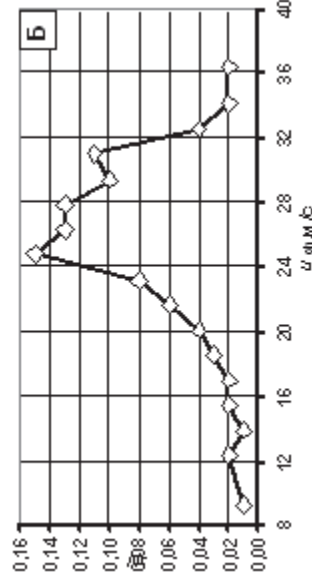
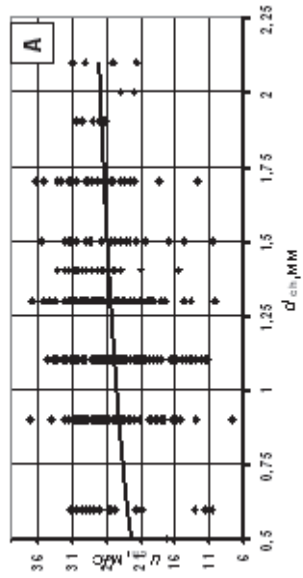


Рис.5. Распределения скоростей (u_{ch}) и вероятностей (W) для частиц при скорости газа $u_r=65$ м/с, $L=1,97$ м, $D=13$ мм, $\alpha=0^\circ$. А – Скорость частиц Mg в потоке газа от их диаметра. Б – Вероятные значения скорости частиц Mg в потоке газа.

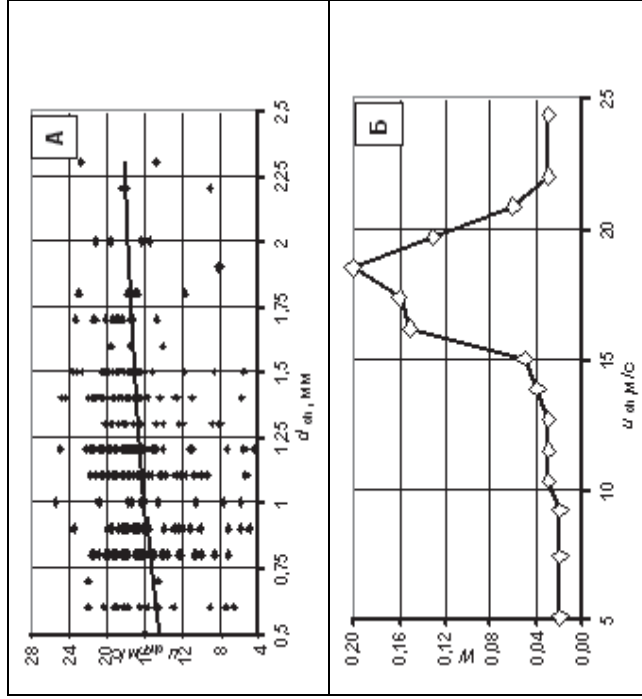


Рис. 6. Распределения скоростей (u_{ch}) и вероятностей (W) для частиц при скорости газа $u_g = 45$ м/с, $L = 1,97$ м, $D = 13$ мм, $\alpha = 45^\circ$. А – Скорость частиц Mg в потоке газа от их диаметра. Б – Вероятные значения скорости частиц Mg в потоке газа

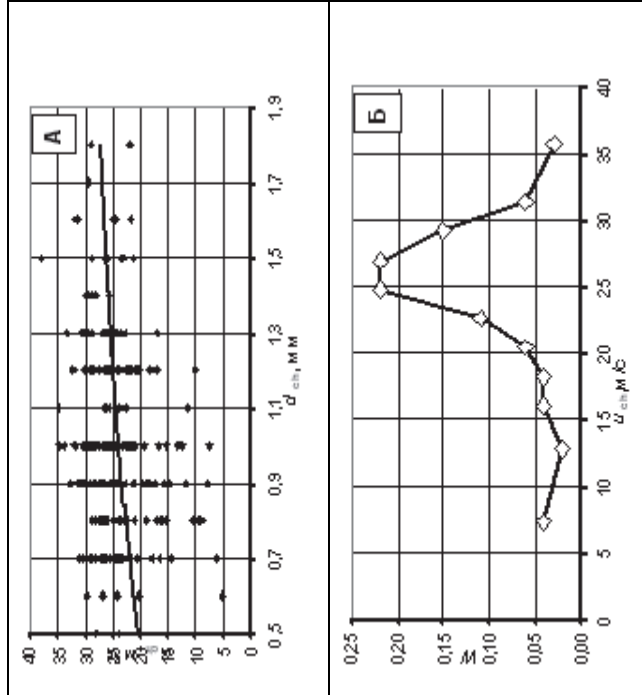


Рис. 7. Распределения скоростей (u_{ch}) и вероятностей (W) для частиц при скорости газа $u_g = 65$ м/с, $L = 1,97$ м, $D = 13$ мм, $\alpha = 45^\circ$.

А – Скорость частиц Mg в потоке газа от их диаметра.
Б – Вероятные значения скорости частиц Mg в потоке газа

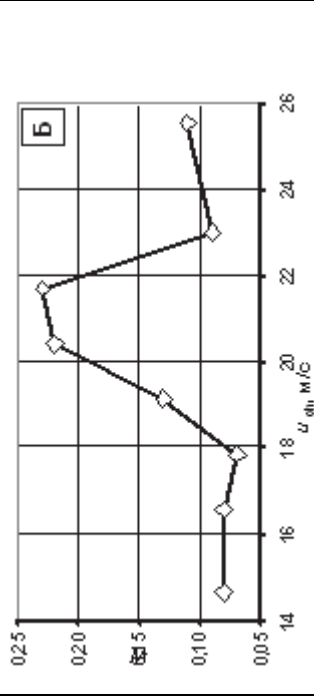
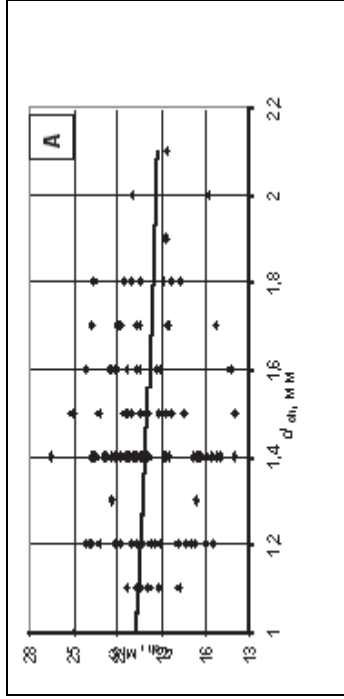


Рис. 8. Распределения скоростей (u_{ch}) и вероятностей (W) для частиц при скорости газа $u_g=45$ м/с, $L=1,97$ м, $D=13$ мм, $\alpha=0^\circ$. А – Скорость частиц полистирола в потоке газа от их диаметра. Б – Вероятные значения скорости частиц полистирола.

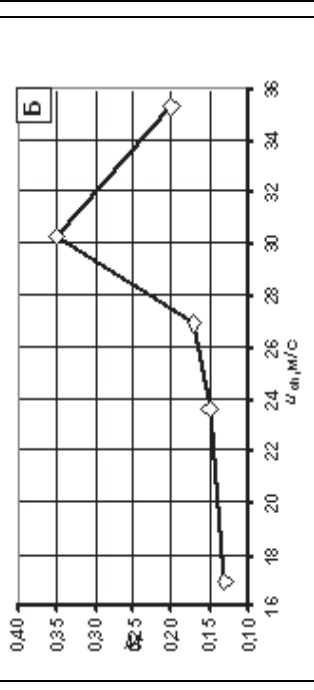
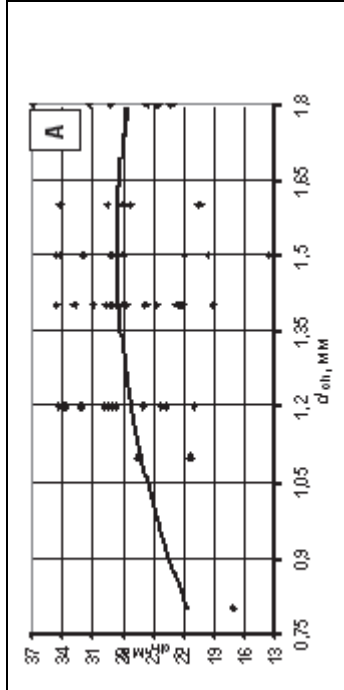


Рис. 9. Распределения скоростей (u_{ch}) и вероятностей (W) для частиц при скорости газа $u_g=65$ м/с, $L=1,97$ м, $D=13$ мм, $\alpha=0^\circ$. А – Скорость частиц полистирола в потоке от их диаметра. Б – Вероятные значения скорости частиц полистирола.

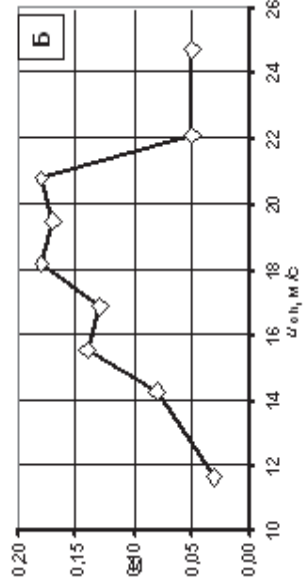
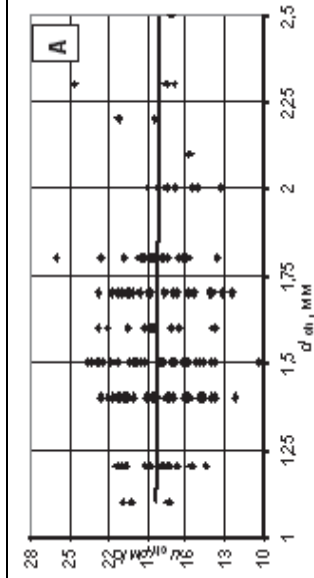


Рис. 10. Распределения скоростей (u_{ch}) и вероятностей (P) для частиц при скорости газа $u_r = 45$ м/с, $L = 1,97$ м, $D = 13$ мм, $\alpha = 45^\circ$.

А – Скорость частиц полистирола в потоке от их диаметра.
Б – Вероятные значения скорости частиц полистирола.

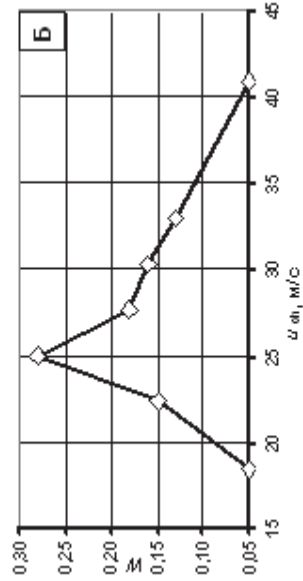
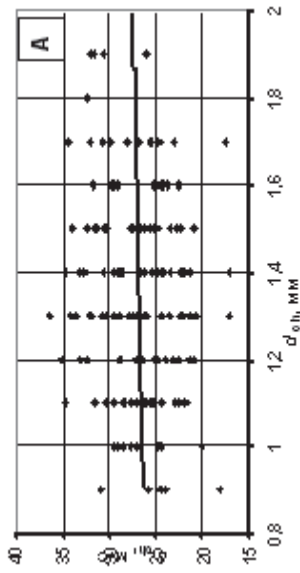


Рис. 11. Распределения скоростей (u_{ch}) и вероятностей (P) для частиц при скорости газа $u_r = 65$ м/с, $L = 1,97$ м, $D = 13$ мм, $\alpha = 45^\circ$.

А – Скорость частиц полистирола в потоке от их диаметра.
Б – Вероятные значения скорости частиц полистирола.

Видимо, для таких скоростей газа основным фактором воздействия на частицу является турбулентность потока, которая приводит к интенсивному взаимодействию частиц с поверхностью стенки канала. Характер взаимодействия частиц во многом зависит от упругих свойств материала стенки и частиц, а также от возникающих сил трения. Предварительные пробные эксперименты по подскоку частиц от металлической плиты показали, что магниевая частица после отражения от поверхности поднимается примерно на 0,1 – 0,2 от первоначальной высоты падения, в то время как частица полистирола – на 0,4 – 0,5, что также указывает на значительное различие в упругих характеристиках исследуемых материалов. Однако, практически все достаточно заметное различие в частицах слабо проявляется в конечных величинах скоростей. Необходимо также отметить, что скорость газового потока оказывает значительное влияние на скорости частиц.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что влияние стенки канала для данных размеров самого канала и частиц оказывается значительным и должно учитываться при выявлении определенных закономерностей, лежащих в основе технологического процесса и при проектировании оборудования.

1. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием / Н.А.Воронова. – М.: Металлургия, 1980. – 239с.
2. *Соу С.* Гидродинамика многофазных систем / С.Соу. – М.: Мир, 1971. – 320с.
3. *Волошин А.И.* Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И.Волошин, Б.В.Пономарев. – Киев: Наук. думка, 2001. – 248 с.
4. *Шевченко А.Ф.* Исследование процесса внепечной десульфурации жидкого чугуна вдуванием порошкообразных реагентов: дисс. канд. техн. наук: 321 / А.Ф.Шевченко–Днепропетровск, 1969. – 175с.
5. *Рузова Т.А., Карпов О.Н., Флеер Л.А.* Оперативный контроль параметров частиц дисперсных образований // Науковий вісник Національного гірничого університету.–Дніпропетровськ.–2004. – № 2. – С.83–88.
6. *Толстомят Т.А., Елисеев В.И.* Распределения и статистические характеристики капель в эмульсиях // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. научн. трудов. – Днепропетровск: ДГУ. – 2001. С.114–122.
7. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248с.
8. *Рудзит Я.А., Плуталов В.Н.* Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении. – М.: Машиностроение, 1991. – 304с.

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

***О.П.Товстон'ят, Л.О.Флеер, В.В.Давидсон, В.І.Єлісєєв,
Т.О.Рузова, А.П.Шевченко, І.О.Маначин, С.А.Шевченко***

Експериментальне визначення швидкості частинок в каналі постійного діаметру

Наведено результати експериментальних досліджень з оцінювання швидкості руху частинок магнію у каналі фурми в процесі ковшового рафінування чавуну. Показано, що частинка магнію ($d_{ch} \approx 1$ мм), що рухається, в сталевій трубі ($D_{вн} \approx 8$ мм) втрачає більше 25% своєї швидкості.