

Рис. 2 иллюстрирует результаты расчетов без пленки с плотностью тока $i = 60 \text{ А/м}^2$. На рис. 3 показаны результаты счета для случая, когда пленка расположена у оси ячейки, а плотность тока равна 100 А/м^2 , что обеспечивает постоянство тока по всей ячейке. Последний рис. 4 отражает результаты для случая, когда пленка находится у стенки солевого осадка (здесь также для поддержания постоянства тока через ячейку было взято $i = 100 \text{ А/м}^2$). Из рис. 2 следует, что ионы Pb^{2+} при движении в поре концентрируются, практически, возле поверхности осадка (кривая 6), что в какой-то степени указывает на наличие поверхностной проводимости в дисперсных средах [4], в средней части ячейки вплоть до самой боковой поверхности (кривые 1– 5) изменение концентраций проходит одинаково (в масштабах приведенного рисунка).

Влияние непроводящей пленки хорошо просматривается на следующих рисунках. Из рис. 3 следует, что на оси ячейки концентрация ионов практически равна нулю, на линии $\eta = 0.2$ (кривая 2, соответствующая границе оксидной пленки) наблюдается довольно резкое падение; менее резкое проходит в областях незатененных оксидной пленкой. Кривая 6, также как и на рис. 2, показывает изменение концентрации у стенки солевого осадка. В случае, если оксидная пленка образуется впритык к солевому осадку, то в незатененной части ячейки (кривые 1, 2) изменение концентраций похоже на рис. 2, а в затененной (кривые 3 – 6) – падение очень быстрое.

Выводы. Таким образом, в результате расчетов получено, что в масштабах порового пространства солевого пористого осадка на электроде, можно с хорошей степенью точности проследить за поведением зарядонесущих компонентов.

Библіографічні посилання

1. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия / Л. И. Антропов. – М., 1984. – 519 с.
2. Дамаскин Б. Б. Электрохимия / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Г. А. Цирлина. – М., 2006. – 672 с.
3. Феттер К. Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – М., 1967. – 856 с.
4. Духин С. С. Электропроводность и электрические свойства дисперсных систем / С. С. Духин. – Киев, 1975. – 246 с.

Надійшла до редколегії 26.11.2012.

УДК 532.516

В. И. Елисеев, А. П. Толстопят, Л. А. Флеер

Днепропетровский национальный университет им. Олесь Гончара

ЧАСТОТА ОТРЫВА ПУЗЫРЬЕЙ ОТ ГАЗОВОГО ПРИФУРМЕННОГО ОБЪЕМА

На основі спостережень динаміки утворення спливаючих бульбашок у зоні прифурмального газового об'єму отримана залежність частоти їх відриву від витрати газу, що задається. Знайдена залежність якісно і кількісно добре узгоджується з літературними даними.

Ключові слова: динаміка утворення бульбашок, відрив бульбашок, частота відриву.

На основе наблюдений динамики образования всплывающих пузырей в зоне прифурменного газового объема получена зависимость частоты их отрыва от задаваемого расхода газа. Найденная зависимость качественно и количественно хорошо согласуется с литературными данными.

Ключевые слова: динамика образования пузырей, отрыв пузырей, частота отрыва.

Based on observations of the dynamics of education in the area of pop bubbles in the tuyere gas volume, the dependence of the frequency of the job specified by the gas flow. The obtained dependence qualitatively and quantitatively in good agreement with literature data.

Keywords: dynamics of bubbles forming, isolation of bubbles, frequency of isolation.

Введение. При вдуве газа в жидкость возникает сложное движение газа и жидкости, которое имеет колебательный характер. Спектр колебаний заключен в широких пределах, и каждый ее участок имеет свои причины и источники. Поскольку пузыри газа в жидкости являются упругим элементом, то присутствие газа является источником довольно высоких частот колебаний (порядка сотни и тысячи Гц в зависимости от размеров пузыря). Они связаны с упругим сжатием и расширением пузырей. Другим хорошо известным источником колебаний жидкости является поверхностные волны, для которых основные частоты невысокие (несколько Гц). Капиллярные волны имеют более высокие частоты, но их вклад в энергию волн для этих процессов крайне низкий. Еще одним источником появления колебательного движения является газоподводящий тракт, который в сочетании с прифурменным газовым образованием может генерировать колебания сравнительно низкой частоты. Наконец, сам характер движения газа в жидкости имеет качественно различные формы: струйный и пузырьковый, которые существуют одновременно. При истечении из сопла в прифурменной зоне образуется газовая пульсирующая область, от которой периодически (квазипериодически) отделяются некоторые объемы газа нерегулярной формы и размеров. Такое отделение (образование отрывных пузырей) также вносят свой вклад в колебательное движение газожидкостной системы. Масштабы образующихся пузырей и их движение в жидкости давно привлекали внимание исследователей. По этим вопросам имеется большое количество работ, например, [1; 2], в которых описано движение пузырей, определены закономерности образования их при барботаже, найдены определенные зависимости тепло- и массообмена с окружающей жидкостью. С развитием новых технологических операций возникает необходимость уточнения имеющихся знаний и установки новых закономерностей, необходимых для развития того или иного технологического процесса.

Важной особенностью многих промышленных технологий химико-технологического и металлургического направления является практически оперативная недоступность получения необходимых параметров, ввиду агрессивных сред или высоких температур. Поэтому о ходе того или иного процесса судят по косвенным параметрам. Расширение таких параметров и установление определенных зависимостей качества процесса с этими параметрами является научной задачей. Такие приемы в настоящее время также хорошо известны, различного рода приборы, такие как тепловизоры, спектрографы и многие другие служат для получения некоторой нужной информации. На наш взгляд представляет большой интерес наблюдение и анализ волнового движения поверхностей жидкостей, обрабатываемых газовыми струями, а также общая частотная характеристика происходящего процесса. В частности, в [3] была сделана попытка проследить частотные характеристики поверхности жидкости, определить

их связь с параметрами отрывного пузыря, а также установит высоты всплесков в зависимости от расходов. В работе получены интересные результаты, однако, еще далекие от четкого понимания взаимосвязи отдельных сторон процесса. В связи с этим встают довольно сложные вопросы об интерпретации найденных зависимостей, а также о моделировании и переносе полученных на лабораторных установках закономерностей на реальные аппараты.

Как было отмечено выше, образование отрывного пузыря приводит к возникновению колебательного процесса в жидкости, вследствие чего важно знать какими частотами характеризуется этот процесс. Этот вопрос освещался довольно часто в литературе, поэтому приведем следующие данные. В [4] на основе анализа данных других работ отмечается, что частота образования пузырей независимо от направления вдува имеет частоту ~ 10 Гц. Более развернутые данные приводятся в работах [5 – 7]. В этих работах отмечается, что размер образующегося пузыря практически не зависит от физических и геометрических условий системы, таких как плотность, поверхностное натяжение, внутренний и наружный диаметр сопла, его ориентации. Из этих работ следует, что в логарифмическом масштабе объемы пузырей практически линейно связаны с объемными расходами вдуваемого газа. В [6] получена аналитическая зависимость, характеризующая связь вдуваемого расхода с объемами образующихся всплывающих пузырей

$$V_p = 1.138 \left(\frac{Q^6}{g^3} \right)^{1/5}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободно падающего тела, м/с^2 ; размерность Q – $\text{м}^3/\text{с}$. Эта формула дает возможность рассчитать объемы образующихся пузырей в чугуна при вертикальном вдуве в него газа. Приведенные данные дают представление о количественных зависимостях образующихся пузырей, однако для более детального изучения влияния процесса образования пузырей на частотные характеристики процесса были проведены эксперименты на воде с заглубленными фурмами, как при вдуве газа вертикально вниз, так и при вдуве под углом 45° к вертикали.

Постановка эксперимента и получение данных. В качестве модели ковша была использована изготовленная из плексигласа емкость с соотношением линейных размеров к реальному ковшу 1:10. В качестве моделей фурм были использованы жестко закрепленные стальные трубки, заглубленные в воду на 1/10 заглубления реальной фурмы со сменным набором сопел диаметром 1.4 мм; 1.6 мм; 1.8 мм; и 2.0 мм. Расход дутьевого воздуха изменялся в пределах от 0,5 $\text{м}^3/\text{час}$ до 2,5 $\text{м}^3/\text{час}$ для каждого сопла на существенно дозвуковых скоростях. Процесс вдува фиксировался посредством видеокамеры Sonyo VPC – HD 1000 с частотой съемки 60 кадров в сек в однородном контрольном освещении.

Для определения частоты отрыва был проведен непосредственный счет актов отрыва пузырей от прифурменного газового объема. Отрыв пузыря является довольно сложным процессом. Наиболее простая картина наблюдается для случаев небольших расходов газа из вертикальных каналов, когда скорость газа направлена вверх. В этом случае со среза сопла сходят аккуратные одиночные пузыри с определенной частотой. При увеличении расхода возникает струйный участок, который образует некоторую динамическую область, непосредственно связанную с соплом, из которого поступает газ. По мере увеличения этого участка, картина

образования пузырей усложняется и делается менее регулярной, однако и в этом случае процесс носит квазипериодический характер.

В случае, когда дутье газа идет сверху вниз в окрестности сопла также образуется пульсирующий газовый объем, в котором можно различить некоторый струйный участок внизу с возвратным течением. Верхняя часть этого объема периодически набухает, и из нее вырываются пузыри. Наблюдения (см. рис. 1) показывают, что при сравнительно небольших расходах (рис. 1, а в нашем случае меньше $1 \text{ м}^3/\text{час}$) разрыв пузырей с прифурменным газовым объемом происходит по следующей схеме.

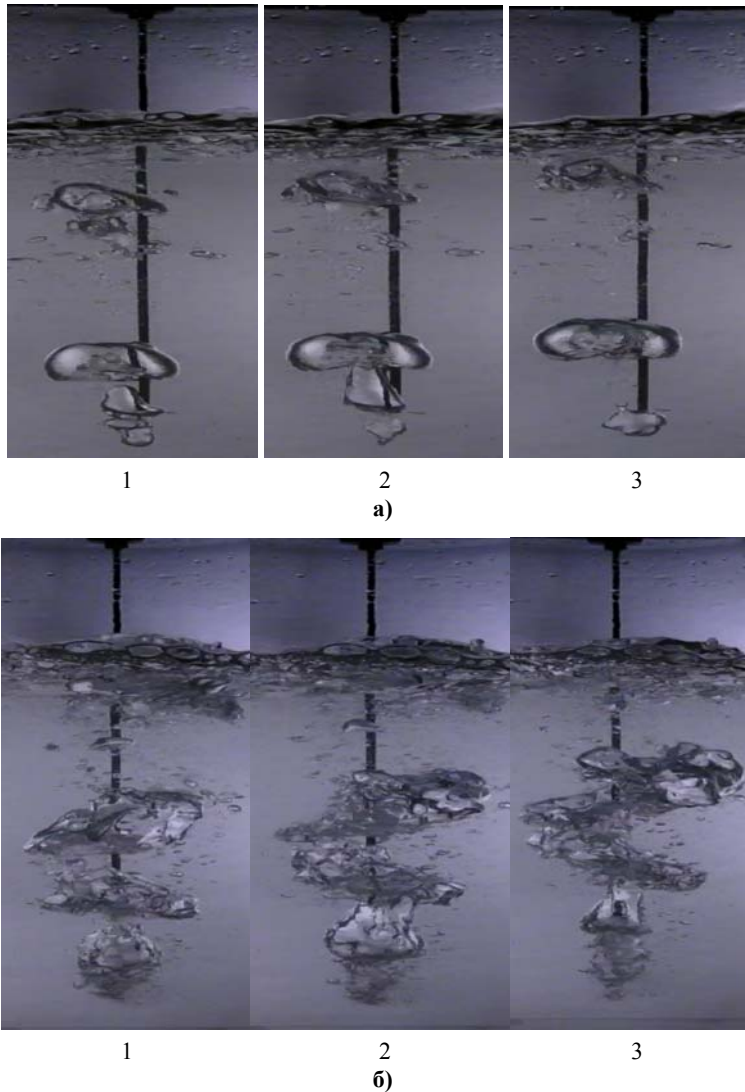


Рис. 1. Фотографии процесса образования всплывающих пузырей:
а – $Q = 0.54 \text{ м}^3/\text{час}$; б – $Q = 2.19 \text{ м}^3/\text{час}$

За счет поднимающихся из нижней части объема газов в верхней части, непосредственно у сопла, образуется расширение, которое иногда имеет почти симметричную картину. Верхняя граница этого расширения поднимается и

становится заметно выше нижнего среза сопла. Затем под действием силы Архимеда от основного объема происходит отделение пузыря, который быстро расплющивается (рис. 1, а1). В результате этого в кормовой части его образуется разрежение и туда, снизу из прифурменной области, вытягивается струйка газа, которая быстро достигает оторвавшийся пузырь (рис. 1, а2). Через образовавшийся мостик в верхний пузырь поступает еще часть газа, после чего происходит окончательный разрыв поднимающегося пузыря с прифурменной газовой областью (рис. 1, а3). После разрыва в области между пузырем и прифурменным объемом образуются мелкие пузырьки, которые подхватываются локальным течением жидкости и уносятся в объем сосуда. Иногда этот процесс прерывается отрывом небольших пузырей без образования газовых мостиков.

С ростом расхода картина отрыва пузырей усложняется (рис. 1,б). Это связано с тем, что: во-первых, поднимающиеся пузыри дробятся, во-вторых, между пузырями образуются газовые мостики, которые соединяют, как вновь образовавшиеся, так и образовавшиеся ранее пузыри, в результате чего образуется целая гирлянда из всплывающих пузырей, достигающая иногда почти верхней границы слоя воды. На рис. 1,б показано образование такой гирлянды (рис. 1,б1 – три газовые области; рис. 1,б2 – прифурменная зона соединена с оторвавшимся пузырем; рис. 1,б3 – три газовые области соединены в гирлянду, которая в следующий момент оторвется от прифурменного объема). В-третьих, в результате распадов и срыва образуется большая масса мелких пузырьков, которые окружают большие газовые образования. Все это делает подсчет актов отрыва достаточно проблематичным. Однако, если пренебречь малыми пузырями (их учет не представляется возможным), то по фотографиям непосредственно это можно подсчитать с какой-то погрешностью. По этим величинам можно найти частоты образования оторвавшихся пузырей.

На рис. 2 приведены графики частот отрыва (в расчет принимался окончательный отрыв газового образования) от подаваемого расхода газа при различных диаметрах сопел ($d_c = 1.4; 1.6; 1.8; 2.0$ мм).

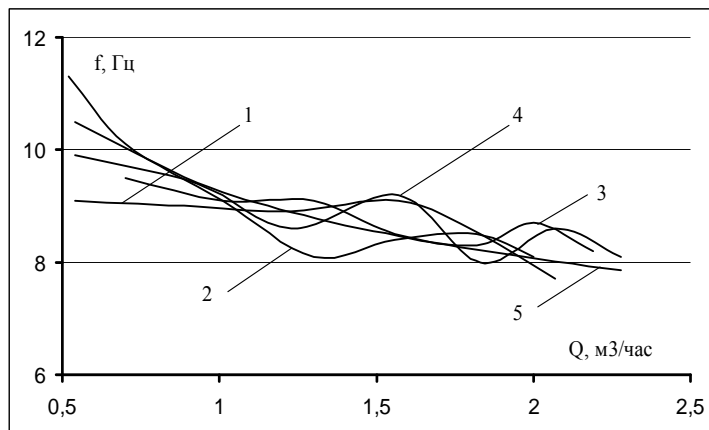


Рис. 2. Графики частот отрыва пузырей от прифурменного газового объема в зависимости от подаваемого объема газа: 1 – $d_c = 1.4$ мм; 2 – 1.6 мм; 3 – 1.8 мм; 4 – 2.0 мм; 5 – критерияльное соотношение (3)

Из рисунка видно, что с увеличением расхода Q кривые частот имеют тенденцию понижаться. Другим важным обстоятельством является то, что

изменение диаметра сопла не приводит к каким-то качественным зависимостям частот, т.е. на данном этапе определить влияние диаметра сопла на частоты отрыва не представляется возможным. Кривая 5 построена по следующему критериальному соотношению

$$f = A \left(\frac{\rho_s g^3}{Q} \right)^{1/5}, \quad (2)$$

где ρ_s – плотность жидкой среды (в нашем случае воды), кг/м³.

Это соотношение было построено из следующих соображений, основывающихся на теории размерностей. Учитывая, что рассматриваемые расходы газа не малы, процесс определяется тремя величинами: плотностью жидкости, величиной g и массовым расходом газа G , принимается также, что края рабочей области не влияют на процесс пузыреобразования

Кроме того, влияние диаметра сопла при таких расходах, видимо, также не сказывается, поскольку какой-то определенной закономерности, связанной с изменением диаметра сопла, из приведенного рисунка не видно. Поверхностное натяжение при образовании сравнительно больших пузырей практически не должно влиять. Вследствие этого, формулу для частоты с размерностью 1/с можно получить единственным способом –

$$f = \overline{A} \left(\frac{\rho_s g^3}{G} \right)^{1/5}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что в технических расчетах используют нормальный объем газа, так что, если пренебрегать изменением плотности при переходе от массового расхода к объемному, то, вводя размерный коэффициент A , будем иметь формулу (2). С помощью метода наименьших квадратов из полученных кривых эта величина была найдена, после чего соотношение (2) удобно переписать в виде

$$f = 0,457 \left(\frac{\rho_s g^3}{\rho_w Q} \right)^{1/5}, \quad (4)$$

где размерность объемного расхода определяется в м³/с; ρ_w – плотность воды. Теперь характерный объем отрывного пузыря можно получить по формуле

$$V_p = \frac{Q}{f} = 2.188 \left(\frac{\rho_w Q^6}{\rho_s g^3} \right)^{1/5}. \quad (5)$$

Если принять, что найденные коэффициенты не зависят от рабочих сред, то выражения (4), (5) становятся достаточно универсальными формулами для пересчета результатов на модели и на реальных установках, в частности, для чугуна формула (5) будет иметь вид

$$V_p = 1.451 \left(\frac{Q^6}{g^3} \right)^{1/5}, \quad (6)$$

что несколько отличается от приведенной выше формулы (1) [6].

В случае, если вдув газа происходит под углом к вертикали, картина несколько усложняется, хотя принципиально элементы распада прифурменного объема

остаються такими же. На рис. 3 показаны отдельные характерные стадии отрыва пузырей при боковом вдуве для $Q = 0.57 \text{ м}^3/\text{час}$.

Отличием здесь является то, что струйный участок прифурменного объема расположен под углом и вытянут (это хорошо видно на рис. 3.4), вследствие чего пузыри отрываются как с одного конца, так и с другого (рис. 3.1). При этом газовые мостики, соединяющие прифурменный объем с только что оторвавшимся пузырем (рис. 3.2, 3.3), образуются также с разных сторон. Вторым важным отличием (это характерно для больших расходов) является более значительное образование мелких пузырей на конце струйного участка.

Проделанный подсчет актов отрыва для рассматриваемого случая приводит к следующим зависимостям, показанным на рис. 4. Из рисунка видно, что разброс в значениях здесь несколько больше, чем на рис. 2, что говорит о большей погрешности в счете.

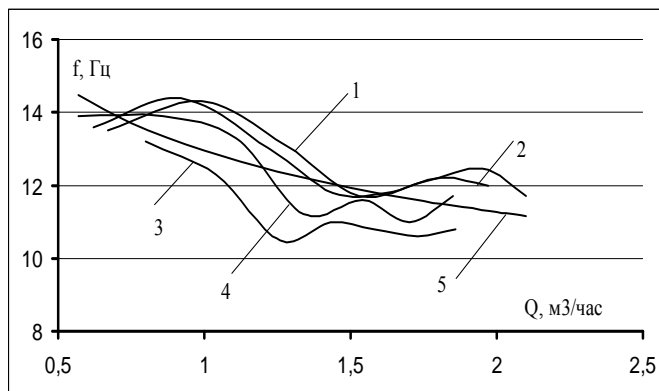
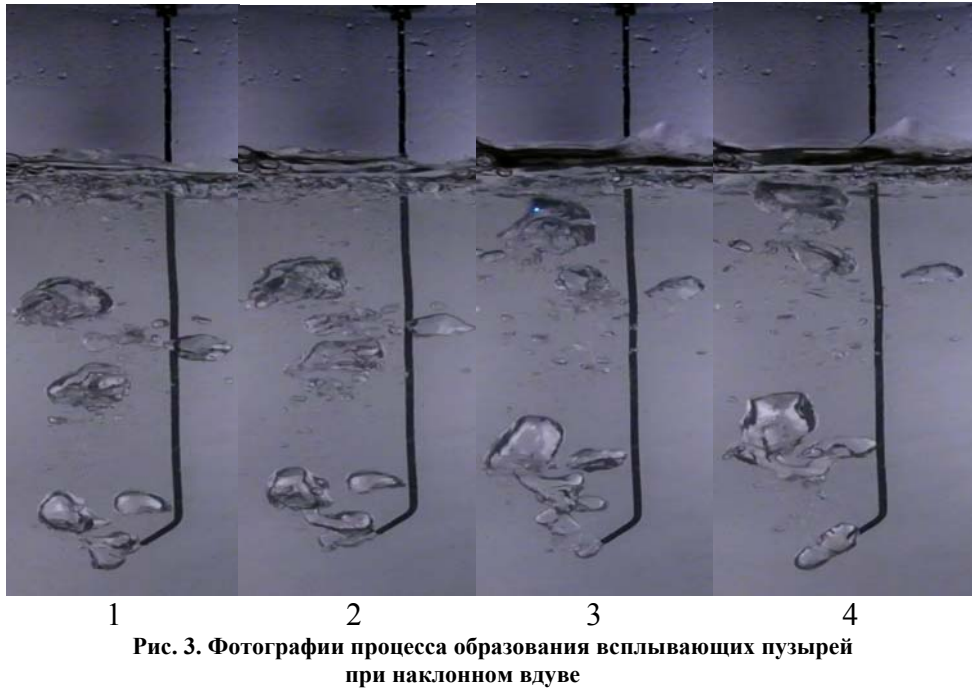


Рис. 4. Графики частот отрыва пузырей от прифурменного газового объема в зависимости от подаваемого объема газа: 1 – $d_c = 1.4 \text{ мм}$; 2 – 1.6 мм ; 3 – 1.8 мм ; 4 – 2.0 мм ; 5 – критерияльное соотношение (7)

Учитывая, что принципиально процесс образования всплывающего пузыря мало отличается от предыдущего случая, примем, что ранее записанное критериальное соотношение для вдува под углом остается справедливым и для этого случая, но с несколько другим коэффициентом.

Используя полученные данные можно записать следующее выражение

$$f = 0,640 \left(\frac{\rho_s g^3}{\rho_w Q} \right)^{1/5}, \quad (7)$$

а тогда объем отрывного пузыря может быть описано формулой вида

$$V_p = \frac{Q}{f} = 1.563 \left(\frac{\rho_w Q^6}{\rho_s g^3} \right)^{1/5}, \quad (8)$$

в частности, для чугуна она приобретает вид

$$V_p = 1.036 \left(\frac{Q^6}{g^3} \right)^{1/5}. \quad (9)$$

Таким образом, полученные критериальные соотношения только коэффициентами отличаются от предложенной ранее формулы. Важным моментом является то, что в данной работе получено количественное отличие частот образования пузырей для вертикального вдува и вдува под углом. На следующих рисунках показаны кривые изменения частот f образования пузырей (рис. 5) и их объемов V_p (рис. 6) в чугуне.

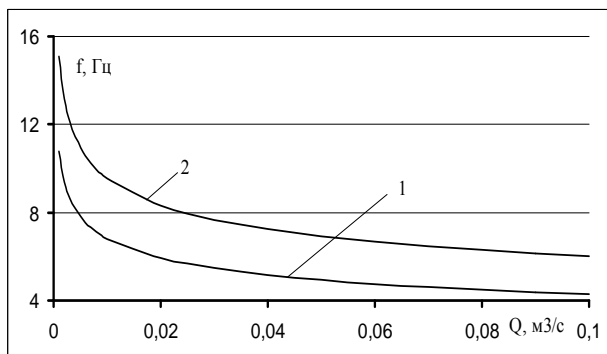


Рис. 5. Зависимость частоты отрыва пузырей от объемного расхода газа:
1 – вертикальный канал, 2 – наклонный канал

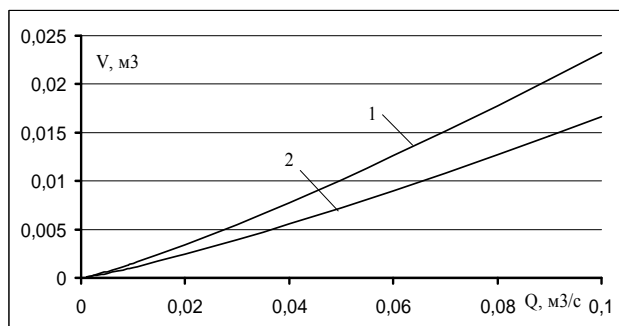


Рис. 6. Зависимость объема пузырей от объемного расхода газа:
1 – вертикальный канал, 2 – наклонный канал

Выводы. Последние два рисунка демонстрируют важные зависимости, возникающие при вдуве газа в расплавленный металл. Последний рисунок показывает, что при наклонном вдуве размеры образующихся пузырей несколько меньше, чем при вертикальном вдуве. Приведенные на рис. 5 кривые, как об этом говорилось выше, не учитывают мелких пузырей, которые образуются в большом количестве при больших расходах. При этом необходимо отметить, что при вдуве под углом их больше. Таким образом, для интенсификации массообменного процесса в ванне необходимо предпочтительно отдавать вдуву газа, направленному под углом к вертикальной прямой.

Библиографические ссылки

1. Явойский В. И. Теория продувки сталеплавильной ванны / В. И. Явойский, Г. А. Дорофеев, И. Л. Повх. – М., 1974. – 496 с.
2. Охотский В. Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов / В. Б. Охотский. – М., 1993. – 151 с.
3. Елисеев В. И. Динамика поверхности жидкости при подаче газового потока через вертикальную заглубленную фурму // В.И. Елисеев, А.П. Толстомят, Л.А. Флеер, и др. – Вісник Дніпропетр. ун - ту. Серія «Механіка». – 2011. – Вип.15, т. 1. – С. 112 – 119.
4. Робертсон Д. Дж. К. Изучение на модели процесса вдувания твердых частиц в жидкий металл / Д. Дж. К. Робертсон, Д. С. Коночи, А. Г. Кастильес. // Инжекционная металлургия 80. Тр. конф. Лулеа. Швеция, 1980. – М., 1982. – С. 43 – 65.
5. Гутри Р. И. Л. Физико-химические и гидродинамические аспекты легирования расплавов методом вдувания порошков / Р. И. Л. Гутри. // Инжекционная металлургия 80. Тр. конф. Лулеа. Швеция, 1980. – М., 1982. – С. 75 – 92.
6. Дон Б. Исследования образования пузырьков и процесса проникновения расплава в сопло при инъекции газа с порошком или без него / Б. Дон, В. Поланшюц, Х. Хиблер. // Инжекционная металлургия 80. Тр. конф. Лулеа. Швеция, 1980. – М., 1982. – С. 33 – 43.
7. Иронз Г. А. Двумерный жидкосвинцовый аналог для изучения вдувания порошкообразных материалов в жидкие чугун и сталь / Г. А. Иронз, Б.-Х. Ту. // Инжекционная металлургия 80. Тр. конф. Лулеа. Швеция, 1980. – М., 1982. – С. 146 – 166.

Надійшла до редколегії 26.11.2012.

УДК 622.648.01 – 9:621.643.29

Е. В. Семененко*, Н. А. Никифорова**

**Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

***Национальная металлургическая академия Украины*

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА А. Е. СМОЛДЫРЕВА

Запропоновано інженерну методику розрахунку параметрів гідротранспорту полідисперсних матеріалів, яка базується на логарифмічному законі для опису залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса і може бути використана для аналітичного дослідження режимів роботи гідротранспортних систем. Формули запропонованої методики не містять коефіцієнтів, які треба визначати експериментально, і вперше показують мультиплікативну залежність критичної швидкості від властивостей тонких, дрібних і кускових фракцій.

© Е. В. Семененко, Н. А. Никифорова, 2013