

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
для практических занятий по дисциплине  
"Теория очистки газов и жидкостей"  
(для студентов очной и заочной форм обучения  
направления подготовки 22.04.02 «Металлургия» магистерской программы  
«Промышленная теплотехника»)

Донецк-2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
для практических занятий по дисциплине  
" Теория очистки газов и жидкостей "  
(для студентов очной и заочной форм обучения  
направления подготовки 22.04.02 «Металлургия» магистерской программы  
«Промышленная теплотехника»)

РАССМОТРЕНО  
на заседании кафедры  
технической теплофизики  
Протокол №12 от 31.05.2018 г.

УДК 669: 532.516.13

Рецензент:

Гридин Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ГОУВПО «ДОННТУ».

Составители:

Захаров Николай Иванович – профессор кафедры технической теплофизики ГОУВПО «ДОННТУ»;

Сапронова Елена Витальевна – старший преподаватель кафедры технической теплофизики ГОУВПО «ДОННТУ».

Методические указания для практических занятий по дисциплине " Теория очистки газов и жидкостей " [Электронный ресурс] для студентов для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 22.04.02 «Металлургия» магистерской программы «Промышленная теплотехника» / ГОУВПО «ДОННТУ», Каф.технической теплофизики; сост. Н.И. Захаров, Е.В. Сапронова – Донецк: ДОННТУ, 2018. – Систем. требования Acrobat Reader.

Включают основные теоретические положения и методики для расчетов на практических занятиях по дисциплине "Теория очистки газов и жидкостей".

Методические указания помогут студентам углубить теоретические знания и получить необходимые практические навыки.

УДК 669: 532.516.13

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ТЕОРИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И РЕСУРСО- -ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВНЕПЕЧНОГО ОЧИЩЕНИЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ ОТ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ.....	9
2. МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ.....	16
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	19

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что газы, имеющиеся в стали, ухудшают ее эксплуатационные свойства [1]. Так, наличие в ней водорода повышает флокеночувствительность и склонность к образованию трещин. Азот увеличивает загрязненность нитридными включениями и повышает склонность нелегированного металла к старению. Кислород образует с различными элементами, входящими в состав стали, оксидные включения и тем самым повышает его загрязненность и ухудшает характеристики пластичности и прочности.

Для очищения стали от газов в настоящее время применяют различные способы внепечной обработки, которые имеют значительное преимущество перед рафинированием металла в печи как в отношении интенсификации процессов конвективного теплопереноса, так и степени дегазации расплава.

К этим способам прежде всего относят продувку расплавов аргоном, обработку стали вакуумом, порошковой проволокой, а также электростатическим полем [2].

Одной из важнейших проблем металлургии и других отраслей промышленности является ресурсо- и энергосбережение. Применительно к рассматриваемой технологии решение этой проблемы связано с разработкой ресурсо- и энергосберегающих режимов интенсификации внепечного очищения расплавов стали.

# 1. ТЕОРИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВНЕПЕЧНОГО ОЧИЩЕНИЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ ОТ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ

Классическим вариантом внепечного очищения жидкой стали от газов является вакуумирование (VD – процесс, в котором ковш с металлом помещают в вакуумную камеру [1] или DH – процесс при порционном вакуумировании [1]).

Для интенсификации технологии совместно с вакуумированием используют сосредоточенную продувку аргоном (например, через пористую пробку, установленную в днище ковша с расплавом), либо электростатическое поле высокой напряженности [2].

Движущей силой очистки жидкого металла от газов является градиент их концентрации в ванне. При этом концентрация газов на границе "металл-вакуум" или "металл-аргон" должна быть минимальной в сравнении со значением этой характеристики в объеме расплава.

Вследствие адсорбции кислорода на поверхности всплывающих пузырей аргона при продувке недораскисленных сталей имеет место углеродное раскисление.

Благоприятное влияние на очистку стали от газов оказывает рассредоточение дутья по днищу ковша и использование пор малого диаметра в продувочном устройстве. Это приводит к мелкопузырьковому режиму продувки и большой межфазной поверхности "аргон-металл". При достаточно больших, близких к оптимальным, интенсивностях продувки эта межфазная поверхность намного превосходит поверхность "металл-вакуум", вследствие чего для рядовых марок металла можно отказаться от одновременного с продувкой вакуумирования стали [2].

Вместе с тем, не интенсивность продувки, а количество пузырей аргона, внедряемых в расплав в единицу времени, является доминирующим

фактором повышения эффективности очищения жидкой стали от газов. При чрезмерно высоких интенсивностях продувки происходит слияние отдельных пузырей, приводя к снижению площади поверхности контакта "аргон-металл" и эффективности очищения расплава. Как, известно, фактор развития межфазной поверхности в увеличении эффективности технологии существенно преобладает над повышением степени турбулизации жидкой ванны. Последняя выравнивает по ее объему концентрацию удаляемого газа и температуру расплава, но существенно не влияет на массоперенос через область диффузионных пограничных слоев на поверхности пузырей аргона..

Следуя известной классификации [2] режимов продувки (пузырьковый, переходный и струйный), пузырьковый режим соответствует всплыванию мелких, не сливающихся друг с другом пузырей аргона. Переходный режим продувки соответствует их частичному слиянию, т.е. включает мелкие и более крупные (вследствие слияния) пузыри. И, наконец, струйный режим продувки – это режим всплывания крупных пузырей аргона, в которые вырождается внедряемая в расплав струя инертного газа.

Таким образом, снижение эффективности очищения жидкой стали от газов происходит при выходе режима продувки из пузырькового по мере роста интенсивности продувки.

Согласно современным представлениям [2], эффективность технологии увеличивается с ростом начальной концентрации удаляемого газа и понижении концентрации в жидкой ванне ПАЭ (поверхностно-активных элементов), например, для стали - серы.

Совмещение продувки аргоном с выпуском металла из плавильной печи в ковш также повышает эффективность технологии, что связано с дополнительным перемешиванием расплава, помимо пузырями аргона также и струей стали, выпускаемой из печи в ковш.

В настоящее время механизм массопереноса при внепечном очищении металлургических расплавов от газов представляется следующей последовательностью звеньев [3]: а) перенос конвекцией растворенных в

жидкой стали атомов удаляемого газа к границе раздела "аргон-металл"; б) перенос этих частиц через диффузионный пограничный слой; в) их адсорбция на рассматриваемой межфазной поверхности; г) химическая реакция молизации адсорбированных атомов на этой поверхности; д) десорбция образованных молекул в газовую фазу (пузыри аргона, полость вакууматора).

Если процесс является многостадийным, то суммарное сопротивление массопереносу, как известно, складывается из сопротивлений на отдельных стадиях. В случае, когда сопротивление одной из стадий существенно превосходит остальные (стадия является лимитирующей), то малыми сопротивлениями пренебрегают, считая, что скорость массопереноса процесса в целом определяется скоростью этого, самого медленного звена.

Рассмотрим последовательно различные варианты внепечного очищения стали, в которых массообменный процесс лимитируется одним звеном. Если это массоперенос через диффузионный пограничный слой, непосредственно прилегающий к поверхности "вакуум-металл" или "аргон-металл", то этот вариант имеет место для чистого металла, для его сплавов с поверхностно-инактивными и слабоактивными компонентами, а также с ПАЭ, но при их достаточно малой концентрации ( $\leq 0,03\%$  по сере).

Как известно, лимитирование массообменного процесса рассматриваемым звеном означает, что этот процесс относится к реакции первого порядка. К реакции того же порядка относятся и адсорбционные процессы, связанные с занятием атомами удаляемого газа вакантных мест на межфазной границе. Это сопряжено с преодолением сил сопротивления со стороны ПАЭ.

К поверхностно-активным компонентам сталеплавильной ванны относятся кислород, сера, селен и теллур, а к поверхностно-инактивным и слабоактивным никель, хром, вольфрам, марганец, кремний, молибден, алюминий, фосфор, углерод и другие.



Поверхностно-активный кислород, в отличие от серы, адсорбируясь на рассматриваемых межфазных поверхностях, не задерживается на них, а взаимодействует с углеродом жидкой стали:



Продукт этой реакции (окись углерода) проникает в пузыри аргона или вакуум-камеру.

По достижении некоторой концентрации (0,12% по сере) наблюдается смена лимитирующего звена на адсорбционное. При промежуточных концентрациях необходимо учитывать как диффузионное, так и адсорбционное звенья массообменного процесса.

Высокая прочность молекул азота приводит к необходимости затрат большой энергии при молизации атомов этого газа на рассматриваемых межфазных поверхностях и, как следствие, лимитированию массопереноса в стали этим актом. Реакция имеет второй порядок, а лимитирующее звено характерно для малой концентрации азота в расплаве (<0,01% - 0,04%), особенно при большой концентрации в нем ПАЭ.

При наличии на зеркале металла жидкого шлака, под которым осуществляется процесс внепечного очищения расплава при атмосферном давлении, лимитирующим звеном массопереноса может стать переход удаляемых газов через слой шлака. Воздействие шлака на очищение жидкого металла от газов сводится к двум основным факторам.

В первом случае имеет значение растворимость  $S$  газов в шлаке, определяющая его газопроницаемость  $q$ :

$$q = D \cdot S, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии газа в шлаке.

Как известно, слабая растворимость азота в сталеплавильном шлаке фактически блокирует массообмен этого газа между металлом и атмосферой.

Несмотря на то, что водородопроницаемость шлаков существенна [1], если атмосфера является влажной, то шлак может быть источником водорода, загрязняющего сталь. Этот фактор может стать лимитирующим при достижении глубокой дегазации.

В случае, когда поверхностью массообмена является пузырьковая граница, лимитирующим звеном массообменного процесса может стать прохождение пузырей аргона через шлак. Это связано с тем, что лишь пузыри, обладающие достаточной энергией, могут совершить работу перехода через границу раздела "металл-шлак". В противном случае они задерживаются в подшлаковом слое.

Следуя работе [4], критический размер пузырей аргона определяется целым набором параметров и в каждом конкретном варианте внепечной дегазации металла индивидуален. В условиях опытно-промышленных исследований [4] критический размер пузырей аргона оказался равным 1 см.

Математическое описание внепечного очищения жидкого неподвижного металла от водорода способом вакуумирования в ковше может быть описано уравнением диффузии Фика:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3)$$

с краевыми условиями для концентрации водорода  $c(x, \tau)$ :

$$c(x, 0) = C_0, \quad (4)$$

$$-D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_0 = 0, \quad (5)$$

$$c(H, \tau) = K \cdot \sqrt{P_{H_2}}. \quad (6)$$

Здесь:  $C_0$  – начальная концентрация водорода в металле;  $D$  – коэффициент диффузии этого газа в расплаве;  $H$  – глубина жидкой ванны;  $P_{H_2}$  – парциальное давление водорода в вакуум-камере,  $x$  – вертикальная координата;  $\tau$  – время. Постоянный коэффициент ( $K$ ) равен постоянной Сиверта  $K_H$  для водорода в стали при отсутствии одновременного с вакуумом воздействия на расплав электрического поля и равен нулю в случае, когда напряженность этого поля выше критического значения, равного (3-18) КВ/см [2]. В этих условиях электрическое поле срывает ионы водорода (протоны) с зеркала металла, обнуляя концентрацию этого газа на границе "металл-вакуум".

При массовом барботаже жидкой ванны пузырями аргона, т.е. в условиях рассредоточенной по пористому днищу ковша продувки металла аргоном под слоем шлака при атмосферном давлении уравнение внепечного очищения стали в период выпуска расплава из печи в ковш имеет вид [5]:

$$\varepsilon = \frac{1}{Q_H} \int_{\tau_0}^{\tau} (\dot{m}H) / m_0 (I/U)_{cp} d\tau. \quad (7)$$

Здесь  $\varepsilon$  – глубина дегазации жидкого металла;  $Q_H$  – начальное содержание удаляемого водорода в ванне;  $H$  – ее глубина в функции времени  $\tau$ ;  $\tau_0$  – момент начала продувки;  $\dot{m}$  – массовый расход аргона;  $m_0$  – его содержание в единичном пузыре;  $U_{cp}$  – средняя скорость его всплывания;  $I$  – средний поток массы удаляемого водорода на поверхность единичного пузыря. При этом осреднение производится по объему расплава в момент времени  $\tau$ .

Проблема ресурсо- и энергосбережения является одной из самых актуальных. Её решение в металлургии чаще всего связано с разработкой ресурсо- и энергосберегающих режимов металлургических технологий.

В странах СНГ, как известно, имеет место неоправданно более высокий удельный расход материальных и энергоресурсов по сравнению с экономически развитыми странами дальнего зарубежья. Укоренившийся взгляд на зависимость эффективности технологий от интенсивности ввода материальных и энергоресурсов в металлургические агрегаты "Чем интенсивнее, тем эффективнее" не выдерживает научной критики. Напротив, снижение этих расходов до уровня "золотой середины" позволяет рационально подходить к решению проблемы ресурсо- и энергосбережения.

Решение проблемы ресурсо- и энергосбережения при внепечной дегазации жидкого металла рассредоточенной по днищу ковша продувкой аргоном непосредственно связано с исследованием эффективности этой технологии, напрямую связанной с интенсификацией массообменных процессов. Последняя возрастает с уменьшением размера пузырей аргона, т.к. при фиксированной интенсивности продувки это приводит к возрастанию площади межфазной поверхности "аргон-металл".

Следовательно, с позиций ресурсо- и энергосбережения целесообразно использовать поры малого диаметра при конструкции продувочных устройств. Кроме того, совмещение продувки стали с ее выпуском из печи в ковш приводит не только к повышению эффективности технологии, но и к экономии материальных (аргон) и энергоресурсов (топливо). При этом, с целью экономии инертного газа оправдано повышать интенсивность продувки по мере наполнения ковша расплавом [5].



## 2. МЕТОДИКИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

На практических занятиях по физико-химическим основам образования вредных примесей в металле вследствие сжигания топлива каждый студент получает задания следующего типа:

- разработать мероприятия, снижающие содержание вредной примеси в жидкой ванне плавильной печи в конкретных условиях ведения плавки, руководствуясь лекциями и учебником [1].

При этом в качестве вредной примеси для стали студент получает водород, поступающий в ванну плавильного агрегата.

На практических занятиях по очищению жидкой стали от растворенного водорода используется математическая модель (3) - (6), при компьютерной реализации которой разные студенты получают различные численные значения параметров  $C_0, H, P_{H_2}$ .

В расчете используется явный конечно-разностный метод [6] в соответствии с уравнением:

$$C_i^{j+1} = (1 - 2\delta)C_i^j + \delta(C_{i-1}^j + C_{i+1}^j), \quad (8)$$

$$C(i, 0) = C_0, \quad (9)$$

$$C(0, j) = C(I, j), \quad (10)$$

$$C(N, j) = K, \quad (11)$$

$$\delta = D \cdot \Delta\tau / \Delta x^2, D = 0,15 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}. \quad (12)$$

Здесь:  $i$  – номер узла конечно-разностной сетки по вертикальной координате  $x$ ;  $j$  – момент времени;  $\Delta x, \Delta\tau$  – шаг сетки по  $x$  и  $\tau$ ;  $i = 0$  и  $i = N$  соответствуют граничным точкам  $x = 0$  и  $x = H$ ;  $D$  – коэффициент диффузии водорода в расплаве стали при  $1600^\circ\text{C}$ .

Студент обязан проанализировать полученные им расчетные результаты (характер зависимости от времени распределения концентрации

удаляемого водорода по высоте жидкой ванны, значения этой концентрации в граничных точках расчетной области и др.).

Использование уравнения (7) позволяет не только исследовать интенсификацию диффузионного процесса внепечного очищения жидкой стали от растворенного водорода, но и определять ресурсо- и энергосберегающие режимы интенсификации этой технологии.

На практических занятиях студент получает численные значения физико-химических параметров:

- плотность металла и шлака:

$$\rho_{\text{м}} = 6,9 \text{ г/см}^3; \quad \rho_{\text{ш}} = 3,0 \text{ г/см}^3;$$

- температура металла и атмосферы:

$$T_{\text{м}} = 1873^{\circ}\text{К}; \quad T_{\text{а}} = 300^{\circ}\text{К};$$

- динамическая вязкость стали:

$$\mu = 0,058 \text{ г/(см}\cdot\text{с)};$$

- постоянная равновесия водорода:

$$K_{\text{H}} = 0,343 \cdot 10^{-7} \text{ г}^{0,5} \cdot \text{см}^{-2,5} \cdot \text{с};$$

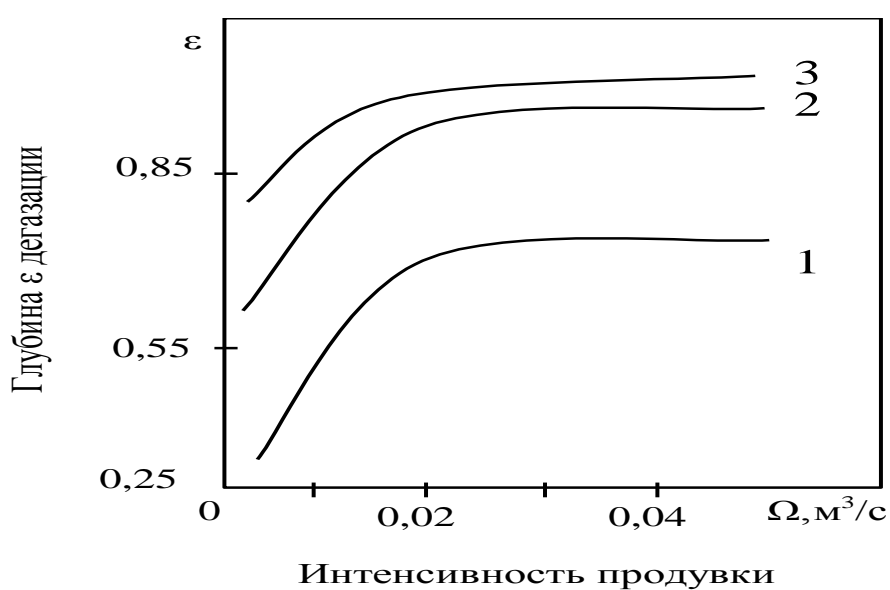
- коэффициент диффузии водорода в жидкой стали:

$$D_{\text{H}} = 0,15 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Кроме того, преподаватель дает численные значения технологических параметров, различных у разных студентов: геометрические размеры жидкой ванны, шлака и пор, длительность обработки стали аргоном (время выпуска расплава из печи в ковш), момент начала продувки, начальное значение концентрации водорода в металле; концентрацию поверхностно-активной серы; верхнее значение линейно возрастающей во времени интенсивности продувки стали аргоном.

Исследование внепечного очищения жидкой рельсовой стали от водорода и разработку ресурсоэнергосберегающего режима интенсификации технологии студенты проводят, используя кафедральную компьютерную программу.

Пример построения графика зависимости степени  $\varepsilon$  очищения расплава от интенсивности  $\Omega$  продувки аргоном при различной глубине ванны приведен на рис. 1, из которого следует монотонно возрастающий характер этой зависимости, но до некоторого значения  $\Omega_0$ . Оно определяет энергосберегающий режим технологии. Снижение реальных значений  $\Omega$  до уровня  $\Omega_0$  экономит этот дорогостоящий газ и энергоресурсы установки по его получению.



1 – H = 1 м, 2 – H = 2 м, 3 – H = 3 м, [S]=0,02%,  
[O]=0,02%,  $\tau_b=450$ с,  $T_M=1580^\circ\text{C}$ ,  $M_M=220$ т

Рис. 1. Зависимость глубины дегазации рельсовой стали при различной глубине ванны от интенсивности продувки.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Явойский В.И., Кряковский Ю.В., Григорьев В.П. Металлургия стали. – М.: Металлургия. – 1983. – 584с.
2. Захаров Н.И., Троцан А.И., Дюдкин Д.А., Туяхов А.И. Тепломассообменные процессы внепечной дегазации стали. – Донецк: NORD PRESS. – 2009. – 156с.
3. Линчевский Б.В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. – М.: Металлургия. – 1986. – 224с.
4. Баканов К.П., Бармотин И.П., Власов Н.Н. Рафинирование стали инертным газом. – М.: Металлургия. – 1975. – 229с.
5. Захаров Н.И., Дюдкин Д.А., Троцан А.И., Туяхов А.И. Моделирование теплофизических процессов внепечной дегазации металла продувкой инертным газом. – Донецк.: Юго-Восток. – 1999. – 140с.
6. Захаров М.І., Троцан А.І. Математичні методи розрахунку тепломасопереносу та комп'ютерне моделювання металургійних процесів. – Донецьк.: Донбас. – 2011. – 99с.