

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ

УДК 669.18

*Куберский С. В.*

*к.т.н., проф.,*

*Романчук А. Н.*

*к.т.н., доц.,*

*Романчук Я. А.*

*асс.,*

*Лукашев Д. Н.*

*магистрант*

*ГОУ ВО «ДонГТИ», г. Алчевск, ЛНР*

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА НА АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ

*В работе приведены результаты физического моделирования процесса перемешивания металла на агрегате ковш-печь в ходе пульсирующей продувки аргоном через два донных продувочных устройства. Установлен характер и площадь раскрытия зеркала воды при пульсирующей и стационарной подаче газа, а также различной интенсивности продувки. Установлены зависимости времени усреднения от расхода продувочного газа при стационарном и пульсирующем режиме перемешивания.*

***Ключевые слова:** агрегат ковш-печь, сталь, шлак, физическая модель, инертный газ, пульсирующая продувка.*

Динамика усреднения металла в процессе его продувки аргоном представляется крайне важным технологическим этапом, определяющим выбор критериев оптимизации параметров продувки для различных стадий внепечной обработки. Достаточно очевидно, что интенсивность перемешивания зависит от расхода вдуваемого аргона, а также от количества продувочных узлов. Вместе с тем, повышение расхода вдуваемого газа приводит к раскрытию зеркала металла, интенсификации его перемешивания со шлаком и, как следствие, к увеличению интенсивности процессов вторичного окисления. Поэтому актуальным направлением исследований является изучение новых, альтернативных режимов продувки металла инертным газом во время его внепечной обработки.

Процесс моделирования осуществлялся на холодной физической модели сталеразливочного ковша, выполненной по геометрическому подобию в масштабе 1:8 к промышленному объекту емкостью 300 т. Положение продувочных узлов в днище физической модели по радиусу и удалённости от вертикальной оси ковша выбрано в соответствии с их расположением на промышленном объекте.

В качестве жидкостей, моделирующих сталь и шлак, применяли, соответственно, воду и машинное масло, имеющие различную вязкость. Для продувки в модели использовали сжатый воздух. Для осуществления пульсирующей продувки применялось устройство (пульсатор) позволяющее осуществлять пульсирующую подачу воздуха. Регулировка режимами продувки осуществлялась с помощью персонального компьютера. Для замера расхода воздуха применялся газовый счётчик. Степень оголения зеркала воды фиксировалась с помощью видеокамеры.

Для моделирования процесса импульсной продувки в днище ковша в месте расположения продувочных узлов были установлены два автомобильных электромагнитных клапана фирмы АТІКЕР. Клапан оснащен катушкой 12 В, которая отвечает за его открытие и закрытие при подаче питания. Управление электромагнитными клапанами осуществляется через звуковую карту Lexicon Alpha компьютера. При помощи программы Cubase создается аудио-запись (проект) с определенной частотой подачи стереосигнала на блок управления электро-

магнитными клапанами. Стереосигнал разделяется на 2 канала (левый и правый) и соответственно на первый и второй клапан. При подаче звукового сигнала на левый канал через блок управления — открывается первый клапан. Время, с которым клапан остаётся открытым зависит от длительности сигнала, идущего на канал. Это позволяет легко изменять длительность и период импульсов продувки.

В ходе проведения исследований применена методика планированного эксперимента с двумя звездными точками, основной задачей которой является разработка оптимальной схемы исследования, обеспечивающей получение необходимой информации при минимальных временных и материальных затратах. Для проведения исследований с пульсирующей подачей модельного газа (воздуха) использовалась матрица планированного эксперимента. Первым фактором являлся расход воздуха на холодной физической модели, вторым частота срабатывания электромагнитного клапана. При проведении исследований с использованием стационарной подачи модельного газа (воздуха) расход устанавливался с шагом 2 л/мин в диапазоне от 2 л/мин до 28 л/мин.

Система пульсирующей подачи воздуха на модели может обеспечить максимальную частоту подачи воздуха до 360 пульсаций в минуту, а минимальную 1 пульсация в минуту. При использовании матрицы планирования эксперимента расчёт показал, что максимальные и минимальные значения частоты пульсации в итоге составляют 22 и 348, соответственно. Расчётный расход продувочного газа может варьироваться от 2 до 28 л/мин на модели, что соответствует расходу аргона в пределах от 100 до 1400 л/мин на объекте. Таким же образом расчёт с помощью матрицы показал, что максимальное значение расхода воздуха для пульсирующей продувки составляет 27,73 л/мин, а минимальное 2,27 л/мин.

На первом этапе исследований изучали раскрытие зеркала воды при стационарном и пульсирующем способе подачи газа. Путём обработки полученных в ходе исследования изображений в фоторедакторе Photoshop были получены данные, которые позволили определить максимальную и минимальную степень раскрытия зеркала воды в процентном соотношении при пульсирующем режиме продувки.

Вторым этапом исследований являлось изучение времени усреднения модельной жидкости в объёме физической модели сталеразливочного ковша. В качестве критерия эффективности перемешивания жидкости в ковше был принят показатель интенсивности перемешивания, определяемый как время гомогенизации объёма жидкости в ковше. Время гомогенизации определялось как период, требуемый для достижения соответствующей высокой однородности системы, необходимой с технологической точки зрения. Следовательно, время гомогенизации является условной величиной, зависящей от способа определения степени перемешивания, ее численного значения и масштаба наблюдений. Вместе с тем время гомогенизации позволяет выполнять сравнительные количественные оценки времени гомогенизации жидкости в ковше при различных режимах продувки, выполненных в одинаковых условиях.

Одним из эффективных методов определения гомогенизации модельного раствора является электрохимический метод с введением в перемешиваемую жидкость (воду) определенного количества раствора поваренной соли и одновременным измерением напряжения в различных точках объёма ковша с помощью специальных датчиков.

В работе напряжение измерялось восьмью датчиками (рис. 1), каждый из которых представлял собой два равноудалённых медных контакта, между которыми пропускался электрический ток. В качестве электролита, вводимого в воду, применялся насыщенный раствор поваренной соли. Датчики располагались вблизи стенок (4 датчика) и днища ковша (2 датчика), а также в центре физической модели (2 датчика).

Значения фиксируемые каждым из датчиков позволяют судить о степени гомогенизации раствора в объёме ковша после введения электролита. Считывающие датчики подключались через блок согласования каналов к аналоговому цифровому преобразователю (АЦП) Е-154. В рабочем окне программы «LGraph2» отображались линии напряжения на каждом из датчиков. При достижении электролитом датчика на экране монитора наблюдалось повыше-

ние напряжения на нем. В процессе продувки, с целью гомогенизации раствора, показания напряжения на датчиках постепенно меняли свои значения. По истечении определенного времени напряжение на всех датчиках выравнивалось. Стабильное значение напряжения, фиксируемого датчиками (изменение показаний в диапазоне 0,1–0,2 В) свидетельствовало о достижении необходимого усреднения и процесс перемешивания прекращали.

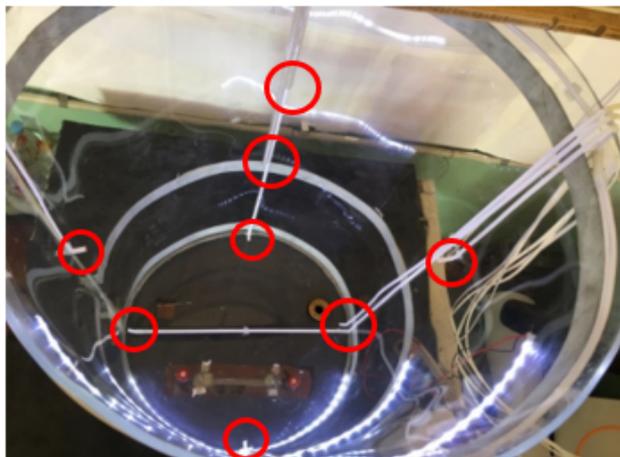


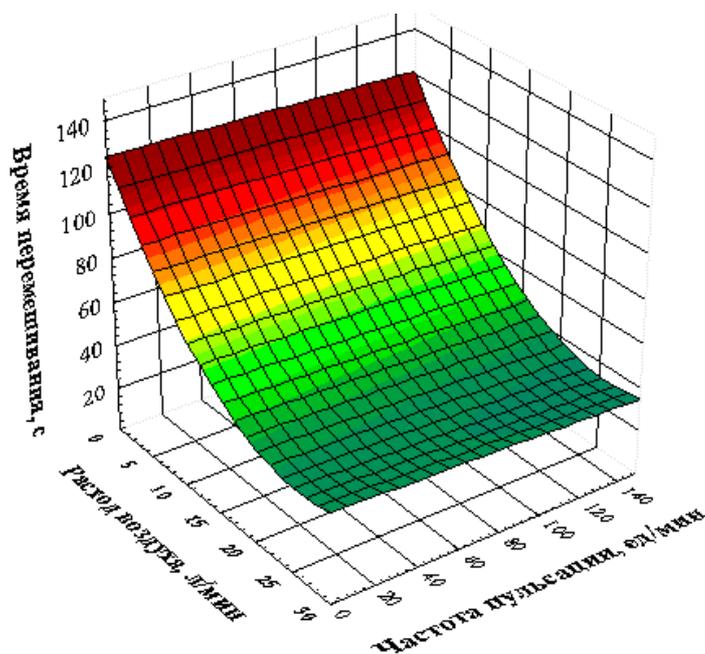
Рисунок 1 — Схема расположения датчиков в объеме физической модели

В таблице 1 представлены результаты исследования массообмена при пульсирующей и стационарной подаче воздуха.

Таблица 1 — Результаты исследований перемешивания при пульсирующей и стационарной подаче воздуха

Режим продувки	Расход воздуха, л/мин	Частота пульсаций, ед/мин	Степень раскрытия в момент подачи воздуха, %	Степень раскрытия в момент паузы подачи воздуха, %	Средняя степень раскрытия зеркала воды, %	Время перемешивания, с
Стационарный	2,27	-	≤10	-	≤10	135
	6	-	15,72	-	15,72	130
	15	-	40,81	-	40,81	61
	24	-	64,30	-	64,30	20,75
	27,73	-	71,5	-	71,5	15,42
Пульсирующий	2,27	185	17,14	15,41	16,27	112,5
	6	70	32,20	22,60	27,4	82,3
	6	300	27,25	27,03	27,14	74,1
	15	22	67,60	2,00	34,8	54
	15	348	46,12	45,10	45,6	41,4
	15	185	41,22	38,90	40	48
	24	70	51,66	40,90	46,28	41,4
	24	300	54,40	50,53	52,46	32,1
	27,73	185	56,10	53,45	54,77	25,4

Путём статистической обработки полученных в ходе исследований данных в программе Statistica были выведены квадратичные зависимости времени перемешивания от частоты подачи и расхода воздуха при пульсирующей продувке (рис. 2).



Время полного перемешивания, с =  $124,8093 - 6,6113 \cdot x - 0,0239 \cdot y + 0,1266 \cdot x \cdot x - 0,0003 \cdot x \cdot y - 2,777E-5 \cdot y \cdot y$   
 (x — расход воздуха, y — время усреднения)

Рисунок 2 — Зависимость времени усреднения от частоты подачи и расхода воздуха при пульсирующей продувке

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что использование пульсирующей подачи воздуха обеспечивает более интенсивное усреднение модельной жидкости после ввода в нее солевого раствора.

На основании полученных данных был построен график зависимости времени усреднения от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки (рис. 3).

Из представленных на рисунке 3 графиков видно, что при пульсирующей продувке с высокой частотой (более 185 пульсаций в минуту) в пределах расхода газа — 2–22 л/мин усреднение проходит быстрее. При расходе воздуха 22–28 л/мин усреднение протекает несколько медленнее, но степень раскрытия зеркала воды значительно меньше, чем при стационарной подаче воздуха, что в свою очередь является положительным эффектом способствующим уменьшению интенсивности вторичного окисления стали кислородом атмосферы в производственных условиях. Так же, важно отметить, что при всех режимах пульсирующей продувки степень раскрытия зеркала воды меньше, чем при стационарной подаче воздуха.

При пульсирующей подаче газа с низкой частотой пульсации (менее 185 пульсаций в минуту), а именно при расходе газа 15 л/мин и частотой подачи воздуха 22 ед./мин наблюдается раскрытие зеркала воды в момент подачи воздуха 67,6 %, но и наблюдается эффект полного закрытия зеркала воды в момент паузы подачи воздуха. При этом средний показатель раскрытия при таком режиме пульсирующей продувки составляет 34,8 %, что меньше аналогичного показателя имеющего место при стационарной подаче газа (40,81 %). Кроме того, более чем на 10 % сокращается и время усреднения.

В целом пульсирующая подача газа оказывает положительный эффект как на степень оголения зеркала воды, так и на время ее усреднения. При пульсирующей подаче газа имеет место грибообразное раскрытие потока в объеме жидкости с значительным увеличением площади контакта взаимодействия фаз. Это способствует интенсификации процессов тепло-массообмена, а также рафинирования. Важно отметить, что полученные в ходе экспериментов данные с датчиков, расположенных в районе днища модели, указывают на более интенсивное перемешивание при пульсирующей продувке в предполагаемых застойных зонах (в нижней части модели ковша).

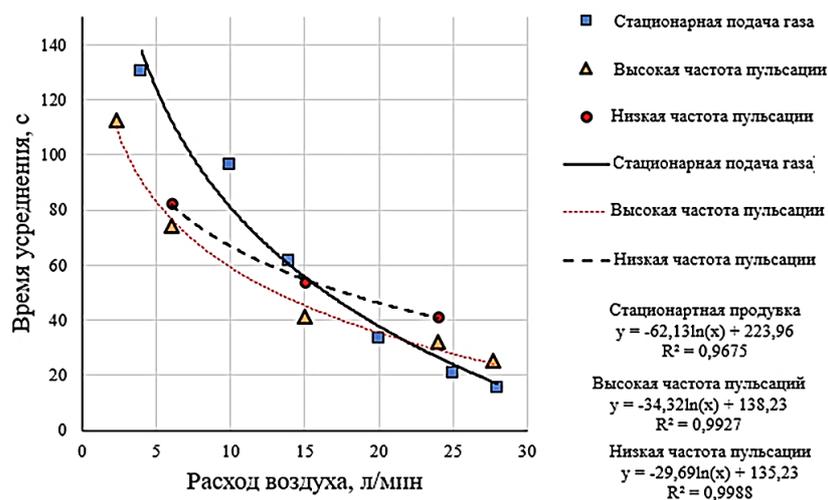


Рисунок 3 — Зависимость времени усреднения от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки

Полученные данные свидетельствуют о достаточно высокой эффективности нового способа гомогенизации металлических расплавов и целесообразности проведения дальнейших исследований в производственных условиях.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Отмечено, что при определённых режимах пульсирующей подачи газа в результате раскрытия вдуваемого потока в средней и нижней части объема жидкости образуются потоки, способствующие выносу неметаллических включений к поверхности, раздела «вода — масло».

2. При одинаковых расходах воздуха пульсирующая продувка обеспечивает более интенсивные гидродинамические процессы, о чём свидетельствует поведение масляных включений в жидкой ванне модели.

3. Выявлено, что при пульсирующем режиме продувки с расходом воздуха 15 л/мин и частотой пульсации 22 ед./мин за время паузы в подаче воздуха зеркало воды успевает вновь покрыться масляным покровом, что в реальных производственных условиях будет способствовать снижению интенсивности вторичного окисления стали кислородом атмосферы.

4. Установлено, что чем выше частота пульсаций (свыше 180 ед./мин), тем разница между степенью раскрытия зеркала воды во время подачи газа и в момент паузы значительно уменьшается.

5. При режиме продувки с расходом воздуха 6 л/мин и частотой пульсации 300 ед./мин наблюдается площадь раскрытия зеркала воды близкая к площади раскрытия, имеющей место при стационарной продувке через 2 пробки с интенсивностью 9 л/мин.

6. Сравнивая два исследованных способа продувки с точки зрения вторичного окисления и времени гомогенизации, можно рекомендовать новый способ для обработки любых марок стали в диапазоне интенсивности продувки 2–22 л/мин, а при обработке сталей, склонных к интенсивным процессам вторичного окисления, пульсирующая подача может быть эффективнее и в диапазоне интенсивности 22–28 л/мин. Несмотря на некоторое удлинение времени операции, площадь контакта зеркала с воздухом в этом случае значительно меньше.

### Список литературы

1. Смирнов, А. Н. Внепечное рафинирование чугуна и стали : учебное пособие / А. Н. Смирнов, А. М. Зборщик. — Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. — 186 с.
2. Куберский, С. В. Усовершенствование методики моделирования продувки металла инертными газами в агрегате ковш-печь / С. В. Куберский, А. Н. Романчук, Я. А. Романчук // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник научных трудов IV международной научно-технической конференции. — 2019. — С. 127–130.