

С.А. Шевченко, к.т.н., с.н.с., 0000-0002-9287-9177

А.Ф. Шевченко, д.т.н., проф., вед.научн.сотр., ORCID 0000-0003-0867-6825
Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

А.П. Толстопят, *Днепропетровский национальный университет*

Л.А. Флеер, *Днепропетровский национальный университет*

В.И. Елисеев, *Днепропетровский национальный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ ДЕЛЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Аннотация. Целью данной работы является оценка влияния т-образного делителя ($\alpha = 180^\circ$) на скорость движения шаровидных частиц по тракту двухсопловой фурмы в потоке воздуха и сопоставление с результатами экспериментов разделения потока при меньших углах. Выполненные исследования показали, что в Т-образном делителе частицы реагента имеют сложную траекторию движения. Часть частиц имеет скорость истечения соответствующую другим типам делителя (7 – 14 м/с), а другая равновесная часть частиц тормозится и имеет скорость истечения в 4 – 5 раз меньшую (1 – 3 м/с), что отражено бимодальным характером распределения полученных результатов. В связи с этим, переход от одиночных частиц к более плотному потоку (в случае повышения интенсивности подачи реагента) приведет к появлению нестабильности процесса инжекции, к пульсациям и даже запариванию фурмы, что в условиях истечения в расплав приведет к закупорке сопла. Подтверждением этому являются отдельные попытки вдувать гранулированный магний через т-образную фурму на установках десульфурации чугуна, когда ввод магния осуществлялся с завышенными расходами транспортирующего газа и интенсивностью не более 5 – 6 кг/мин, что в 5 раз меньше чем через у-образную двухсопловую фурму. При этом инжекция осуществлялась через одно сопло, поскольку другое на первых секундах выдачи магния закупоривалось. Процесс протекал бурно и сопровождался выплесками чугуна из ковша. Установлено, что в сравнении с углами разделения потока ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) т-образный делитель ($\alpha = 180^\circ$) в большей степени снижает скорость частиц магния и полистирола (на 20 – 50%). Кроме того, на скорость движения твердой частицы по тракту двухсопловой фурмы оказывают существенное влияние физические характеристики взаимодействующих материалов, форма частиц, расход транспортирующего газа и длина патрубка после делителя.

Ключевые слова: десульфурация чугуна, магний, инжекция, фурма, делитель потока

Ссылка для цитирования: Шевченко С.А., Шевченко А.Ф., Толстопят А.П., Флеер Л.А., Елисеев В.И. Исследование скорости дисперсных частиц при различных углах деления двухфазного потока. //«*Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*». – 2019. - Вып.33. – С.78-86. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-78-86

Состояние проблемы. Создавая современные системы инжекционного рафинирования расплава в ковшах дисперсными

реагентами, разработчики стремятся повысить эффективность процесса за счет увеличения реакционной зоны и рассредоточения ее в объеме рафинируемой ванны. Наиболее рациональным путем в этом случае является применение фурм с двумя или более соплами, в тракте которых основной двухфазный поток (транспортирующий газ + дисперсный реагент) разделяется на два или более потоков.

Переход от одного сопла к нескольким, привел к появлению проблем, связанных со стабильностью инжектирования, закупориванием сопел, равномерностью разделения потока, удобством изготовления и обслуживания фурм, что во многом определяется особенностью конструкции делителя потока, встроенного в пневмотранспортную систему фурменного устройства.

Ранее нами были проведены исследования [1, 2] влияния особенности конструкции делителя на скорость движения двухфазного потока на примере шарообразных твердых частиц $\varnothing 1,5$ мм (магния и полистирола). Были рассмотрены углы разделения потока $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Результаты этих исследований показали, что наличие делителя в тракте фурмы вносит помехи при движении частиц, снижая их скорость на момент разделения до 32 – 34%. При этом, изменение геометрии конструкции делителя: угла разделения (в пределах $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$), типа используемых отводов (прямой или изогнутый) существенного влияния на скорость частиц не оказывало. Эти выводы указывают на целесообразность рассмотрения крайнего варианта, разделения потока с углом $\alpha = 180^\circ$, т.е. вариант т-образного делителя. Имеющиеся сведения о применении фурм с т-образным делителем потока для инжектирования в расплав дисперсных материалов: порошкообразной извести, смеси извести и магния [4] отмечают простоту изготовления и удобство обслуживания таких фурм.

Цель исследования. С помощью имеющейся методики и экспериментальной установки [1,3] оценить влияние т-образного делителя ($\alpha = 180^\circ$) на скорость движения шаровидных частиц по тракту двухсопловой фурмы в потоке воздуха и сопоставить с результатами экспериментов разделения потока при меньших углах.

Описание эксперимента. Эксперименты проводились в лаборатории Днепропетровского национального университета на разработанном стенде [1]. На масштабную модель тракта двухсопловой фурмы с т-образным делителем (рис. 1) были установлены специальные оптоэлектронные блоки [1], позволяющие регистрировать скорость частиц двухфазного потока без вмешательства в его структуру в канале фурменного устройства до и после деления. Делителю потока предшествовал вертикальный канал $L = 2000$ мм (при дополнительном эксперименте $L = 100$ мм). Поток разделялся на два отвода к соплам длиной $L \approx 150$ мм. Сумма площадей поперечных сечений отводов делителя равна площади поперечного сечения вертикального канала (трубы $d = 13$ мм) перед ним. Все элементы тракта выполнены из стали. Расход транспортирующего

воздуха рассчитывался по перепаду давления на расходной шайбе и соответствовал расходам ранее проведенных экспериментов [1]: $Q = 17 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (1,0 ати); $21 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (1,5 ати); $25 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (2,0 ати); $30 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (2,65 ати), что для диаметра основного канала (13 мм) соответствовало скоростям газа $u_2 = 17 \text{ м/с}$, $u_2 = 45 \text{ м/с}$, $u_2 = 54 \text{ м/с}$ и $u_2 = 65 \text{ м/с}$. В качестве дисперсного материала использовались полистирол шаровидной формы $d = 1,5 \text{ мм}$ (плотностью 1040 кг/м^3) и окатанный, близкий к шаровидной формы магний $d = 1,2 \text{ мм}$ (плотностью 1740 кг/м^3).

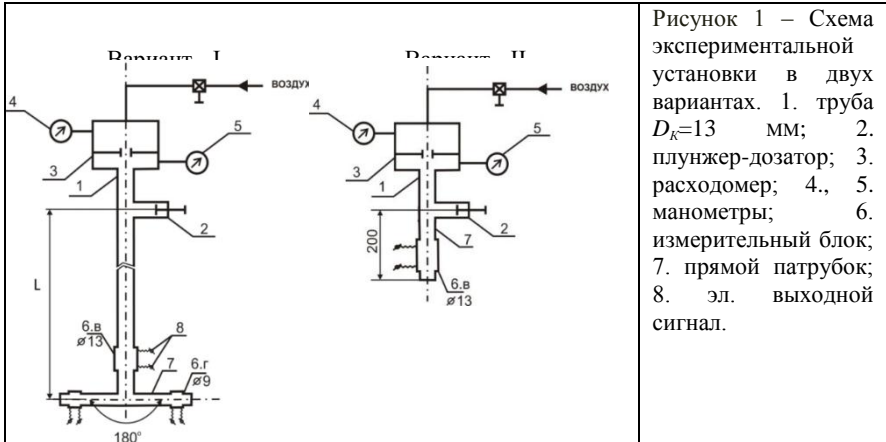


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки в двух вариантах. 1. труба $D_k=13 \text{ мм}$; 2. плунжер-дозатор; 3. расходомер; 4., 5. манометры; 6. измерительный блок; 7. прямой патрубок; 8. эл. выходной сигнал.

Анализ результатов. Сравнение скоростей дисперсных частиц до и после делителя позволяло определить потерю скорости при его прохождении, в зависимости от угла между осями сопел [2]. На рис. 2 приведены результаты измерения скоростей частиц оптоэлектронным блоком расположенным после т-делителя.

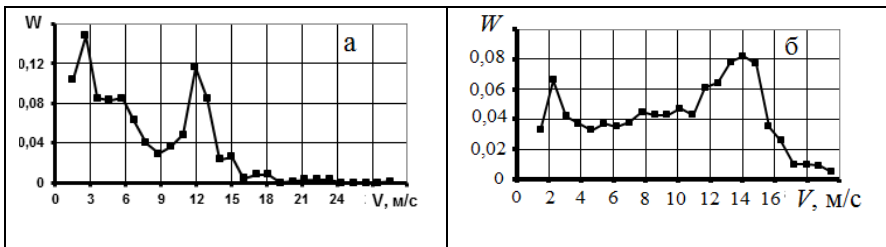


Рисунок 2 – Распределение скоростей частиц на выходе т-делителя. Магний, $Q_2 = 30 \text{ нм}^3/\text{ч}$, $U = 65 \text{ м/с}$, $L = 2000 \text{ мм}$. а) Полистирол; б) Магний.

Показано, что распределения вероятных скоростей ($V, \text{ м/с}$), в отличие от ранее полученных результатов, не подчиняются нормальному закону, а являются бимодальными с ярко выраженными двумя (практически

равновероятными) максимумами. Следует отметить, что величины наиболее вероятных скоростей частиц как первого максимума $V_w = 1 - 2$ м/с для полистирола и $V_w = 2 - 3$ м/с для магния, так и второго $V_w = 7,5 - 14$ м/с для полистирола и $V_w = 6,6 - 12,4$ м/с для магния, растут (в исследованном диапазоне) пропорционально увеличению расхода транспортирующего газа.

Для прояснения физической основы бимодального распределения было проведено несколько дополнительных экспериментов. На рис. 3 приведены результаты измерений после делителя при $L = 100$ мм, т.е. при укороченном в 20 раз разгонном участке. Сравнение их с результатами, приведенными на рис. 2 (полистирол, $L = 2000$ мм) показывает, что характер распределения другой – и имеет место нормальное распределение. Значение наиболее вероятной скорости V на выходе из т-делителя при соответствующих расходах газа меняется слабо, но доля W наиболее вероятных скоростей в распределении увеличивается втрое. При тех же условиях магний (рис.3, б) сохраняет бимодальное распределение.

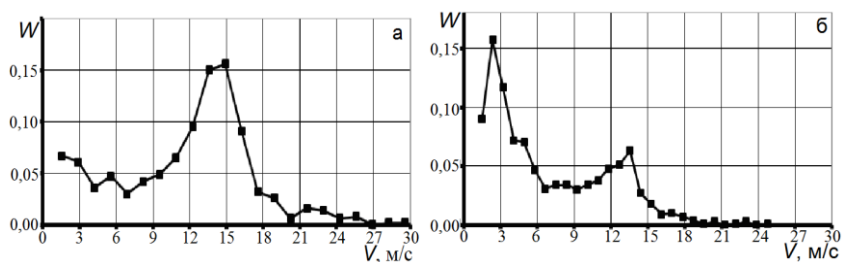


Рисунок 3 – Распределение скоростей частиц на выходе т- делителя: $Q_2 = 30 \text{ нм}^3/\text{ч}$, $U = 65 \text{ м/с}$, $L = 100 \text{ мм}$

С целью полностью исключить предварительный разгон частиц в вертикальном участке т-делителя стенд был собран без т-делителя в одной горизонтальной плоскости и включал лишь питатель и оптоэлектронный блок (100 мм). Результаты этих продувок представлены на рис. 4. Видно, что в этом случае величины V_w как для полистирола, так и для магния при соответствующих расходах газа достаточно близки и имеют близкий к «нормальному» закон распределения.

Следует отметить, что значения наиболее вероятной скорости V_w (в случае бимодального распределения – второй максимум) на выходе из т-насадки как для короткого и длинного вертикальных разгонных участков, так и для случая короткого горизонтального разгонного участка, без т-делителя при соответствии расходов газа достаточно близки.

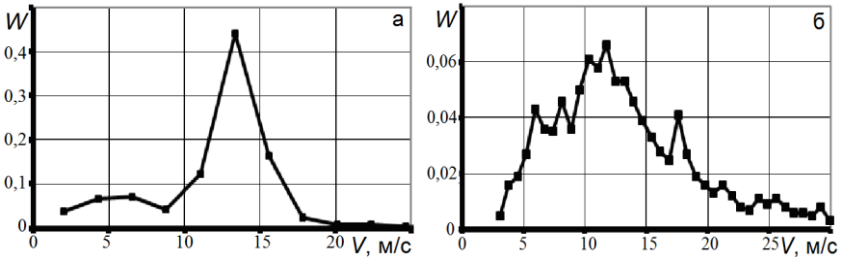


Рисунок 4 – Распределение скоростей частиц, горизонтальная труба $D = 13$ мм, ($L=100$ мм) без делителя. $Q_2 = 30$ нм³/ч, $U = 65$ м/с, а) Полистирол; б) Магний.

Также, следует отметить тот факт, когда при экспериментах с длинным основным каналом ($L = 2000$ мм) некоторые частицы после упругого отражения от горизонтальной плоскости т-делителя поднимались против потока по вертикальному каналу на высоту более 100 мм и регистрировались первым оптоэлектронным блоком (на входе в т-делитель). Дополнительные эксперименты с прикрепленным к корпусу т-делителя микрофоном подтверждают, что некоторые частицы после лобового отражения более 4-х раз ударяются о стенки тракта, тем самым, теряя свою скорость. Частицы неправильной формы имеют всего один отскок.

Результаты исследований позволили установить, что движение частиц, принадлежащих к различным модам, происходит по различным траекториям. Ко второй моде, с большими из наиболее вероятных скоростей, относятся частицы, которые потеряли свою скорость в результате лобового столкновения до весьма малых значений, и уже в горизонтальном участке т-делителя беспрепятственно разогнались. Моду с меньшими вероятными скоростями составляют частицы, которые в силу различных причин на момент вхождения в горизонтальный канал сохранили свою скорость после отражения от горизонтальной плоскости т-делителя. Движение этих частиц под углом к оси горизонтального канала способствует их частому контакту со стенкой (например: многократное отражение или спиральное движение частицы). В этом случае, наличие начальной скорости, на момент вхождения частицы в горизонтальный участок т-делителя, отрицательно влияет на последующий ее разгон.

На рис. 5 показана зависимость наиболее вероятных скоростей частиц от расхода газа для полистирола (а) и магния (б). Видно, что мода наиболее вероятных больших скоростей (белый маркер) линейно нарастает с увеличением расхода газа, что вполне отвечает физической картине прямолинейного движения частицы в потоке газа. В то же время мода меньших скоростей (черный маркер) практически не зависит от

расхода газа, что, по всей вероятности, подтверждает предположение о рикошете, скольжении и движении частиц по винтовой линии.

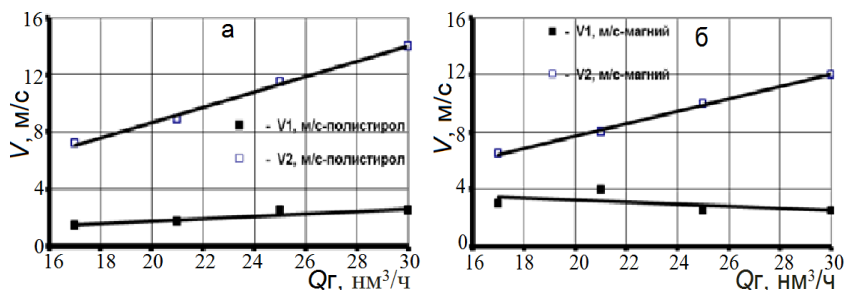


Рисунок 5 – Зависимость наиболее вероятных скоростей частиц на выходе т-образной фурмы от расхода газа. а) полистирол; б) магний; (■ V_1 – наиболее вероятные меньшие скорости; □ V_2 – наиболее вероятные большие скорости).

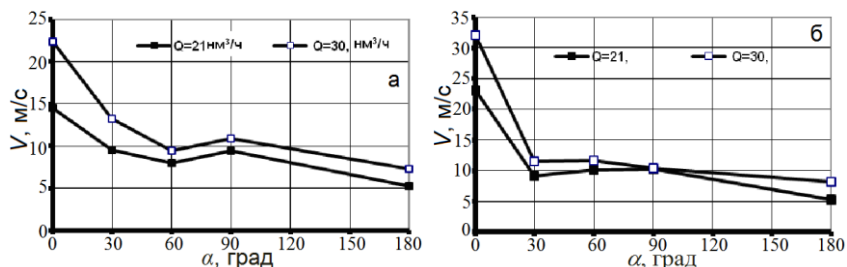


Рисунок 6 – Зависимость наиболее вероятных больших скоростей частиц от угла между осями сопел делителя фурменного устройства: а) полистирол; б) магний.

Ввиду бимодального характера распределения результатов полученных на т-образном делителе (практически с двумя равнозначными максимумами), сравнение их с результатами других типов делителей $\alpha = 30 - 90^\circ$ [2] является не корректным. Поэтому результаты по т-делителю представлено в виде средних значений. На рис. 6 представлено сравнение наиболее вероятных скоростей частиц полистирола (а) и магния (б) для различных углов между осями сопел делителя фурменного устройства ($\alpha = 0^\circ$ отвечает фурме без делителя, $\alpha = 180^\circ$ – фурме с т-делителем). Кривые показывают, что скорости частиц, как магния, так и полистирола на срезе сопел фурменного устройства для делителей $\alpha = 30 - 90^\circ$ практически не зависят от угла между осями патрубков, т.е. даже при самых малых углах разворота потока в делителе значения скоростей определяются длиной патрубка делителя разгонного участка и расходом несущего газа. При т-образном делителе в целом скорость частиц снижается на 20 – 50 % относительно других типов делителей.

Выводы. Настоящие исследования показали, что в т-образном делителе частицы реагента имеют сложную траекторию движения. Часть частиц имеет скорость истечения, соответствующую другим типам делителя (7 – 14 м/с), а другая равновесная часть частиц тормозится и

имеет скорость истечения в 4 – 5 раз меньшую (1 – 3 м/с), что отражено бимодальным характером распределения полученных результатов. В связи с этим, переход от одиночных частиц к более плотному потоку (в случае повышения интенсивности подачи реагента) приведет к появлению нестабильности процесса инъекции, к пульсациям и даже заклиниванию фурмы, что в условиях истечения в расплав приведет к закупорке сопла.

Подтверждением этому является опыт североамериканских металлургов [4] и отдельные попытки вдуть гранулированный магний через т-образную фурму на установках десульфурации чугуна (КНР). Когда ввод магния осуществлялся с завышенными расходами транспортирующего газа и интенсивностью не более 5 – 6 кг/мин, что в 5 раз меньше чем через у-образную двухсопловую фурму. При этом инъекция осуществлялась через одно сопло, поскольку другое на первых секундах выдачи магния закупоривалось. Процесс протекал бурно и сопровождался выплесками чугуна из ковша.

Таким образом, можно сделать заключение, что двухсопловые фурмы с Т-образны типом делителя для инъекции дисперсных материалов в различного рода расплавы применять не рационально.

Библиографический список

1. Толстопят А.П. Экспериментальное определение скорости частиц в канале постоянного диаметра / А.П. Толстопят, Л.А. Флеер, В.Е. Давидсон, В.И. Елисеев, Т.А. Рузова, А.Ф. Шевченко, И.А. Маначин, С.А. Шевченко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сборник научных трудов.* – 2011. – Вып. 23. – С. 113-122.
2. Толстопят А.П. Экспериментальное определение скорости частиц двухфазного потока (газ-тв.) в трубопроводе с делителем. / А.П. Толстопят, В.В. Давидсон, Л.А. Флеер, В.И. Елисеев, Т.А. Рузова, И.А. Маначин, А.Ф. Шевченко, С.А. Шевченко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сборник научных трудов.* 2012. – Вып. 25. – С. 123-130.
3. Рузова Т.А., Толстопят А.П., Флеер Л.А. Метод экспериментального определения скоростей частиц в двухфазном потоке // *Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ.* – 2012. – № 3.– С.107–113.
4. VI *Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали: Сб. докладов /* Магдебург – Германия. 14–16 сентября 2000 г. – 138 с.

References

1. Tolstopyat A.P., Fleer L.A., Davidson V.E., Eliseev V.I., Ruzova T.A. & Shevchenko A.F. et al. (2011). Eksperimentalnoye opredelenie skorosti chastits v kanale postoyannogo diametra [Experimental determination of the particle velocity in a channel of constant diameter]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sbornik nauchnykh trudov [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific papers]*. Dnepropetrovsk, 2011, 23, 113–122. (In Russian).
2. Tolstopyat A.P., Davidson V.E., Fleer L.A., Eliseev V.I., Ruzova T.A. & Manachin I.A. et al. (2012). Eksperimentalnoye opredelenie skorosti chastits

- dvuhfaznogo potoka (gaz-tv.) v truboprovode s delitelem [Experimental determination of the particle velocity of a two-phase flow (gas-solid) in a pipeline with a divider]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sbornik nauchnykh trudov [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific papers]*. Dnepropetrovsk, 2012, 25, 123–130. (In Russian).
3. Ruzova T.A., Tolstopyat A.P. & Fleer L.A. (2012). Metod eksperimentalnogo opredeleniya skorostey chastits v dvuhfaznom potoke [Method of experimental determination of particle velocities in a two-phase flow]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu [Science Bulletin of the National Mining University]*. Dnepropetrovsk, 2012, 3, 107–113. (In Russian).
 4. VI Mizhnarodniy simpozium po desulfuratsii chuguna i stali: Sb. Dokladov. [VI International Symposium on desulfurization of iron and steel: Collection of reports]. (2000). Germany, Magdeburg (14-16 sentyabrya 2000 g), 138 p.

С.О. Шевченко, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9287-9177

А.Ф. Шевченко, д.т.н., проф., пров.наук.співр., ORCID 0000-0003-0867-6825

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

А.П. Толстоп'ят, *Дніпропетровський національний університет*

Л.А. Флеер, *Дніпропетровський національний університет*

В.І. Єлссєв *Дніпропетровський національний університет*

Дослідження швидкості дисперсних частинок при різних кутах ділення двофазного потоку

Анотація. Метою даної роботи є оцінка впливу т-образного подільника ($\alpha = 180^\circ$) на швидкість руху кулястих частинок по тракту соплової фурми в потоці повітря і зіставлення з результатами експериментів поділу потоку при менших кутах. Виконані дослідження показали, що в т-образному подільнику частки реагенту мають складну траєкторію руху. Частина частинок має швидкість витікання відповідну іншим типам подільника (7 – 14 м/с), а інша рівноважна частина частинок гальмується і має швидкість витікання в 4 – 5 разів меншу (1 – 3 м/с), що відображено бімодальним характером розподілу отриманих результатів. У зв'язку з цим, перехід від одиночних частинок до більш щільному потоку (у разі підвищення інтенсивності подачі реагенту) призведе до появи нестабільності процесу інжекції, до пульсацій і навіть замикання фурми, що в умовах витоку в розплав призведе до закупорки сопла. Підтвердженням цьому є окремі спроби вдувати гранульований магній через т-образну фурму на установках десульфурації чавуну, коли завершення введення магнію здійснювалось із завищеними витратами газу, який транспортує магній, і інтенсивністю не більше 5 – 6 кг/хв, що в 5 разів менше ніж через у-образну соплову фурму. При цьому інжекція здійснювалася через одне сопло, оскільки інше на перших секундах видачі магнію закупорюють. Процес протікав бурхливо і супроводжувався виплесками чавуну з ковша. Встановлено, що в порівнянні з кутами поділу потоку ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) т-образний дільник ($\alpha = 180^\circ$) більшою мірою знижує швидкість частинок магнію і полістиролу (на 20 – 50%). Крім того, на швидкість руху твердої частинки по тракту соплової фурми істотно впливають фізичні характеристики взаємодіючих матеріалів, форма частинок, витрата газу, транспортує, і довжина пагтрубка після дільника.

Ключові слова: інжекція, канал фурми, дільник потоку, частинка магнію, експериментальна установка, розподіл ймовірності швидкості.

S.A. *Shevchenko*, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9287-9177

A.F. *Shevchenko*, Dr. Sci., Professor, Leading Research Scientist, ORCID 0000-0003-0867-6825

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

A.P. *Tolstopyat*, Dnipropetrovsk National University

L.A. *Fleyer*, Dnipropetrovsk National University

V.I. *Yeliseyev*, Dnipropetrovsk National University

The study of the velocity of dispersed particles at different angles of division of a two-phase flow

Summary. The aim of this work is to assess the influence of a t-shaped divider ($\alpha = 180^\circ$) on the speed of movement of spherical particles along the path of a two-nozzle lance in the air stream. Also, comparison with the results of flow separation experiments at smaller angles. The performed studies showed that in the t-shaped divider the reagent particles have a complex trajectory of motion. Part of the particles has an outflow velocity corresponding to other types of divider (7 – 14 m/sec), and the other equilibrium part of the particles is slowed down and has an outflow speed 4 – 5 times lower (1 – 3 m/sec). This is reflected by the bimodal nature of the distribution of the results. In this regard, the transition from single particles to a denser flow (in the case of an increase in the reagent supply intensity) will lead to instability of the injection process, to pulsations and even blocking of the lance. This under conditions of flow into the melt will lead to blockage of the nozzle. This is confirmed by individual attempts to inject granular magnesium through a t-shaped lance in cast iron desulfurization plants. In this case, magnesium was introduced with overestimated flow rates of the transporting gas and an intensity of no more than 5–6 kg/min, which is 5 times less than through a y-shaped two-nozzle lance. In addition, the injection was carried out through one nozzle, since the other in the first seconds of the release of magnesium was clogged. The process proceeded violently and was accompanied by splashes of cast iron from the ladle. It is established that, in comparison with the flow separation angles ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$), the t-shaped divider ($\alpha = 180^\circ$) reduces the speed of magnesium and polystyrene particles to a greater extent (by 20 – 50%). In addition, the physical characteristics of the interacting materials, the shape of the particles, the flow rate of the transporting gas, and the length of the nozzle after the divider significantly affect the speed of movement of a solid particle along the path of a two-nozzle lance.

Keywords: iron desulfurization, magnesium, injection, tuyere, flow divider

For citation: *Shevchenko S.A., Shevchenko A.F., Tolstopyat A.P., Fleyer L.A., Yeliseyev V.I.* Issledovaniye skorosti dispersnykh chastits pri razlichnykh uglakh deleniya dvukhfaznogo potoka. [The study of the velocity of dispersed particles at different angles of division of a two-phase flow]. «*Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii*». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2019, 33. 78-86. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-78-86

Статья поступила в редакцию сборника 17.09.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)