

Methodology. We have increased the dimension of the space characteristics of the analyzed information in the image by using the method of fuzzy segmentation of initial data, and have formed new multi-dimensional array of images based on the obtained membership functions of classes with subsequent segmentation of the Kohonen neural network.

Findings. We have developed and experimentally proved the new method of segmentation of low-contrast images of the Earth surface and geophysical fields.

Originality. The new method of formation of multi-dimensional information space using images membership

classes in the fuzzy segmentation algorithm followed by the formation of an adaptive single output image.

Practical value. The informativity of the method has been approved by experimental testing on segmentation of real examples of low-contrast images. The sensitivity of the procedure of segmentation, depending on the nature of the task may vary.

Keywords: *segmentation, image, membership function, neural network, sensitivity, adaptability*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В. Ткачовим. Дата надходження рукопису 18.07.12.

УДК 681.3

А.П. Толстопят, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
В.И. Елисеєв, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.,
Т.А. Рузова, канд. техн. наук, Л.А. Флеєр

Днепропетровский национальный университет
им. О. Гончара, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: ruzov1973@bk.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ И ГАЗОВЫХ ДИСПЕРСИЙ ПРИ ВДУВЕ ЗАГЛУБЛЕННОЙ ДВУХФАЗНОЙ СТРУИ В ЖИДКОСТЬ

A.P. Tolstopyat, Cand. Sci. (Tech.), Sen. Res. Fellow,
V.I. Yeliseyev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Sen. Res. Fellow,
T.A. Ruzova, Cand. Sci. (Tech.), L.A. Fleyer

O. Gonchar Dnepropetrovsk National University,
Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: ruzov1973@bk.ru

DISTRIBUTION OF SOLID PARTICLES AND GAS DISPERSIONS DURING INJECTION OF SUNKEN TWO-PHASE JET INTO LIQUID

Цель. Изучение картины гидрогазодинамического взаимодействия и выявление наиболее эффективных режимов дутья – путей повышения экономичности ведения процесса.

Методика. Экспериментальное исследование газожидкостного взаимодействия на прозрачной модели технологического аппарата. Модельная жидкость – вода, модельный газ – воздух (расход – 0,5 – 3,5 м³/ч). По оси сосуда устанавливалась трубка (фурма) с наружным диаметром 3 мм. Заглубление трубки в жидкость – 200 мм. Исследовались три варианта фурм, которые различались по погружному концу, на котором варьировались параметры наконечника (сопла). Два наконечника, являясь продолжением трубки, различались внутренним диаметром, а третий – V-образный насадок, выполненный из двух патрубков. Вдуваемая среда – полистирол (расход – 30 – 100 г/мин). Регистрация процесса велась на видеокамеру с затвором ~ 1/2000 с, 25 кадр/сек в проходящем свете. Полученный видеоматериал обрабатывался на компьютере, в результате чего были выделены и оцифрованы для дальнейшего анализа оптические неоднородности, включающие как газовую фазу, так и конгломераты (уплотненные области) частиц твердой дисперсной фазы. Определены коэффициенты неравномерности распределения этих параметров в диаметральном сечении сосуда.

Научная новизна. Проведено экспериментальное исследование вдува заглубленной двухфазной струи в жидкость в ковше при различных конструкциях дутьевого устройства и режимах дутья газовой и дисперсной фаз. На основании анализа статистической обработки видеоизображений процесса выявлены эффективные режимы диспергации.

Результаты. Установлено, что 2-кратное изменение скорости газа на выходе сопла не оказывает заметного влияния на величину неоднородностей и равномерность их распределения. Выявлено, что диспергация системы V-образным патрубком в 2 раза выше, а неравномерность распределения в 3 раза меньше, чем односопловым, что отвечает более эффективному и спокойному ведению процесса. Получена в безразмерных комплексах зависимость для расчета длины погружной двухфазной струи.

Практическая значимость. Результаты исследований применяются при разработке схем внепечной обработки металла в чугуновозных ковшах.

Ключевые слова: *дутье в жидкость, обработка видеоизображения, фурма, газораспределение, струя, диспергация*

Введение. Ввод дисперсных присадок в высокотемпературные и агрессивные жидкости в потоке газовых струй является широко используемым тех-

нологическим приемом в промышленности: в горнорудной – флотация, в металлургии – конвертерная выплавка стали и внепечная обработка в ковшах, в химической промышленности – реакторы различного назначения. Наиболее часто этот прием реализу-

ється в процесах внепечной обработки металла. Последнее связано с тем, что он позволяет достаточно простыми средствами обеспечить развитую поверхность взаимодействия сред и, тем самым, активизировать процесс.

Постановка задачи. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию дисперсий, образующихся при вдуве как однофазной, так и двухфазной струй в жидкость – определению концентрации газодисперсных образований и величины равномерности их распределения.

Целью исследования является изучение картины гидрогазодинамического взаимодействия и выявление наиболее эффективных режимов дутья – путей повышения экономичности ведения процесса.

Методы решения. Описание экспериментального стенда. Исследования процесса газожидкостного взаимодействия проводятся на холодных моделях, как правило, с привлечением кино съемки путем визуального сопоставления кинограмм режимов дутья.

Основным инструментом настоящей работы является видеосъемка процесса дутья и последующая компьютерная обработка видеоизображения [1, 2], состоящая в выделении на видеоизображении оптических неоднородностей и их оцифровывании для дальнейшего анализа.

Эти неоднородности включают как газовую фазу, так и конгломераты (уплотненные области) частиц твердой дисперсной фазы, которые метод компьютерной обработки видеоизображения не отличает друг от друга.

Эксперименты проводились на прозрачном цилиндрическом сосуде $D = 330$ мм, заполненном водой $H_в = 350$ мм. По оси сосуда устанавливалась трубка (фурма) с наружным диаметром $d_H = 3$ мм. Заглубление трубки в жидкость составляло 200 мм. Исследовалось три варианта конструкции трубки, которые различались по погружному концу, на котором варьировались параметры наконечника (сопла). Два наконечника, являясь продолжением трубки, различались внутренним диаметром $d_B = 2$ мм и $d_B = 1,4$ мм, а третий представлял собой V-образный насадок, выполненный из двух патрубков $d_B = 1,2$ мм. Угол раствора между осями этих патрубков 112° , а плоскость раствора угла при установке трубки по оси сосуда совпадает с диаметральной плоскостью цилиндрического сосуда.

Вдуваемые среды: газ – воздух, твердая дисперсная фаза – полистирол $d_q < 0,5$ мм, $\gamma = 1,05$ г/см³.

Расход вдуваемого воздуха варьировался в диапазоне 0,5 – 3,5 м³/ч. Дисперсная фаза вводилась в потоке вдуваемого воздуха и величина ее расхода составляла 30 г/мин и 100 г/мин. На рис. 1 (а–г) представлены кадры исследуемого процесса.

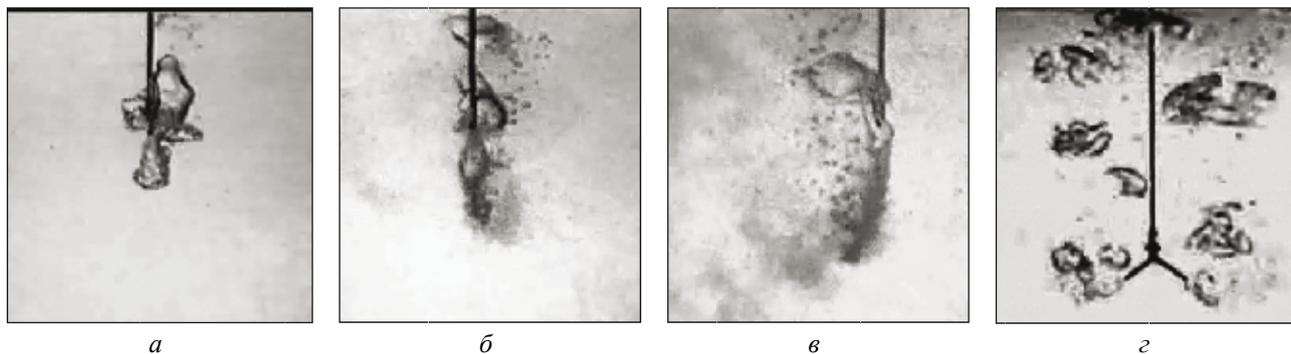


Рис. 1 Фотографии различных режимов и схем дутья: а – сопло $d_c = 2$ мм; $Q_c = 1,25$ м³/ч; $Q_{np} = 0$ г/мин; б – сопло $d_c = 2$ мм; $Q_c = 1,25$ м³/ч; $Q_{np} = 30$ г/мин; в – сопло $d_c = 2$ мм; $Q_c = 1,25$ м³/ч; $Q_{np} = 100$ г/мин; г – V-насадок $d_c = 2 \times 1,2$ мм; $Q_c = 1,4$ м³/ч; $Q_{np} = 30$ г/мин

Обработка видеоизображений. Как отмечалось в [3], особенностью метода компьютерной обработки видеоизображения, разработанного для оцифровывания визуальной картинки процесса, является представление объемной картины в проекции на диаметральной плоскости цилиндрического сосуда. С учетом этого плоскость V-образного насадка, находящегося в диаметральной плоскости, ориентировалась так, чтобы нормаль к ней совпадала с осью объектива видеокамеры.

Результатом компьютерной обработки кинограмм являются приведенные ниже на рисунках распределения параметров процесса (процентное содержание неоднородностей и величина неравномерности их рас-

пределения) на различных уровнях глубины сосуда погружения сопла и режимах дутья. Обработка режимов велась во временном интервале 10 с. Отснятый видеокамерой материал усреднялся по 250 кадрам.

На приведенных графиках (рис. 2) представлена обработка видеок кадров на разных глубинах в диапазоне $-90 \leq h \leq 30$ мм. Здесь значение $h = 0$ отвечает глубине $H = 200$ мм (величина заглубления трубки), $h = -90$ мм и $h = 30$ мм глубинам $H = 110$ мм и $H = 230$ мм соответственно.

Полученное распределение величины S на заданной глубине h позволяет определить неравномерность ее изменения по диаметру емкости, определяемую как

$$K_p = \frac{p_c - p}{p_c}, \text{ при } p < p_c,$$

где p_c – среднее значение параметра.

Величина $0 \leq K < 1$ является интегральной величиной неравномерности распределения параметра (газораспределение, фазовая поверхность) – характеристическим параметром данной конструкции фурмы и режима ее работы, численно определяет качество ведения процесса или эффективность работы выбранной фурмы. При $K_p \rightarrow 0$ достигается наибольшая равномерность распределения параметра.

На графиках 5, а – 5, з экспериментальные точки для сопел с $d = 2$ мм и $d = 1.4$ мм нанесены одним маркером ввиду того, что авторы не увидели расхождений в результатах, полученных с их использованием, т.е. в исследованном диапазоне расходов дутья 2-х кратное изменение скорости на выходе, связанное с изменением диаметра сопла, не оказывает влияния на величину неоднородностей и равномерность их распределения.

Вместе с тем на этих графиках видно влияние на указанные параметры вдуваемой дисперсной фазы, причем более заметно это влияние на уровне $h = 30$ мм (рис. 2, з), когда величина неоднородностей меняется тем больше, чем меньше расход дутья. Так, при расходе дисперсной фазы $Q_{DP} = 30$ г/мин величина дисперсных включений при дутье $0,5$ м³/ч практически такая же, как и при однофазном газовом дутье $1,5$ м³/ч. Близкий к этому эффект можно отметить и на других глубинах ($h = -90$ мм; -30 мм; 0 мм).

Отмеченное выше может быть объяснено эффектом динамического влияния двухфазной струи на зону взаимодействия за счет разгона твердой дисперсной фазы. При этом следует отметить, что этот эффект нивелируется с ростом Q_G и уменьшением глубины от $h = 0$ до $h = -90$ мм. Это связано с тем, что с ростом расхода газа его скорость на выходе из сопла, обеспечивающая разгон частиц, увеличивается непропорционально изменению расхода газа вследствие увеличения его плотности.

Изложенное показывает, что при переходе от газового дутья к 2-х фазной продувке расход дутьевого газа может быть снижен в 3 раза без изменения динамического воздействия на зону газожидкостного взаимодействия (постоянство величины S).

При этом видно, что для всех значений величины h параметр неравномерности K достаточно высокий (0,7–0,9), что характерно для схем с прямоточным дутьем через устройства, установленные по оси сосуда.

На рис. 2, б – 2, з приведены также результаты обработки видеоизображений с расходом $Q_{DP} = 100$ г/мин.

Здесь значение $h = 0$ отвечает глубине $H = 200$ мм.

В отличие от случая $Q_{DP} = 30$ г/мин, при 3-х кратном увеличении расхода присадки ($Q_{DP} = 100$ г/мин; $Q_G < 1$ м³/ч) на видеоизображении отчетливо просматриваются конгломераты твердых частиц в жидкости, непрерывно „вытекающие“ из зоны газожидкостного взаимодействия (рис. 1, в). Последнее на указанных графиках отмечено существенно большей величиной S_{100} по сравнению со случаем $Q_{DP} = 30$ г/мин (S_{30}), где в картине газожидкостного взаимодействия не выявлено образования таких конгломератов. Таким образом, на рис. 1, б; 1, в и графиков (рис. 2) видно, что твердая фаза вырывается из газовых пузырей и автономно распространяется по линиям тока в объеме сосуда. При небольших расходах твердой дисперсной фазы это слабо проявляется, поэтому при обработке видеоизображения, вследствие малой концентрации, этот эффект может теряться. С увеличением расхода дисперсной фазы образуются достаточно концентрированные зоны, которые хорошо ухватываются методами обработки видеоизображения, в результате чего к газовым областям прибавляются области, содержащие концентрированную твердую фазу, а на графике это выливается в увеличении доли дисперсной фазы в сосуде. При $Q_G \geq 1$ м³/ч конгломераты размываются в объеме сосуда и величины S_{30} и S_{100} совпадают.

Интересно, что с дальнейшим ростом $Q_G \geq 1,2$ м³/ч величина S_{100} приближается к величине S , отвечающей чисто газовому дутью.

На рис. 2, д; 2, е дано изменение величины S по высоте жидкости (h). Видно, что с ростом h величина неоднородностей практически постоянна до значения $h = 0$, а затем падает в зоне ($h > 0$) активного газожидкостного взаимодействия.

На рис. 6 построены графики изменения параметров S и K , полученных при продувке из V-образного сопла (рис. 1, з). Здесь на всех глубинах картина подобная: рост величины S и падение с ростом Q_G неравномерностей K – улучшение равномерности распределения по сечению. В сравнении с предыдущим случаем (односопловой патрубком) величины неоднородностей S , при одинаковых расходах газа, в 2 раза выше, а параметр K в 3 раза меньше, что, вероятно, должно отвечать более эффективному и спокойному ведению процесса.

На рис. 3, д; 3, е показано изменения величин S и K по глубине сосуда. Следует отметить повышение величины неоднородностей в области $h = 0$, в отличие от предыдущего случая.

На рис. 4 представлена интегральная величина неоднородностей в диаметральной сечении емкости на обрабатываемой площади видеоизображения $H \times L = 162 \times 243$ мм (рис. 4, I) и $H \times L = 297 \times 245$ мм (рис. 4, II; 4, III) при различных конструкциях и диаметрах наконечника, режимах подачи газовой и дисперсной фаз.

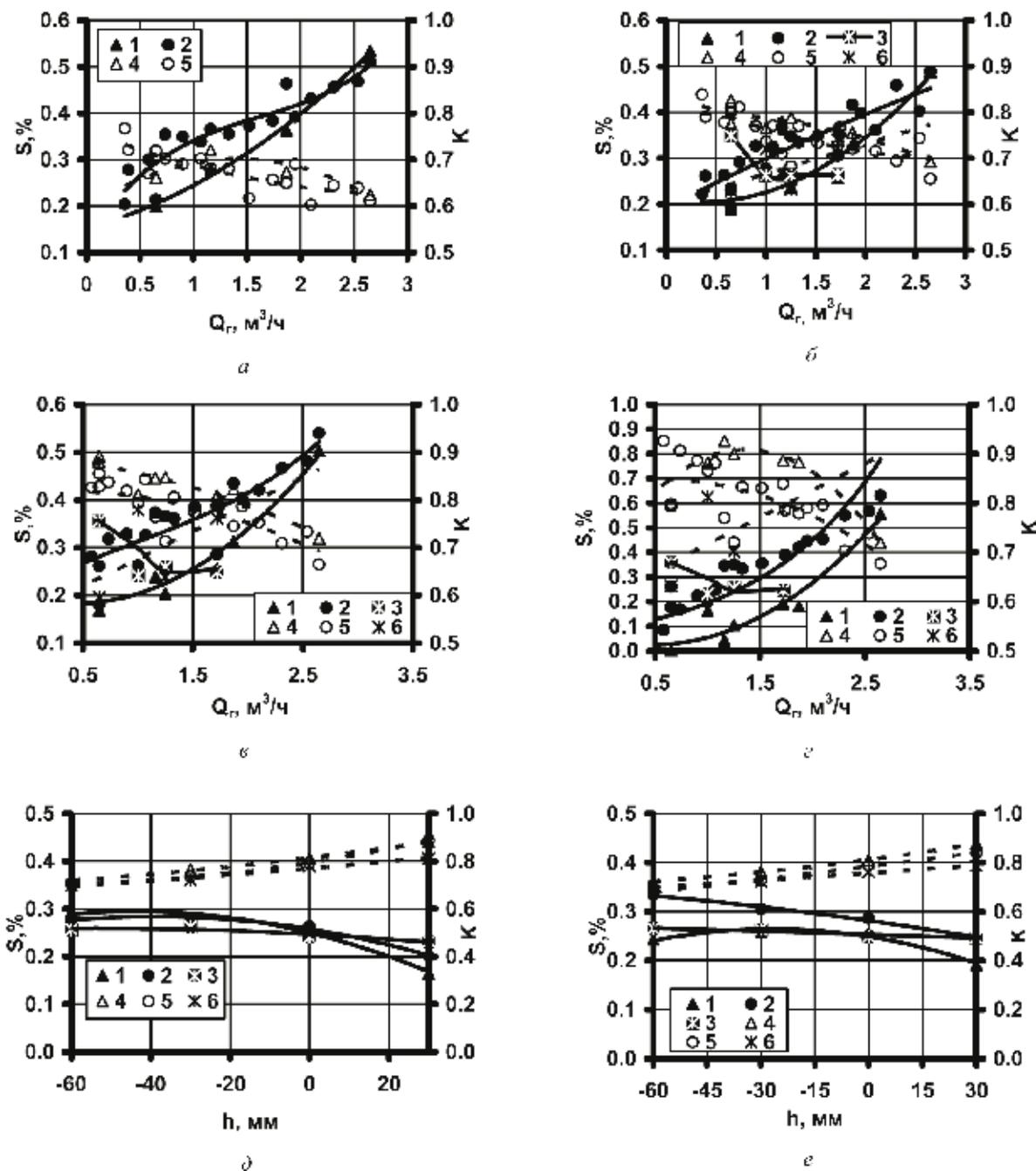


Рис. 2 Процентное содержание неоднородностей – газовых и дисперсных включений (S) в диаметральной сечении и неравномерности их распределения (K): а–г – односопловая фурма, $d = 2$ мм, $d = 1,4$ мм; д–е – односопловая фурма, $d = 2$ мм; а – $h = -90$ мм; б – $h = -30$ мм; в – $h = 0$ мм; г – $h = +30$ мм; д – $Q_r = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$; е – $Q_r = 1,72 \text{ м}^3/\text{ч}$; 1–3 – содержание неоднородностей; 4–6 – неравномерность (пунктир); 1, 4 – газовое дутье; 2, 5 – двухфазное дутье, $Q_{\text{ПР}} = 30 \text{ г/мин}$; 3, 6 – двухфазное дутье, $Q_{\text{ПР}} = 100 \text{ г/мин}$

На рис. 4, I видно, отмеченное выше „проявление“ конгломерата дисперсной фазы ($Q_{\text{ПР}} = 100 \text{ г/мин}$), что на малом расходе газа увеличивает регистрируемую величину S в 3 раза, по сравнению с вариантами однофазной продувки или продувки с малым расходом дисперсной фазы (30 г/мин).

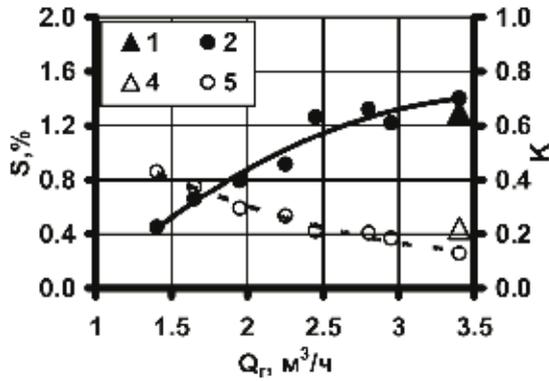
С увеличением расхода дутья ($Q \geq 1 \text{ м}^3/\text{ч}$) величина S для исследованных режимов подачи дисперсной фазы практически одинакова. Вместе с тем видно,

что сам факт ввода дисперсной фазы во всем диапазоне изменения Q_r существенно (на 20–40%) увеличивает величину S .

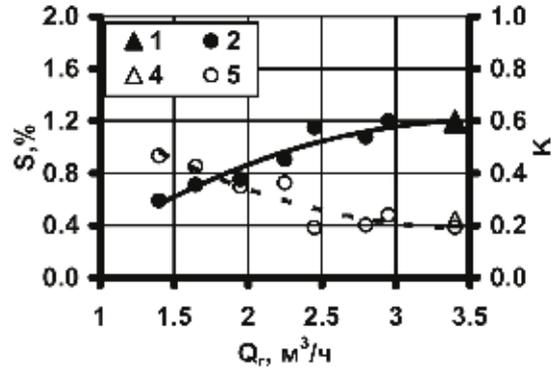
На рис. 4, II сведены результаты по величине S для различных конструкций сопла фурмы при одинаковом расходе дисперсной фазы ($Q_{\text{ПР}} = 30 \text{ г/мин}$). Видно, что при прямоточной продувке ни изменение расхода дутья (7-II, а–в), ни существенное изменение скорости (7-II, в, г) не приводят к значимому увеличе-

нию неоднородностей (S). Вместе с тем переход к схеме с V-образным соплом резко меняет картину газожидкостного взаимодействия. Так при 2-х кратном увеличении скорости, при переходе от варианта

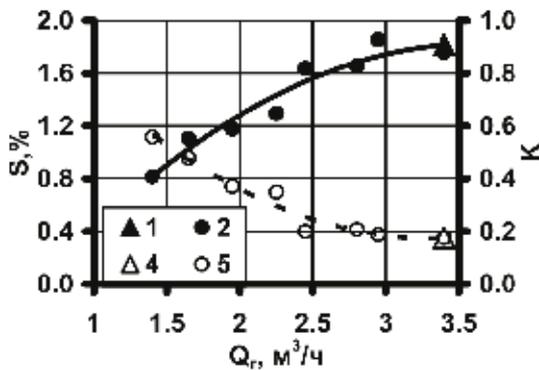
7-II, в к варианту 7-II, г, величина S возрастает в 1,5 раза, а при одинаковой скорости в вариантах 7-II, г и 7-II, д величина S , в случае V-образного сопла (вариант 7-II, д), возрастает в 2 раза.



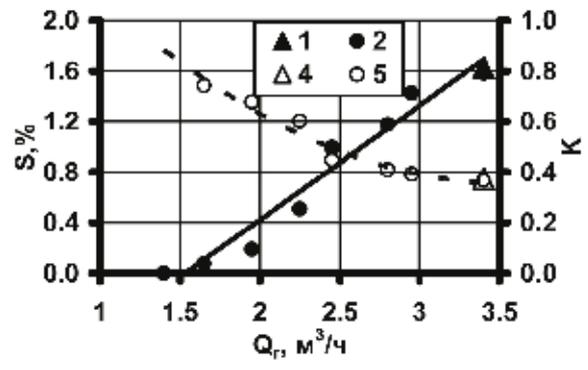
а



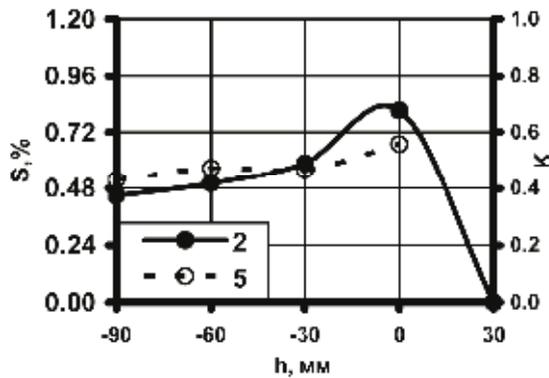
б



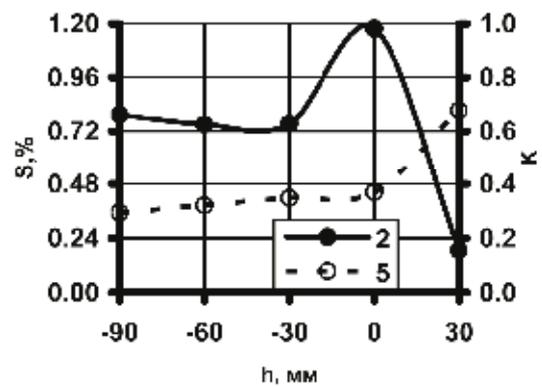
в



г



д



е

Рис. 3. Процентное содержание неоднородностей – газовых и дисперсных включений (S) в диаметральной сечении и величины неравномерности их распределения (K). Двухсопловая фурма, $d = 2 \times 1,2$ мм: 1,2 – содержание неоднородностей; 4,5 – неравномерность (пунктир); 1, 4 – газовое дутье; 2, 5 – двухфазное дутье, $Q_{пр} = 30$ г/мин; а – $h = -90$ мм; б – $h = -30$ мм; в – $h = 0$ мм; г – $h = +30$ мм; д – $Q_r = 1.4$ м³/ч; е – $Q_r = 1.95$ м³/ч

На рис. 4, III приведено сопоставление V-образного (аппроксимация 4,III – е) и прямоструйного (4,III – ж) сопел в широком диапазоне изменения расхода газа и одинаковом расходе дисперсной фазы.

Следует отметить, что на всех режимах 4, III – е расход Q_r распределяется, как и $Q_{пр}$, по двум соплам V-образного наконечника, при этом скорость газа на соплах меняется от 170 м/с до 330 м/с, соответственно расходу газа.

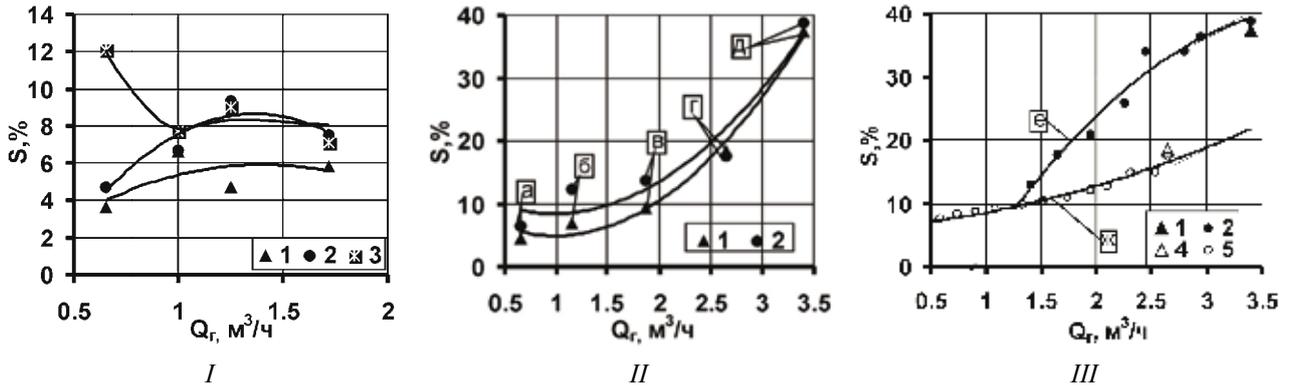


Рис. 4. Процентное содержание неоднородностей – газовых и дисперсных включений в диаметральной сечении: 1, 4 – газовое дутье; 2, 5 – двухфазное дутье, $Q_{пр}=30\text{г/мин}$; 3 – двухфазное дутье, $Q_{пр}=100\text{г/мин}$; I – $d = 2\text{ мм}$; II – а – $d = 2\text{ мм}$, $V = 50\text{ м/с}$; б – $d = 2\text{ мм}$, $V = 103\text{ м/с}$; в – $d = 2\text{ мм}$, $V = 164\text{ м/с}$; г – $d = 1.4\text{ мм}$, $V = 330\text{ м/с}$; III – е – $d = 2 \times 1.2\text{ мм}$; ж – $d = 1.4\text{ мм}$

Для режимов 4, III – ж, представленных на этом же графике, скорость газа через сопло изменяется от 100 м/с до 330 м/с.

Из графика видно, что величина газосодержания (а здесь можно говорить именно о ней, а не вообще о неоднородностях, поскольку конгломераты дисперсной фазы выявлены только при $Q_{пр} = 100\text{ г/мин}$ и малых расходах дутья) при использовании V-образного сопла значительно выше, чем при прямоструйном дутье (аппроксимация 4, III – ж). Вместе с тем, в варианте 4, III – е не удалось понизить расход дутья ниже $1,4\text{ м}^3/\text{час}$ (в пересчете на одно сопло $0,7\text{ м}^3/\text{ч}$). В варианте 4, III – ж минимальный расход составил $0,58\text{ м}^3/\text{ч}$. При уменьшении величин Q_e ниже указанных происходило забивание сопла в варианте 4, III – ж и одного из 2-х сопел в варианте 4, III – е.

Следует отметить высокую эффективность использования V-образного сопла (большие значения S) и, в то же время, высокую вероятность забивания его и вместе с ним забивания пневмотранспортной линии при сравнительно большом расходе дутьевого газа.

В процессе анализа видеоматериала определялась и длина струи на выходе из сопла как газодисперсная, не имеющая разрывов неоднородность, усредненная по

обрабатываемому массиву (250 кадров) для всех указанных режимов дутья и наконечников, включая V-образный. Результаты представлены на рис. 5 в координатах измеряемых параметров: L – длина струи; Q_r – расход вдуваемого газа (газа-носителя твердой фазы), и безразмерных комплексах: L/d – приведенная длина струи;

$$Ar = \frac{\rho_s u^2}{\rho_{жс} g d_e} \text{ – критерии Архимеда.}$$

Здесь ρ_s – плотность потока вдуваемой газодисперсной смеси; $\rho_{жс}$ – плотность жидкости в сосуде; d_e – диаметр сопла; u – скорость газа на выходе из сопла.

Из графика видно, что критерий Ar, как это и описано в современной литературе, удовлетворяет описанию процесса однофазного и 2-х фазного дутья при малых концентрациях второй фазы ($Ar > 5 \cdot 10^3$). Приведенная длина струи при незаглубленном дутье, по работам Явойского В.И. (кривая 4, рис. 5, б), в 2–3 раза больше. Для струй, у которых давление на срезе сопла фурмы больше давления среды, хороший результат дает зависимость (1) по Иванцову Г.П. [4, 5], которая приведена на графике 4, б (кривая 6).

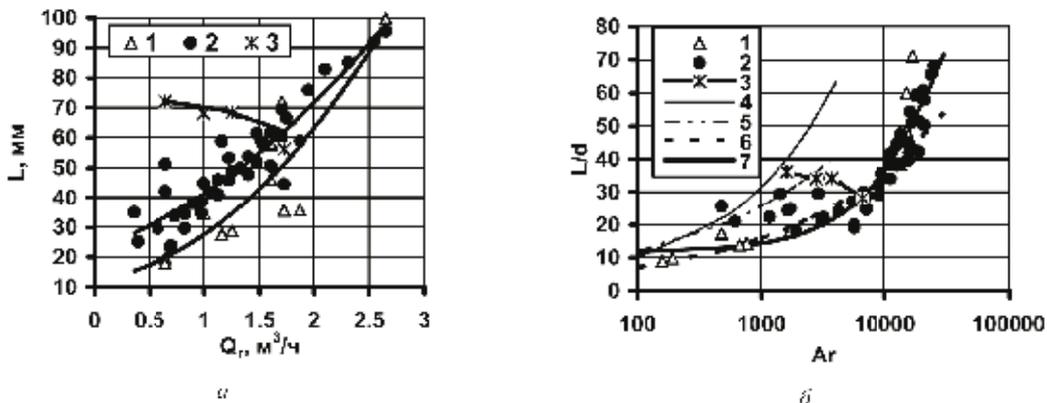


Рис. 5. Длина газовой струи с уплотнениями дисперсной фазы: 1 – газовое дутье; 2 – двухфазное дутье, $Q_{пр} = 30\text{г/мин}$; 3 – двухфазное дутье, $Q_{пр} = 100\text{г/мин}$; 4,5 – аппроксимации по Явойскому В.И.; 6 – по Иванцову Г.П.; 7 – по формуле (2)

$$\frac{L}{d} = 1,32 Ar^{0,36} \left(1,715 - 1,353 \frac{P_2}{P_1} \right)^{0,26}. \quad (1)$$

Для погружных фурм нами построена аппроксимационная кривая 7 (рис. 4, б)

$$\frac{L}{d} = 11,6 + 27,7(Ar \cdot 10^{-4}) - 2,57(Ar \cdot 10^{-4})^2. \quad (2)$$

На рисунке видно (кривая 3), что длина струи при $Q_{ПР} = 100$ г/мин значительно больше по сравнению с измеренной при однофазном газовом дутье и двухфазном дутье с $Q_{ПР} = 30$ г/мин. Последнее, как показано выше, связано с образующимся в жидкости конгломератом твердой фазы, „вытекающей“ из зоны газожидкостного взаимодействия, и выявлено видео съемкой и компьютерной обработкой изображения. Обнаруженный переход газодисперсной струи (при малых Q_G и больших $Q_{ПР}$) в уплотненный струйный конгломерат твердой фазы является значимым эффектом, требующим учета при проектировании и ведении технологического процесса.

Выводы. Авторами проведено экспериментальное исследование вдува заглубленной двухфазной струи в жидкость в ковше при различных конструкциях дутьевого устройства и режимах дутья газовой и дисперсной фаз. На основании анализа статистической обработки видеоизображений процесса установлено:

- в исследованном диапазоне расходов дутья ($0,5 - 3,5$ м³/ч), 2-х кратное изменение скорости газа на выходе сопла не оказывает заметного влияния на величину неоднородностей и равномерность их распределения;

- при переходе от газового дутья к 2-х фазной продувке расход дутьевого газа может быть снижен в 3 раза без изменения динамического воздействия на зону газожидкостного взаимодействия;

- при малых расходах газа ($Q_G < 1$ м³/ч) и больших расходах дисперсной фазы ($Q_{ПР} = 100$ г/мин) последняя, в результате локальных гидродинамических потоков, вырывается из газовых пузырей и автономно распространяется по линиям тока в объеме сосуда;
- диспергация системы V-образным патрубком в 2 раза выше, а неравномерность распределения (K) в 3 раза меньше, чем с односопловым, что отвечает более эффективному и спокойному ведению процесса;

- высокая вероятность забивания V-образного сопла при сравнительно большом расходе дутьевого газа;

- зависимость для расчета длины погружной двухфазной струи в безразмерных комплексах.

Список литературы / References

1. Рузова Т.А. Оперативный контроль параметров частиц дисперсных образований / Рузова Т.А., Карпов О.Н., Флеер Л.А. // Науковий вісник Націо-

нального гірничого університету. – 2004. – №2. – С. 83–88.

Ruzova, T.A., Karpov, O.N. and Fleyer, L.A. (2004), “Efficient evaluation of particles parameters in dispersed structures”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirmnychoho universytetu*, no.2, pp. 83–88.

2. Компьютерная обработка видеоизображений газовых пузырей в жидкости / Рузова Т.А., Елисеєв В.И., Толстопят А.П., Флеер Л.А. // Оптические методы исследования потоков: труды IX международной научно-технической конференции. – М., 2007. – С. 48–49.

Ruzova, T.A., Yeliseyev, V.I., Tolstopyat, A.P. and Fleyer, L.A. (2007), “Computer processing of videoimages of gas bubbles in liquid”, *Optical methods of flow investigation: Proc. of the 9th International Scientific And Technical Conf.*, Moscow, pp. 48–49.

3. Компьютерная обработка кинограмм процесса взаимодействия газовых струй с жидкостью / Рузова Т.А., Толстопят А.П., Шевченко А.Ф., Шевченко С.А. // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2007. – № 12. – С. 91–96

Ruzova, T.A., Tolstopyat, A.P., Shevchenko, A.F. and Shevchenko, S.A. (2007), “Computer processing of interaction between gas jets and liquid”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirmnychoho universytetu*, no.12, pp. 91–96.

4. Поволоцкий Д.Я. Основы технологии производства стали: Учебное пособие для вузов / Д.Я. Поволоцкий / 2-е изд., – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 202с.

Povototskiy, D.Ya. (2004), *Osnovy tekhnologii proizvodstva stali* [Introduction in Steelmaking Theory], tutorial for high schools, 2nd edition, YUUrGu, Chelyabinsk, Russia.

5. Сурин В.А. Массо- и теплообмен, гидрогазодинамика металлургической ванны / В.А. Сурин, Ю.Н. Назаров – М.: Металлургия, 1993. – 352 с.

Surin, V.A. and Nazarov, Yu.N. (1993), *Masso- i teploobmen, gidrogazodinamika metallurgicheskoy vanny* [Heat and Mass Transfer, Hydraulic Gas Dynamics of Metallurgical Bath], Metallurgiya, Moscow, Russia.

Мета. Вивчення картини гідрогазодинамічної взаємодії й виявлення найбільш ефективних режимів дутья – шляхів підвищення економічності ведення процесу.

Методика. Експериментальне дослідження газорідинної взаємодії на прозорій моделі технологічного апарата. Модельна рідина – вода, модельний газ – повітря (витрата – $0,5 - 3,5$ м³/год). По осі посудини встановлювалася трубка (фурма) із зовнішнім діаметром 3 мм. Заглиблення трубки в рідину – 200 мм. Досліджувалося три варіанти фурм, що розрізнялися по заглибленню кінцю, на якому варіювалися параметри наконечника (сопла). Два наконечники були продовженнями трубки, розрізнялися за внутрішнім діаметром, а третій – V-образний насадок, виконаний із

двох патрубків. Середовище, що вдувається – полістирол (витрата – 30–100 г/хв).

Реєстрація процесу велася на відеокамеру із затвором $\sim 1/2000$ с, 25 кадр/сек у прохідному світлі. Отриманий відеоматеріал оброблявся на комп'ютері, у результаті чого було виділено й оцифровано для подальшого аналізу оптичні неоднорідності, що включають як газову фазу, так і конгломерати (ущільнені області) частинок твердої дисперсної фази. Визначено коефіцієнти нерівномірності розподілу цих параметрів у діаметральному перетині посудини.

Наукова новизна. Проведено експериментальне дослідження вдування заглибного двофазного струменя в рідину в ковші при різних конструкціях дуттьового пристрою й режимах дуття газової та дисперсної фаз. На підставі аналізу статистичної обробки відеозображень процесу виявлено ефективні режими диспергації.

Результати. Установлено, що 2-кратна зміна швидкості газу на виході сопла не здійснює помітного впливу на величину неоднорідностей і рівномірність їх розподілу. Виявлено, що диспергація системи V-образним патрубком у 2 рази вище, а нерівномірність розподілу в 3 рази менше, ніж односопловим, що відповідає більш ефективному й спокійному веденню процесу.

Отримано в безрозмірних комплексах залежність для розрахунку довжини заглибного двофазного струменя.

Практична значимість. Результати досліджень застосовуються при розробці схем позапічної обробки металу в чавуновізних ковшах.

Ключові слова: дуття в рідину, обробка відеозображення, фурма, газорозподіл, струмінь, диспергація

Purpose. To study hydro-gas-dynamic interaction, determine the most efficient blowing modes, and find the ways to increase the process efficiency.

Methodology. Experimental investigation of liquid-gas interaction in transparent model of technological device has been carried out. Water was used as liquid and air was used as gas in the model (gas consumption is

0,5–3,5 m³/h). The pipe (tuyere) with external diameter of 3 mm has been installed along the vessel axis. Pipe penetration into liquid was 200 mm. Three types of tuyers have been tested. The difference between them consisted in the configuration of the submersible part and nozzle. Two tips were extension of the pipe and differ by internal diameter, and the third one was V-shaped nozzle, made of two pipes. Injected medium was polystyrene (consumption of 30–100 g/min).

Process recording was realized by camcorder (shutter is $\sim 1/2000$ s, 25 fps) in transmitted light. Video material was processed by computer. On the basis of the results optical heterogeneities, including both gas phase and conglomerates (condensed areas) of solid dispersive phase particles has been selected and digitized. Irregularity ratios for distribution of these parameters in diametric section of the vessel have been evaluated.

Originality. We have investigated experimentally the submersible jet injection into liquid in the ladle by blowing devices of different construction of and blowing modes of gas and dispersive phases. On the base of statistical treatment analysis of videoimages the efficient dispergation modes have been determined.

Findings. We have determined that double change in gas speed at the nozzle output makes no effect on heterogeneities value and their distribution uniformity. Dispergation of the system by V-shaped pipe is 2 times higher, and the distribution irregularity is 3 times less than dispergation by single-nozzle pipe, and this corresponds to more efficient and quiet process.

The dependency in dimensionless complexes for calculating the length of immersed two phase jet has been obtained.

Practical value. The results are used for design the plan of out-of-furnace metal treatment in hot-metal ladle cars.

Keywords: blowing in liquid, videoimage processing, tuyere, gas distribution, jet, dispergation

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсунюм. Дата надходження рукопису 25.04.12.