

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ЖИДКОСТИ ПРИ ПРОДУВКЕ СНИЗУ

Р.А. Гизатулин

Решение многих задач технологии внепечной обработки стали требует достаточно полного представления о механизмах формирования структуры и динамики газовой (газовых пузырьков) и жидкой фаз в восходящем газожидкостном потоке (в «султана») над газоподводящим соплом. Распределение газовой фазы, распределение и величины скоростей жидкости по высоте и сечению султана в конечном счете определяют динамику потоков расплава в остальных, вне султана, объемах ванны. Вопросам взаимодействия вдуваемого газа и жидкости посвящено огромное количество исследований. В результате сейчас имеется достаточно полное представление о процессах проникновения газовой струи в жидкость, о формировании у сопла одиночных пузырей и роев, о скорости их всплывания и пр. Тем не менее, все это не позволяет создать надежную модель гидродинамических явлений в султанах и во всем объеме ванны. Попытки построения моделей, например, для прогнозирования продолжительности продувки с целью усреднения расплава в ковшах дают результаты, существенно отличающиеся от практики. Продуктивней непосредственное изучение структуры восходящего потока. С этой целью применяются различные методы: фотографирование в световом ноже, скоростная киносъемка, кондуктометрические и электродиффузионные датчики, образующие порой сложные системы.

В настоящей работе описываются результаты изучения структуры газового потока в султанах просвечиванием зоны барботажа лазерным лучом. При пересечении всплывающим пузырьком светового потока происходит частичное отражение и соответствующее уменьшение его интенсивности [1]. Понижение интенсивности пропорционально длине образующей границы раздела жидкость-газ и газ-жидкость, пересекающих луч пузырей. Остаточный световой поток воспринимается фотоэлементом; сигнал от которого поступает на самописец. Сравнение записанных за время экспозиции сигналов фотоэлемента при просвечивании свободной от пузырьков зоны и зоны барботажа позволяет оценить относительное количество (объем) газовой фазы (пузырьков), прошедших через луч за время экспозиции. В целом распределение пузырьков в горизонтальном сечении султана неравномерно, но, по-видимому, осесимметрично. В соответствии с принятым предположением исследуемую горизонтальную плоскость султана разбивали на аксиально расположенные кольца шириной по 1 см и принимали, что каждое кольцо

имеет свою характерную среднюю плотность газового потока, Π , $\text{см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

При поперечном сканировании султана потери интенсивности светового потока обусловлены не только плотностью газового потока по кольцевым зонам, но и расстоянием луча от вертикальной оси. С помощью специальной программы по данным потерь интенсивности светового потока на каждом шаге сканирования определяли среднюю плотность газового потока в каждом кольце. Продолжительность экспозиции составляла 3 мин.

Опыты проводили в прозрачной емкости в форме вертикального параллелепипеда сечением 600x600 x1200 мм. Такие размеры обеспечивали нестесненность восходящего газожидкостного потока при всех опробованных режимах продувки. Уровень воды над соплом во всех опытах был 1100 мм. Продувку проводили компрессорным воздухом через пять отверстий диаметром по 1,4 мм. Четыре отверстия расположены на вершинах квадрата со стороной 4 мм, пятое - в центре. Эквивалентный диаметр отверстий 3,1 мм, диаметр описанной у периферийных сопел окружности 7,6 мм. Расход воздуха измеряли ротаметром, давление перед соплом - пружинным манометром. Сканирование проводили при интенсивностях I подачи газа 8, 14, 22 и 38 л/мин на высотах H , составляющих 570 и 800 мм над уровнем сопла. Первая высота представляет собой пятикратную величину l проникновения в воду направленной вертикально вверх газовой струи до ее полного распада на пузыри при максимальном в наших опытах значении $I = 38$ л/мин. Расчет проводили по приведенной в работе [2] формуле:

$$l/d = 5,07(\text{Ar})^{1/3}, \quad (1)$$

где d - диаметр сопла, Ar - число Архимеда.

Предполагается, что за время преодоления пузырьками остальных 0,45 м высоты их взаимодействие с жидкостью перейдет в установившийся режим. Второй уровень измерений (800 мм) находится примерно на половине оставшегося расстояния до поверхности ванны, где при продувке развиты радиальные потоки жидкости, способные существенно изменить распределение пузырьков в горизонтальной плоскости.

При обработке экспериментальных данных полагали, что вдуваемый воздух в барботажной области и саму барботажную область не следует рассматривать как затопленную струю. Во-первых, под затопленными струями понимают струи, физические свойства которых одинаковы или мало отличаются от физических свойств среды, куда они истекают. В нашем случае газ истекает в среду

со значительно отличающимися физическими параметрами. Во-вторых, зону барботажа не следует считать и турбулентным газовым потоком с тяжелой примесью, так как на основном участке газосодержание барботируемой области колеблется на уровне нескольких процентов. В-третьих, при барботировании не может реализоваться условие постоянства количества движения вдоль восходящего потока, поскольку по всей его высоте на жидкость непрерывно воздействуют пузырьки, всплывающие в результате постоянно действующей архимедовой силы.

Опыты показали, что распределение плотности газового потока в общем соответствует сложившимся представлениям о структуре газовой фазы в султанах: высокая плотность на оси, составляющая 1,9...3,9 см³/(см²с) в зависимости от высоты и интенсивности подачи газа, с постепенным ее уменьшением к границам, где плотность газового потока Π , составляет 0,04.. 0,07 см³/(см²с). При подъеме газовый поток расширяется и, увлекая за собой жидкость, формирует конусообразный газожидкостный восходящий поток. Если принять, что расширение газовой фазы (пузырьков) от центра к периферии происходит за счет массопереноса пузырьков в жидкости, то следует ожидать существования связи между плотностью Π газового потока по сечению султана и расстоянием r_i от вертикальной оси, где плотность максимальна. В этом случае падение плотности по сечению описывается уравнением:

$$-d\Pi/dr = \alpha(\Pi - \Pi_0), \quad (2)$$

где $(\Pi - \Pi_0)$ - градиент плотности; α - коэффициент пропорциональности, по физическому смыслу представляет собой коэффициент турбулентного массопереноса, см⁻¹.

После интегрирования при начальном условии $\Pi = \Pi_0$, если $r = 0$, и пренебрегая Π_0 , величина которой практически равна фону вне султана, получаем

$$\ln(\Pi/\Pi_0) = -\alpha r, \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что если распространение пузырьков по поперечному сечению султана определяется массопереносом, то связь между $\ln(\Pi/\Pi_0)$ и расстоянием от оси должна быть линейной с отрицательным уклоном.

На рис. 1 представлена статистическая реализация уравнения (3) для случая $I = 22$ л/мин и

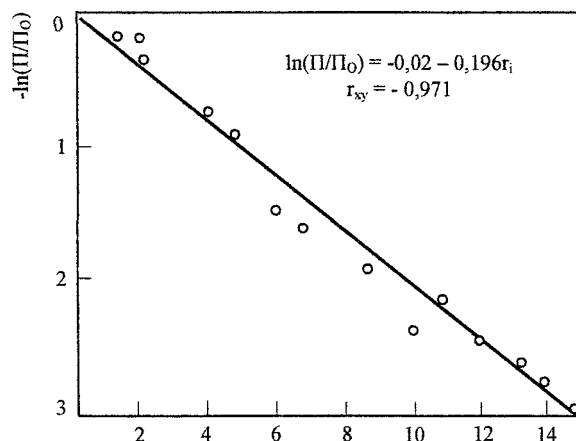


Рис. 1. Зависимость плотности газового потока от расстояния до оси зоны барботажа

Аналогичные связи получены для остальных режимов продувки на обеих высотах. Установлено также существование подобия строения газового потока на обеих высотах для всех режимов продувки, подтверждением чего являются линейные связи между $\ln(\Pi/\Pi_0)$ и безразмерным радиусом $\rho = r/R$ (где R - максимальное значение радиуса конуса газожидкостного восходящего потока на данной высоте), (см. таблицу, в которой приведена и статистика корреляций). Проверка существенности связи между $\ln(\Pi/\Pi_0)$ и безразмерным радиусом ρ приведена по работе [3]. Для всех массивов

Коэффициент регрессий вида $\ln(\Pi/\Pi_0) = A + Br$ для всех вариантов исследованных массивов

Вариант	I , л/мин	N	A	B	r_{xy}	T	t_α при $\alpha = 0,001$
1/2	8	9	-0,08	-2,21	-0,857	4,40	3,50
		11	-0,05	-3,49	-0,925	7,33	4,78
3/4	14	10	-0,16	-2,97	-0,975	12,36	5,04
		13	-0,12	-3,41	-0,949	9,95	4,44
5/6	22		0,12	-3,12	-0,951	9,25	4,78
			-0,02	-3,13	-0,971	14,13	4,32
7/8	38	7	0,10	-2,74	-0,989	15,10	6,86
		8	0,16	-2,56	-0,969	9,56	5,96
9	Весь массив	83	-0,09	-2,98	-0,905	19,19	3,37

Примечание. Числитель и знаменатель – высота подачи газа 570 и 800 мм соответственно.

(см. таблицу) при уровне значимости $\alpha = 0,001$ имеет место соотношение

$$T = \frac{r_{xy} \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} > t_{\alpha},$$

в котором T и t_{α} - критерии существенности связи; r_{xy} - коэффициент корреляции; N - число точек.

Из приведенных данных следует, что плотность потока по сечению султана описывается экспонентой вида

$$\Pi_i = \Pi_0 \cdot \exp(-B\rho). \tag{4}$$

На рис. 2 изображено рассчитанное по уравнению (4) распределение плотности газового потока на высоте 800 мм при $I = 8$ л/мин и на высоте 570 мм при $I = 38$ л/мин в случае $\Pi_0 = 1$. Здесь же нанесено распределение плотности, рассчитанное по общему для всех экспериментальных данных уравнению. Различие между частными распределениями и обобщенными несущественно.

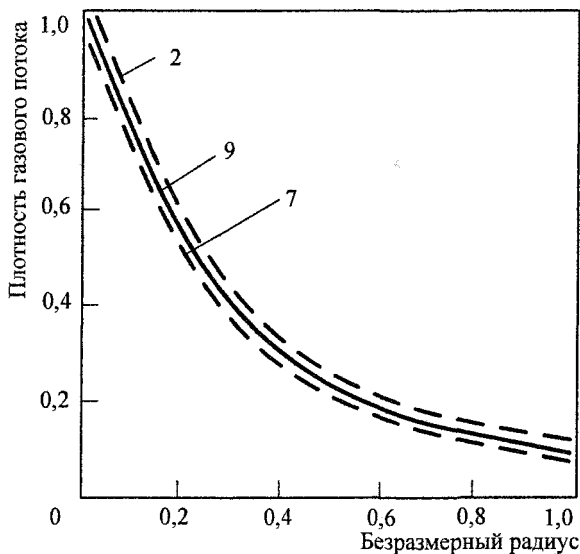


Рис. 2. Изменение плотности газового потока в зависимости от безразмерного радиуса (числа у кривых – номер уравнений таблицы)

В новой серии опытов воздух подавался через одно сопло диаметром 3,04 мм, сканирование лазерным лучом с шагом 1 см проводилось на трех высотах; 570, 800 и 940 мм от сопла, воздух подавался с интенсивностью I , равной 4, 8, 14, 22 и 38 л/мин.

При обработке результатов экспериментов, как и в работе [4, 5], исходили из предположения, что расширение газового потока по мере подъема происходит за счет массопереноса пузырьков по горизонтали (по радиусу r) из зоны с максимальной плотностью Π_0 (ось султана) к зоне с минимальной плотностью Π_r (на границе султана).

Таким образом, если распространение пузырьков в поперечном сечении султана определяется массопереносом, то должна существовать

линейная с отрицательным уклоном связь между $\ln(\Pi/\Pi_0)$ и расстоянием от оси султана. Результаты рассматриваемой серии опытов подтвердили это положение: при $I = 8...38$ л/мин получены статистические линейные связи с коэффициентами корреляции в пределах от -0,91 до -0,97 для соответствующих высот; лишь при расходе 4 л/мин они понижаются до -0,82, -0,66 и -0,81. Подтверждено также существование подобия строения газового потока на всех трех высотах при всех режимах продувки.

Дискретность сканирования вносит ошибки в определении границ султана. Кроме того, получаемые статистической обработкой уравнения регрессий, подтверждая реальность связей типа (3), имеют вид $\ln(\Pi/\Pi_0) = -\alpha r$. Анализ массива статистических данных показал, что наиболее устойчивыми характеристиками являются плотность газового фона вне султана (Π_{ϕ}) и величина коэффициента α . С учетом этих особенностей был проведен пересчет каждой конкретной статистической регрессии на эквивалентную регрессию с наблюдаемой величиной α и плотностью газового потока на границе султана (Π_r), равной плотности газового фона. Пересчет проводился с помощью системы уравнений:

$$\frac{\Pi_r}{\Pi_{03}} - \exp(-\alpha r) = 0; \tag{5a}$$

$$I - 2\pi \Pi_{03} \int_0^{R_r} r \cdot \exp(-\alpha r) dr = 0. \tag{5б}$$

Первое уравнение описывает эквивалентную экспоненту распределения газового потока, второе равенство поданного объема воздуха в единицу времени (I , $\text{см}^3/\text{с}$) и объема тела вращения с образующей, описываемой уравнением (5 а); Π_{03} - плотность газового потока на оси эквивалентного распределения. В отличие от Π_0 , представляющей собой экспериментально определяемую среднюю плотность в центральном, приосевом круге с $R = 1$ см, величина Π_{03} есть плотность газового потока на математической оси султана. Естественно поэтому, что величина Π_{03} , превышает Π_0 на 25–35%. В дальнейшем будут использоваться только величины Π_{03} , поэтому индекс «э» будем опускать. В уравнении (5б) R_r - уточняемая величина радиуса султана при $\Pi_r = \Pi_{\phi}$. Зависимость коэффициента массопереноса и плотности газового потока от радиуса зоны барботажа представлены на рис. 3 и 4.

Согласно принятому механизму распределения газовой фазы, при ее всплывании величина Π_0 , будучи максимальной на срезе сопла, по мере удаления от него за счет «утечки» газа от оси на периферию должна постепенно уменьшаться. Ее величина на конкретной высоте определяется расстоянием от сопла и исходной плотностью газового потока на срезе сопла (Π_c), или, иначе говоря, от интенсивности подачи газа: чем выше интенсивность, тем больше значение Π_0 на контрольной высоте (рис. 5).

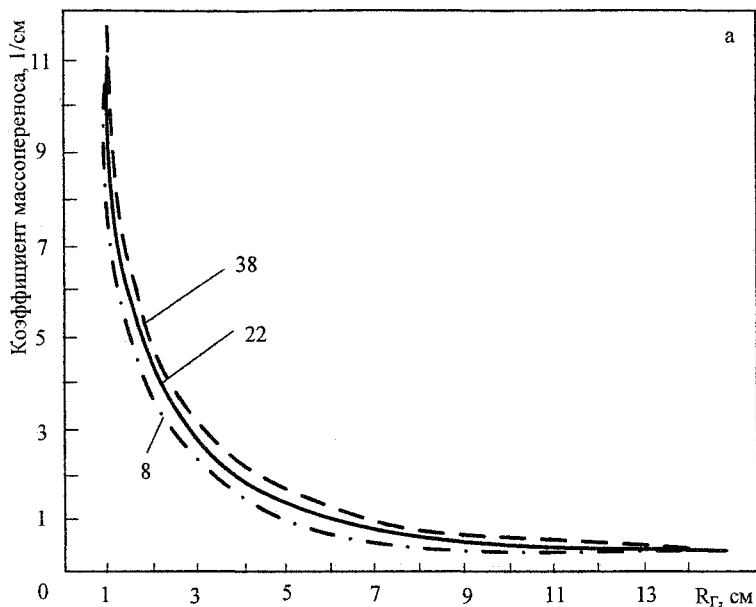


Рис. 3. Зависимость коэффициента массопереноса от радиуса зоны барботажа (цифры у кривых – интенсивность продувки)

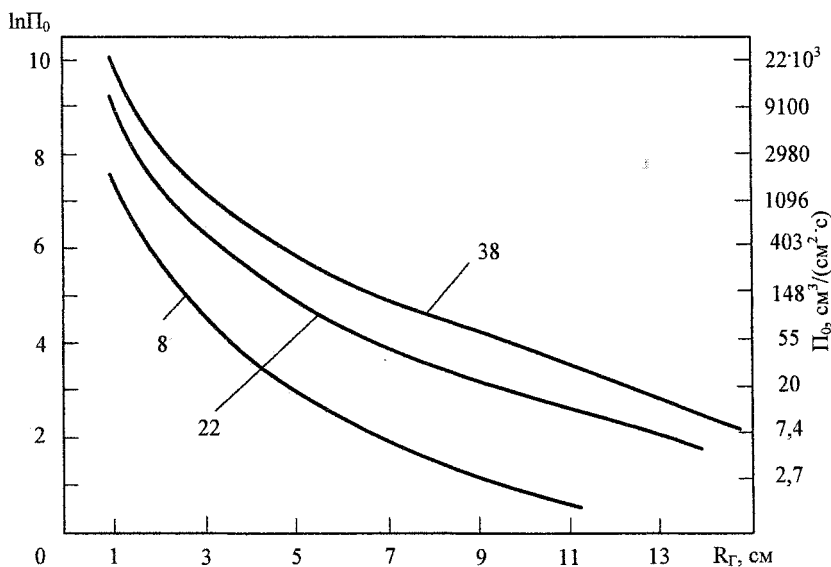


Рис. 4. Зависимость плотности газового потока от радиуса зоны барботажа (цифры у кривых – интенсивность продувки)

Следует заметить, что при заданном диаметре сопла величина P_c прямо пропорциональна скорости газа на срезе сопла в докритическом режиме истечения.

По данным о распределении плотности газового потока и истинных скоростей жидкой фазы в радиальном сечении исследуемого султана [5] оценили его истинное объемное газосодержание (ϕ) по зонам. Расчеты проводили исходя из модели скольжения фаз [6]:

$$\phi = w_r / (w_r + w_{ж} + w_{п}), \quad (6)$$

где: w_r и $w_{ж}$ - соответственно приведенные скорости газа и жидкости, см/с; $w_{п}$ - относительная скорость всплывания пузырей, см/с.

Величина w_r численно равна значениям плотности газового потока, определенным в наших опы-

тах; приведенная скорость жидкости связана с ее истинной скоростью ($w_{жн}$) соотношением:

$$w_{ж} = w_{жн} (1 - \phi). \quad (7)$$

Скорость всплывания пузырей оценивали по формуле [7]:

$$w_{п} = (g r_{п} + \sigma / \rho_{ж} r_{п})^{0,5}; \quad (8)$$

где: g - ускорение сила тяжести; $r_{п}$ - радиус эквивалентного пузыря; σ - удельная свободная поверхностная энергия на границе газовой пузырь жидкости; $\rho_{ж}$ - плотность жидкой фазы.

Величину радиуса эквивалентного пузыря приняли равной радиусу пузыря критического размера. Такой выбор сделан из следующих соображений. При продувке в султаны всплывают пузыри различной величины от менее 1 мм до грибо-

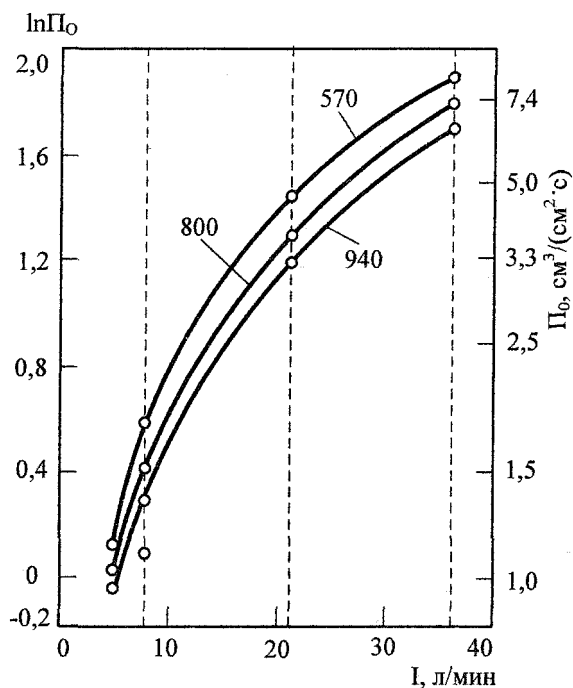


Рис. 5. Изменение плотности газового потока на оси султана в зависимости от интенсивности продувки и высоты над соплом (цифры у кривых, мм)

видных с базовым диаметром до 30 и более миллиметров. Как известно, при групповом движении происходит ускорение подъема пузырей, движущихся в следе предыдущего крупного пузыря; такие пузыри и рои быстро настигают ведущий и сливаются с ним. Одновременно происходит дробление крупных пузырей. В этих условиях приняли, что средний размер всплывающих пузырей равен критическому, радиус которого оценивали по работе [8]. Для системы вода - воздух радиус эквивалентного пузыря критического размера $r_n = 1,1...1,2$ см, $w_n = 0,33$ м/с.

Следует отметить, что при оценке среднего значения r_n другими методами, например по работе [9], размеры радиусов в зависимости от плотности газового потока по зонам находятся в пределах 0,3...0,9 см (меньшие значения относятся к периферии, большие к центральной зоне). Однако рассчитанные по уравнению (8) приведенные скорости пузырей минимального радиуса отличаются от скорости пузырей критического размера не более, чем на 30 % ($w_n = 0,23$ м/с при $r_n = 0,3$ см); значения же ϕ - примерно на 10...15% выше. При $r_n > 0,8$ см истинная газонасыщенность для обоих вариантов практически одинакова.

Истинная скорость жидкости центральной части султана при безразмерном радиусе $\rho < 0,6$, изменяясь в зависимости от режима продувки и расстояния от сопла, в большинстве случаев колеблется в относительно небольшом диапазоне - в пределах 0,15...0,30 м/с [4].

Поэтому, исходя из структуры уравнения (6), следует ожидать достаточно жесткую связь между истинной газонасыщенностью и плотностью газового потока по радиальным зонам султана и понижения ее величины от центра к границам по экспоненте вида:

$$\phi_i = \phi_0 \cdot \exp(-b\rho_i), \quad (9)$$

где ϕ_0 - истинная газонасыщенность на оси султана.

На рис. 6 и 7 представлены названные связи для трех высот при $I = 38$ л/мин.

Угол расширения султана [половина угла расширения конуса султана ($\beta/2$)] считают постоянным вне начального участка газовой струи, конкретное значение которого часто связывается со скоростью истечения газа из сопла. Влияние скорости оценивается по-разному: так, например, в работе [10] нашли, что он возрастает с числом Маха на срезе сопла, в работе [11] для дозвуковых струй

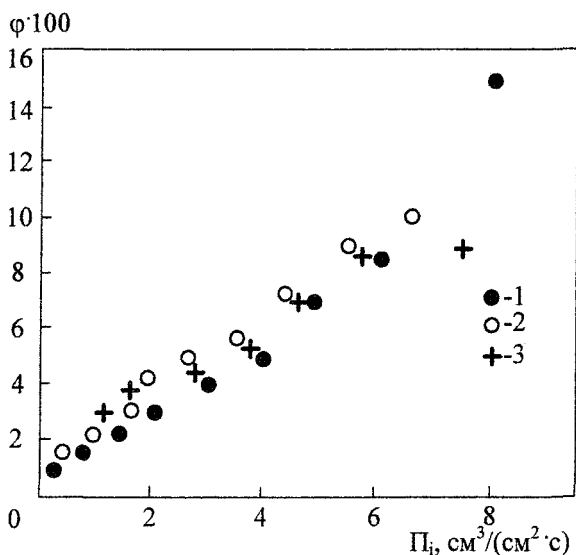


Рис. 6. Зависимость величины истинного объемного газосодержания султана от плотности газового потока: 1, 2, 3 - соответственно для высот 570, 800 и 940 мм

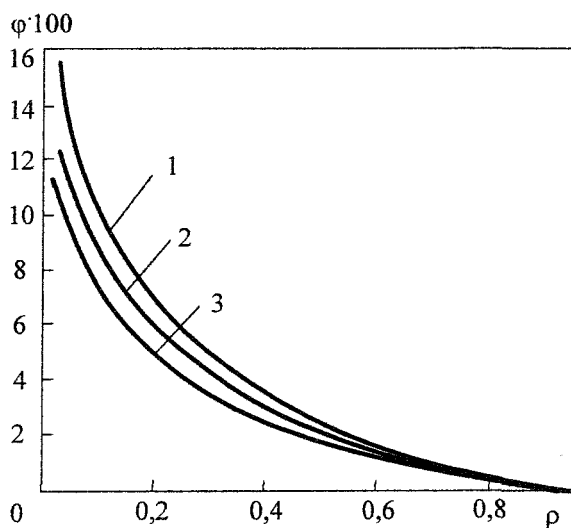


Рис. 7. Зависимость величины истинного объемного газосодержания султана от безразмерного радиуса сечения султана: 1, 2, 3 - соответственно для высот 570, 800 и 940 мм

угол оценивается в 8,5 град, при сверхзвуковых уменьшается до 5,7 град; в работе [12] связывают его величину со степенной функцией расхода газа.

Эксперименты показали, что в целом угол расширения определяется плотностью газового потока на срезе сопла (P_c), причем по мере подъема его величина уменьшается (рис. 8).

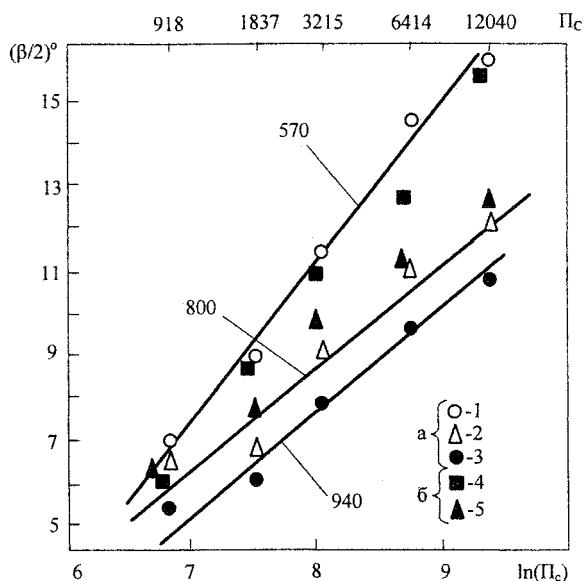


Рис. 8. Зависимость угла расширения газового сопла от плотности газового потока на срезе сопла и от высоты над соплом: 1, 2, 3 – соответственно для высот 570, 800 и 940 мм; а – одиночное сопло, б – пучок из пяти сопел

Здесь сопоставлены величины $\beta/2$ и $\ln(P_c)$ при пяти режимах продувки на трех исследованных нами высотах. Видно, что на каждой высоте проявляется линейная связь между указанными величинами при коэффициентах корреляции 0,992...0,994. Здесь же показаны значения углов расширения при продувке через пять кучно расположенных отверстий с эквивалентным диаметром 3,1 мм [5]. Результаты второго варианта отличаются не более чем на 1 град. Такие логарифмические связи естественны при расширении сопла за счет массопереноса пузырьков.

Выводы

На холодной модели методом дистанционного лазерного зондирования изучалось распределение газовой фазы в трех горизонтальных сечениях восходящего газожидкостного потока при продувке снизу. Найдено, что, распределение плотности газового потока в горизонтальном сечении описывается экспоненциальной зависимостью; распределение газового потока выше основного уча-

стка в поперечном сечении подобно, т.е. не зависит от интенсивности подачи газа и от высоты сечения над соплом. Истинное объемное газосодержание потока максимально на его оси и понижается по мере удаления от нее по экспоненте. Угол расширения газового потока в целом определяется плотностью газового потока на срезе сопла; по мере подъема его величина уменьшается. Результаты исследования могут использоваться при построении моделей барботажного перемешивания расплавов.

Литература

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование/ Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. - 550 с.
2. Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. - М. Металлургия, 1993. -151 с.
3. Шторм Р. Теория вероятности. Математическая статистика. Статистический контроль качества/Пер. с нем. - М.: Мир. 1970. - 368 с.
4. Коган А.Е. Распределение газовой фазы в зоне барботажа при продувке снизу// Изв. вузов. Черная металлургия. - 1995. - № 8. - С. 36-38.
5. Коган А.Е. Поле скоростей жидкости в восходящем газожидкостном потоке при продувке через нижнее сопло// Изв. вузов. Черная металлургия. - 1996. - №2.- С. 5-8.
6. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения/Пер. с англ. - М.: Мир, 1972.- 440 с.
7. Маленков И.Г., О движении больших пузырей газа, всплывающих в жидкости// Прикладная математика и теоретическая физика. - 1968. — № 6. - С. 130-133.
8. Левич ВТ. Физико-химическая гидродинамика. — М.: Физматгиз, 1959. - 659 с.
9. Сано М., Мори К. Модель циркуляционного течения в расплавленном металле для специального случая барботажа ванны и ее применение к процессам инжектирования газа// Инжекционная металлургия - 83. Лулеа, Швеция. 1983. - М: Металлургия, 1986. - С. 124-134.
10. Белов В.И., Белов В. Т. Закономерности распространения газовой струи в жидкости// Изв. вузов. Черная металлургия. -1983. -№4. - С. 90-92.
11. Характеристики пузырей в зоне подъема вертикальной воздушно-водяной струи пузырьков/ М. Игути, К. Озава, Х. Томида, Д-И. Морито// Тэцу то хаганэ. Iron and Steel Inst. Yarp. - 1991. - 77, Ия 9.-Р. 1426-1575.
12. Штейнмец Е., Шеллер П.Р. Условия течения расплава в ковше при продувке через пористый блок// Черные металлы.- 1987. -№ 9. -С. 23-32.