

УДК 669.162.221.2

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

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ МАГНИЯ В КАНАЛЕ ДВУХСОПЛОВОЙ ФУРМЫ

Институт черной металлургии НАН Украины

Целью работы является изучение закономерностей движения газа и частиц в канале фурмы с делителем потока при внепечной обработке чугуна. Построена математическая модель движения газа и частиц магния в канале сложной формы, изучено сопротивление стенок канала фурмы. Выявлено сильное влияние делителя на конечную скорость частиц магния и слабое влияние углов поворота каналов в делителе. Дана оценка выходной скорости частицы магния.

Ключевые слова: внепечной обработке чугуна, фурма, модель движения газа и частиц магния, скорость

Введение. Канал двухсопловой фурмы с точки зрения газодинамики имеет отличия от односопловой прямоточной фурмы. Двухсопловой канал состоит из прямого вертикального участка, в конце которого находится делитель потока, за которым следует относительно небольшой прямолинейный либо слабоискривленный участок. Поворот приводит к тому, что частицы, летящие с довольно большими скоростями, наталкиваются на стенку канала. Попытки теоретически проследить за полетом частицы до и после удара были сделаны в работе [1], в которой рассмотрен наиболее простой случай – движение частицы в прямом плоском канале с учетом ее силы тяжести. Для двухсопловой фурмы, в котором расположен делитель, такой прием чрезвычайно трудоемок и, практически, непригоден. Однако, общий подход с использованием силы Бусройда может быть применен для расчетной оценки скорости частиц магния при движении по реальному магниепроводу двухсопловой фурмы. Экспериментально было показано [2, 3], что взаимодействие частиц с поверхностью канала оказывает довольно значительное влияние на величины их скоростей. Для искривленных каналов это влияние должно усиливаться. В основу теоретического подхода данной работы и проделанных расчетов были положены полученные экспериментальные результаты, а также теоретические разработки в [1, 2].

Целью работы является изучение закономерностей движения газа и частиц в канале фурмы с делителем потока при внепечной обработке чугуна.

Математическая модель движения частиц в канале с учетом их взаимодействия со стенкой. Принимая во внимание, что в гидравлической постановке изменения направления канала и его поперечного сечения могут быть учтены с помощью коэффициентов

сопротивления, используем одномерную модель течения газа и дисперсного материала с учетом силы Бусройда в следующей форме:

$$\alpha \rho u = G, \quad (1)$$

$$\alpha_{ch} \rho_{ch} u_{ch} = G_2, \quad (2)$$

$$\alpha \rho u \frac{du}{dx} = \alpha \frac{dp}{dx} - \alpha n f_{g-ch} + \alpha \rho g - \alpha f_T, \quad (3)$$

$$\alpha_{ch} \rho_{ch} u_{ch} \frac{du_{ch}}{dx} = \alpha_{ch} \left(\frac{dp}{dx} - f_T \right) + \alpha n f_{g-ch} + \alpha_{ch} (\rho_{ch} - \rho) g - F_B, \quad (4)$$

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 $\left(\frac{dp}{dx} - f_T \right)$, получим:

$$\left(\rho_{ch} + \frac{1}{2} \rho \right) u_{ch} \frac{du_{ch}}{dx} = \frac{3}{2} \rho u \frac{du}{dx} + \frac{n}{\alpha_{ch}} f_\mu + g \cos \theta \cdot (\rho_{ch} - 2\rho) - \alpha_{ch}^{-1} F_B. \quad (5)$$

В [2] было принято эту силу представлять в виде двух слагаемых

$$F_B = F_B^G + F_B^W, \quad (6)$$

$$F_B^W = B_W \alpha_{ch} \rho_{ch} \frac{u u_{ch}}{D_{tr}}, \quad F_B^G = B_G g \cdot \sin \theta \cdot \alpha_{ch} \rho_{ch} \frac{u_{ch}}{u}$$

где $B_W = f_W \frac{1 - \exp(-m)}{m} \frac{D_{tr}}{R_{ch}}$; $B_G = f_G \frac{1 - \exp(-m)}{m} \frac{D_{tr}}{R_{ch}}$; f_W , f_G -

экспериментальные коэффициенты; θ - угол между силой тяжести и нормалью к поверхности внутренней стенки канала. Чтобы расширить возможности использования силы Бусройда в такой форме, добавим к ускорению свободного падения центробежное ускорение, которое возникает при повороте канала, тогда будем иметь

$$F_B^G = f_G (g \cdot \sin \theta + W) \alpha_{ch} \rho_{ch} \frac{u_{ch}}{u} \frac{D}{r_{ch}}, \quad (7)$$

где $W = \frac{u_{ch}^2}{R_{cr}}$. Если делитель потока представить схематично в виде

показанного на рис.1 соединения двух каналов, то, взяв в качестве основных точек точку A (точка пересечения осей каналов) и точку B (точка пересечения оси вертикального канала с нижней границей отводного канала), можно получить радиус кривизны R_{CR}

$$R_{CR} = R_{T2} + \frac{R_{T1} \cos \beta - R_{T2}}{\sin^2 \beta} \cos \beta + \frac{(2 + \cos \beta) R_{T2} - R_{T1} \cos \beta}{\sin^2 \beta} \cos \beta, \quad (8)$$

где β - угол между осями каналов; R_{T1} , R_{T2} - радиусы первого (вертикального) и второго (наклонного) каналов соответственно.

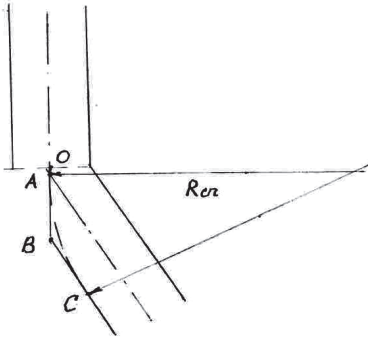


Рис.1. Схема делителя

Коэффициенты f_W и f_G были найдены в [2] для шариков полистирола и магниевых частиц для вертикальной и наклонной под 45 к вертикали трубе. В данной работе, т.к. показания скорости частиц снимались в двух участках – в конце вертикального участка и на выходе из фурмы, эти коэффициенты были вновь определены, причем коэффициент f_W определялся по наиболее вероятной скорости в конце вертикального участка, а f_G - по наиболее вероятной скорости на выходе из канала. Процедура определения коэффициентов состояла в следующем. Бралось одно значение скорости частицы, полученное в эксперименте при какой-то величине расхода воздуха для вертикального канала, и для него подбирался коэффициент f_W . Затем такая же операция делалась для полного канала (вертикальный канал плюс делитель со вставкой) и находился коэффициент f_G . В результате таких вычислений получены следующие значения f_W и f_G : для полистирола - $f_W = 1.25 \cdot 10^{-4}$, $f_G = 1.2$; для магния - $f_W = 2.5 \cdot 10^{-4}$, $f_G = 0.5$. Сравнивая эти величины с приведенными ранее в [2] (фотографирование треков), можно увидеть, что для полистирола эти величины практически не изменились, что

говорит о единообразии методики и теоретических расчетов; для магния они несколько поменялись (уменьшились). Это связано с тем, что в данных экспериментах использовались катанные и просеянные через сито частицы магния, поверхностные характеристики которых, видимо, существенно отличаются от ранее используемых. После нахождения необходимых коэффициентов были проделаны расчеты скоростей для частиц полистирола и магния. Приведем значения скоростей на выходе вертикальной трубы (м/с) для тех же расходов q

Полистирол	Эксперим.	Расчет	Магний	Эксперим.	Расчет
$Q_{\Gamma} = 21$	22,90	22,60	$Q_{\Gamma} = 21$	15,01	15,19
$Q_{\Gamma} = 30$	32,41	31,59	$Q_{\Gamma} = 30$	18,38	21,05

В приведенных ниже таблицах показаны значения скоростей, которые представляют интерес для анализа процесса.

ЧАСТИЦЫ – ПОЛИСТИРОЛ; $d=1,5$ мм; $H=2,3$ м; $h=2,2$ м

	α ,	Q_{Γ} ,	u ,	Пара метры		скорости		число	Скор.
	град.	м ³ /ч	м/с	макс.	вероятн.	средн.	измер.	расч.	
Кривая	30	21	45	20,00	8,96	10,61	172	7,78	
Прямая	30	21	45	19,90	9,12	9,79	81	9,38	
Кривая	30	30	65	29,81	9,54	14,63	146	11,11	
Прямая	30	30	65	29,09	11,53	14,62	85	13,36	
Кривая	60	21	45	19,63	8,53	9,93	476	7,81	
Прямая	60	21	45	19,75	10,16	9,24	447	9,46	
Кривая	60	30	65	29,81	15,83	14,59	576	11,18	
Прямая	60	30	65	28,24	11,66	12,32	503	13,50	
Кривая	90	21	45	19,63	9,66	10,33	291	8,02	
Прямая	90	21	45	17,88	10,19	9,67	261	9,63	
Кривая	90	30	65	29,36	13,13	14,18	349	11,49	
Прямая	90	30	65	28,32	10,42	13,63	247	13,78	

ЧАСТИЦЫ – МАГНИЙ; $d=1,5$ мм; $H=2,3$ м; $h=2,2$ м

	α ,	Q_{Γ} ,	u ,	Пара метры		скорости		число	Скор.
	град.	м ³ /ч	м/с	макс.	вероятн.	средн.	измер.	расч.	
Кривая	30	21	45	19,39	9,18	10,11	231	7,51	
Прямая	30	21	45	19,63	9,52	9,69	190	8,66	
Кривая	30	30	65	28,74	10,48	12,86	195	10,67	
Прямая	30	30	65	29,00	13,25	13,09	103	12,27	
Кривая	60	21	45	19,96	8,41	9,21	369	7,44	
Прямая	60	21	45	19,71	7,94	8,70	265	8,54	
Кривая	60	30	65	29,81	9,01	9,90	396	10,59	
Прямая	60	30	65	29,81	9,40	11,62	559	12,12	
Кривая	90	21	45	19,71	7,43	9,82	198	7,45	
Прямая	90	21	45	18,19	9,42	8,87	175	8,43	
Кривая	90	30	65	29,91	11,38	13,04	295	10,63	
Прямая	90	30	65	28,32	10,90	11,46	302	11,99	

В приведенных таблицах показаны значения скоростей частиц (6 колонка – наиболее вероятные значения; 7 – колонка средние статистические),

полученные при обработке экспериментальных данных. В пятой колонке приведены максимальные значения скоростей частиц, зафиксированные датчиком. Слова «**Кривая**, **Прямая**» в первой колонке относятся к соответствующим вставкам после делителя потока. В четвертой колонке показаны конечные скорости газа. Угол $\alpha = 2\beta$ во второй колонке является углом между осями двух каналов в делителе. В предпоследних колонках таблиц приведено количество измерений, сделанных в эксперименте для соответствующего случая. При рассмотрении этих таблиц видно, что увеличение расхода газа приводит к увеличению скорости частиц на выходе из насадка. Важным моментом в полученных значениях является то, что средние статистические величины скоростей не сильно отличаются от величин, соответствующих максимальной вероятности. Это указывает на то, что статистический процесс близок к нормальному. Для желательного более точного совпадения, видимо, не хватает количества точек (количества испытаний). При рассмотрении экспериментальных значений скоростей видно, что углы (α) в насадке не вызывают каких-то определенных четких закономерностей в величинах скоростей (нет монотонности изменения), отсюда следует, что невозможно определить влияние углов насадка на количественное изменение выходной скорости частиц. Возможно, что и в этом случае для более четкого определения не хватает количества экспериментальных точек. Наконец, еще один вопрос оказывается несколько неопределенным – влияние кривизны выходного канала (вставки после делителя) на конечную скорость частиц. Сравнивая кривой канал с прямым, к сожалению, нельзя четко определить какое изменение в величину конечной скорости вносит кривизна канала. Возможно, что этот вопрос также является за пределами нашей точности, обусловленной количеством испытаний. В последних колонках таблиц приведены расчетные значения скоростей, полученные при решении выписанной выше системы уравнений с указанными выше коэффициентами. Сравнивая расчетные значения и экспериментальные, можно сказать, что подобранные коэффициенты неплохо удовлетворяют поставленной задаче – полученные значения выходных скоростей близки в пределах ошибки к наиболее вероятным значениям скоростей, приведенных в таблицах. В отличие от экспериментальных величин выходных скоростей в расчетах просматриваются некоторые закономерности. Увеличение углов в насадке приводит к некоторому увеличению скоростей для полистирола, но к уменьшению для магния. Искривление канала, как следует из расчетов (см. таблицы), приводит к уменьшению выходных значений скоростей, как для полистирола, так и для магния (выходные скорости частиц в искривленной трубке насадка несколько меньше, чем скорости при выходе из прямого). Однако, необходимо заметить, что эти отличия сравнительно небольшие и могут также рассматриваться в пределах ошибки.

Результаты расчетов течения газа и движения частиц магния в двухсопловой фурме с делителем. По приведенным выше уравнениям и найденным с помощью экспериментов коэффициентам Бусройда были проведены расчеты параметров течения газа с частицами. Длина прямого участка фурмы принималась равной 9 м, а ее диаметр 12 мм. Геометрические формы насадка брались такими же, как и при нахождении коэффициентов f_W и f_G . Т.к. изменение параметров движения газа и частиц для вертикальной части фурмы показаны в [2], то, учитывая, что для рассматриваемых вариантов они не сильно отличаются, приведем только значения давлений, скоростей газа и частиц в конце вертикального канала:

$Q_G, \text{ м}^3/\text{час}$	p/p_a	$u, \text{ м/с}$	$u_{ch}, \text{ м/с}$
50	1,02	102	34,0
75	1,09	143	47,2
100	1,16	177	58,4
125	1,28	200	67,3

Из сопоставления величин скоростей газа и частиц следует, что скорость частиц на выходе из вертикального участка фурмы достигает одной трети от скорости газа. На следующих четырех рисунках 2 – 5 показаны параметры течения в каналах делителя и насадка.

На рис.2 и 3 приведены кривые изменения давления и скорости газа в каналах делителя и насадка. Повышение давления и, соответственно, понижение скорости связано с некоторым расширением канала (участок ОА на рис.1) при его раздвоении (расчет велся для безотрывного течения). Затем, следует резкое падение давления и повышение скорости. Этот участок кривых соответствует изменению диаметров каналов до 9 мм.

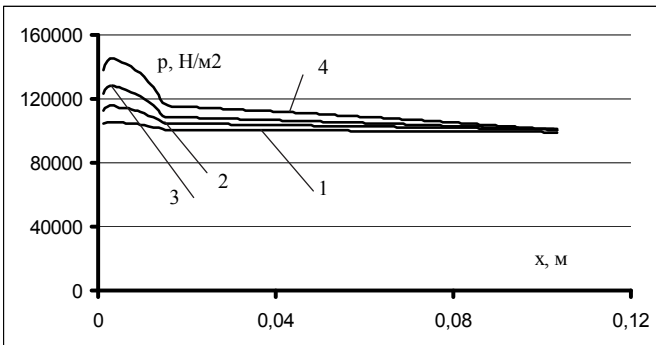


Рис.2. Распределение давления по длине канала делителя и насадка
Кривые: 1 - $Q_G = 50 \text{ м}^3/\text{час}$; 2 - $75 \text{ м}^3/\text{час}$; 3 - $100 \text{ м}^3/\text{час}$; 4 - $125 \text{ м}^3/\text{час}$

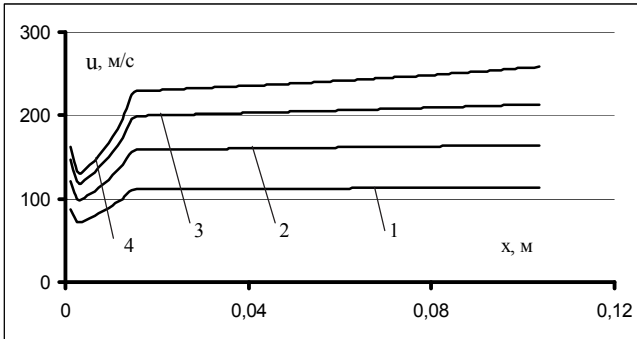


Рис.3. Изменение скорости газа по длине канала делителя и насадка.
Кривые: 1 - $Q_r = 50 \text{ м}^3/\text{час}$; 2 - $75 \text{ м}^3/\text{час}$; 3 - $100 \text{ м}^3/\text{час}$; 4 - $125 \text{ м}^3/\text{час}$

Далее, как следует из рисунков, давление плавно переходит к концу канала к атмосферному, а скорости постепенно подрастают. При этом видно, что, даже на таком коротком участке, при большом расходе (кривая 4) наклон кривой к концу участка несколько увеличивается.

На последних двух рисунках приведены кривые изменения скоростей частиц в делителе и насадках с прямым (рис.4) каналом и с искривленным (рис.5). Здесь видно, что при входе в делитель (при выходе из вертикального канала) скорости резко падают (происходит интенсивное взаимодействие частиц со стенками делителя), при этом величины скоростей падают раза в 2–2,5, затем после достижения минимальных значений начинается новый рост. Это соответствует входу частиц в канал насадка с постоянной площадью, где скорость газа постепенно возрастает.

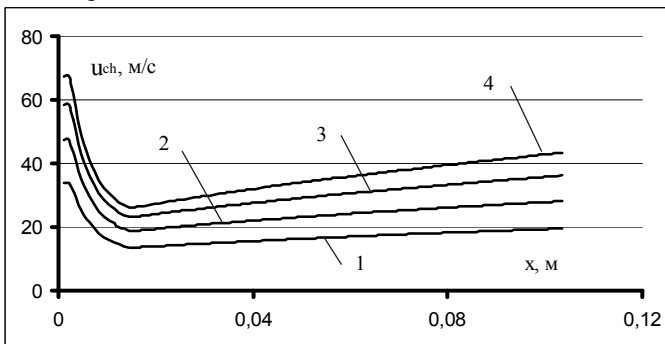


Рис.4. Изменение скорости частиц по длине прямого канала насадка.
Кривые: 1 - $Q_r = 50 \text{ м}^3/\text{час}$; 2 - $75 \text{ м}^3/\text{час}$; 3 - $100 \text{ м}^3/\text{час}$; 4 - $125 \text{ м}^3/\text{час}$

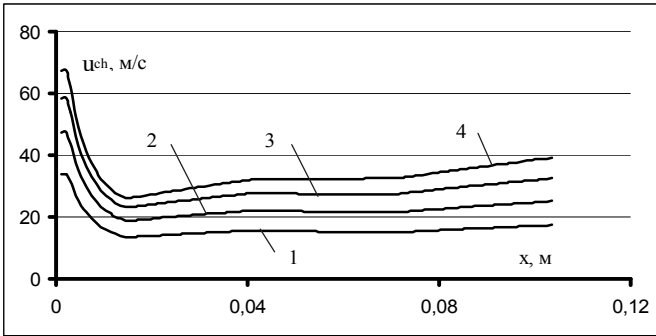


Рис.5. Изменение скорости частиц по длине искривленного канала насадке.
Кривые: 1 - $Q_r = 50 \text{ м}^3/\text{час}$; 2 - $75 \text{ м}^3/\text{час}$; 3 - $100 \text{ м}^3/\text{час}$; 4 - $125 \text{ м}^3/\text{час}$

При сравнении кривых на этих рисунках видно, что введенная в уравнения центробежная сила, прижимает частицы к стенке искривленного канала, в результате чего скорости частиц на конце его несколько меньше, чем в прямолинейном. Как уже говорилось, эксперименты не показали явного влияния искривления канала на скорость частиц. Во-первых, это обусловлено физическим взаимодействием частиц со стенками в этой части канала (частицы отскакивают от стенки, а не скользят по ней), в этом случае введение указанной силы, видимо, требует уточнения. Во-вторых, возможный эффект несколько тоньше и требует более точного подхода и увеличения количества экспериментов. Как отмечается в [4] в криволинейных участках возникают вторичные течения в виде поперечных вихрей, которые сильно влияют на однофазные течения, увеличивая сопротивление. Движение частиц в изгибах труб довольно разнообразно и зависит от крупности частиц. В данном случае, исходя из экспериментального исследования и теоретических расчетов, можно говорить о том, что искривление канала в насадке не приводит к заметному (экспериментальный результат) изменению скорости на выходе. Теоретические результаты, хоть и выявляют некоторое отличие, но оно находится в пределах ошибки эксперимента, вследствие чего этот вопрос требует более тщательного исследования.

Выпишем значения начальных величин скоростей частиц ($u_{ch,0}$), входящих в делитель, и выходных значений скоростей газа (u_c) и частиц ($u_{ch,c}$) из насадков

$q, \text{ м}^3/\text{час}$	$u_{ch,0}, \text{ м/с}$	$u_c, \text{ м/с}$	$u_{ch,c}, \text{ м/с}$	$u_{ch,c}, \text{ м/с}$
	прямой канал		кривой канал	
50	34.0	113	19.5	17.4
75	47.2	164	28.1	25.1
100	58.4	213	36.1	32.5
125	67.3	258	43.3	39.2

Из этой таблицы видно, что скорость частиц на выходе из насадка фурмы раз в шесть меньше скорости газа и раза в 1.5 – 2 меньше входной скорости частиц в делитель. Разница между скоростями частиц при выходе из прямого и криволинейного канала составляет примерно 10 %.

Выводы. Построена математическая модель движения газа и частиц в канале сложной формы. С помощью экспериментально полученных значений скоростей частиц, найдены коэффициенты в силе Бусройда, характеризующей сопротивление, оказываемое стенкой канала на движение частиц. Проведенные вычисления показали закономерности движения газа и частиц в канале фурмы с делителем потока и последующими вставками. Расчеты выявили сильное влияние делителя на конечную скорость частиц, и слабое влияние углов поворота каналов в делителе. В результате расчетов, найдена практически важная оценка выходной скорости частицы магния.

1. *Волошин А.И., Пономарев Б.В.* /Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов.- К. Наукова думка, 2001, 520с.
2. *Толстомят А.П., Флеер Л.А., Давидсон В.В., Елисеев В.И., Рузова Т.А., Шевченко А.Ф., Маначин И.А., Шевченко С.А.* // Экспериментальное определение скорости частиц в канале постоянного диаметра – Фундаментальные и прикладные проблемы проблемы чёрной металлургии. Сб. ИЧМ. - №23 – 2012.
3. *Елисеев В.И., Толстомят А.П., Флеер Л.А., Давидсон В.В., Рузова Т.А., Шевченко А.Ф., Маначин И.А., Шевченко С.А.* // Расчет движения частиц в прямолинейном канале – Фундаментальные и прикладные проблемы проблемы чёрной металлургии. Сб. ИЧМ. - №24 – 2012.
4. *Бусройд Р.* / Течение газа со взвешенными частицами.- М.: Мир, 1975, 378с.

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

***В.І.Єлісеєв, О.П.Толстомят, Л.О.Флеєр, Т.О.Рузова, І.О. Маначин,
А.П.Шевченко, С.А.Шевченко***

Розрахунок руху частинок магнію у каналі двохсплової фурми

Метою роботи є вивчення закономірностей руху газу і частинок магнію у каналі фурми з дільником потоку при позапічній обробці чавуну. Розроблено математичну модель руху газу і частинок магнію в каналі складної форми, вивчено опір стінок каналу фурми. Виявлено сильний вплив подільника на кінцеву швидкість частинок магнію і слабкий вплив кутів повороту каналів в дільнику. Дано оцінку вихідний швидкості частинок магнію.

Ключові слова: позапічна обробка чавуну, фурма, рух газу і частинок магнію, модель, швидкість

*V.I.Eliseev, A.P.Tolstopyat, L.A.Fleer, T.A.Ruzova, I.O.Manachyn,
A.F.Shevchenko, S.A.Shevchenko*

**Calculation of the motion of magnesium particles in the channel two -
nozzles lance**

The aim is to study the laws of motion of gas and particles in the channel of the lance with flow divider in the processing of iron in the ladle. A mathematical model of the motion of gas and particles of magnesium in the channel of complex shape. Studied the resistance of the channel walls of the lance. Revealed a strong influence on the final speed divider magnesium particles and the weak effect of the rotation angles of channels in the denominator. Calculated speed of magnesium particles in the channel of the lance.

Keywords: cast iron ladle, lance, model motion of the gas and particles of magnesium, magnesium particle velocity