

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГЛУБЛЕННОЙ ПРОДУВКИ ЧУГУНОВОЗНОГО КОВША. ПАРАМЕТРЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ.

Изложение основных материалов исследования. Проведены гидрогазодинамические исследования жидкометаллической ванны при инъекционном рафинировании расплава через погружную фурму на холодной модели ковша. Новая методика компьютерной обработки видеоклипов процесса газожидкостного взаимодействия позволила провести количественную оценку эффективности газораспределения в объеме жидкометаллической ванны при вдувании под разным углом газопорошковой струи.

Исследованию процессов выплавки стали и обработки металла в ковшах постоянно уделяется большое внимание, что определяется как стремлением повысить их эффективность, так и сложностью высокотемпературных газожидкостных взаимодействий, имеющих место при их проведении [1]. Моделирование этих процессов (горячее или холодное) направлено главным образом на выявление картины газожидкостного взаимодействия и его структурных особенностей [2, 3]. Десульфурация чугуна в чугуновозных ковшах путем продувки гранулированным магнием представляет пример такого процесса.

Целью данной статьи является изучение гидрогазодинамической картины на холодной модели чугуновозного ковша при газовом дутье заглубленной фурмой.



Рис. 1. Схема модели ковша.

В качестве модели была выбрана прозрачная емкость (рис.1), размеры которой соотносятся с размерами натуре как 1:10. В качестве жидкости использовалась вода. Заполняемый объем модели составлял ≈ 30 л, при этом уровень зеркала жидкости отстоит от верхней кромки модели на 70мм.

Дутьевое устройство, моделирующее фурму, представляло собой латунную трубку с внешним и внутренним диаметрами 3мм и 2мм соответственно.

Величина внутреннего диаметра определялась по газодинамическим

параметрам реализуемых натурной фурмой: диапазон пропускаемых расходов газа $60 \div 200 \text{ м}^3/\text{ч}$, скорость газа на входе из фурмы ($d=12 \text{ мм}$), заглубленной в металл ($h = 2,5 \text{ м}$; $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$) $50 \div 165 \text{ м/с}$.

С учетом приведенных величин на модели ковша при дутье через трубку внутренним диаметром 2 мм был реализован тот же диапазон скоростей на выходе из сопла при изменении расхода дутья в диапазоне $0,6 \div 2,0 \text{ м}^3/\text{ч}$. Эти величины расхода дутья на модели создают такую же нагрузку на единицу площади поперечного сечения ковша, как и отвечающие им в соотношении 100:1 величины расхода на натурном объекте.

Минимальный внешний диаметр фурмы–трубки (3 мм) позволяет не загружать визуально исследуемое поле газожидкостного взаимодействия. Трубка, моделирующая дутьевое устройство, размещалась на оси ковша. Величина заглубления составляла 200 мм.

Реализация математической модели. Правомочность применения масштабированной холодной модели вода-воздух может быть подтверждена равенством для модели и природы модифицированного числа Re_{mod} , полученного исходя из следующих соображений. Применение критерия Re допустимо постольку, поскольку моделируется истечение газа в жидкость, при этом силы инерции определяются скоростью истечения газа и его плотностью, а силы вязкости определяются вязкостью жидкости, существенно большей вязкости газа, и скоростью жидкости.

Поскольку разрыв скоростей на поверхности раздела жидкость-газ невозможен, постольку справедливым будет допущение о равенстве скоростей газа и жидкости в области взаимодействия. Первым геометрическим независимым масштабом области струйного взаимодействия примем диаметр сопла $d_{сопла}$, т.к. длина собственно газовой струи в жидкости для исследуемого процесса сравнима по порядку с калибром сопла.

Тогда число Re можно записать так:

$$Re_{mod} = \left[\frac{\rho_{газа} \cdot V_{газа}^2}{d_{сопла}} \right] / \left[\frac{\mu_{жидк} \cdot V_{жидк}}{d_{сопла}^2} \right] \quad (1)$$

где $\rho_{газа}$ – плотность газа; $V_{жидк} = V_{газа}$ – масштаб скорости; $d_{сопла}$ – геометрический масштаб; $\mu_{жидк}$ – вязкость жидкости.

После приведения (1) примет вид:

$$Re_{mod} = \left(\frac{\rho_{газа}}{\mu_{жидк}} \right) \cdot V_{газа} \cdot d_{сопла} \quad (2)$$

Вторым геометрическим независимым параметром, позволяющим учесть масштаб процесса в целом, является диаметр ковша $D_{ковша}$, учтем его, введя для критерия Re_{mod} множитель $d_{сопла}/D_{ковша}$, тогда (2) примет вид:

$$Re_{mod} = \left(\frac{\rho_{газа}}{\mu_{жидк}} \right) \cdot V_{газа} \cdot d_{сопла}^2 / D_{ковша} \quad (3)$$

где комплекс $(V_{\text{газа}} \cdot d_{\text{сопла}}^2)$ играет роль масштаба расхода газа. В свою очередь сомножитель $\rho_{\text{газа}}$ позволяет учесть плотность жидкости и глубину погружения фурмы.

$$\text{Для исследуемого процесса} \left(\frac{\rho_{\text{газа}}}{\mu_{\text{жидк}}} \right)_{\text{модели}} = 0,385 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{газа}}}{\mu_{\text{жидк}}} \right)_{\text{натуры}}.$$

Для рассматриваемого случая имеют место следующие значения параметров и размеров:

$d_{\text{сопла}}$ модели	$d_{\text{сопла}}$ натур- ры	$D_{\text{ковша}}$ модели	$D_{\text{ковша}}$ натур- ры	$V_{\text{газа}}$ модели	$V_{\text{газа}}$ натур- ры
2 мм	12 мм	300 мм	3000 мм	100 м/с	100 м/с

Приведенным геометрическим размерам и параметрам отвечают следующие значения модифицированного числа Рейнольдса Re_{mod} :

$$Re_{\text{mod}} \text{ модели} = 1,3(3) \cdot 10^{-3} \quad Re_{\text{mod}} \text{ натур-ры} = 1,846 \cdot 10^{-3}.$$

Близость полученных значений Re_{mod} говорит о достаточно удовлетворительном гидродинамическом подобии модели и натур-ры.

В работе исследовалось влияние угла вдувания при различных расходах дутьевого газа на размеры газовых пузырей в объеме ковша, на величину площади поверхности раздела фаз и распределение этих параметров в проекции на вертикальное сечение ковша в диаметральной плоскости. Моделирование направления дутья по углу отклонения от направленного вниз прямого истечения газа ($\alpha=0^\circ$) проводилось в диапазоне $\alpha=0^\circ \div 90^\circ$ с шагом 15° , для чего было изготовлено соответствующее число моделей фурмы с указанными выше размерами, отличавшимися величиной угла, на который был отогнут сопловой конец модели фурмы. Длина отогнутой части составляла 6 мм (два калибра наружного диаметра трубки). Для учета влияния на процесс наружного диаметра натурной фурмы (340 мм) было изготовлено дополнительное дутьевое устройство – прямоточная фурма из трубки тех же размеров с установленным на срезе тонким диском диаметром 34 мм.

Процесс продувки ковша на каждом из режимов регистрировался видеокамерой VHS GR-SX20 с выдержкой 1/2000 сек и частотой 24 кадр/сек. Киносъемка велась в проходящем свете – источник света, модель ковша и объектив видеокамеры размещались на одной оси. Материалы киносъемки в дальнейшем использовались для определения параметров газораспределения [4, 5]. Пример обработки кинограмм дан на рис.2.

По полученному плоскому изображению (рис.2,а) методами численного интегрирования с применением аппроксимационной модели описания периметров [6] определялись площади (аналог объемов газовых пузырей) и периметры (аналог площади поверхности раздела фаз) изображенных объектов. Возможно при этом, что изображения распределенных в объеме ковша пузырей в проекции на диаметральную плоскость накладываются друг на друга.

Далее вычисленные площади и периметры были отнесены к площади

выделенного прямоугольника (плоский аналог объема ковша, рис.1) и обозначены как величины газосодержания (S_G) и поверхности раздела фаз (S_{Π} - периметра диаметральной проекции). При этом газосодержание определено как измеренная попиксельно в диаметральной плоскости по диаметру ковша площадь пузырей, а поверхность раздела фаз – как длина контура этих пузырей.

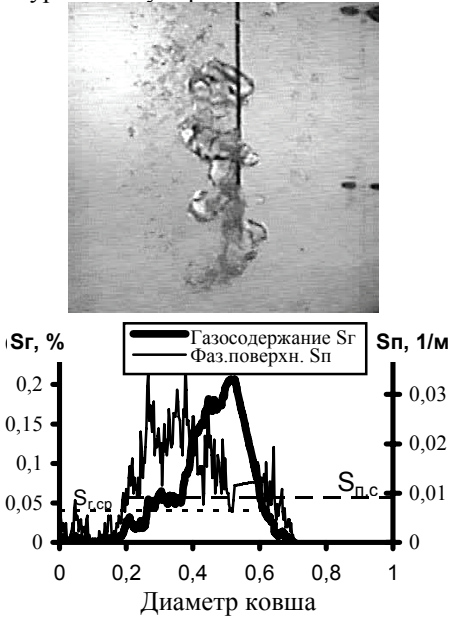


Рис. 2. Распределение параметров дутья

Полученное для n кадров кинограммы процесса распределение параметров S_G и S_{Π} позволяет найти для каждого из них свое значение средней по диаметру ковша величины $S_{ср}$ и величину неравномерности изменения соответствующего параметра по диаметру, определяемую как среднее отклонение $K_K = \frac{[S_{ср} \cdot \sum S]}{S_{ср}}$ для всех $S \leq S_{ср}$.

Введем далее величину $K = \frac{K_K}{n}$, осредненную по $n=125$ кадрам, являющуюся характерным параметром для данной конструкции фурмы и режима ее работы, т.е. расхода дутьевого газа. Величина K , изменяющаяся в диапазоне $0 \leq K < 1$, численно определяет качество ведения процесса или эффективность работы выбранной фурмы. Чем меньше величина K при равных расходах газа, тем равномернее исследуемый параметр распределен в диаметральном сечении модели ковша, а значит и выше каче-

Еще раз отметим, что введенные термины газосодержания и поверхности раздела фаз, как следует из данного выше определения, привязаны к плоской картине моделируемого процесса. Этим предлагаемые определения отличаются от общепринятых. Вместе с тем разработанная в [5] методика обработки изображений позволяет количественно оценивать влияние режимных и конструктивных параметров на моделируемый процесс.

На рис.2,б приведено распределение газосодержания (S_G) и поверхности раздела фаз (S_{Π}) по ширине выделенной зоны изображения, являющейся аналогом диаметра ковша, как результат обработки одного кадра (рис.2,а) кинограммы.

ство газожидкостного взаимодействия. Далее по тексту величина K_{Γ} характеризует равномерность распределения газосодержания, а K_{Π} равномерность распределения поверхности раздела фаз.

На рис.3–6 показано изменение величины кажущегося газосодержания и равномерности его распределения в зависимости от расхода газа и угла наклона дутья. Обращают на себя внимание следующие интересные особенности и результаты. Общим для рассматриваемых режимов является то, что согласно рис.3 величина S_{Γ} растет с ростом расхода газа для всех углов продувки. При этом средняя величина S_{Γ} во всем диапазоне расходов дутья максимальна при $\alpha=45^{\circ}$.

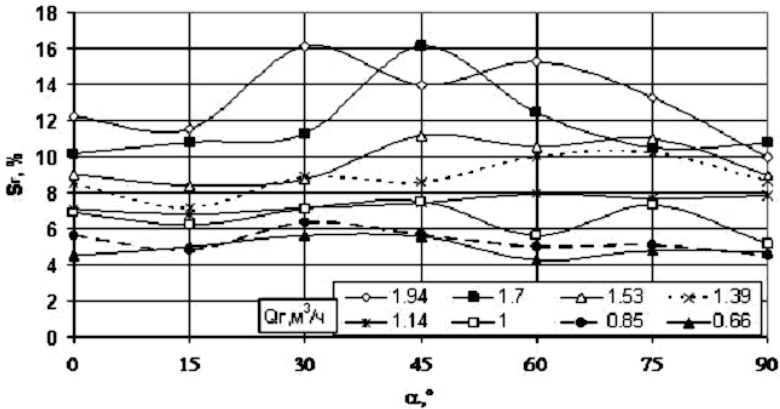


Рис. 3. Изменение газосодержания от расхода дутья.

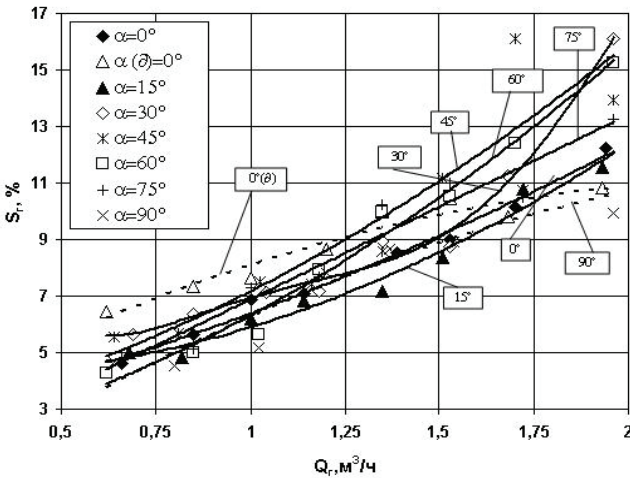


Рис. 4. Изменение газосодержания от угла дутья

На рис.3 следует выделить вариант $\alpha(\partial)=0^\circ$, который характеризует дутье прямоточной фурмой с диском на срезе. Видно, что для режимов $Q_{\Gamma}<1,25 \text{ м}^3/\text{ч}$ эффект от наличия диска сильнее влияния угла дутья, поскольку для таких режимов варианту с диском отвечают большие значения S_{Γ} . Следует отметить, что наличие диска заметно влияет на величину газосодержания S_{Γ} (рис.3), но весьма слабо сказывается на равномерности газораспределения K_{Γ} по диаметру ковша (рис.5). Сопоставляя варианты дутья при $\alpha=0^\circ$ (с диском и без диска) видим, что в диапазоне $1<Q_{\Gamma}<1,5 \text{ м}^3/\text{час}$ газораспределение во втором случае на $8\div 10\%$ лучше чем в первом, это может быть объяснимо тем, что при малых расходах газа характерный размер газового пузыря сравним с диаметром диска и диск работает как газораспределительное устройство.

Вместе с тем влияние угла вдувания в области $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ (рис.4) становится особенно заметно при $Q_{\Gamma}>1,25 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Интересно, что для каждого из расходов дутья значения S_{Γ} при $\alpha=0^\circ$ и $\alpha=90^\circ$ по обработанным плоским изображениям весьма близки (рис.4, табл.1). Отметим, что кривые, характеризующие неравномерность газораспределения по диаметру модели ковша (параметр K_{Γ}), в зависимости от угла дутья могут быть разбиты на три группы (рис.5).

Таблица 1. Газораспределение для углов 0° и 90° при различных расходах газа

Расход газа, $\text{м}^3/\text{ч}$	$S_{\Gamma}, \%$	
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$
1,94	12,22	9,95
1,7	10,15	10,73
1,53	9,02	8,93
1,39	8,55	8,65
1,14	7,1	7,82
1,00	6,87	5,18
0,85	5,63	4,54
0,66	4,61	4,66

К первой группе относятся обращенные выпуклостью вверх достаточно близкие кривые, отвечающие малым дутьевым углам 0° и 15° . Для этих углов неравномерность газораспределения непрерывно снижается с увеличением расхода дутья, причем уменьшение неравномерности при переходе от минимального к максимальному расхода газа не превышает 12% .

Ко второй группе можно отнести почти линейные кривые, отвечающие дутьевым углам 30° и 45° . Для этих дутьевых углов характерен скачок в уменьшении неравномерности газораспределения по сравнению с малыми углами, что хорошо видно в координатах K_{Γ}, α (рис.6), неравномерность также непрерывно снижается с увеличением расхода дутья, причем при $Q_{\Gamma} = 1,8 \text{ м}^3/\text{час}$ неравномерность газораспределения при $\alpha=45^\circ$ на 40% меньше, чем для $\alpha=0^\circ$ и на этот результат не влияет даже установка диска (рис.5, кривая $0^\circ (\partial)$). Такое заметное влияние угла вдувания, по-видимому, связано с перестройкой гидродинамики ванны.

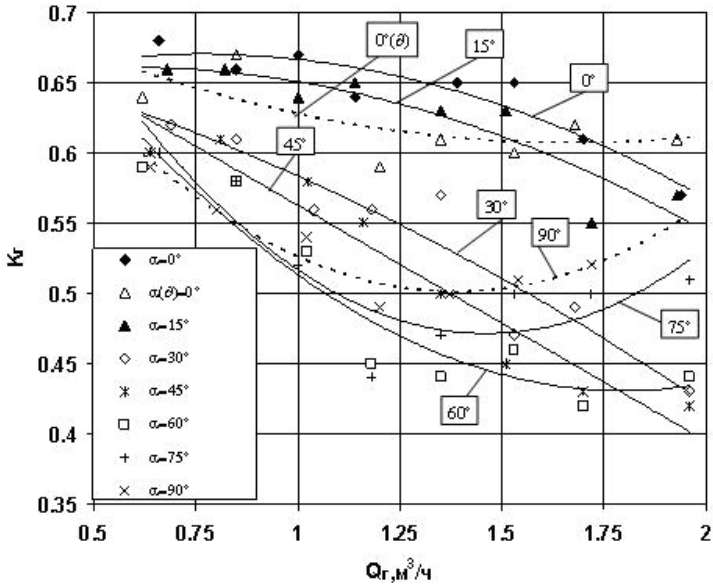


Рис. 5. Неравномерность газосодержания в зависимости от расхода газа

К третьей группе относятся обращенные выпуклостью вниз кривые, соответствующие большим углам дутья 60° , 75° и 90° . Для этой группы также характерен скачок в уменьшении неравномерности газораспределения по сравнению с предыдущими углами дутья. Для больших углов вдувания неравномерность газораспределения с ростом дутья достигает минимума, после чего снова начинает возрастать (рис. 5, 6), причем каждому из этих углов отвечает свой расход газа, при котором реализуется наилучшее газораспределение. Интересно, что большим углам вдувания в этом диапазоне соответствуют меньшие с позиций наилучшего газораспределения расходы газа (табл.2.).

Таблица 2. Наилучшее газораспределение как функция угла дутья и расхода газа

Угол дутья, град	60°	75°	90°
Расход газа, $\text{м}^3/\text{ч}$	1,8	1,45	1,4
Наилучшее для данного угла дутья значение K_{Γ}	0,43	0,47	0,5

Поведение третьей группы кривых при больших расходах газа может быть просто и логично объяснено влиянием стенок модели ковша. Действительно, с увеличением угла вдувания уменьшается кратчайшее расстояние от стенки до среза сопла; углу вдувания, равному 90° отвечает минимальное расстояние.

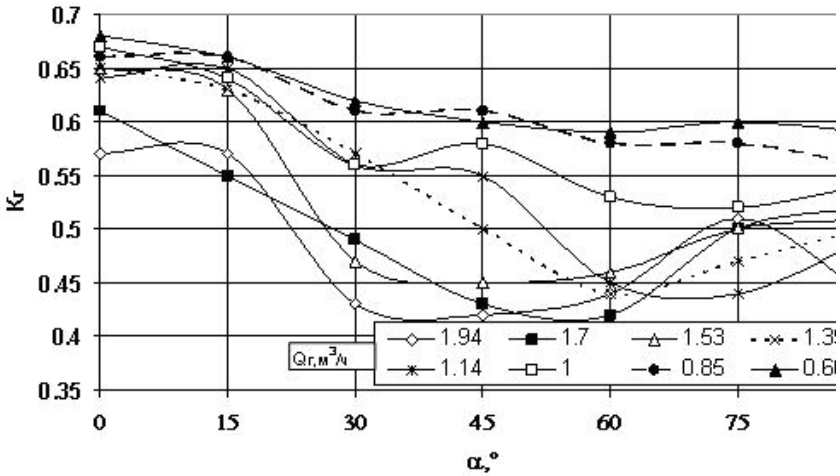


Рис. 6. Неравномерность газосодержания в зависимости от угла дутья

Результаты исследования. С ростом расхода газа при неизменном сечении сопла увеличивается дальность газожидкостной струи; начиная от некоторого значения расхода газа струя натекает на стенку и далее компактная газожидкостная структура под действием архимедовых сил по кратчайшему пути всплывает вдоль стенки, не распределяясь по объему ковша. Отдельно отметим, что при натекании газовой струи на стенку в области торможения газа ухудшается дробление струи и появляются условия для коалесценции уже отделившихся от струи пузырьков. Иное объяснение может иметь поведение кривых, описывающих работу прямоточной фурмы с диском на срезе, случай $\alpha(\partial) = 0^\circ$. В то время как при меньших расходах газа диск действует подобно газораспределительному устройству, при больших расходах газовый пузырь поглощает диск и действие диска как газораспределительного устройства ослабевает.

Визуальным подтверждением этим объяснениям могут служить фотографии, представленные на рис.7,а–7,е. На рис.7,а и 7,б; 7,в и 7,г попарно сгруппированы фотографии дутья при средних и больших расходах газа для различных углов вдувания. Отчетливо видно, что средним расходам газа при углах вдувания 45° и 90° отвечают визуально похожие картины газораспределения (рис.7,а и 7,б.), в то время как при большом расходе газа и угле вдувания 90° для заданной геометрии ковша газожидкостная струя в отличие от режима с углом 45° натекает на стенку и образует компактную структуру (рис.7,в и 7,г). В свою очередь на рис.7,д и 7,е приведены фотографии истечения для случая диска на срезе при средних и больших расходах газа. Видно, что при больших расходах газа газораспределительное действие диска ослабевает.



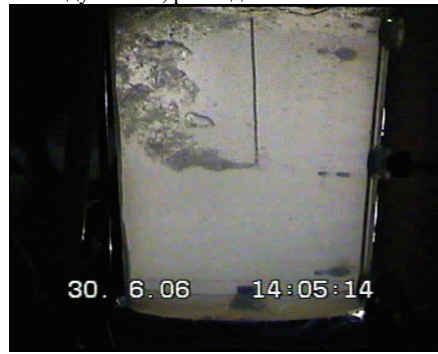
а)

Угол дутья 45°, расход газа 1.02 $\text{нм}^3/\text{час}$ 

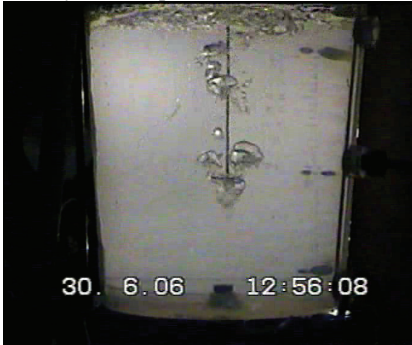
б)

Угол дутья 90°, расход газа 1.08 $\text{нм}^3/\text{час}$ 

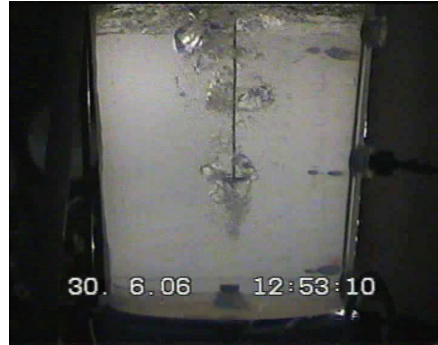
в)

Угол дутья 45°, расход газа 1.96 $\text{нм}^3/\text{час}$ 

г)

Угол дутья 90°, расход газа 1.96 $\text{нм}^3/\text{час}$ 

д)

Диск на срезе сопла, расход газа 1.00 $\text{нм}^3/\text{час}$ 

е)

Диск на срезе сопла, расход газа 1.93 $\text{нм}^3/\text{час}$

Рис. 7. Отдельные кадры процесса

Из анализа представленных на рис.5 и рис.6 данных можно сделать вывод о том, что возможно более равномерное газораспределение достигается для углов $30^\circ < \alpha < 75^\circ$, оптимальное же значение угла дувания близко к 60° .

В свою очередь на рис.8–11 показано изменение величины периметра (аналога площади поверхности) раздела фаз и равномерности распределения этого параметра в зависимости от расхода газа и угла наклона дутья.

На рис.8 представлено изменение периметра раздела фаз S_{Π} , отнесенного к площади выделенной области обработки видеоизображения как функции изменения расхода дутья. Видно, что S_{Π} растет пропорционально росту дутья, относительно слабо при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 15^\circ$ и более заметно при $\alpha > 30^\circ$. Наиболее эффективны в этом плане фурменные устройства с дутьевыми углами в диапазоне $30^\circ \div 60^\circ$

На рис.9 в зависимости от расхода газа представлен параметр $P_{\Pi} = S_{\Pi} / [2(\pi S_{\Gamma})^{0,5}]$, являющийся отношением периметра диаметальной проекции поверхности раздела фаз S_{Π} к периметру диаметальной проекции эквивалентного сферического пузыря, плоским аналогом объема которого является величина газосодержания S_{Γ} . Параметр P_{Π} характеризует суммарную приведенную поверхность раздела фаз пузырей.

Интересен представленный на рис.10 график $S_{\Pi}(\alpha)$. Видно, что площадь поверхности раздела фаз при значениях $Q_{\Gamma} \geq 1,7 \text{ м}^3/\text{час}$ и углах дутья $\alpha = 45^\circ$ и 60° увеличивается на 100% по сравнению с $\alpha = 0^\circ$.

На рис.11 показано изменение коэффициента неравномерности распределения площади поверхности раздела фаз K_{Π} по диаметру ковша как функции расхода газа Q_{Γ} для различных углов дутья. Прежде всего отметим, что для зависимости $K_{\Pi}(Q_{\Gamma})$ также, как и для зависимости $K_{\Gamma}(Q_{\Gamma})$ характерен скачок в уменьшении неравномерности при переходе от дутьевых углов 0° и 15° к углам 30° и больше, сохраняется и изменение характера выпуклости кривых. Это видно из сравнения рис.11 и рис.5.

Обратим внимание на то, что коэффициент неравномерности $K_{\Pi}(Q_{\Gamma})$ для $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 15^\circ$ в диапазоне $Q_{\Gamma} = 0,65 \div 1,4 \text{ м}^3/\text{час}$ практически остается постоянным, а далее с ростом Q_{Γ} уменьшается, при этом для $\alpha \geq 30^\circ$ коэффициент неравномерности уменьшается с ростом Q_{Γ} уже при малых значениях расхода газа, для углов $\alpha = 45^\circ$ и 60° наблюдается оптимум по Q_{Γ} , при котором равномерность распределения поверхности раздела фаз наибольшая.

Наличие диска ($\alpha_{\partial} = 0^\circ$) не оказывает влияния на равномерность распределения поверхности пузырей уже при $Q_{\Gamma} \geq 1 \text{ м}^3/\text{час}$.

Интересно отметить, что хотя параметр P_{Π} на порядок больше величины S_{Π} (рис.11 и рис.8), изменения $P_{\Pi}(Q_{\Gamma})$ имеют такой же характер, как и $S_{\Pi}(Q_{\Gamma})$, при этом сохраняются те же особенности изменения функции $P_{\Pi}(Q_{\Gamma})$ при переходе от дутьевых углов 0° и 15° к углам 30° и больше.

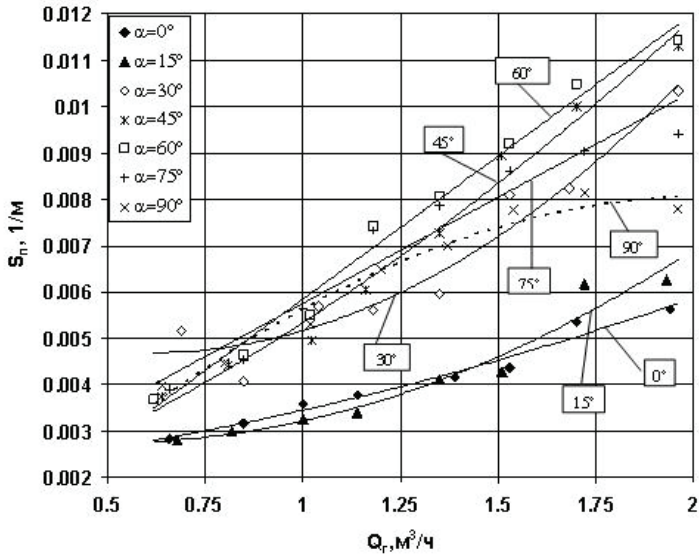


Рис.8. Изменение периметра раздела фаз в зависимости от расхода дутья

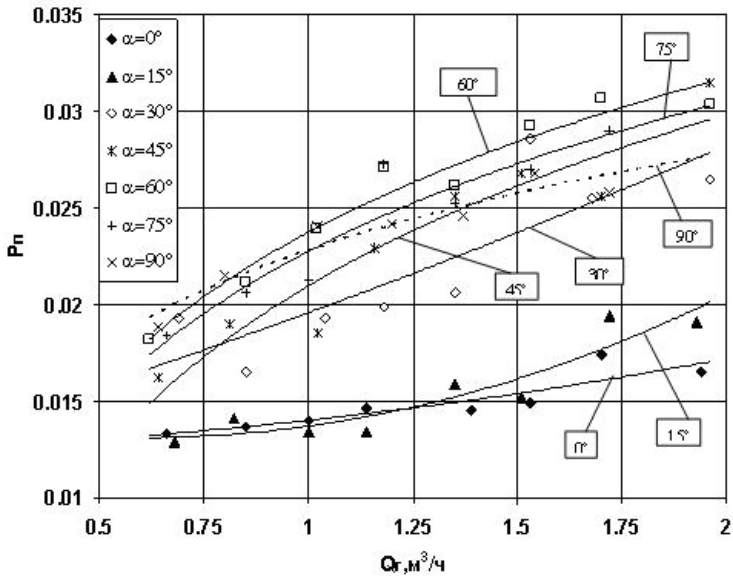


Рис.9. Изменение суммарной приведенной поверхности раздела фаз пузырей от расхода газа

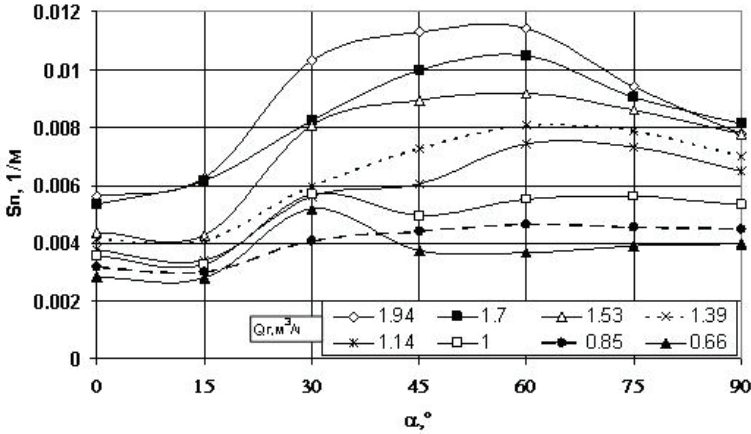


Рис.10. Изменение периметра диаметальной проекции поверхности раздела фаз в зависимости от угла дутья

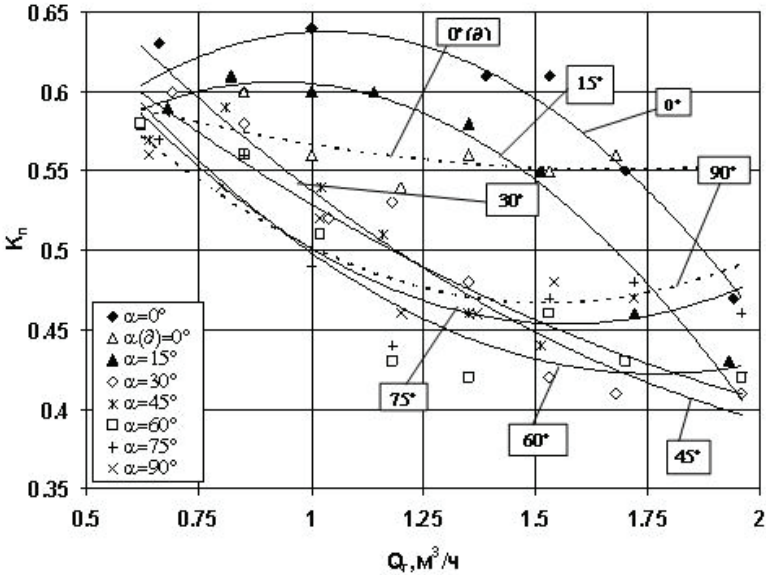


Рис. 11. Изменение коэффициента неравномерности распределения поверхности раздела фаз в зависимости от расхода газа

Заметим при этом, что параметр S_{Π} скорее характеризуют влияние геометрических пропорций ковша на гидродинамику ванны при ее взаимодействии с дутьевым газом, а параметр P_{Π} в большей степени характеризует эффективность собственно дутьевого устройства.

Выводы.

На основе методики компьютерной обработки видеоизображений [5] проведен анализ газожидкостного взаимодействия при заглубленном дутье в ковш.

В относительных величинах сделана оценка эффективности дутья при различных значениях углов вдувания газа α и расходов дутья Q_{Γ} .

На основе методики компьютерной обработки видеоизображений дана оценка степени неравномерности распределения параметров газожидкостного взаимодействия по диаметру аппарата, позволяющая перейти от качественной характеристики видеоизображения газожидкостного взаимодействия к численному значению.

Отмечено, что изменение эффективности дутья как функции расхода газа Q_{Γ} характеризуется монотонностью, в отличие от эффективности дутья как функции угла вдувания α , причем немонотонность выражена тем больше, чем больше величина Q_{Γ} , что, по-видимому, связано с изменением гидродинамических структур в ковше.

Наилучшие показатели газожидкостного взаимодействия в части увеличения газосодержания и площади поверхности раздела фаз, а также уменьшения неравномерности распределения этих параметров по объему ковша имеют место при значениях угла вдувания, лежащих в диапазоне $\alpha=30^{\circ}\div 60^{\circ}$, причем по сравнению с прямоточной фурмой ($\alpha=0^{\circ}$) эффект достигает 100%.

Выявлена область резкого изменения параметров газожидкостного взаимодействия при переходе от дутьевых углов 0° и 15° к углам 30° и больше.

Выявлено, что кривые распределения параметров газожидкостного взаимодействия по диаметру модели ковша в зависимости от угла дутья могут быть разбиты на три отстоящие друг от друга группы с характерным для каждой группы поведением.

Показано, что причиной ухудшения однородности газораспределения для случаев дутья с большими расходами газа и на больших углах вдувания может быть натекание газожидкостной струи на стенку сосуда.

На примере фурмы с торцевым диском выявлено влияние внешнего диаметра фурменного устройства на характер газожидкостного взаимодействия. Показано, что в области $Q_{\Gamma}<1,3$ м³/ч диспергирование газовой фазы в объеме ковша при увеличении за счет диска диаметра донного среза фурмы до размера, пропорционального натурному, более эффективно, нежели изменение угла дутья ($\alpha=0^{\circ}\div 90^{\circ}$). Вместе с тем равномерность газожидкостного взаимодействия по объему ковша в случае фурмы с диском существенно уступает конструкции с угловым вдуванием при $\alpha\geq 30^{\circ}$.

Сложность гидродинамической картины при заглубленном дутье требует индивидуального холодного моделирования конкретных реальных устройств с учетом максимально возможного числа элементов устройства

и процесса, как-то размеров и формы ковша и фурмы, положения и глубины погружения фурмы и др.

1. *Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л.* Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Metallurgy, 1974. – 496 с.
2. *Ефименко С.П., Пилушенко В.Л., Смирнов А.Н.* Пульсационное перемешивание металлургических расплавов. – М.: Metallurgy, 1989. – 168с.
3. *Исследование* на холодной модели ковша влияния конфигурации оголовка фурмы на распределение газовой фазы в жидкости / Л.А.Флеер, А.П.Толстопят, А.Ф.Шевченко и др. // Теория и практика металлургии. – 2006. – № 6. – С. 20-23.
4. *Компьютерная* обработка фотоизображений газовых пузырей в жидкости / Т.А.Рузова, В.И.Елисеев, А.П.Толстопят и др. // Тези доповідей третьої міжнар. наук.-практ. конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем». – Дніпропетровськ, 2006. – С. 137-138.
5. *Компьютерная* обработка кинограмм процесса взаимодействия газовых струй с жидкостью / Т.А. Рузова, А.П. Толстопят, А.Ф. Шевченко и др. // Науковий вісник Національного гірничого університету.–2007. – № 12.– С. .
6. *Рузова Т. А., Карпов О.Н., Флеер Л.А.* Оперативный контроль параметров частиц дисперсных образований // Науковий вісник Національного гірничого університету.–2004. – № 2.– С. 83-88.

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