

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА.....	3
ЗА НЕФТЬЮ КУЗБАССА С ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ.....	3
В.В.Ростовцев, Е.Ю. Липихина, А.М. Афанасьев, В.Н. Ростовцев, В.В. Лайнвебер	
НОВАЯ ПАРАДИГМА ПОИСКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА.....	8
В.В. Ростовцев, Е.Ю. Липихина, В.Н. Ростовцев, В.В. Лайнвебер	
ПУТИ РЕАНИМАЦИИ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ.....	15
В.В. Ростовцев, Е.Ю. Липихина, В.Н. Ростовцев, В.В. Лайнвебер	
ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМОЙ НЕФТИ В АРКТИКЕ.....	28
И.Г. Яценко, Ю.М. Полищук	
ГЕОТЕХНОЛОГИЯ И ГЕОМЕХАНИКА.....	42
АЛЛЕЯ ГЕОЛОГОВ В ТОМСКЕ. ИСТОКИ.....	42
А.Я. Пшеничкин, В.А. Домаренко	
ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОТЕКТОНИЧЕСКОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ГЕОМАССИВЕ НА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК.....	49
В.Н. Фрянов, Л.Д. Павлова	
ПАРАДОКСЫ ПРИРОДНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ОКЛО.....	60
В.А. Домаренко	
К ВОПРОСУ РАЗРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	65
Е.Э. Очиров, С.Н. Харламов	
МЕТАЛЛУРГИЯ.....	76
ПЕРЕМЕШИВАНИЕ РАСПЛАВА ПРИ ПРОДУВКЕ ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ В АГРЕГАТАХ КОВШ-ПЕЧЬ.....	76
Е.В. Протопопов, Л.В. Думова, М.В. Темлянцев, Е.М. Запольская	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ИЗ ОТБРАКОВКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ НА ИХ УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ.....	84
А.А. Уманский, А.Б. Юрьев, А.С. Симачев, Л.В. Думова	

©Издательский
центр
Сибирского
государственного
индустриального
университета

Адрес редакции:
654007
г. Новокузнецк,
ул. Кирова, 42,
Сибирский
государственный
индустриальный
университет
тел. 8–3843–78–44–55

http: www.sibsiu.ru

ISSN 2311–9519

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА МЕТАЛЛОЗАВАЛКИ ПРИ ВЫПЛАВКЕ РЕЛЬСОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВА.....	93
Е.В. Протопопов, Л.В. Думова	
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ШЛАКОВЫХ РАСПЛАВОВ.....	102
Н. Ф. Якушевич, Е. В. Протопопов, М. В. Темлянец	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЛЮМИНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ЧУГУНОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СРЕДЕ АНОДНЫХ ГАЗОВ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ЭКОСОДЕРБЕРГ.....	116
Е.А. Пинаев, М.В. Темлянец, Е.В. Протопопов, Д.Г. Большаков, Е.Н. Темлянцева, А.С. Симачев	
БИОМЕДИЦИНА.....	122
ЧТО ИЗМЕНИЛОСЬ В КЛИНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ СЕПСИСА: КОММЕНТАРИИ К НОВЫМ МЕЖДУНАРОДНЫМ РЕКОМЕНДАЦИЯМ SSC 2021 ПО ЛЕЧЕНИЮ СЕПСИСА И СЕПТИЧЕСКОГО ШОКА.....	122
В. В. Агаджанян, И. М. Устьянцева, А.Х. Агаларян	
ОРГАНИЗАЦИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ ПРИ ПОЛИТРАВМЕ. ПРОЕКТ КЛИНИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ.....	146
В.В. Агаджанян, А.Х. Агаларян	
ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ЛЕТАЛЬНОСТЬ ПАЦИЕНТОВ С ПОЛИТРАВМОЙ.....	148
В.В. Агаджанян, А.Х. Агаларян	
ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЕ ЗНАНИЯ И ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ.....	151
РАЗВИТИЕ АМБИЕНТНОЙ СРЕДЫ ГОРОДА КАК ОСНОВЫ ЕГО ВОЗРОЖДЕНИЯ.....	151
Ю.С. Серенков, Е.А. Благиных, И.В. Шимлина, В.Е. Хомичева	
ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНЫЕ ОСНОВАНИЯ МНОГООБРАЗИЯ МОДЕЛЕЙ ТРАНСФОРМАЦИИ УНИВЕРСИТЕТА.....	167
Н.А. Иванова	
ЮБИЛЕИ.....	174
РЕФЕРАТЫ.....	183

МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.11

ПЕРЕМЕШИВАНИЕ РАСПЛАВА ПРИ ПРОДУВКЕ ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ В АГРЕГАТАХ КОВШ-ПЕЧЬ

Е.В. Протопопов, Л.В. Думова, М.В. Темлянцев, Е.М. Запольская

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк*

Использование в технологическом цикле современного металлургического агрегата типа ковш-печь наиболее рационально обеспечивает возможность управления процессами формирования физико-химического состояния расплава для получения высококачественных сталей с заданными свойствами.

Важнейшим составным элементом такой технологии является продувка инертным газом, которая позволяет успешно решать такие технологические задачи, как снижение неоднородности по температуре и химическому составу, удаление неметаллических включений, а также частичной дегазации расплава. При этом на многих агрегатах ковш-печь в качестве стандартных режимов используют продувку инертным газом через верхнюю погружную фурму сквозь пористые пробки, установленные в днище ковша.

В условиях при отсутствии перемешивания металлической ванны сверхзвуковыми газовыми струями и всплывающими пузырями монооксида углерода при продувке металла инертным газом с определенными допущениями можно предположить, что перемешивание расплава осуществляется только (или в основном) за счёт такой технологической операции, а определяющие для оценки перемешивания подходы подчиняются основным законам аэрогидродинамики.

Как известно [1 – 3], существуют различные методы оценки эффективности перемешивания расплава, при этом интенсивность перемешивания определяется в основном характеристиками режима подачи

инертного газа и соответствующими скоростями возникающих циркуляционных потоков в металлической ванне. Обычно в качестве основной характеристики используется так называемое время полного перемешивания ($\tau_{\text{п}}$) или время усреднения химического состава расплава в ковше. Другим подходом в оценке перемешивания является использование в качестве характеристики мощность перемешивания ванны (ξ). Причём, исходя из различных теоретических предпосылок и условий эксперимента, определение в различных работах соотношения между указанными величинами в уравнении $\tau_{\text{п}} \approx A\xi^{-n}$ постоянно уточняется и справедливо для тех массивов экспериментальных данных, на основании которых они получены. Показатель степени n по многочисленным данным колеблется от 0,23 до 0,89, а значения коэффициента A изменяется в зависимости от характеристик моделирующих сред, геометрии ванны ковша и колеблется в ещё более широких пределах от 50 до 800. Поэтому наиболее точной характеристикой оценки интенсивности перемешивания расплава в ковше в соответствии с классическими подходами гидродинамики жидкости [3 – 5] является использование коэффициента эффективной диффузии (D_e), объединяющего все основные виды переноса (вынужденная и свободная конвекция, молекулярная диффузия).

В соответствии с современными представлениями при формировании газовых струй при выходе из погруженных в жидкость сопел различают пузырьковый, переходный и струйный режимы, когда газовые объёмы (пузыри) образуются непосредственно на срезе сопла или в конце некоторого струйного участка. Режим взаимодействия газовой струи с жидкостью и размеры образующихся пузырей слабо зависят от направления подвода дутья [5]. Известно, что выходящая струя инертного газа встречает некоторое сопротивление среды (металла) и деформируется. Поскольку, различные переходные режимы взаимодействия газовых струй с металлом в реальных условиях сложно фиксируются, возможно использование следующей классификации режимов: режим барботирования, характеризующийся периодическим растеканием газовых пузырей по площади днища ковша с

последующим их всплыванием; режим струйного истечения при формировании непрерывной газовой струи на некотором участке проникающем в объём металла в ковше. Реализация того или иного режима при этом всегда связана со скоростью струи на срезе сопла и расходом инертного газа.

Анализ многочисленных данных показывает, что пузырьковый режим истечения может сохраняться до скоростей порядка 20 – 30 м/с, а при больших скоростях истечения (более 100 м/с для газожидкостных потоков) сохраняются основные закономерности струйных течений.

Предварительно с использованием положений волновой теории процессов при продувке расплавов [4] по известным выражениям рассчитывали и определяли параметры всплывающих пузырей. В соответствии с данным подходом всплывающие пузыри генерируют вихри аналогичного размера, а в объёме расплава возникает развитая турбулентность, обусловленная, с одной стороны, возникновением направленных циркуляционных потоков, а с другой – турбулентными пульсациями в этих потоках, что обеспечивает случайный статистический характер переноса. При реализации струйного режима истечения газовых струй диаметр образующихся пузырей можно рассчитывать по выражению [4]:

$$D = k_D q^{2/5} g^{-1/5} \quad (1)$$

где $k_D = 1,19$ [1], g – гравитационное ускорение, q – расход газа через донное сопло, а при реализации пузырькового режима истечения, диаметр образующихся пузырей можно определить с использованием критерия Бонда [7].

$$\frac{D}{d} = 2/\pi^{1/3} (B_0)^{1/3} \quad (2)$$

где критерий Бонда $B_0 = \Delta \rho g d^2 / \sigma < \pi^2$, d – диаметр сопла, $\Delta \rho = \rho_{ж} - \rho_g$ – разность плотностей жидкости и газа, g – гравитационное ускорение, σ – поверхностное натяжение расплава, полученное на основе равенства сил действующих на пузырь.

Принимали, что согласно [8] пузыри будут всплывать со скоростью $w_{\text{вспл}} = (gD)^{1/2}$. Согласно выполненным расчётам при реализации струйного режима истечения газовых струй, диаметр образующихся пузырей в зависимости от скорости всплывания составляет $\sim 1,2 - 1,5$ см. При использовании пористых вставок в ковше, то есть при реализации пузырькового режима истечения, диаметр образующихся пузырей будет не превышать $0,5 - 0,6$ см и практически не зависит от расхода инертного газа, являясь результатом взаимодействия гравитационных и капиллярных волн. Скорость всплывания таких пузырей в объёме ванны ковша находится в пределах $150 - 160$ и $10 - 15$ см/с для обоих режимов соответственно. В соответствии с выдвинутой Прандтлем «теорией пути смешения» [3, 6], возможно определение коэффициента микропереноса в жидкости по аналогии с коэффициентом переноса в молекулярно-кинетической теории газов:

$$D\varepsilon = \bar{u}\bar{\lambda}/3, \text{ м}^2/\text{с} \quad (3)$$

где $\bar{u}$ – осредненная скорость газовых молекул; $\bar{\lambda}$ – средняя длина их свободного пробега.

Для рассматриваемого случая переноса в расплаве имеет место следующее соотношение:

$$D\varepsilon = \omega_p l \quad (4)$$

где ω_p – скорость циркуляции расплава; l – масштаб движения или линейный масштаб турбулентных пульсаций.

В качестве линейного масштаба турбулентных пульсаций (или длины пути перемешивания) использовали линейный размер элементарной площадки, приходящийся на один центр газовыделения:

$$l = \sqrt{S}/m \quad (5)$$

где S – площадь поверхности ванны в спокойном состоянии; m – количество донных пористых пробок или центров газовыделения.

С учётом того, что расплав циркулирует под действием импульса газовых струй, можно записать, что

$$D_e = \sum_{m=1}^m J_i l_i \quad (6)$$

где m – количество источников газовой выделения (сопел в фурме или пористых пробок); J_i – секундный импульс газовых струй, действующих на расплав; Q – масса металла в ковше. В зависимости от режима истечения инертного газа со стороны одиночного всплывающего пузыря действует импульс, равный произведению подъёмной силы P на время её действия τ , где

$$P = Vg(\rho_m - \rho_g) \approx Vg\rho_m \quad (7)$$

так как $\rho_m \gg \rho_g$; здесь V – объём одиночного пузыря; g – гравитационное ускорение; ρ_m и ρ_g – плотность металла и газа; $\tau = h_B / \omega_{вспл}$; h_B – высота металла в ковше; $\omega_{вспл}$ – скорость всплывания пузыря.

Для получения суммарного импульса всех всплывающих пузырей, образующихся на поверхности пористой пробки или в конце некоторого струйного участка газовых струй, можно вместо величины V подставить объёмный расход инертного перемешивающего газа (V_g):

$$\sum_{m=2}^m J_i = \frac{S_M g V_g h_B}{\omega_{вспл}} \quad (8)$$

где $V_g = G/\rho_g$; $G = f_g w_{вспл} \rho_g$ – массовый расход газа; ρ_g – плотность инертного газа; f_g – площадь выходного сечения сопла; $w_{вспл}$ – скорость всплывания газовых объёмов.

Тогда в соответствии с принятой моделью величину D_e можно рассчитать по следующему уравнению:

$$D_e = \frac{\rho_m g V_g h_B \sqrt{S/m}}{w_{вспл}} \quad (9)$$

Для рассматриваемых условий эффективный коэффициент диффузии составляет 0,35 – 0,45 м²/с и 0,05 – 0,15 м²/с при реализации струйного режима истечения и режима барботирования соответственно.

Оценку мощности перемешивания ($N_{п}$) в соответствии с принятой моделью определяли с использованием законов сохранения энергии и количества движения:

$$N_{п} = \sum_{m=2}^m J_i l_i \quad (10)$$

где J_i – секундный импульс газовых струй, действующих на расплав; l_i – «масштаб движения», равный 1/3 размера всплывающих пузырей.

Полученные результаты расчётов представлены на рис. 1 в виде зависимости секундной работы (мощности) перемешивания ванны от расхода инертного газа, подаваемого через пористые пробки или погружные фурмы. С увеличением расхода инертного газа величина работы перемешивания как в струйном, так и в пузырьковом режиме истечения газовых струй в расплав возрастает, причём в случае реализации струйного режима истечения мощность перемешивания увеличивается в значительно большей степени, нежели в режиме барботирования ни, не увеличивается в значительно большей степени, нежели в режиме барботирования жели в режиме барботирования.

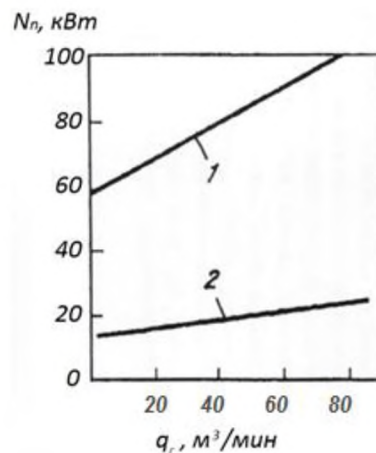


Рисунок 1. Влияние расхода инертного газа на изменение мощности перемешивания расплава в 150-т ковшах: 1 и 2 – струйный режим истечения и барботаж

Как показывают расчёты, уменьшение диаметра пузырьков при незначительной скорости их всплывания увеличивает продолжительность их пребывания в расплаве, общую их поверхность в рассматриваемом объёме газа, что способствует достижению более стабильного дегазирующего эффекта, приближению системы металл – шлак к равновесию и эффективному всплыванию неметаллических включений.

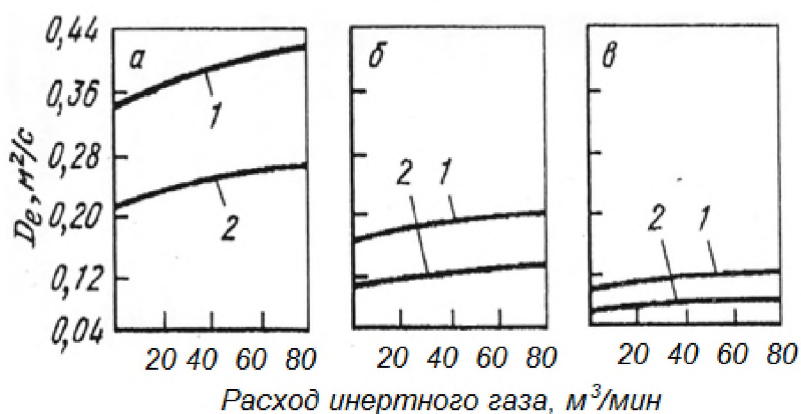


Рисунок 2. Зависимость коэффициентов эффективной диффузии от расхода инертного газа при перемешивании в 150-т ковшах, *a*, *б*, и *в* – вертикальный, горизонтальный и радиальный переносы; 1 и 2 – струйный и пузырьковый режимы истечения

В общем случае перенос вещества в результате диффузии может быть разложен на три составляющие: вертикальная, горизонтальная и радиальная. Для определения значения D_e в направлениях переноса использовали полученные критериальные зависимости, характеризующие перемешивание расплава для условий эксперимента. Для всех случаев переноса величина D_e пропорциональна кубическому корню из мощности перемешивания и отличается коэффициентом пропорциональности, который принимает значения 32, 70 и 140 при вертикальном, горизонтальном и радиальном переносах соответственно [6].

Результаты расчётов D_e в зависимости от режима продувки и расхода перемешивающего газа приведены на рис. 2, из которого видно, что эффективный коэффициент диффузии, как и мощность перемешивания, зависят от расхода инертного газа и увеличиваются с ростом интенсивности его подачи. Вместе с тем для всех зависимостей, представленных на рис. 2, характерно значительное различие в значениях коэффициента эффективной диффузии для случаев продувки ванны в струйном и пузырьковом режимах. При выбранных расходах инертного газа эффективный коэффициент диффузии для

вертикального переноса имеет наибольшее абсолютное значение, существенно меньшее – для горизонтального переноса и наименьшее – для радиального.

С использованием предложенной модели для условий продувки расплава в 150-т сталеразливочных ковшах установок ковш-печь определены параметры всплывающих пузырей и значения составляющих эффективного коэффициента диффузии при различных режимах продувки.

Список использованных источников

1. Kai T // J. Iron and Steel Inst. Jap. – 1981. – V. 68, № 4. – P. 214.
2. Mori K., Sano M. // J. Iron and Steel Inst. Jap. – 1983. – V. 69, № 6. – P. 672-695.
3. Явойский, В. И. Теории продувки сталеплавильной ванны / В. И. Явойский, Г. А. Дорофеев, И. Л. Повх. – М. : Металлургия, 1974. – 496 с.
4. Охотский, В. Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов / В. Б. Охотский. – Москва : Металлургия, 1993. – 151 с.
5. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1987. – 840 с.
6. Яковлев Ю. Н., Опришко Н. В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1990. – № 1. – С. 22-24.
7. Охотский, В. Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов / В. Б. Охотский. – М. : Металлургия, 1993.–151 с.
8. Охотский, В. Б. Гидродинамика процессов взаимодействие газовой струи с жидкостью / В. Б. Охотский. – ИФЖ. – 1984. – Т. 47.– № 4. – С. 550-558.