

УДК 532.5, 621.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРУЖЕННОЙ В РЕЗЕРВУАР С ВОДОЙ ДВУХФАЗНОЙ (ВОЗДУХ — ВОДА) ПУЗЫРЬКОВОЙ СТРУИ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ПРОЦЕСС НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

А. Хан, Е. К. Спиридонов, Д. Ф. Хабарова, Х. Санаулла*,
А. Бахадар**, М. Звави**, М. Алгарни**, Б. Фелембан***

Южно-Уральский государственный университет, 454080 Челябинск, Россия

* Университет Тон Дук Тханг, Хошимин, Вьетнам

** Университет короля Абдулазиза, 21911 Рабиг, Саудовская Аравия

*** Таифский университет, Таиф, Саудовская Аравия

E-mails: drafrasyabkhan7@gmail.com, spiridonov@susu.ru, khabarovad@susu.ru,
khairuddin.sanaullah@tdtu.edu.vn, absali@kau.edu.sa, mzwawi@kau.edu.sa,
malgarni1@kau.edu.sa, b.felemban@tu.edu.sa

Приводятся результаты маломасштабного эксперимента, в котором исследуются основные характеристики двухфазного (воздух — вода) течения, имеющего место в производственном процессе непрерывного литья. Жидкость и газ подавались в подводную трубку через кольцеобразную насадку. Жидкость в виде пленки стекала по стенке подводной трубки в двухфазную (воздух — вода) среду, содержащую пузырьки. Показано, что характеристики течения (содержание газа, горизонтальная скорость струи и др.), определенные с использованием модели дрейфа потока, согласуются с экспериментальными данными. Исследована зависимость угла наклона истекающей из сопла струи от глубины погружения сопла в жидкость и скорости движения жидкости в подводной трубке.

Ключевые слова: литье, гидродинамика, пузырьки, струя, подводная трубка.

DOI: 10.15372/PMTF20200411

Введение. На различных стадиях производства стали для перемешивания или дегазации расплава используется закачка газа, поскольку альтернативные методы оказывают негативное влияние на окружающую среду. В частности, закачка аргона применяется при непрерывном литье стали. При этом для предотвращения загрязнения внутренней поверхности сопла оксидами алюминия закачка аргона осуществляется через погруженное в жидкость сопло. В потоке расплавленной стали, истекающей из сопла, содержится большое количество пузырьков относительно небольшого размера. Крупные пузырьки, имеющие большую плавучесть, поднимаются к поверхности расплава. Более мелкие пузырьки размером менее 1 мм остаются в расплаве, а следовательно, и в готовой стали,

Работа выполнена при финансовой поддержке Южно-Уральского государственного университета.

© Хан А., Спиридонов Е. К., Хабарова Д. Ф., Санаулла Х., Бахадар А.,
Звави М., Алгарни М., Фелембан Б., 2020

образуя точечные дефекты [1]. В современном машиностроении используется сталь высокого качества, что обуславливает ужесточение требований к процессу очистки готового продукта. Марка стали и область ее применения зависят от допустимого количества примесей. Например, в листовой стали, предназначенной для автомобилестроения, максимальная объемная доля углерода, азота и кислорода не должна превышать 0,003, 0,003 и 0,002 % соответственно [2, 3]. Объем неметаллических включений в литых сталях не должен превышать 100 мкм³. Наличие даже одиночных крупных включений в листовой стали, изготовленной методом литья, может сделать ее непригодной для применения в промышленности. На этапе затвердевания литой стали высока вероятность появления в ней пузырьков размером менее 3 мм, которые называются также точечными отверстиями, или газовыми пузырьками [4, 5]. Установлено, что 93 % таких отверстий возникают вследствие образования пузырьков аргона, остальные 7 % — вследствие образования пузырьков азота и кислорода [4, 5]. Обычно в процессе литья стали [5] пузырьки возникают при инъекции газообразного аргона через погруженное сопло и в основном имеют размер менее 1 мм [6–8]. Другие, менее существенные включения образуются при выделении газов CO, N₂ и H₂ на стадии затвердевания.

При исследовании режимов и характеристик процесса непрерывного литья стали в качестве модели расплавленной стали использовалась вода. Путем визуального наблюдения и с использованием результатов измерения кинетической энергии турбулентного движения [7] установлено, что кривизна свободной поверхности жидкости (мениск) резко увеличивается с уменьшением глубины погружения входного сопла. Также установлено, что при достаточно большой глубине погружения турбулентность, обусловленная наличием мениска, существенно уменьшается, при этом кривизна свободной поверхности жидкости также уменьшается [7, 8]. При использовании воды в качестве модели жидкого металла интенсивность турбулентности уменьшалась путем подбора глубины погружения сопла, скорости потока аргона и геометрии сопла. Однако все эти параметры зависят от скорости литья и ширины литейной формы [9–11].

Проведение экспериментов с жидким металлом существенно затруднено вследствие наличия агрессивной среды, непрозрачности расплава и высокой температуры (1700 °C) [12]. Как отмечено выше, альтернативой жидкому металлу является вода, кинематическая вязкость которой такая же, как у расплавленной стали. Аргон можно заменить воздухом, поскольку его плотность близка к плотности воздуха при комнатной температуре.

В работе [13] представлены результаты экспериментального исследования процесса истечения смеси воды и воздуха из сопла. В частности, была измерена локальная скорость частиц жидкости. Жидкость и газ поступали в резервуар через трубку, закрепленную с одной стороны.

В данной работе приводятся результаты визуального наблюдения и исследования с использованием фотосъемки течений в подводящей трубке и литейной форме (резервуаре). Исследовалось взаимодействие двухфазной (воздух — вода) струи с поперечным потоком. Экспериментальное оборудование не является точной моделью оборудования, применяемого в производственном процессе. Для обработки экспериментальных данных о пузырьковом течении в подводящей трубке и характеристиках погруженной в жидкость двухфазной струи, истекающей из трубки в резервуар, использовалась модель дрейфа потока.

1. Методика эксперимента. Ниже описываются экспериментальная установка и методы измерения параметров струи.

1.1. *Экспериментальное оборудование.* На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Вода циркулирует в замкнутом контуре с помощью центробежного насоса, воздух подается из лабораторного воздухопровода. Резервуар, моделирующий литейную

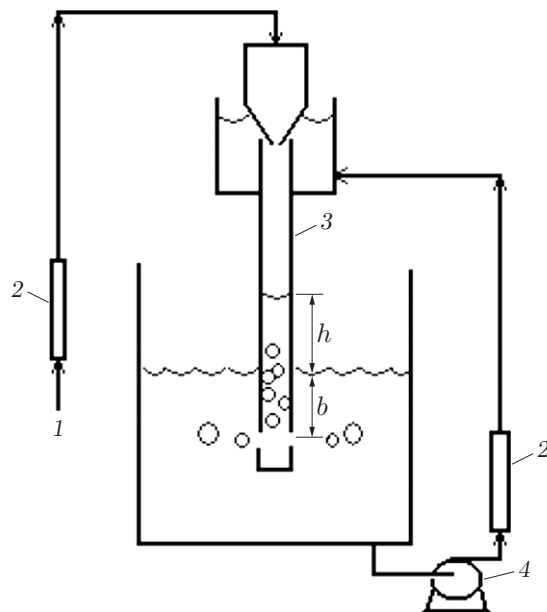


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — воздух, 2 — ротаметр, 3 — подводящая трубка, 4 — насос

форму, имеет длину 0,24 м, ширину 0,105 м, глубину 0,37 м. Длина сливного вертикального канала, в котором смешиваются вода и воздух, равна 600 мм, его внутренний диаметр — 29 мм. Бак с водой соединен с основанием концентрической трубки, прикрепленной к верхней части подводящей трубки. Воздух подается через коническую камеру, размещенную на входе в подводящую трубку. Вода перетекает из наружной трубки в подводящую трубку через отверстие между стенкой трубки и сходящейся поверхностью конической воздушной камеры. Нисходящий поток в подводящей трубке представляет собой кольцеобразную пленку, стекающую по ее стенке в область, заполненную пузырьками. Пузырьки увлекаются жидкостью и выходят из трубки через два сопла, диаметр каждого из которых равен 15 мм. В баке они движутся по направлению к поверхности жидкости. В экспериментах, результаты которых приводятся в данной работе, расход жидкости изменялся в диапазоне $1,2 \cdot 10^{-4} \div 6,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, расход воздуха — в диапазоне $8,3 \cdot 10^{-6} \div 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$.

1.2. *Методы измерения параметров потока.* Структура потока в подводящей трубке и баке определялась визуально. Как отмечено выше, данная экспериментальная установка не является уменьшенной моделью оборудования, используемого в процессе непрерывного литья. Однако в эксперименте использовались практически точные значения скорости, поэтому кинематика процесса, наблюдаемого в эксперименте, соответствует кинематике производственного процесса. Исследование процесса непрерывного литья осложняется наличием в потоке двух фаз. Поэтому в эксперименте использовались приведенные скорости в подводящей трубке и сопле (приведенная скорость — отношение среднего по времени объемного расхода данной фазы через поперечное сечение потока к полной площади этого сечения).

В табл. 1 приведены характеристики жидкостей и газов, условия проведения экспериментов, геометрические характеристики сопла и ванны для расплава, в табл. 2 — значения приведенных скоростей жидкости v_L и газа v_G в подводящей трубке и сопле, в табл. 3 — значения чисел Рейнольдса, Вебера и Фруда. В подводящей трубке значения числа Рейнольдса для жидкости, вычисленные с использованием характерной длины и плотности, имеющих место в промышленных условиях, существенно больше, чем в эксперименте, в сопле числа Рейнольдса, Вебера и Фруда для газа различаются незначительно.

Таблица 1

Характеристики жидкостей и газов, условия проведения экспериментов, геометрические характеристики сопла и ванны для расплава

Параметр	Производственный процесс	Данные работы [13]	Данные настоящей работы
Жидкость:	Расплавленная сталь	Вода	Вода
T_L , К	1833 ÷ 1853	293	293
ρ_L , кг/м ³	7000 ÷ 7200	1000	1000
Газ:	Аргон	Воздух	Воздух
T_G , К	293 ÷ 1853	293	293
ρ_G , кг/м ³	1,60 ÷ 0,25	1,3	1,2
Ванна для расплава:			
длина, м	0,85 ÷ 2,30	0,3	0,24
ширина, м	0,23 ÷ 0,25	0,15	0,105
глубина, м	—	0,5	0,37
Диаметр подводящей трубки, м	0,076	—	0,029
Форма сопла	Квадрат	Круг	Круг
Количество сопел	2	1	2
Размеры сопла, м	0,07 × 0,07, 0,09 × 0,09	0,009	0,015
Q_L , кг/мин	3000 ÷ 5000	2,5 ÷ 7,5	7,2 ÷ 36,0
Q_G , л/мин	10 ÷ 70	0,24 ÷ 1,44	0,5 ÷ 2,0

Таблица 2

Значения приведенных скоростей жидкости и газа в подводящей трубке и сопле

Параметр	Подводящая трубка			Сопло		
	Производственный процесс	Данные работы [13]	Данные настоящей работы	Производственный процесс	Данные работы [13]	Данные настоящей работы
v_L	1,500 ÷ 2,550	—	0,180 ÷ 0,910	0,400 ÷ 1,500	0,650 ÷ 1,960	0,340 ÷ 1,700
v_G	0,037 ÷ 0,260	—	0,013 ÷ 0,050	0,020 ÷ 0,240	0,062 ÷ 0,360	0,024 ÷ 0,090

Таблица 3

Числа Рейнольдса, Вебера и Фруда, вычисленные с использованием приведенных скоростей

Параметр	Производственный процесс	Данные работы [13]	Данные настоящей работы
Подводящая трубка:			
Re_L	$8,208 \cdot 10^5 \div 1,370 \cdot 10^6$	—	5200 ÷ 26 390
Re_G	156 ÷ 1094	—	25 ÷ 97
We_L	3078 ÷ 8550	—	13 ÷ 329
We_G	$2,60 \cdot 10^{-4} \div 1,29 \cdot 10^{-2}$	—	$4 \cdot 10^{-5} \div 6 \cdot 10^{-4}$
Fr_L	1,74 ÷ 2,90	—	0,34 ÷ 1,70
Fr_G	0,042 ÷ 0,300	—	0,024 ÷ 0,093
Сопло:			
Re_L	259 200 ÷ 756 000	5850 ÷ 17 640	5100 ÷ 25 500
Re_G	78 ÷ 933	37 ÷ 228	24 ÷ 96
We_L	202 ÷ 2835	52 ÷ 474	24 ÷ 594
We_G	$3 \cdot 10^{-5} \div 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-4} \div 2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-4} \div 2,0 \cdot 10^{-3}$
Fr_L	0,48 ÷ 1,80	2,2 ÷ 6,6	0,86 ÷ 4,30
Fr_G	0,024 ÷ 0,290	0,21 ÷ 1,28	0,06 ÷ 0,23

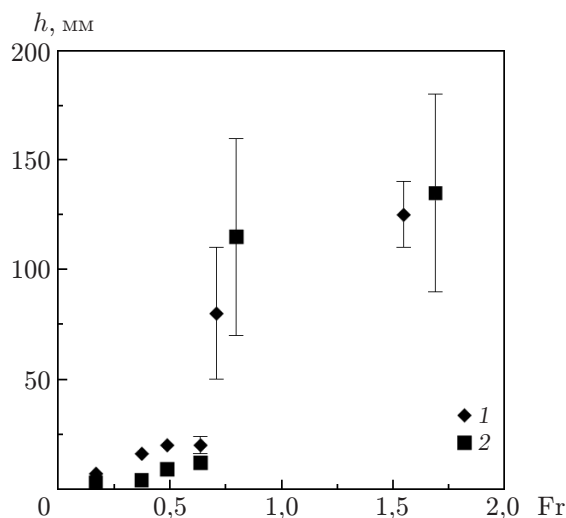


Рис. 2. Зависимость высоты столба двухфазной жидкости h от числа Фруда в подводящей трубке при различных значениях величины b :
 1 — $b = 95$ мм, 2 — $b = 205$ мм

2. Результаты исследования и их обсуждение. Ниже приводятся результаты проведенных экспериментов.

2.1. *Поток двухфазной среды в подводящей трубке.* Вода переливается в подводящую трубку, при этом образуется пленка, которая стекает по стенке к поверхности резервуара (см. рис. 1). Вследствие наличия волн на поверхности пленки и возникновения турбулентности при погружении пленки на поверхности воды, находящейся в подводящей трубке, появляются возмущения. В поток жидкости поступает воздух, который движется вниз и выходит из трубки через два сопла, если локальная скорость жидкости превышает скорость поднимающихся вверх пузырьков. По мере образования в жидкости пузырьков содержание газа увеличивается и граница раздела жидкости и газа (воздуха) поднимается вверх по трубке. Высота части столба двухфазной смеси, находящейся выше поверхности жидкости в резервуаре, зависит от скорости жидкости и газа. Для различных значений скорости жидкости и расстояний между соплом и поверхностью жидкости в резервуаре b определялась высота h части столба двухфазной смеси, находящейся выше поверхности жидкости в резервуаре (см. рис. 1). На рис. 2 приведена зависимость величины h от числа Фруда при $b = 95, 205$ мм.

Высота h существенно зависит от свойств пленки, стекающей по стенке трубки к поверхности жидкости. При очень малой скорости жидкости образуется тонкая пленка с волнами на ней, имеющими небольшую амплитуду. В этом случае пузырьки практически не возникают. При увеличении скорости жидкости до значения, равного 3 м/с, количество пузырьков не увеличивается. При превышении этой скорости высота столба двухфазной смеси h резко увеличивается, причем при фиксированной скорости жидкости она не является постоянной, а колеблется в окрестности среднего значения. По мере истечения воздуха с поверхности активной зоны поверхность раздела жидкости и газа поднимается, в результате чего гидростатическое давление жидкости в трубке и резервуаре уравнивается. Под действием сил инерции погружающейся струи пузырьки выталкиваются из трубки через сопла, при этом высота столба двухфазной среды h уменьшается. Однако по мере того, как воздух вовлекается пленкой в поток жидкости, высота столба h увеличивается и достигает максимального значения. По флуктуациям этой высоты можно судить о количестве воздуха в трубке в данный момент времени. Результаты визуальных наблюдений

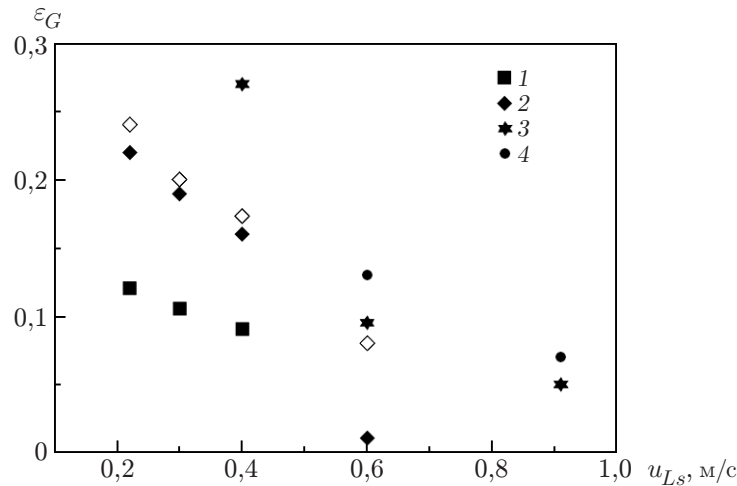


Рис. 3. Зависимость содержания газа от приведенной скорости жидкости при различных значениях приведенной скорости газа: темные точки — $L = b$ (1 — $u_{Gs} = 0,013$ м/с, 2 — $u_{Gs} = 0,025$ м/с, 3 — $u_{Gs} = 0,038$ м/с, 4 — $u_{Gs} = 0,05$ м/с), светлые точки — $L = h$

показывают, что глубина погружения сопла оказывает незначительное влияние на процесс вовлечения воздуха в трубку. При больших скоростях течения граница раздела воздуха и жидкости сильно возмущена, вследствие чего вовлечение воздуха значительно. Струя, стекающая по стенке трубки, проникает в жидкость на расстояние, приблизительно равное $1/3$ высоты столба двухфазной смеси. Подводная струя увлекает вниз мелкие пузырьки, которые по мере продвижения объединяются, образуя крупные пузырьки, в результате чего скорость жидкости уменьшается. Крупные пузырьки поднимаются по трубке. Поскольку силы инерции жидкости преобладают над силами плавучести пузырьков, крупные пузырьки увлекаются на дно трубки, в область ускоренного движения жидкости. Захваченные ускоряющимся потоком крупные пузырьки проходят через сопла и вследствие больших деформаций сдвига распадаются на более мелкие.

По высоте части столба двухфазной смеси h можно приблизительно оценить содержание газа в подводящей трубке. Однако более надежный метод определения содержания газа основан на использовании вычисленных значений скорости пузырьков u_B , расхода жидкости Q_L и расхода газа Q_G .

Объем газа, содержащегося в подводящей трубке в некоторый момент времени, вычисляется по формуле

$$V_G = Q_G L / u_B, \quad (1)$$

где L — длина области, заполненной двухфазной средой; L/u_B — время прохождения пузырька по этой области; $u_B = u_d - u_T$; $u_T = 0,2$ м/с — скорость всплытия пузырька. На рис. 3 представлена зависимость содержания газа ε_G от приведенной скорости жидкости u_{Ls} при различных значениях приведенной скорости газа u_{Gs} . При вычислении содержания газа принималось $L = b$ (темные точки) либо $L = h$ (светлые точки). При скоростях жидкости, меньших 0,6 м/с, высота h части столба двухфазной смеси, находящейся выше поверхности жидкости в резервуаре, невелика, поэтому значения содержания газа, вычисленные с использованием двух указанных выше значений величины L , различаются несущественно. Однако при скорости жидкости, равной 0,6 м/с, интенсивность перемешивания жидкости в пленке и поступающего воздуха увеличивается, что приводит к существенному увеличению высоты столба h , при этом различие значений содержания газа,

вычисленных с использованием различных значений величины L , также значительно увеличивается. Погрешность определения содержания газа зависит от точности определения высоты h столба двухфазной среды и при значительных колебаниях этой высоты может достигать $\pm 17\%$.

В различных работах изучалось течение двухфазной (воздух — вода) среды, геометрия которого подобна геометрии течения в подводной трубке. В [14] приведены результаты исследования пенной флотации, проведенного с использованием модели дрейфа потока, предложенной в работе [15]. В основе модели лежит определение скорости дрейфа каждой фазы, разности линейной скорости компонента и общего расхода потока, который в свою очередь является суммой приведенных скоростей каждой фазы. Скорость дрейфа потока определена как произведение скорости дрейфа и площади, занимаемой потоком каждой фазы. В предположении отсутствия дрейфа через плоскость, движущуюся со скоростью, равной приведенной скорости смеси газ — жидкость, движение системы можно описать с использованием уравнений движения каждой фазы.

Для газа имеем

$$J'_G = \varepsilon_G(v_G - u_{Ls}), \quad (2)$$

где J'_G — скорость дрейфа газа; v_G — скорость газа; u_{Gs} , u_{Ls} — приведенные скорости газа и жидкости. Поскольку $u_{Ls} = (1 - \varepsilon_G)v_L$, уравнение (2) записывается в следующем виде:

$$j'_G = u_{Gs}(1 - \varepsilon_G) - \varepsilon_G u_{Ls}. \quad (3)$$

В работе [15] дрейф потока описывается с использованием конечной скорости всплытия пузырька в жидкости бесконечной протяженности v_∞ :

$$j'_G = v_\infty g(\varepsilon_G)(1 - \varepsilon_G)\varepsilon_G \quad (4)$$

($g(\varepsilon_G)$ — функция, зависящая от физических свойств и размера пузырька [14]). Используя приведенную скорость в подводной трубке и определенное из уравнения (1) содержание газа, из уравнения (3) можно определить скорость дрейфа потока двухфазной среды. На рис. 4 представлена зависимость вычисленной таким способом скорости дрейфа потока от содержания газа при различных значениях приведенной скорости (точки), а также зависимость от содержания газа скорости дрейфа потока, вычисленной по уравнению (4) (линия). Из приведенных на рис. 4 зависимостей следует, что для описания течения в подводной трубке может быть использована модель дрейфа потока.

Отметим, что в данной работе результаты получены с использованием конической насадки, тщательно отцентрированной в подводной трубке. При наличии малого эксцентриситета на одной стороне трубки образуется пленка большей толщины, а на другой — меньшей. Вследствие этого на части поверхности пленки с большей толщиной образуется большее количество пузырьков, которые проходят через соответствующее сопло, что оказывает влияние на распределение жидкости между двумя соплами.

2.2. Двухфазная пузырьковая струя. Часть течения вне сопла представляет собой горизонтальную двухфазную (воздух — вода) струю в резервуаре с водой. Эта струя отклоняется вниз (относительно горизонтального положения) вследствие сохранившегося в ней количества движения жидкости, вытекающей из подводной трубки. Однако по мере удаления от сопла струя ослабевает и отклоняется вверх, поскольку доминирующими становятся силы плавучести, действующие на пузырьки. В резервуаре с водой наблюдались пузырьки диаметром до 6 мм. Размер пузырьков аргона, образующихся при непрерывном литье, неизвестен. Однако в работе [13] отмечено, что в готовой стали были обнаружены пузырьки диаметром до 300 мкм (следовательно, пузырьки диаметром более 300 мкм поднимаются к поверхности и попадают в атмосферу). В экспериментах, описываемых

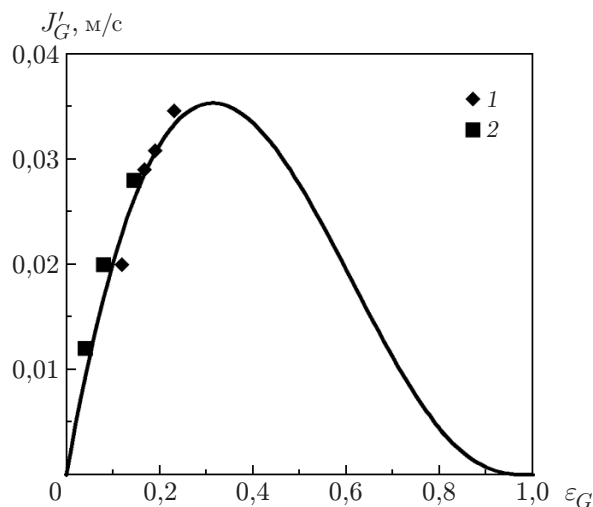


Рис. 4. Зависимость скорости дрейфа потока от содержания газа при различных значениях приведенной скорости: точки — расчет по уравнению (3) (1 — $u_{Ls} = 0,32$ м/с, 2 — $u_{Ls} = 0,58$ м/с), линия — расчет по уравнению (4)

в настоящей работе, пузырьки, диаметр которых меньше 300 мкм, также присутствовали. Таким образом, данные эксперименты адекватно моделируют процесс непрерывного литья.

Визуализация потока в резервуаре, моделирующем пресс-форму, проводилась с использованием тонкого металлического листа высотой 20 мм и шириной 1 мм, установленного напротив выходного отверстия одного из сопел. Свет направлялся в резервуар, и течение визуализировалось в свете, отраженном от частиц оксида алюминия. Из результатов наблюдений следует, что струя распространяется в резервуаре до тех пор, пока не столкнется с его стенкой. Затем она разбрызгивается во всех направлениях, создавая трехмерное течение. Однако основная часть потока распространяется либо вверх, либо вниз. Часть потока, двигавшаяся вверх, далее движется вдоль свободной поверхности по направлению к подводящей трубке, в то время как часть потока, двигавшаяся вниз, далее движется вдоль дна резервуара по направлению к подводящей трубке. В результате образуются четыре медленно движущиеся зоны рециркуляции. Содержащаяся в этих зонах жидкость возвращается к подводящей трубке. Вблизи стенок резервуара образуется шлейф из пузырьков, движущихся вверх и увлекающих за собой окружающую их жидкость. В результате возникает дополнительная циркуляция жидкости. Однако пузырьки, диаметр которых не превышает 1 мм, могут оказаться в зоне рециркуляции, находящейся под двухфазной струей.

От угла наклона, под которым струя выходит из сопла, существенно зависит характер течения в ванне с расплавом. Этот угол, в свою очередь, зависит от интенсивности турбулентного движения, глубины, на которую погружено сопло, геометрии ванны для расплава, а также от количества газа, вовлекаемого в поток, и положения области, в которой газ вовлекается в поток. Ниже приводятся результаты экспериментального исследования влияния скорости жидкости и глубины погружения сопла (при заданной геометрии ванны) на величину угла наклона струи, истекающей из сопла (рис. 5, 6). Значение угла наклона находилось в диапазоне $20 \pm 4^\circ$. При малой глубине погружения струя существенно отклоняется вниз. С увеличением глубины погружения расстояние от сопла до дна резервуара уменьшается, в результате чего усиливается рециркуляция жидкости и струя сильнее изгибается вверх.

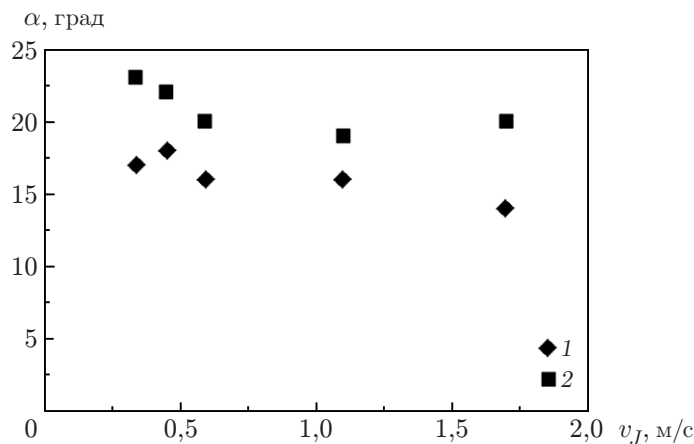


Рис. 5. Зависимость угла наклона двухфазной струи α от ее скорости v_J при различных значениях величины b :

1 — $b = 95$ мм, 2 — $b = 205$ мм

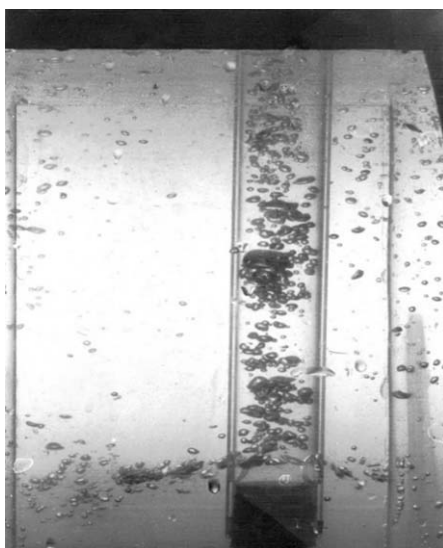


Рис. 6. Струя, истекающая из сопла

Анализ закономерностей отклонения струи проведен в работе [13]. Предполагалось, что двухфазная среда является разжиженной и взаимодействие пузырьков практически отсутствует; проскальзывание в поперечном направлении отсутствует, поэтому скорость пузырьков равна скорости жидкости; силы плавучести уравновешиваются силами сопротивления и вертикальная составляющая скорости значительно меньше горизонтальной. Условие равенства сил плавучести силам сопротивления записывается в виде

$$(\rho_L - \rho_G)gV_G = c_D D l \rho_m u_x^2 / 2,$$

где V_G — объем газа в контрольном объеме; ρ_L — плотность жидкости; ρ_G — плотность газа; g — ускорение свободного падения; c_D — коэффициент сопротивления; l — характерный размер контрольного объема; D — диаметр струи, вытекающей из сопла; u_x — скорость струи в направлении оси x ; ρ_m — средняя плотность двухфазной среды в контрольном объеме. Объем газа в контрольном объеме можно приближенно оценить величиной $Q_G L / u_V$ или $Q_G L / u_J$. Значения D , u_J в точках, находящихся на некотором расстоянии

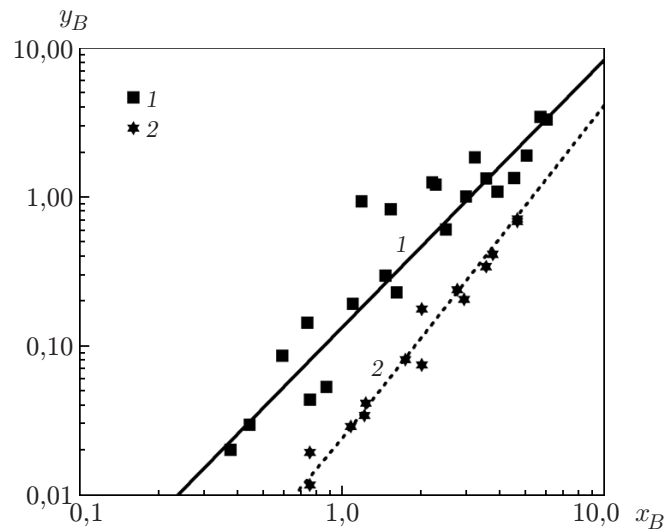


Рис. 7. Зависимость величины отклонения точек струи y_B от расстояния между этими точками и соплом x_B :

точки — экспериментальные данные, линии — аппроксимации экспериментальных данных зависимостью (5); 1 — данные настоящей работы ($K = 0,13$, $n = 1,8$), 2 — данные [13] ($K = 0,0233$, $n = 2,24$)

от сопла, не известны, но их можно вычислить по соответствующим значениям в сопле, используя закон сохранения количества движения в осевом направлении. В предположении, что среда является разжиженной, имеем $\rho_L - \rho_G \approx \rho m$. С учетом сказанного выше получаем

$$u_x = \left(\frac{2}{c_D}\right)^{1/2} \left(\frac{gQ_G}{D_N u_N}\right)^{1/2}.$$

Полагая коэффициент сопротивления постоянным, а первый множитель — равным единице, находим отношение скоростей

$$r_v = \frac{u_N}{u_x} = \frac{u_N}{(gQ_G/(D_N u_N))^{1/2}},$$

где u_N — средняя скорость воды, истекающей из трубки; D_N — внутренний диаметр сопла. Это выражение может быть использовано для определения безразмерной величины отклонения струи (величины отклонения, отнесенной к расстоянию от сопла в осевом направлении). В работе [13] предложена следующая аппроксимация этой зависимости:

$$\frac{y_B}{D_N r_v} = K \left(\frac{x}{D_N r_v}\right)^n. \tag{5}$$

Здесь y_B — величина отклонения пузырьковой струи в вертикальном направлении; $K = 0,0233$; $n = 2,24$. При этих значениях параметров K , n зависимости (5) соответствует линия 2 на рис. 7. Результаты экспериментов, описываемых в данной работе, аппроксимируются зависимостью (5) при $K = 0,13$, $n = 1,8$ (линия 1 на рис. 7). Полученные экспериментальные данные отличаются от данных, приведенных в работе [13]. По-видимому, это обусловлено тем, что в экспериментах [13] струя истекала в резервуар из трубки, а не из узкого сопла.

Заключение. В проведенных экспериментах большинство безразмерных параметров (числа Рейнольдса, Вебера, Фруда) в потоке на выходе из сопла в экспериментальной установке были приблизительно такими же, как в реальном процессе непрерывного литья. Получены следующие результаты экспериментальных исследований течения в подводящей трубке и течения струи.

Как правило, высота части столба двухфазной среды, отсчитываемая от уровня поверхности жидкости в резервуаре, увеличивается с увеличением скорости жидкости. Если скорость жидкости превышает критическое значение, равное 3 м/с, происходит существенное увеличение этой высоты.

При больших скоростях потока поверхность раздела жидкости и воздуха сильно возмущена, при этом происходит захват значительного количества воздуха. Стекающая по стенке трубки струя проникает в жидкость на расстояние, приближенно равное $1/3$ высоты столба двухфазной смеси.

При скоростях жидкости, меньших 0,6 м/с, высота части столба двухфазной смеси, находящейся выше поверхности жидкости в резервуаре, невелика. Однако при скорости жидкости, равной 0,6 м/с, интенсивность перемешивания жидкости в пленке и поступающего воздуха увеличивается, что приводит к существенному увеличению высоты этой части столба двухфазной смеси.

Модель дрейфа потока применима для описания течения в подводящей трубке.

В целом характер течения в литейной форме (величина угла наклона струи, положение зон рециркуляции и точек столкновения струи со стенками) соответствует характеру течения в производственном процессе непрерывного литья.

С увеличением глубины погружения сопла величина отклонения вниз струи, истекающей из него, уменьшается.

Для оценки величины отклонения струи в пресс-форме использован подход, предложенный в работе [13] и основанный на сравнении сил инерции и сил плавучести. Данные о величине отклонения струи, полученные в описанных в настоящей работе экспериментах, отличаются от данных, приведенных в работе [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kasai N., Watanabe Y., Kajiwara T., Toyoda M.** Mechanism of fine bubbles entrapment beneath the surface of continuously cast slabs // *Tetsu-to-Hagane*. 1997. V. 83. P. 24–29. DOI: 10.2355/tetsutohagane1955.83.1_24.
2. **Yang W., Wang X., Zhang L., et al.** Cleanliness of low carbon aluminum-killed steels during secondary refining processes // *Steel Res. Intern.* 2013. V. 84. P. 473–489. DOI: 10.1002/srin.201200213.
3. **Briant C. L.** Impurities in engineering materials: impact, reliability and control // *MRS Bull.* 2000. V. 25, iss. 2. P. 51. DOI: 10.1017/s0883769400064885.
4. **Hibbeler L. C., Thomas B. G.** Investigation of mold flux entrainment in CC molds due to shear layer instability // *Proc. of the AISTech*. 2010, Pittsburgh (USA), 4–7 May 2010. Warrendale: Assoc. iron and steel technol., 2010. P. 1–16.
5. **Hagemann R., Schwarze R., Heller H. P., Scheller P. R.** Model investigations on the stability of the steel-slag interface in continuous-casting process // *Metall. Materials Trans. B. Process Metall. Materials Process. Sci.* 2013. V. 44. P. 80–90. DOI: 10.1007/s11663-012-9749-9.
6. **Yamashita S., Iguchi M.** Mechanism of mold powder entrapment caused by large argon bubble in continuous casting mold // *ISIJ Intern.* 2001. V. 41. P. 1529–1531. DOI: 10.2355/isijinternational.41.1529.

7. **He Q., Evans G., Serje R., Jaques T.** Fluid flow and mold slag entrainment in the continuous twin-slab casting mould // AISTech. Conf. Proc. 2009. V. 2. P. 573. [Electron. resource]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/289257872_Fluid_flow_and_mold_slag_entrapment_in_the_continuous_twin-slab_casting_mould.
8. **Scheller P. R., Sahebkar B., Volkova O.** Interaction between the flow conditions and temperature distribution in the continuous slab caster mold // Annals of the Assambly for 13th Intern. heat transfer conf., Sydney (Australia), 13–18 Aug. 2006. Redding: Begell House, 2006. DOI: 10.1615/ihtc13.p13.10.
9. **Andrzejewski P., Köhler K.-U., Pluschkell W.** Model investigations on the fluid flow in continuous casting moulds of wide dimensions // Steel Res. Intern. 1992. V. 63. P. 242–246. DOI: 10.1002/srin.199200508.
10. **Thomas B. G., Huang X., Sussman R. C.** Simulation of argon gas flow effects in a continuous slab caster // Metall. Materials Trans. B. Process Metall. Materials Process. Sci. 1994. V. 25. P. 527–547. DOI: 10.1007/BF02650074.
11. **Watanabe T., Iguchi M.** Water model experiments on the effect of an argon bubble on the meniscus near the immersion nozzle // ISIJ Intern. 2009. V. 49. P. 182–188. DOI: 10.2355/isijinternational.49.182.
12. **Kamal M., Sahai Y.** Modeling of melt flow and surface standing waves in a continuous casting mold // Steel Res. Intern. 2005. V. 76. P. 44–52. DOI: 10.1002/srin.200505971.
13. **Iguchi M., Kasai N.** Water model study of horizontal molten steel-Ar two-phase jet in a continuous casting mold // Metall. Materials Trans. B. Process Metall. Materials Process. Sci. 2000. V. 31. P. 453–460. DOI: 10.1007/s11663-000-0151-7.
14. **Evans G. M.** A study of a plunging jet bubble column: Ph. D. Thesis. Newcastle: Univ. of Newcastle, 1990.
15. **Wallis G. B.** One-dimensional two-phase flow. N. Y.: McGraw-Hill, 1969.

*Поступила в редакцию 18/XI 2019 г.,
после доработки — 27/I 2020 г.
Принята к публикации 2/III 2020 г.*
