

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
"Интенсификация тепломассообменных процессов
в технологических агрегатах"
(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
"Интенсификация тепломассообменных процессов
в технологических агрегатах"
(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 "Интенсификация тепломасообменных процессов в технологических агрегатах" [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 расчетов на практических занятиях по дисциплине "Интенсификация тепломасообменных процессов в технологических агрегатах".

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

УДК 669: 532.516.13

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	5
1.1. Интенсификация тепломассообменных процессов в ректификационных теплоэнергетических установках.....	5
1.2. Интенсификация тепломассообменных процессов в металлургических теплоэнергетических агрегатах.....	8
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ..	15
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	18

ВВЕДЕНИЕ

Научный подход к интенсификации различных технологий актуален для Украины, у которой, как известно, неоправданно более высокий удельный расход энергоресурсов по сравнению с экономически развитыми странами Дальнего Зарубежья.

Укоренившийся взгляд на зависимость эффективности технологий от интенсивности ввода энергоносителей в промышленные агрегаты ("Чем интенсивнее, тем эффективнее") не выдерживает научной критики. Напротив, снижение рассматриваемой характеристики до уровня "золотой середины", т.е. оптимума, позволяет рационально подходить к энергосбережению.

На повестке для экономики Украины – необходимость широкого применения интенсивных, но вместе с тем эффективных, энергетических установок.

Специальность "Промышленная теплотехника" включает в себя и металлургическую теплоэнергетику, в проблематику которой входит и разработка энергосберегающих режимов металлургических и смежных с ними технологий. И если часть разделов дисциплины "Интенсификация тепломассообменных процессов" студент-заочник может изучить самостоятельно (например, интенсификация тепломассообменных процессов в котельных установках), то раздел интенсификации этих процессов в металлургических и смежных с ними теплоэнергетических агрегатах наиболее труден, с одной стороны, а с другой, - достаточно проработан преподавателями кафедры "Техническая теплофизика" физико-металлургического факультета ДонНТУ.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

1.1. Интенсификация тепломассообменных процессов в ректификационных теплоэнергетических установках

Если понижать температуру газа, охлаждая его, то он превращается в жидкость. Сначала при охлаждении газа от него отнимается теплота перегрева и газ превращается в сухой насыщенный пар. При дальнейшем его охлаждении отнимается теплота конденсации и сухой насыщенный пар начинает превращаться во влажный пар, в котором содержатся капельки жидкости. Когда теплота конденсации будет полностью отнята, весь влажный пар превращается в жидкость.

Температура сжижения газа зависит от его природы и давления. Чем выше давление, тем легче его перевести в жидкость. Однако для каждого газа существует определенная критическая температура, выше которой этот газ нельзя превратить в жидкость даже при очень высоком давлении (табл. 1).

Таблица 1

Название газа	Температура сжижения при атмосферном давлении, °С	Критическая температура, °С
Воздух	- 192,5 – - 194,4	- 140,6
Кислород	- 183,0	- 119,0
Азот	- 195,6	- 147,0
Аргон	- 186,0	- 122,0

В ректификационных теплоэнергетических установках (кислородных установках КУ) технический кислород получают из атмосферного воздуха [1].

В начале сжижения воздуха кислород конденсируется быстрее азота, т.к. имеет более высокую температуру сжижения. И, напротив, к концу процесса сжижения, начинается усиленная конденсация азота.

Отнятие теплоты от охлаждаемого воздуха в КУ осуществляют с помощью хладагента, в качестве которого используют предварительно охлажденный воздух. Процесс охлаждения, осуществляемый с помощью хладагента, называется холодильным циклом.

Для получения очень низкой температуры, необходимой для сжижения воздуха, в холодильный цикл включают теплообменник. Теплообменник служит для охлаждения сжатого в компрессоре воздуха. Охлаждение в теплообменнике осуществляют обратным потоком воздуха, предварительно охлажденного.

При сжижении воздуха используют явление сильного охлаждения сжатого газа при его расширении с одновременным совершением внешней работы. При расширении воздух производит работу за счет своей внутренней энергии, вследствие чего и охлаждается. Охлаждение будет тем значительнее, чем больше степень расширения воздуха, т.е. чем большую работу он производит.

В таблице 2 приведена температура воздуха в конце расширения, начиная с различного давления и заканчивая атмосферным, при начальной температуре 30⁰С.

Таблица 2

Начальное давление, атм.	Конечная температура, ⁰ С
10	-83
30	- 112
60	- 125

В холодильном цикле среднего давления используют детандер (цилиндр поршневого двигателя) и процесс дросселирования (пропускание воздуха через узкую щель расширительного вентиля). Воздух предварительно сжимают в компрессоре до давления 20-40 атм. Далее воздух охлаждается с помощью теплообменника. После теплообменника часть воздуха отводится в

детандер, в котором расширяется до давления 1 атм., толкая поршень этого двигателя и производя работу. Воздух при этом сильно охлаждается. Именно эту часть воздуха пускают в теплообменник для отдачи холода поступающей в теплообменник свежей порции воздуха.

Другая часть воздуха идет вместо детандера на дросселирование, после которого переходит в жидкое состояние и собирается в сборнике.

Рассмотрим разделение жидкого воздуха на кислород и азот.

Если жидкость состоит только из одного вещества, то и пар над нею будет содержать только это вещество. Процесс усложняется, если жидкость состоит из двух веществ с различной температурой испарения.

Жидкий воздух состоит, в основном из жидкого кислорода (21%) и жидкого азота (78%). Оставшийся 1% приходится на другие компоненты, в частности, аргон.

При фиксированной температуре жидкого воздуха ниже (-190°C) наиболее интенсивно будет испаряться азот с температурой испарения (-196°C). Процесс испарения будет продолжаться при этой температуре до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между составом жидкой фазы и пара. При этом в жидкости будет больше кислорода, чем в паре, а в паре больше азота, чем кислорода.

Для полного разделения жидкого воздуха на жидкий кислород и газообразный азот применяют многократное испарение жидкости.

Сущность процесса очищения жидкого воздуха от балластного азота состоит в том, что парообразная смесь из азота и кислорода пропускается через жидкий воздух с более низкой температурой, чем пар. Это вызывает конденсацию кислорода из пара, т.к. жидкость имеет температуру ниже точки конденсации кислорода. И, кроме того, при этом дополнительно испаряется азот из жидкого воздуха, т.к. последний имеет более высокую температуру, чем точка испарения азота. Этот процесс ректификации в кислородной установке повторяется многократно до тех пор, пока не получится газ, состо-

ящий, в основном, из азота, и жидкость, состоящая практически из чистого кислорода.

Интенсификация тепломассообменных процессов в ректификационных теплоэнергетических установках достигается рациональным выбором давления в компрессоре, численного значения доли охлажденного в теплообменнике воздуха, идущего в детандер, а также значений других параметров.

1.2. Интенсификация тепломассообменных процессов в металлургических теплотехнологических агрегатах

Рассмотрим технологию дегазации металла от водорода и других вредных газов.

Классическим вариантом внепечного очищения жидкой стали от газов является вакуумирование (VD – процесс, в котором ковш с металлом помещают в вакуумную камеру или DH – процесс при порционном вакуумировании [2]).

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 очищения 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 очищение 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: 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 слабо-активным 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 [2], критический размер пузырей аргона определяется целым набором параметров и в каждом конкретном варианте внепечной дегазации металла индивидуален. В условиях опытно-промышленных исследований 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;

τ – время. Постоянный коэффициент (K) равен постоянной Сивертса 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 аргонном под слоем шлака при атмосферном давлении уравнение внепечного очищения стали в период выпуска расплава из печи в ковш имеет вид [2]:

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

Здесь ε – глубина дегазации жидкого металла; Q_H – начальное содержание удаляемого водорода в ванне; H – ее глубина в функции времени τ ; τ_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 τ .

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

В нашей республике, 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 интенсификации внепечной дегазации жидкого металла рассредоточенной по днищу ковша продувкой аргоном непосредственно связано с исследованием эффективности этой технологии, напрямую связанной с интенсификацией тепломассообменных 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 при интенсификации технологии использовать поры малого диаметра при конструкции продувочных устройств. Кроме того, совмещение продувки стали с ее выпуском из печи в ковш приводит не только к интенсификации 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 [2].

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Интенсификация тепломассообменных процессов в ректификационных теплоэнергетических установках достигается в частности рациональным выбором давления в компрессоре.

На рис. 1 изображен график, показывающий зависимость между содержанием кислорода в жидком воздухе и его паре при различном давлении. Из графика видно, например, что при давлении 1 атм пар над жидким воздухом с 21% кислорода будет иметь только 6,3% кислорода (точка А). Чтобы повысить содержание кислорода в паре до 21%, необходимо, чтобы жидкий воздух содержал 52% кислорода (точка Б). С повышением давления, при котором кипит жидкость, количество кислорода в паре увеличивается. Так, например, при давлении в 6 атм пар над жидким воздухом будет содержать уже 10% кислорода (точка В).

На практических занятиях студенту дается значение давления в компрессоре из диапазона [1,20 атм]. Ему необходимо построить, используя квадратичную интерполяцию, аналогичный рисунку 1 график. Используя этот график, необходимо определить содержание кислорода в паре над жидким воздухом с 21% содержанием кислорода. И, кроме того, определить содержание кислорода в жидком воздухе, которому соответствует 21% содержанию кислорода в паре.

Производительность кислородной установки, характеризующая интенсивность протекающих в ней тепломассообменных процессов, определяется формулой:

$$K = \frac{A - A_N}{A - A_K}, \quad (8)$$

где K – количество кислорода, получаемого из 1 м^3 воздуха, поступающего в установку, м^3 ;

A – чистота отходящего азота, %;

A_K – содержание азота в полученном кислороде, %;

A_N – содержание азота в атмосферном воздухе, %.

Задание на практических занятиях предполагает расчет величины повышения производительности кислородной установки за счет интенсификации тепломассообменных процессов при переходе с аппарата однократной ректификации к установке двукратной ректификации.

Пусть, например, в аппарате однократной ректификации чистота получаемого кислорода 99%, а чистота отходящего азота $A = 92\%$. Следовательно, $A_K = 100 - 99 = 1\%$, откуда имеем:

$$K = \frac{92 - 79,1}{92 - 1} = 0,142 \text{ м}^3.$$

При проведении расчета предполагалось, что воздух состоит лишь из азота и кислорода. Кроме того, принималось, что $A_N = 79,1$.

При переходе к установке двукратной ректификации с той же чистотой получаемого кислорода, чистота отходящего азота повышается до 97%.

В этом случае имеем:

$$K = \frac{97 - 79,1}{97 - 1} = 0,187 \text{ м}^3.$$

Следовательно, производительность кислородной установки повышается на $(0,187 - 0,142) / 0,142 = 0,32$, т.е. на 32%.

Именно поэтому производительник, обслуживающий кислородную установку, должен стремиться к поддержанию наивысшей чистоты отходящего азота. При этом уменьшаются потери кислорода с отходящим азотом, происходит более полное разделение воздуха на кислород и азот и, следовательно, повышается производительность кислородной установки за счет интенсификации тепломассообменных процессов.

На практических занятиях по интенсификации очищения 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 в соответствии с уравнением:

$$C_i^{j+1} = (1 - 2\delta)C_i^j + \delta(C_{i-1}^j + C_{i+1}^j), \quad (9)$$

$$C(i, 0) = C_0, \quad (10)$$

$$C(0, j) = C(1, j), \quad (11)$$

$$C(N, j) = K, \quad (12)$$

$$\delta = D \cdot \Delta\tau / \Delta x^2, \quad D = 0,15 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}. \quad (13)$$

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

Студент обязан проанализировать полученные им расчетные результаты (характер зависимости от времени при интенсификации технологии 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 внепечного очищения жидкой стали от растворенного водорода, но и определять ресурсоэнергосберегающие режимы интенсификации этой технологии.

Студент получает численные значения физико-химических параметров:

- плотность металла и шлака:

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

- температура металла и атмосферы:

$$T_m = 1873^\circ\text{K}; \quad T_a = 300^\circ\text{K};$$

- динамическая вязкость стали:

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

- постоянная равновесия водорода:

$$K_H = 0,343 \cdot 10^{-7} \Gamma^{0,5} \cdot \text{см}^{-2,5} \cdot \text{с};$$

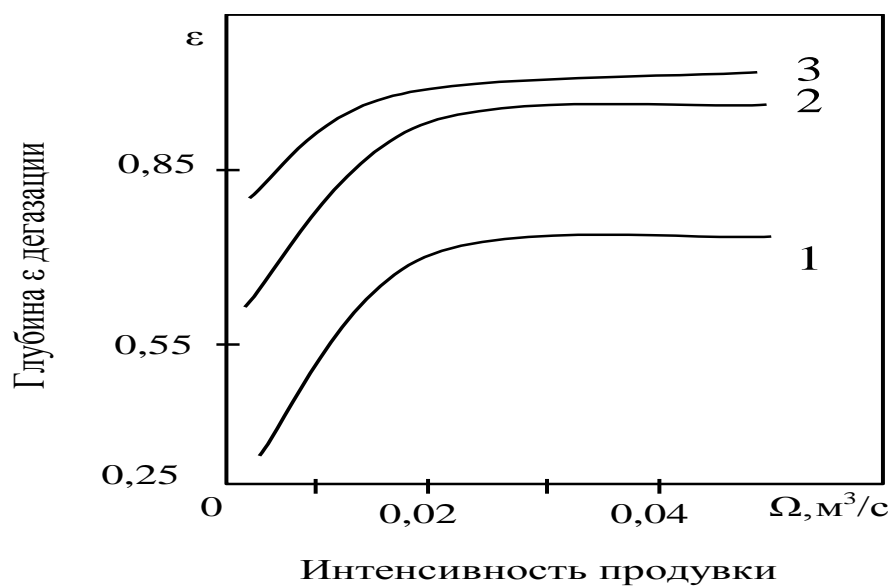
- коэффициент диффузии водорода в жидкой стали:

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

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

Пример построения графика зависимости степени ε очищения расплава от интенсивности Ω продувки аргоном при различной глубине ванны приведен на рис. 1, из которого следует монотонно возрастающий, повышающий уровень интенсификации технологии, характер этой зависимости, но до некоторого значения Ω_0 . Оно определяет ресурсоэнергосберегающий режим интенсификации технологии. Снижение реальных значений Ω до уровня Ω_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%, $\tau_B=450\text{с}$, $T_M=1580^\circ\text{C}$, $M_M=220\text{т}$

Рис. 2. Зависимость глубины дегазации рельсовой стали при различной глубине ванны от интенсивности продувки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глизманенко Д.Л. Кислород и его получение. – М.: ГХИ. – 1981. – 344с.
2. Захаров Н.И., Туяхов А.И. Массообменные процессы внепечной дегазации стали. – Донецк: NORD PRESS. – 2009. – 156с.