

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**

ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.А. Ч Е Р Н Ы Й

**ГАЗОВЫЕ ВАГРАНКИ И ВОЗДЕЙСТВИЕ НА
НАГРЕВАЕМЫЙ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЙ МАТЕРИАЛ
ПЕРЕМЕННОЙ ПОДАЧИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО
ТОПЛИВА**

Учебное пособие

Пенза 2009

УДК 669.621.74

Черный А.А. Газовые вагранки и воздействие на нагреваемый железоуглеродистый материал переменной подачи высокотемпературных продуктов сгорания водородсодержащего топлива: Учеб. пособие. – Пенза: Пенз. гос. ун-т, 2009. - 32 с., 4 табл., библиогр. 8 назв.

Изложены основы плавки чугуна на газообразном топливе - природном газе. Приводятся рациональные способы сжигания топлива в газовых вагранках, эффективные технологии плавки чугуна на основе изобретений. Разработки выполнены с применением математического моделирования по результатам экспериментов.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета. Оно может быть использовано студентами при изучении курсов «Принципы инженерного творчества», «Печи литейных цехов», «Литейные сплавы и плавка», «Математическое моделирование в литейном производстве», а также при выполнении курсовых и дипломных работ.

Рецензенты:

Научный совет Пензенского научного центра;

А.С. Белоусов, главный металлург ОАО «Пензадизельмаш»

© А.А. Черный, 2009.

ВВЕДЕНИЕ

В литейном производстве широко используется процесс плавки чугуна в вагранках. В качестве топлива для этих печей применяют преимущественно кокс. В коксе имеется вредная примесь – сера, которая при плавке частично переходит в металл, ухудшая его качество. Кроме того, кокс – непрочный материал, и часть его в шахте вагранки разрушается, образуя уходящую с продуктами горения пыль. В ваграночных газах кроме пыли содержатся угарный газ и вредные соединения серы, ухудшающие при поступлении в атмосферу экологическую среду. Поэтому многократно делались попытки заменить ваграночный кокс используемым для отопления металлургических печей газообразным топливом.

Известно, что в коксовой вагранке металл плавится в противотоке газов на холостой коксовой колоше, а затем, стекая в виде капель и струек по горящему коксу холостой колоши, перегревается. Принцип перегрева чугуна, имеющий место в коксовой вагранке, пытались использовать при плавке чугуна в газовых вагранках. Для этого предлагалось заменить холостую коксовую колошу огнеупорами, разогреваемыми продуктами сгорания горючего газа. Такие вагранки испытывались, но опыты показали, что конструкция вагранок, принятые способы плавки и примененные для холостой колоши огнеупоры не обеспечили необходимых для эффективного ваграночного процесса условий. Огнеупорная колоша быстро оплавлялась, ваграночный процесс нарушался, плавки приходилось прекращать. Стабильность плавильного процесса не достигалась.

В результате систематизированных исследований с применением моделирования созданы новые газовые вагранки различных конструкций, в том числе и с холостой огнеупорной колошей (насадкой), которые прошли промышленное испытание. Разработки этих чугуноплавильных агрегатов выполнены на уровне изобретений. Актуальность и новизна этих разработок подтверждена рядом патентов, полученных как в нашей стране, так и в зарубежных странах.

СЖИГАНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ВАГРАНКАХ

Применительно к высокотемпературным печам разработано эффективное устройство для сжигания газообразного топлива, которое содержит горелку, закрепленную к кожуху теплового агрегата, горелочный туннель за выходным сечением сопла горелки. За пределами выходного сечения сопла горелки размещены сопла для подачи углеводородов, осевые линии которых удалены от осевой линии сопла горелки на расстоянии $a = (1,5 - 7)b$, где b – наибольший размер (высота, ширина, диаметр) сопла горелки в выходном сечении. Рациональна такая конструкция горелки и геометрическая форма сопла в выходном сечении, которая позволяет при прочих равных условиях уменьшить длину горящего факела, увеличивать в нем температуру. Сопла для подачи углеводородов могут быть размещены в пределах горелочного туннеля или за пределами горелочного туннеля.

Способ сжигания газообразного топлива осуществляется следующим образом. В горелку подают воздух и газообразное топливо. Создание горючей газовой смеси, если она холодная, производится в корпусе горелки или за выходным сечением сопла горелки. Если в горелку подается горячий воздух, то создание газовой смеси рационально за выходным сечением сопла горелки. Горючую смесь сжигают в горелочном туннеле и тепловом агрегате. При этом организуют процесс горения так, чтобы горячие газы имели температуру t_1 не ниже 1200^0 С. В горячие газы подают струями углеводороды при отношении скорости их движения в струях w_1 к скорости движения горячих газов в потоках w_2 1,01-12, что приводит к повышению излучательной способности горячих газов и интенсификации теплопередачи от горячих газов нагреваемому материалу, уменьшению потерь окисляющегося материала при нагревании горячими газами, увеличению долговечности огнеупорной футеровки теплового агрегата. Если температура горячих газов, в которые подают углеводороды, $t_1 < 1200^0$ С, то не все углеводороды, подаваемые в горячие газы, разлагаются и эффективность излучательной способности газов получается недостаточной для интенсификации теплопередачи от горячих газов нагреваемому материалу в тепловом агрегате. Для достаточно глубокого проникновения углеводородов в горячие газы, необходимо, чтобы $1,01 < \frac{w_1}{w_2} < 12$. При соблюдении указанных

оптимальных пределов отношения $\frac{w_1}{w_2}$ углеводороды успевают разложиться на коротком пути с образованием сажистого углерода и водорода. Если $\frac{w_1}{w_2} < 1,01$, то углеводороды не проникают в горячие газы, светимость горячих газов не увеличивается, процесс теплопередачи не интенсифицируется. В случае $\frac{w_1}{w_2} > 12$ струи углеводородов, имея большую скорость, проскакивают

высокотемпературные зоны горячих газов, углеводороды не успевают разложиться, совместимость горячих газов резко уменьшается.

При факельном сжигании газообразного топлива, когда подают газоздушную смесь в горелочный туннель, за выходным сечением сопла горелки образуется «холодное» ядро факела, по периферии которого возникает зона воспламенения горючей смеси. Чтобы не нарушать процесс воспламенения горючей смеси, углеводороды рационально подавать за пределами зоны воспламенения факела. Если же струи углеводородов будут проникать в зону воспламенения факела, то газодинамика в этой зоне нарушится, что приведет к прекращению процесса воспламенения горючей смеси.

При использовании холодного и горячего воздуха-окислителя в горячие газы рационально подавать углеводороды в количестве g_1 0,01 – 0,15 весового расхода топлива g_2 , подаваемого на сжигание. При $\frac{g_1}{g_2} < 0,01$ эффект влияния подсвечивания горячих газов на улучшение процесса теплопередачи незначителен. При $\frac{g_1}{g_2} > 0,15$ резко возрастают затраты тепла горячих газов на нагрев и разложение углеводородов, что приводит к снижению температуры горячих газов и ухудшению процесса теплопередачи в тепловом агрегате. Следовательно, оптимум находится в пределах $0,01 < \frac{g_1}{g_2} < 0,15$.

Горячую газовую смесь рационально сжигать в потоке при скорости ее движения до входа в зону воспламенения факела w_3 40-120 м/с. В этом случае обеспечивается автомодельность газодинамики в факеле, длина факела значительно не увеличивается в пределах указанных скоростей, тепловое напряжение объема факела и температура в нем достигаются высокие. При $w_3 < 40$ автомодельность газодинамики в факеле не достигается, возможны колебания длины факела и температуры в нем. При $w_3 > 120$ м/с резко увеличиваются сопротивление движению газового потока в сопле горелки и затраты энергии на повышение давления подаваемого воздуха и горючего газа для преодоления сопротивления движению потоков, возможны отрыв факела и нестабильное горение горючей смеси.

Экспериментально установлено, что сопла для подачи углеводородов рационально размещать за пределами входного сечения сопла горелки, причем оптимум геометрических параметров находится в пределах

$a = (1,5 - 7)b$. При $a < 1,5b$ нарушается процесс воспламенения и горения смеси в факеле. При $a > 7b$ углеводороды проходят за пределами высокотемпературных зон факела. Стабильное факельное горение и интенсивное свечение внешних газовых слоев факела происходит при $a = (1,5 - 7)b$.

При подаче в горелку горячего воздуха, когда размеры горящего факела значительно уменьшаются, при коротких и широких горелочных туннелях рационально сопла для подачи углеводородов размещать в

пределах горелочного туннеля. При сжигании холодной горючей смеси, применении длинных горелочных туннелей рационально сопла для подачи углеводородов размещать за пределами горелочного туннеля.

Предложенный способ и устройство позволяют повышать производительность печей, снижать потери нагреваемого металла. Они просты и универсальны в применении.

С целью повышения эффективности сжигания, уменьшения длины и повышения светимости факела разработана новая горелка.

Горелка содержит сопло для подачи воздуха и помещенную в нем газораспределительную трубу с радиальными каналами в боковой стенке и аксиальным каналом в торцевой стенке. Радиальные газовыпускные каналы выполнены так, что расстояние между рядами этих каналов (h_i) в последовательности от первого ряда каналов ($i = 1$) у выходного сечения сопла до последнего ряда каналов (i) у торцевой стенки газораспределительной трубы увеличивается.

Благодаря этому в горелочном туннеле развивается благоприятный для уменьшения длины факела и повышения светимости продуктов горения процесс.

Горелка работает следующим образом. Через сопло подается холодный или горячий воздух. Затем в газораспределительную трубу вводится горючий (природный) газ, который в виде высокоскоростных струй выходит из радиальных каналов и аксиального канала. Каналы выполнены так, что струи создают вихри, способствующие быстрому перемешиванию газа с воздухом и воспламенению газа на коротком пути от выходных сечений каналов. Происходит струйное распределение и горение газа, причем такое, которое обеспечивает постепенный, все возрастающий прогрев стенок по направлению к торцевой стенке.

В связи с этим возрастает и температура горючего газа по мере увеличения i , а это приводит к уменьшению длины факела, определяемой от наружной поверхности торцевой стенки по направлению движения потока, и повышению светимости продуктов горения. При этом сохраняется долговечность обьятой пламенем газораспределительной трубы, так как горение происходит на расстоянии от выходных сечений каналов не менее 10 наружных диаметров газораспределительной трубы, а нагреваемые за счет излучения пламени стенки отдают получаемое тепло движущемуся по трубе горючему газу.

Новая конструкция горелочного устройства позволяет быстро реконструировать существующие горелки. Наиболее высокая эффективность может быть получена при высокотемпературном нагреве металла, так как светящееся пламя позволит уменьшить потери металла в связи с окислением его продуктами сгорания. Повышается долговечность футеровки печей, что также является следствием светящегося пламени. При короткофакельном горении и образовании при этом светящихся продуктов в пламени интенсивнее и равномернее нагревается в печах металл. Повышается производительность печей и улучшается качество металла.

Для газовых вагранок с гетерогенной холостой огнеупорной колошей разработаны и прошли испытания два конструктивных варианта газовых горелок. Эти газовые горелки стабильно работают на холодном и горячем воздушном дутье при различных, допустимых для ваграночных процессов, расходах природного газа и воздуха. Промышленное испытание эти газовые горелки прошли на газовых вагранках производительностью 7 т/ч.

ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПЛАВКИ ЧУГУНА НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ

Для газовых вагранок с холостой огнеупорной колошей разработан новый способ плавки чугуна.

Технический результат разработки заключается в экономии топлива на процесс плавки и подогрев дутья при стабильности плавки на всем ее протяжении.

Указанный технический результат достигается тем, что плавка включает загрузку шихты, флюса и подачу подогретого дутья, при этом воздушное дутье с температурой 450-550⁰ С подают в течение 75-85% общего времени плавки, затем подачу газа на разогрев воздуха в воздухоподогревателе прекращают и плавку заканчивают при температуре дутья в пределах 150-200⁰ С, осуществляя подогрев за счет тепла, аккумулированного огнеупорной футеровкой воздухоподогревателя.

Подогрев дутья в начале плавки до 450-550⁰ С гарантирует стабильность процесса, получение высокой температуры расплавленного чугуна, снижает расход топлива непосредственно на плавку. Повышение температуры дутья выше верхнего предела практически нецелесообразно и экономически не выгодно, более того, при этом создаются неблагоприятные условия для работы воздухоподогревателя. Нижний предел по температуре дутья обеспечивает достижение поставленной цели, его снижение ниже нижних пределов ухудшает технологические и экономические показатели плавки.

Окончание процесса плавки на протяжении 15-25% общего времени плавки, как показала практика, приводит к постоянному снижению температуры дутья до 150-200⁰ С, при этом понижается температура выпускаемого расплава до 1340-1360⁰ С, однако эта температура не влияет на технологические свойства чугуна и вполне достаточна для заливки толстостенных отливок, заливку которых можно спланировать на конец плавки.

Выключение подачи топлива в конце плавки в воздухоподогреватель уменьшает расход топлива и дает соответствующую экономию.

Работа вагранки с температурой дутья 450-550⁰ С в течение 75-85% общего времени плавки обусловлена наличием количества тонкостенных и толстостенных отливок. При большом количестве толстостенных отливок подачу топлива в воздухоподогреватель прекращают раньше, при меньшем количестве их – позже.

Осуществление способа производится следующим образом.

После розжига вагранки или одновременно розжигают газовые горелки воздухоподогревателя.

При достижении необходимой температуры разогрева футеровки вагранки 1550-1600⁰ С и достижения температуры воздушного дутья 450-550⁰ С производят загрузку шихтовых материалов, флюса, ферросплавов до уровня завалочного окна. Расплавленный металл перед выпуском скапливается либо на подине вагранки (если вагранка без копильника), либо в копильнике, откуда осуществляется его непрерывный или периодический отбор для заливки литейных форм.

Способ плавки по контролируемым параметрам выгодно отличается от известных и позволит сократить 6-10% расхода топлива на 1 т расплавляемого чугуна.

На основе исследований разработаны следующие эффективные способы плавки металла на газообразном топливе:

- способ плавки чугуна в газовой вагранке, включающий введение порошкообразных или пылевидных добавок, отличающийся тем, что пылевидные добавки, содержащие флюсы или другие вещества, вводят в туннель или в смесительную камеру;

- способ плавки чугуна в газовой вагранке, отличающийся тем, что плавку производят одновременно с продувкой чугуна углеводородами, предварительно подвергнутыми термокрекингу;

- способ плавки чугуна в газовой вагранке, отличающийся тем, что в качестве источника тепла используют одновременно природный газ и электроэнергию;

- способ получения чугуна в газовой вагранке, отличающийся тем, что, с целью получения чугуна заданного состава, продувку его газообразными, жидкими и твердыми веществами ведут одновременно с перегревом;

- способ получения высокопрочного чугуна путем обработки его парами магния или другими модификаторами, отличающийся тем, что модифицирование жидкого чугуна ведут одновременно с перегревом его в газовой вагранке, содержащей бассейн с проходящим потоком металла;

- способ плавки металла в газовой вагранке, отличающийся тем, что, с целью восстановления окислов, в высокотемпературные области печи вводят углеводороды;

- способ получения высококачественного, модифицированного чугуна в газовой вагранке, отличающийся тем, что насыщение жидкого металла окислами железа производят в период плавления в газовой вагранке с окислительной атмосферой, а затем металл раскисляют кремнием;

- способ плавки чугуна в вагранке с холостой огнеупорной колошей, включающий разогрев колоши продуктами сгорания топлива, плавление шихты и перегрев жидкого металла между кусками колоши, отличающийся тем, что плавку ведут при температуре продуктов сгорания

топлива, равной 1-1,05 температуры огнеупорности материала холостой колоши;

- способ плавки чугуна в газовой вагранке с углеродсодержащей холостой огнеупорной колошей, включающей сжигание газовой смеси в горелках вагранки, разогрев продуктами сгорания холостой колоши, плавление шихты и выпуск жидкого металла, отличающийся тем, что, с целью экономии огнеупорных материалов и повышения температуры получаемого металла, плавку ведут при коэффициенте расхода воздуха в пределах 0,4-0,6 и температуру воздуха поддерживают минимально в соответствии с зависимостью $t = 1460 - 1100\alpha$ и максимально в соответствии с зависимостью $t = 1540 - 900\alpha$, где α – коэффициент расхода воздуха; t – температура воздуха, °С.

Изложенные способы плавки чугуна на газообразном топливе разработаны на уровне изобретений. Они позволяют получать из газовых вагранок чугун требуемого состава и качества.

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗОВЫХ ВАГРАНКАХ

Решающее значение для определенной производительности вагранки и температуры чугуна имеют процессы теплообмена между газами, твердой шихтой и жидким металлом. По условиям и характеру теплообмена газовая вагранка может быть разделена на шахту и камеру перегрева. По физико-химической характеристике процессов, происходящих в каждой зоне, может быть произведено их дальнейшее подразделение. Например, шахта может быть подразделена на зону подогрева и зону плавления, как обычно делается для коксовых вагранок.

Процессы теплообмена определяют всю тепловую работу газовых вагранок.

Были проведены исследования тепловых условий в газовой вагранке производительностью 3 т/ч с диаметром камеры перегрева 700 мм.

Сначала были проведены исследования тепловых условий и тепловой работы при сжигании газа в одной горелке. Затем одна горелка заменена многосопловой горелочной системой и были проведены те же исследования.

Температура измерялась по высоте шахты на 10 уровнях. На каждом уровне было установлено по четыре термопары: для 5 нижних уровней использовались вольфрам-молибденовые, для 6- и 7-го уровней – платинородий-платиновые термопары и для 3 верхних уровней – хромель-алюминиевые. Замеры производились для случая сжигания газа в одной горелке и для случая сжигания газа в многосопловой горелочной системе при прочих равных условиях. Расход газа был 330 м³/ч, коэффициент расхода воздуха $\alpha=0,98$. Эти величины поддерживались постоянными автоматическими устройствами.

Было выявлено следующее распределение температур газов по высоте шахты при сжигании газа в одной горелке температура в граничной зоне

факела на выходе из туннеля равна 1730°C , затем температура понижается до $1480 - 1500^{\circ}\text{C}$ на выходе в зону плавления и до 650°C на выходе из шахты вагранки. При сжигании газа в многосопловой горелочной системе максимальная температура, замеряемая термопарой, расположенной между двумя горелочными туннелями равна 1680°C . Падение температуры на последующих трех уровнях незначительно, что свидетельствует о высокой и более равномерной температуре газов над поверхностью металла. Это способствует интенсификации теплообмена.

Были выявлены: характер распределения газовых потоков, строение факела и распределение температур в зоне сжигания газа для одной горелки. Установлено, что максимальная температура газов, равная 1730°C , имеет место в узких зонах у стенки туннеля, способствуя его интенсивному оплавлению. Над поверхностью металла в бассейне находятся газы с пониженной температурой, которая в некоторых местах достигает до 1300°C . В среднем температура газов равна 1500°C .

Выявлено распределение газовых потоков и температур над поверхностью металла в бассейне при сжигании газа в многосопловой горелочной системе. Установлено, что “холодное ядро” каждого факела не выходит за пределы туннеля. Замеряемая между туннелями температура газов была 1680°C . Ввиду того, что диаметр каждого факела незначителен, граничные слои с высокой температурой как бы нейтрализуют охлаждающее действие центральных, более холодных зон факела, имеющих незначительные размеры. Следствием этого является достижение средней температуры газов в слое 1680°C . Эта температура может быть повышена, так как исследования проводились при скорости выхода смеси $49,2$ м/с, тогда как при более высоких скоростях (75 м/с и выше) достигается температура 1720°C .

Увеличение температуры при сжигании газа в многосопловой системе по сравнению с сжиганием газа в одной горелке объясняется увеличением теплового напряжения в этой зоне газовой вагранки.

При переходе на многосопловую горелочную систему диаметр струи уменьшается, в связи с чем изменяется и тепловое напряжение.

Пирометрический коэффициент при сжигании в многосопловой горелочной системе равен $0,85$.

Такой высокий пирометрический коэффициент объясняется полнотой выгорания смеси, большими тепловыми напряжениями и относительно малой величиной потерь.

Кроме сравнения тепловых условий над бассейном в газовых вагранках с уступами, было проведено исследование тепловых условий над бассейном в шахтно-отражательной печи. Было установлено, что важнейшим условием получения высокой температуры является правильное конструктивное решение камеры перегрева и системы сжигания газа, обеспечивающее достаточно высокий пирометрический коэффициент.

В шахте вагранки металл нагревается от температуры $10-20^{\circ}\text{C}$ до температуры плавления, плавится и незначительно перегревается.

Показателем, характеризующим тепловую работу шахты, является производительность вагранки. Она зависит от размеров шахты и от коэффициента теплопередачи. Размеры шахты в свою очередь зависят от газодинамических требований и условий теплопередачи. Высота слоя шихтовых материалов определяется из условия обеспечения производительности вагранки при достаточно высоком к.п.д. шахты.

Факторами, определяющими интенсивность теплообмена, являются, главным образом, температура газов и их скорость, а также размер кусков металла. Была выявлена интенсивность теплообмена, связанная с размерами и производительностью шахты, установлена зависимость коэффициента теплопередачи от этих факторов.

Опытные и расчетные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Диаметр шахты на входе, мм	Высота загрузки и шихты, м	Объем слоев шихты, м ³	Производительность вагранки, т/ч	Расход газа, м ³ /ч	Количество продуктов сгорания, проходящих шахту, м ³ /ч	Скорость газов при нормальных условиях, м/с	Количество тепла, затраченное на нагрев и расплавление металла, ккал/ч	Коэффициент теплопередачи, ккал/(м ³ ·ч·град)
700	2,7	1,038	2,9	300	2765	1,995	773	1950
700	2,7	1,038	3,2	330	3085	2,2225	851	2146
700	2,7	1,038	3,5	360	3405	2,46	931	2348
1100	2,55	2,42	4,2	400	3779	1,104	1116	1207
1100	2,9	2,76	6,9	600	5909	1,73	1833	1739
1100	3,1	2,94	8,5	700	6969	2,04	2260	2012
1300	2,9	3,85	7,8	650	6439	1,346	2064	1403
1300	3,0	3,98	8,5	695	6619	1,446	2260	1486
1300	3,1	4,12	9,4	750	7509	1,57	2500	1588

Производительность газовой вагранки зависит от расхода газа, температуры продуктов сгорания на входе и выходе, площади сечения шахты и высоты столба шихтовых материалов. Влияние диаметра на высоту загрузки шихты сказывается через скорость продуктов сгорания, профиль шахты и связанное с ним распределение газовых потоков в шахте.

Определена высота шахты для нормального ряда газовых вагранок. Диаметр шахты вагранок при этом принимался таким же, как и для коксовых вагранок. Расчетные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

Диаметр шахты, мм	Производительность, т/ч	Удельный расход газа, м ³ /ч	Количество продуктов сгорания при 10% потерь через копильник, м ³ /ч	Скорость газов на свободное сечение шихты при нормальных условиях м/с	Коэффициент теплопередачи	Количество тепла, ккал/ч	Объем слоя шихты, м ³	Высота загрузки шихты, м
700	3	103	3100	2,29	2220	803	0,948	2,46
800	4	96,5	3860	2,14	2100	1071	1,336	22,66
900	5	91,7	4580	2,00	1980	1340	1,773	2,78
1100	7	85	5950	1,74	1760	1875	2,79	2,94
1300	10	78,5	7850	1,64	1675	2680	4,18	3,14

Следовательно, высота шахты, заполняемой шихтой, находится в пределах 2,5-3,2 м.

Для коксовых вагранок полезная высота шахты (расстояние от оси нижнего ряда фурм до кромки загрузочного окна) равна 3,5-5,2 м.

Расплавленный в шахте металл поступает в виде капель и струек в камеру перегрева. Навстречу металлу движется поток горячих газов. Между металлом и газами в камере перегрева при участии шлака и футеровки происходят сложные физические и химические процессы. Важнейшим из них является процесс передачи тепла металлу.

В таблице 3 приведены результаты расчетов перегрева металла при плавке на газообразном топливе.

Таблица 3

Виды теплопередачи	Тепловой поток		Перегрев металла, °С
	ккал/кг	%	
Конвекцией от газов к капле	4,016	10,20	19,1
Излучением от газов капле	3,17	8,03	15,1
Конвекцией и теплопроводностью от футеровки к капле	17,15	43,50	81,6
Излучением в бассейне	4,2	10,62	20,0
Конвекцией от газов в бассейне	1,086	2,75	5,17
Окислением элементов	9,84	24,90	46,9
Всего	39,462	100,0	187,87

Из приведенных данных видно, что около 40% тепла жидкому металлу передается от раскаленной футеровки, 25% тепла поступает за счет окисления элементов и по 10% тепла передается излучением к капле, конвекцией к капле и излучением к металлу в бассейне. Незначительная доля тепла передается конвекцией от газов к металлу в бассейне.

На основе тепловых расчетов можно установить, насколько эффективно влияет на перегрев чугуна изменение тех или иных конструктивных и режимных параметров процесса плавки.

Температура газов влияет на величину теплового потока излучением в четвертой степени своей величины, а на тепловой поток конвекцией в первой степени, если не учитывать влияние температуры на скорость и теплотехнические константы газа и металла. Температура газов в свою очередь зависит от характеристики газа, режима сжигания и пирометрического коэффициента. Поэтому одним из решающих условий достижения высокой температуры выплавляемого чугуна следует считать высокий пирометрический коэффициент камеры перегрева, который определяется “закрытостью” объема.

Тепловоспринимающая поверхность металла влияет на величину теплового потока равнозначно. В реальных условиях металл поступает в бассейн в виде капель и струек, стекающих по стенкам и падающих в бассейн. При этом металл разбрызгивается. Поэтому общую поверхность капель и струек определить сложно.

Поступление металла из шахты в камеру перегрева в виде капель и струек является преимуществом газовой вагранки с уступами в шахте. Для получения чугуна с температурой 1380-1400°С (на желобе по оптическому периметру без поправки) шахтно-пламенные печи должны иметь удельную поверхность ванны 0,6 м² на тонну, а для газовой вагранки с уступами производительностью 3 т/ч удельная поверхность равна 0,128 м².

Важнейшими факторами высокого перегрева металла являются уменьшение размеров и увеличение числа капель и струек металла.

Угол наклона горелок значительно влияет на величину теплового потока от газов к металлу в бассейне.

Итак, установлено, что важнейшими факторами, влияющими на перегрев металла, являются температура газов, размеры и общая поверхность капель и струек металла.

На газовых вагранках с уступами в шахте было изучено влияние шлакового покрова на перегрев металла. С этой целью проводились плавки при открытом от шлака бассейне и при бассейне, закрытом шлаковым покровом. Все прочие условия были равными. Слабое влияние шлакового покрова на температуру чугуна наблюдалось при жидкотекучих, легкоплавких шлаках, которые легко уходили с поверхности металла. Шлаки с высокой температурой плавления, полученные при использовании высокоглиноземистых огнеупорных материалов, способствовали увеличению перегрева металла.

По результатам проведенных исследований была построена номограмма, которая позволяет определить основные размеры газовых вагранок.

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПЛАВКЕ ЧУГУНА НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ – ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

Экспериментами установлено, что при высокотемпературном нагревательном процессе значительно повышается скорость и равномерность нагрева, производительность печи, если нагреваемый металл омывается менее окислительными и при этом горячими продуктами сгорания.

Окислительно-раскислительные свойства печных газов могут характеризоваться величинами $\frac{\%H_2 + \%H}{\%H_2O}$ и $\frac{\%CO}{\%CO_2}$, изменение которых в зависимости от α_0 по результатам термодинамических расчетов применительно к высокотемпературному сжиганию смеси природного газа с воздухом, аналитически выражаются связями

$$\frac{\%H_2 + \%H}{\%H_2O} = 0,9183^{100} \cdot (2 - \alpha_0)^{12,6073} \cdot 1,041^{(2 - \alpha_0) \cdot 100},$$

$$\frac{\%CO}{\%CO_2} = 7,767^{100} \cdot (2 - \alpha_0)^{253,1929} \cdot 0,1233^{(2 - \alpha_0) \cdot 100}.$$

(α_0 - коэффициент расхода воздуха, при котором достигается максимально возможная температура в факеле или в камере сжигания).

Снижение окислительных свойств печных газов возможно за счет уменьшения α_0 при подогреве воздуха или за счет добавления в горячие продукты сгорания углеводородов (природного газа). Углеводороды, смешиваясь с горячими газами и разлагаясь в них, в конечном итоге увеличивают сумму $\% H_2 + \% H + CO$ и уменьшают коэффициент расхода воздуха в пересчете на полученную газовую смесь.

Влияние добавляемых в продукты сгорания углеводородов на уменьшение окислительных свойств печных газов можно определить, сравнивая полученные при α_0 отношения $\frac{\%H_2 + \%H}{\%H_2O}$ с величиной суммы

отношений $\frac{\%H_2 + \%H}{\%H_2O} + \frac{(\%H_2O)_{\max}}{\%H_2O} \cdot \frac{\Gamma_d}{100}$, где $\% H_2$, $\% H$, $\% H_2O$ – объемное

процентное содержание указанных газов в продуктах сгорания при α_0 ; $(\% H_2O)_{\max}$ – максимаьное объемное процентное содержание H_2O в продуктах сгорания при $\alpha = 1$; Γ_d - дополнительный расход природного газа на подсвечивание продуктов сгорания соответственно приведенный к нормальным условиям в процентах от расхода природного газа на сжигание.

Установлено, что при $(\% H_2O)_{\max} = 18,17 \%$ и изменении Γ_d от 2,5 до 10% коэффициент расхода воздуха для газовой смеси уменьшается и равен при Γ_d 2,5; 10% соответственно $\alpha_0 = 0,03$; $\alpha_0 = 0,13$. При сжигании природного газа с $\alpha_0 = 0,98$ и добавлении в продукты сгорания 2,5; 5; 7,5; 10% природного газа от его расхода на сжигание, окислительные свойства газовой фазы соответствуют получаемым при α_0 0,95; 0,915; 0,88; 0,85.

Величина, уменьшающая коэффициент расхода воздуха в связи с дополнительной подачей природного газа в продукты сгорания, $\Delta\alpha_{гд}$ определяется, исходя из того, что на 1% Γ_d коэффициент расхода воздуха уменьшается приблизительно на 0,013. Поэтому $\Delta\alpha_{гд} = 0,013 \Gamma_d$.

Следовательно, в результате подсвечивания продуктов сгорания получаемый коэффициент расхода воздуха α_n меньше α_0 и равен $\alpha_0 - \Delta\alpha_{гд}$.

При $5 \leq \Gamma_d \leq 10\%$ по сравнению $\Gamma_d = 0\%$ в камеру из шахты меньше поступало шлака, так как меньше была величина $Y_{мет}$ (потери металла при плавке в печи, %), а в связи с этим меньше разрушалась футеровка подины шахты и площадки между шахтой и ванной камеры.

Обнаружено увеличение стойкости футеровки печи при $5 \leq \Gamma_d \leq 10\%$ в 1,5-2 раза по сравнению со случаем, когда $\Gamma_d = 0\%$.

Выявлено, что при высокотемпературном сжигании смеси природного газа с воздухом для интенсификации печных процессов, снижения потерь металла рационален дополнительный ввод в высокотемпературные продукты сгорания природного газа. Повышение эффективности дополнительного ввода природного газа заметно уже при $\Gamma_d = 2,5\%$ и существенно при $5 \leq \Gamma_d \leq 10\%$.

Следовательно, для улучшения печных процессов необходимо создавать условия, обеспечивающие достижение высоких температур в факелах, а затем выше факелов надо изменить состав продуктов сгорания так, чтобы в них увеличивалось содержание компонентов - раскислителей, преимущественно водорода, его ионов и разогретых до высокой температуры мелкодисперсных частиц углерода, что возможно осуществлять путем дополнительного ввода в высокотемпературные продукты сгорания природного газа, углеводороды которого при температуре выше 1427 К полностью разлагаются на водород и сажистый углерод, причем с образованием большого количества ионов, снижающих окислительные свойства печных газов в зоне плавления.

Анализ полученных математических зависимостей на основе планирования экспериментов свидетельствует о том, что с увеличением температуры воздуха - окислителя T_b при $\Gamma_d = const$ повышается температура продуктов сгорания $T_{пс}$, но более значительно при $\Gamma_d = 0$. При $\Gamma_d = 0$ с повышением T_b и уменьшением α_0 , увеличивается степень черноты продуктов сгорания - $E_{пс}$, что связано с улучшением условий для возникновения дисперсной фазы. Закономерность увеличения $E_{пс}$ с повышением T_b и уменьшением α_0 сохраняется для каждого случая $\Gamma_d = const$ в пределах $0 \leq \Gamma_d \leq 10\%$, причем величина $E_{пс}$ более значительно возрастает при $T_b = 293$ К, чем при $T_b = 583$ К, что объясняется развитием реакций $C + CO_2 = 2CO$, $C + H_2O = CO + H_2$ с увеличением $T_{пс}$ при повышении T_b .

Математическая модель позволила установить, что с повышением T_b и, соответственно, с уменьшением α_0 уменьшаются потери металла в связи с окислением $Y_{мет}$, причем более значительно при больших величинах количества стали в шахте в % Z_c и менее значительно при $Z_c = 0$. При $z_c = 100\%$, $T_b = 293$ К металл полностью окисляется, а в случае $T_b = 873$ К

величина $Y_{\text{мет}}$ резко снижается, но все же остается значительно больше, чем при $Z_c = 0$, $T_b = 873$ К. Следовательно, уменьшение α_0 при увеличении T_b особенно эффективно при высокотемпературном нагреве омывающими продуктами сгорания стальных материалов с незащищенными от воздействия газов поверхностями. Поскольку уменьшение α_0 по мере увеличения T_b в любых исследованных случаях приводило к уменьшению $Y_{\text{мет}}$, то рассмотренный процесс следует считать эффективным. Однако значительная величина $Y_{\text{мет}}$ при $z_c = 100\%$, $T_b = 873$ К указывает на необходимость дальнейшего снижения окислительных свойств продуктов сгорания.

Анализ математических зависимостей $G_{\text{пп1}}$, $G_{\text{пп2}}$, $\eta_{\text{тп}}$, $T_{\text{мет}}$, $\delta_{\text{окч}}$, $\delta_{\text{окс}}$, $Y_{\text{мет}}$, от Z_c , T_b , Γ_d показывает, что $G_{\text{пп1}}$, $G_{\text{пп2}}$, $\eta_{\text{тп}}$, $T_{\text{мет}}$ возрастают, а $\delta_{\text{окч}}$, $\delta_{\text{окс}}$, $Y_{\text{мет}}$ уменьшаются с увеличением T_b , Γ_d при $z_c = \text{const}$ в пределах $0 \leq Z_c \leq 100\%$. Величина $G_{\text{пп2}}$ значительно меньше $G_{\text{пп1}}$ при $T_b = 293$ К, $Z_c = 0$, $\Gamma_d = 0$, а при $\Gamma_d = 5\%$ и $\Gamma_d = 10\%$, величины $G_{\text{пп1}}$, $G_{\text{пп2}}$ приблизительно равны. При $T_b = 293$ К, $Z_c = 100\%$, $\Gamma_d = 0$ получено $G_{\text{пп1}} = G_{\text{пп2}} = 0$, так как $Y_{\text{мет}} = 100\%$.

Математические зависимости отражали реальный процесс в газовых вагранках. В них $G_{\text{пп1}}$, $G_{\text{пп2}}$ – производительность печи по массе полученного жидкого металла, соответственно, за первый час плавки, за второй час плавки, кг/ч; $\eta_{\text{тп}}$ – термический коэффициент полезного действия печи за период плавки; $T_{\text{мет}}$ – температура получаемого жидкого металла, К; $\delta_{\text{окч}}$, $\delta_{\text{окс}}$ – толщина оксидной пленки на кусках нерасплавившегося над зоной плавления, соответственно, чугуна, стали, мм.

Результаты экспериментального исследования свидетельствуют о значительном влиянии конструктивных и режимных параметров горелочного устройства, T_b , Γ_d на показатели процесса при нагреве металла в печи, причем существенным фактором является и состав нагреваемого металла.

Установлено, что теплообмен в печи интенсифицируется при увеличении T_b , когда, соответственно, уменьшается величина α_0 и увеличиваются T_g , w_g , w_b (T_g – температура горючего газа, К; w_g , w_b – скорость истечения из канала соответственно горючего газа, воздуха, м/с). Положительным было размещение горелочных устройств в камере печи на минимально возможном расстоянии от нагреваемого материала, поскольку это позволило приблизить высокотемпературные вихревые зоны факела к поверхности нагрева. Подсвечивание горячих продуктов сгорания разлагающимися в них углеводородами приводило к повышению излучательной способности теплоносителя и снижению его окислительных свойств. Важным было и компактное размещение факелов в камере печи. В комплексе все это способствовало повышению $T_{\text{мет}}$ при достижении высоких показателей $G_{\text{пп1}}$, $G_{\text{пп2}}$, а в конечном итоге к увеличению $\eta_{\text{тп}}$ с учетом использования химического и физического тепла уходящих из печи газов для нагрева воздуха-окислителя в рекуператоре.

В условиях работы печи выявлялись эффективность разработанного горелочного устройства и рациональность принятого размещения таких горелочных устройств в камере печи.

Горелочные устройства стабильно работали в печных условиях при $293 \leq T_b \leq 873$ К и изменении величины α в широких пределах.

РАЦИОНАЛЬНЫЕ СОСТАВЫ ШИХТЫ ДЛЯ ПЛАВКИ В ГАЗОВЫХ ВАГРАНКАХ

При плавке чугуна в газовых вагранках печные газы окисляют железо, углерод, кремний, марганец, содержащиеся в металлической шихте, причем при высокой температуре окислителями железа могут быть углекислый газ и пары воды. При оптимальных величинах коэффициента расхода воздуха и температуре подогрева воздуха, подаваемого на сжигание природного газа, процесс плавки становится экономичным, если правильно выбран состав шихты. Установлено, что для получения чугуна марки СЧ20 при температуре подогрева воздуха 500°C , коэффициенте расхода воздуха от 1 до 0,9 рационально выдерживать следующий состав шихты: 50% чугунного лома, 40% передельного чугуна, 10% стального лома. С повышением температуры подогрева воздуха до 650°C можно снижать величину коэффициента расхода воздуха, уменьшать угар углерода в металле и увеличивать количество стального лома в шихте до 30% и выше. В каждом конкретном случае состав шихты рассчитывается с учетом принятого технологического процесса плавки в газовой вагранке.

Плавка чугуна в газовой вагранке позволяет получать металл с низким содержанием серы (до 0,02%). А это – важный фактор при производстве высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Состав шихты в этом случае может быть следующим: 50% литейного чушкового чугуна, 40% передельного чугуна, 10% низкопроцентного ферросилиция.

Установлено, что состав получаемого чугуна можно изменять не только путем изменения состава шихты при прочих других одинаковых условиях, но и путем изменения количества, размеров кусков, высоты огнеупорной колоши газовой вагранки. Так наилучшие показатели по снижению потерь элементов металла в связи с окислением достигаются, если применять холостую колошу только из кусков углеродсодержащего электродного боя. При этом можно увеличивать количество стали в шихте и получать жидкий чугун требуемых состава и жидкотекучести.

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ ЧУГУНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ГАЗОВЫХ ВАГРАНОК В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В производственных условиях испытано несколько типов шахтных высокотемпературных металлургических печей, работающих на газообразном топливе – природном газе. На основе экспериментальных исследований и производственной проверки установлено, что в высокотемпературных плавильных печах рационально сжигать природный газ при таких условиях, когда достигается наиболее высокая температура

продуктов сгорания, а затем в высокотемпературные области печи вводить углеводороды и уменьшать коэффициент расхода воздуха в продуктах сгорания до необходимых для интенсификации теплообмена величин. При этом несколько уменьшается температура горячих газов, но образующиеся при разложении углеводородов твердые частицы углерода приводят к увеличению степени черноты и излучательной способности горячих продуктов сгорания.

Разложение углеводородов природного газа практически полностью заканчивается при такой температуре (1473 К), которая ниже температуры продуктов сгорания в высокотемпературных печах. При разложении углеводородов горячие продукты сгорания обогащаются не только светящимися частицами углерода, но и водородом, а углерод и водород обладают высокими восстановительными свойствами, увеличивающимися с повышением температуры. Следовательно, интенсификация теплопередачи в высокотемпературных печах может быть достигнута не только благодаря повышению излучательной способности горячих продуктов сгорания в связи с образованием в них дисперсной фазы – твердых частиц углерода, но и благодаря тому, что при снижении окислительных свойств продуктов сгорания уменьшается толщина теплоизолирующей оксидной пленки на поверхности нагреваемого металла.

Для уменьшения расхода тепла в печи на нагрев и разложение углеводородов их рационально предварительно подогревать до подачи в продукты сгорания. Это позволяет сохранить высокие температуры последних и повышать их излучательную способность. Чем выше температура в факеле с учетом температурного режима в печи для ведения технологического процесса и чем выше температура предварительного подогрева углеводородов, тем больше количество последних можно вводить для подсвечивания продуктов сгорания и тем интенсивнее становится излучательная способность печной атмосферы.

Горячие газы следует турбулизовать и засвечивать струями углеводородов в зонах, где необходима интенсификация теплообмена. После участия в теплообмене необходимо дожигать отходящие газы, повышая коэффициент расхода воздуха до величин, больших единицы, и производить утилизацию тепла этих газов. При этом улучшается дожигание печных газов и упрощается управление печным процессом.

Изложенный выше способ сжигания природного газа позволяет в широких пределах управлять процессами горения, светимостью и составом продуктов сгорания, интенсификацией теплообмена в высокотемпературных печах, вести процессы в печах экономично. Этот способ прошел проверку на эффективность в чугуноплавильных агрегатах – газовых вагранках.

Разработанная на основе изложенного выше способа система рационального сжигания природного газа в высокотемпературных печах включает в себя горелочные устройства, обеспечивающие достижение максимально возможной температуры в горящих факелах, устройства для подсвечивания продуктов сгорания путем подачи струй углеводородов

(природного газа) в высокотемпературные печи, устройства для дожигания горючих компонентов отходящих из печи газов, рекуператоры для полезного использования тепла отходящих газов, нагрева подаваемого в горелочные устройства воздуха-окислителя. Испытанная в производственных условиях такая система показала высокую эффективность. Повышалась производительность газовой вагранки при плавке чугуна на 15...35% в связи с интенсификацией теплообмена, уменьшались потери металла в связи с окислением в 1,3...2,0 раза, увеличивалась температура жидкого металла на 20...60 градусов, повышался термический коэффициент полезного действия плавильного агрегата на 12...25%, уменьшался износ (разрушение) футеровки в высокотемпературных зонах печи, улучшались процессы горения в вагранке и поджигания горючих компонентов отходящих из печи газов. В вагранке сжигание производилось при оптимальной величине коэффициента расхода воздуха α_0 , когда обеспечивалось достижение максимально возможной температуры в факелах. Величина α_0 зависела от температуры подогрева воздуха и находилась в пределах 0,92...0,98. В высокотемпературных зонах печи коэффициент расхода воздуха в связи со струйным вводом углеводородов в горячие продукты сгорания снижался до 0,8...0,9. После выхода из шахты вагранки в зонах дожигания горючих компонентов продуктов сгорания коэффициент расхода воздуха был больше единицы за счет подмешивания в продукты сгорания воздуха. Из пылеуловителя вагранки выходили газы, состав которых по вредным выбросам не превышал действующих норм.

Следовательно, наилучшие показатели печного процесса могут быть достигнуты, когда используется подогрев воздуха-окислителя и горючего газа, а сжигание производится при оптимальном коэффициенте расхода воздуха, причем дополнительный ввод углеводородов в высокотемпературные зоны печи способствует не только улучшению процесса теплоотдачи от продуктов сгорания нагреваемому металлу, но и приводит к уменьшению потерь металла от окисления, защите печной футеровки от интенсивного разрушения в связи с меньшим воздействием на нее излучения в менее прозрачной печной атмосферой. Дожигание горючих компонентов уходящих печных газов способствует улучшению экологических условий.

Для уменьшения расхода природного газа на плавку металла в газовой вагранке рационально:

- а) применять горючее воздушное дутье (подогрев воздуха, подаваемого в горелки, до 500⁰С позволяет снизить расход природного газа на 1 тонну получаемого жидкого чугуна до 80 м³ в расчете на нормальные условия);
- б) плавить чугунную шихту, использовать в составе шихты минимальное количество стали, до 10% (увеличивается производительность плавильного агрегата);

в) использовать тугоплавкую огнеупорную насадку – холостую огнеупорную колошу (получается меньше шлака в связи с оплавлением огнеупоров);

г) создавать в шахте более равномерное распределение горячих газов путем применения оптимальной формы шахты (уменьшаются тепловые потери, увеличиваются термический коэффициент полезного действия и производительность плавильного агрегата);

д) образовывать менее окислительную печную атмосферу в зоне плавления, применять дожигание отходящих газов, рекуперацию тепла, подогрев шихты (повышаются КПД и производительность печи).

Выявленные особенности тепловых процессов в газовых вагранках, закономерности горения газообразного топлива позволили разрабатывать экономичные чугуноплавильные агрегаты для промышленности.

НОВЫЙ СПОСОБ ПЛАВКИ В ГАЗОВОЙ ВАГРАНКЕ

Предлагаемый способ относится к металлургии и может быть использован в литейном производстве при плавке материала в вагранке.

Известен способ плавки чугуна в вагранке, согласно которому в шахту загружают твердое топливо – кокс, разжигают кокс, создают холостую колошу, продувают ее воздухом, доводят температуру в холостой колоше до 1700°С и выше, на разогретую холостую колошу заваливают шихту, подают в фурмы воздух до 1000 м³ при нормальных условиях из расчета получения 1 тонны жидкого чугуна при стабильной, постоянной подаче воздуха на сжигание топлива, плавят чугун, выпускают его из вагранки и используют для заливки форм. При этом способе плавки образуются продукты сгорания топлива прямо пропорционально количеству вдуваемого воздуха, причем продукты сгорания движутся в шахте между кусками шихты по пути наименьшего сопротивления преимущественно у стенок шахты (Ладыженский Б.Н., Орешкин В.Д., Сухарук Ю.С. Литейное производство. Под ред.к.т.н. В.Д. Орешкина. – М. – Свердловск, 1953, стр. 92-97; Леви Л.И., Мариенбах Л.М. Основы теории металлургических процессов и технология плавки литейных сплавов. – М.: «Машиностроение», 1970, стр. 171-182; Литейное производство. Под ред. И.Б. Куманина. – М.: «Машиностроение», 1971, стр. 226-234; Баринов Н.А. Водоохлаждаемые вагранки и их металлургические возможности. – М.: «Машиностроение», 1964, стр. 22-38.). Недостатком известного способа является неэффективное использование тепла продуктов сгорания топлива, преимущественное движение газов у стенок шахты, оплавление огнеупорной футеровки шахты, необходимость применения водяного охлаждения шахты, что приводит к увеличению тепловых потерь и снижению термического коэффициента полезного действия плавильного агрегата.

Известны способы плавки материала в коксовых и газовых вагранках с оптимальной формой шахты типа доменной (Грачев В.А., Черный А.А. Современные методы плавки чугуна. – Саратов: Приволжское книжное

издательство, 1973, стр. 26-31; Опыт плавки чугуна в газовой вагранке/ Е.Д. Сосновский, Н.А. Горелов, В.Н. Моргунов, В.П. Гуськов// Литейное производство, 1996, № 5, стр. 9-10; Черный А.А. Газовая вагранка. Авторское свидетельство СССР №873739, Кл.³ F27B 1/08). В этих вагранках изменение формы шахты с цилиндрической на более сложную, типа доменной, позволяет улучшить распределение горячих продуктов сгорания по сечениям шахты, сделать более равномерным движение горячих газов, повысить производительность плавильных агрегатов, но эффективность работы этих агрегатов уменьшается по мере увеличения диаметров шахты.

Техническим результатом предлагаемого способа является достижение многократного перераспределения горячих газов в шахте вагранки, интенсификации турбулизации газовых потоков в слоях нагреваемого материала, улучшение теплопередачи от горячих газов шихте, уменьшение тепловых потерь, увеличение производительности вагранки, повышение температуры получаемого жидкого материала, экономия топлива, повышение термического коэффициента полезного действия теплового агрегата.

Сущность предлагаемого способа плавки материала в вагранке заключается в том, что сжигают топливо, нагревают и плавят материал поступающими в шахту продуктами сгорания, но в отличие от известных способов, продукты сгорания топлива подают к нагреваемому материалу попеременно, то увеличивая, то уменьшая расход в пределах 2-60 процентов от средней величины расхода с частотой изменения этого расхода 3-120 колебаний в минуту, причем, чем меньше величина изменения расхода продуктов сгорания, тем больше частота колебаний расхода этих продуктов во времени.

Такое сочетание новых признаков с известными позволяет достигать многократного перераспределения горячих газов в шахте вагранки, интенсифицировать турбулизацию газовых потоков в слоях нагреваемого материала, улучшить теплопередачу от горячих газов шихте, уменьшить тепловые потери, увеличить термический коэффициент полезного действия (к.п.д.), повысить производительность теплового агрегата, уменьшить расход топлива на 1 тонну получаемого жидкого материала.

Способ осуществляется следующим образом. Продуктами сгорания топлива нагревают материалы (куски) холостой колоши в шахтной печи, повышая постепенно температуру до 1650-1700⁰С. Затем загружают шихту, устанавливают средний расход продуктов сгорания, исходя из требуемой производительности плавильного агрегата. После стабилизации процесса плавки и выпуска жидкого материала с требуемой температурой подают продукты сгорания к нагреваемому материалу в шахте попеременно, то увеличивая, то уменьшая расход R в пределах 2-60 процентов от средней величины расхода с частотой N изменения этого расхода 3-120 колебаний в минуту. Чем меньше величина изменения расхода продуктов сгорания, тем больше может быть частота колебаний расхода этих продуктов во времени. Расход продуктов сгорания определяют по расходу воздуха, подаваемого на

сжигание топлива. При изменениях расхода продуктов сгорания и прочих одинаковых условиях изменяется глубина проникновения струй газа в шахте, перераспределяются газовые потоки, турбулизируются горячие газы у нагреваемого материала, интенсифицируется теплопередача, достигается экономичность процесса плавки. При $R < 2$ резко уменьшается турбулизация в слоях шихты, а при $R > 60$ нарушаются процессы дожигания газов. При $N < 3$ не наблюдается улучшение процессов теплопередачи, а при $N > 120$ происходит интенсивная вибрация теплового агрегата. Оптимальные величины находятся в пределах $2 < R < 60$, $3 < N < 120$. При плавке чугуна в коксовых вагранках изменение величины R , N в оптимальных пределах приводит к увеличению производительности плавильного агрегата, уменьшению расхода топлива, повышению термического к.п.д., а при плавке в газовых вагранках достигаются уменьшение расхода природного газа, повышение к.п.д., снижение угара элементов в чугуне.

Поскольку расход продуктов горения прямо пропорционален расходу воздуха, подаваемого на сжигание топлива, то изменениям подвергается расход воздуха путем автоматического регулирования. При использовании твердого топлива в вагранках кислород подаваемого в холостую колошу воздуха окисляет углерод, образуются преимущественно горячие оксиды углерода, нагревается поступавший с воздухом азот, и эти горячие газообразные продукты, омывая загруженную в шахту шихту, нагревают, плавят и перегревают материал. Изменение указанных расходов приводит к изменению глубины проникновения горячих газов в холостой колоше, перераспределению потоков в шахте, интенсификации теплопередачи. Это же происходит и в газовой вагранке с холостой колошей. Но при газовой плавке материала топливом преимущественно являются газообразные углеводороды (природный газ), и для достижения положительного эффекта при изменениях расходов воздуха необходимо изменять расход горючего газа, выдерживая оптимальную величину коэффициента расхода воздуха, при этом прямо пропорционально расходам воздуха и газа изменяются расходы продуктов сгорания, проходящих через холостую колошу и слои шихты в шахте.

Эффективность предлагаемого способа повышается с увеличением диаметров шахты вагранки, так как в таких вагранках глубже по направлению от стенок шахты проникают горячие газы в кусковые материалы, больше шихты смывается горячими продуктами сгорания.

Испытания проводились при плавке чугуна в универсальной вагранке с шахтой типа доменной. Эта вагранка могла работать на твердом или газообразном топливе.

Пример осуществления способа.

Производили плавку чугуна в вагранке, производительность которой выдерживали в обычных условиях производственного процесса 7 тонн жидкого чугуна в час. Средний расход воздуха в коксовом и в газовом

вариантах работы вагранки был 7000 м^3 в час в расчете на нормальные условия. При газовой плавке чугуна средний расход природного газа был $700 \text{ м}^3/\text{ч}$ для нормальных условий. Эксперименты проводили при величинах $1,7 < R < 62$, $2,7 < N < 123$.

Полученные результаты приведены в таблице 4.

В таблице 4 при применении предложенного способа по сравнению с известным способом Q – увеличение производительности вагранки, раз; ΔT – повышение температуры получаемого жидкого чугуна, град.; G – экономия топлива на 1 тонну полученного жидкого чугуна, %; D – повышение термического коэффициента полезного действия вагранки, раз.

Таблица 4

Факторы R; N	Показатели процесса плавки чугуна предлагаемым способом по сравнению с известным							
	Плавка на твердом топливе				Плавка на газообразном топливе			
	Q,раз		G,%	D,раз	Q,раз	ΔT ,град	G,%	D,раз
R=2;N=3	1,025	10	1,04	1,02	1,03	15	1,035	1,025
R=2;N=60	1,1	15	1,06	1,07	1,09	20	1,1	1,09
R=2;N=120	1,15	20	1,07	1,1	1,13	25	1,15	1,11
R=30;N=3	1,21	25	1,09	1,2	1,25	25	1,3	1,21
R=30;N=60	1,25	30	1,15	1,25	1,27	35	1,32	1,27
R=30;N=120	1,17	20	1,14	1,07	1,18	20	1,25	1,09
R=60;N=3	1,28	25	1,16	1,27	1,29	35	1,33	1,28
R=60;N=60	1,11	20	1,08	1,12	1,1	25	1,11	1,11
R=60;N=120	1,02	10	1,05	1,03	1,04	10	1,05	1,04
R=1,7;N=2,7	экономическая эффективность не достигается, показатели такие же, как и при применении известного способа							
R=1,7;N=123	экономическая эффективность не достигается, происходит вибрация кожуха вагранки							
R=62;N=2,7	экономическая эффективность не достигается, показатели резко не увеличиваются							
R=62;N=123	экономическая эффективность не достигается, происходит вибрация кожуха вагранки							

В оптимальных пределах величин $2 < R < 60$; $3 < N < 120$ достигается эффективность, так как при плавке чугуна в вагранке на твердом топливе $Q = 1,02-1,28$; $\Delta T = 10-30$; $G = 1,04-1,15$; $D = 1,02-1,27$, а при плавке на газообразном топливе $Q = 1,03-1,29$; $\Delta T = 10-35$; $G = 1,035-1,33$; $D = 1,025-1,28$, то есть выше, чем при известном способе плавки. Рационально увеличивать N по мере уменьшения R.

При использовании предлагаемого способа уменьшаются потери металла в связи с окислением, ускоряются процессы горения топлива и дожигания горючих компонентов продуктов сгорания, устраняется зависание шихты в шахте вагранки.

Предлагаемый способ обеспечивает технический эффект и может быть осуществлен с помощью известных в технике средств, его можно применять не только в литейном производстве, но и при нагреве, и обжиге, и плавке металлических и неметаллических материалов в шахтных печах металлургической промышленности и строительной индустрии.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАННОЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГАЗОВЫХ ВАГРАНОК И ПРОЦЕССОВ ПЛАВКИ В НИХ ЧУГУНА

В литейном производстве - разнообразные процессы, которые необходимо совершенствовать, оптимизировать или заменять новыми, более эффективными, чаще на уровне изобретений. А это в современных условиях сложно или невозможно выполнить без математического моделирования, вычислительной техники.

Применительно к использованию в литейном производстве разработана оригинальная методика математического моделирования при планировании 3^2 .

В табл. 5 представлен план проведения двухфакторных экспериментов 3^2 .

Таблица 5
План проведения двухфакторных экспериментов 3^2

№, u	$x_{1,u}$	$x_{2,u}$	y_u
1	$x_{1,1}=x_{1a}$	$x_{2,1}=x_{2a}$	y_1
2	$x_{1,2}=x_{1b}$	$x_{2,2}=x_{2a}$	y_2
3	$x_{1,3}=x_{1a}$	$x_{2,3}=x_{2b}$	y_3
4	$x_{1,4}=x_{1b}$	$x_{2,4}=x_{2b}$	y_4
5	$x_{1,5}=x_{1a}$	$x_{2,5}=x_{2e}$	y_5
6	$x_{1,6}=x_{1b}$	$x_{2,6}=x_{2e}$	y_6
7	$x_{1,7}=x_{1e}$	$x_{2,7}=x_{2a}$	y_7
8	$x_{1,8}=x_{1e}$	$x_{2,8}=x_{2b}$	y_8
9	$x_{1,9}=x_{1e}$	$x_{2,9}=x_{2e}$	y_9

Для плана 3^2 уравнение регрессии определяются, исходя из соответствующих зависимостей:

$$y = a'_o + a_{1n} \cdot x_{1n} + a_{1r} \cdot x_{1r};$$

$$\text{где } a'_o = c'_o \cdot x_o + c_{2n} \cdot x_{2n} + c_{2r} \cdot x_{2r};$$

$$a_{1n} = d'_o + d_{2n} \cdot x_{2n} + d_{2r} \cdot x_{2r};$$

$$a_{1r} = e'_o + e_{2n} \cdot x_{2n} + e_{2r} \cdot x_{2r}.$$

После подстановки, перемножений и замены коэффициентов получается следующий полином для плана 3^2 :

$$y = b'_o \cdot x_o + b_{1n} \cdot x_{1n} + b_{2n} \cdot x_{2n} + b_{1n,2n} \cdot x_{1n} \cdot x_{2n} + b_{1r} \cdot x_{1r} + b_{2r} \cdot x_{2r} + b_{1n,2r} \cdot x_{1n} \cdot x_{2r} + b_{2n,1r} \cdot x_{2n} \cdot x_{1r} + b_{1r,2r} \cdot x_{1r} \cdot x_{2r} \quad (1)$$

В уравнении регрессии (1) y - показатель (параметр) процесса; $x_o = +1$;

$$x_{1n} = x^n_1 + v_1; \quad x_{1r} = x^r_1 + a_1 \cdot x^n_1 + c_1;$$

$$x_{2n} = x^n_2 + v_2; \quad x_{2r} = x^r_2 + a_2 \cdot x^n_2 + c_2;$$

x_1, x_2 - 1, 2-й факторы (независимые переменные); n, r - изменяемые числа показателей степени факторов; v_1, a_1, c_1 - коэффициенты ортогонализации, определяемые при трех уровнях 1-го фактора, $m = 1$ по формулам (2)-(4);

v_2, a_2, c_2 - коэффициенты ортогонализации, определяемые при трех уровнях 2-го фактора, $m=2$ по формулам (2)-(4);

$b'_o, b_{1n}, b_{2n}, b_{1n,2n}, b_{1r}, b_{2r}, b_{1n,2r}, b_{2n,1r}, b_{1r,2r}$ - коэффициенты регрессии. Для уровней a, b, e факторы имеют следующие обозначения: $x_{1a}, x_{1b}, x_{1e}, x_{2a}, x_{2b}, x_{2e}$.

Формулы для расчета коэффициентов ортогонализации представлены ниже:

$$V_m = -\overline{x^n_m} \quad (2)$$

$$a_m = \frac{\overline{x^n_m x^r_m} - \overline{x^{n+r}_m}}{\overline{x^{2n}_m} - (\overline{x^n_m})^2}; \quad (3)$$

$$C_m = -\left(\overline{x^r_m} + a_m \overline{x^n_m}\right) \quad (4)$$

где

$$\overline{x^n_m} = \frac{1}{3}(x^n_{ma} + x^n_{mb} + x^n_{me}); \quad \overline{x^r_m} = \frac{1}{3}(x^r_{ma} + x^r_{mb} + x^r_{me});$$

$$\overline{x^{2n}_m} = \frac{1}{3}(x^{2n}_{ma} + x^{2n}_{mb} + x^{2n}_{me}); \quad \overline{x^{n+r}_m} = \frac{1}{3}(x^{n+r}_{ma} + x^{n+r}_{mb} + x^{n+r}_{me});$$

$$\overline{x_m} = \frac{1}{3}(x_{ma} + x_{mb} + x_{me});$$

В связи с ортогональным планированием все коэффициенты регрессии и дисперсии в их определении рассчитываются независимо друг от друга.

Формулы для расчета коэффициентов регрессии уравнения (1) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
b'_0 &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{0,u} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^N x_{0,u}^2} = \frac{\sum_{u=1}^N y_u}{N}; & b_{1n} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{1n,u} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^N x_{1n,u}^2}; \\
b_{2n} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{2n,u} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^N x_{2n,u}^2}; & b_{1n,2n} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{1n,u} \cdot x_{2n,u} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^N (x_{1n,u} \cdot x_{2n,u})^2}; \\
b_{1r} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{1r,u} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^N x_{1r,u}^2}; & b_{2r} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{2r,u} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^N x_{2r,u}^2}; \\
b_{1n,2r} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{1n,u} \cdot x_{2r,u} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^N (x_{1n,u} \cdot x_{2r,u})^2}; & b_{2n,1r} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{2n,u} \cdot x_{1r,u} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^N (x_{2n,u} \cdot x_{1r,u})^2}; \\
b_{1r,2r} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{1r,u} \cdot x_{2r,u} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^N (x_{1r,u} \cdot x_{2r,u})^2};
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
x_{1n,u} &= x^n_{1,u} + v_1; & x_{1r,u} &= x^r_{1,u} + a_1 x^n_{1,u} + c_1; \\
x_{2n,u} &= x^n_{2,u} + v_2; & x_{2r,u} &= x^r_{2,u} + a_2 x^n_{2,u} + c_2;
\end{aligned}$$

N – количество опытов в соответствующем уравнению регрессии плане проведения экспериментов, т.е. $N = 9$ при планировании 3^2 .

Выполняется расчет тех коэффициентов регрессии, которые входят в рассматриваемое уравнение регрессии.

Если числитель (делимое) каждой из формул для расчета коэффициентов регрессии заменить величиной дисперсии опытов $s^2\{y\}$, а знаменатель (делитель) оставить прежним, то получаются формулы для расчета дисперсий в определении соответствующих коэффициентов регрессии $s^2\{b'_0\}$, $s^2\{b_{1n}\}$, $s^2\{b_{2n}\}$, $s^2\{b_{1n,2n}\}$, $s^2\{b_{1r}\}$, $s^2\{b_{2r}\}$, $s^2\{b_{1n,2r}\}$, $s^2\{b_{2n,1r}\}$, $s^2\{b_{1r,2r}\}$.

Сначала следует принимать $n = 1$, $r = 2$ и при этих числах показателей степени факторов производить расчет коэффициентов регрессии, дисперсий в их определении, выявлять статистически значимые коэффициенты регрессии. Математическая модель процесса получается после подстановки в уравнение регрессии статистически значимых и не равных нулю коэффициентов регрессии. Если при проверке выясняется, что математическая модель не обеспечивает требуемой точности, то следует

изменить величины показателей степени факторов и основа выполнять расчеты, пока не будет достигнута требуемая точность.

Были выявлены математические модели процессов плавки металла на газообразном топливе. На основе результатов моделирования оптимизированы процессы в газовых вагранках, разработаны на уровне изобретений новые конструкции чугуноплавильных агрегатов, экологически чистые, экономичные процессы.

Моделирование производилось по компьютерной программе VN9, разработанной на языке Бейсик.

При разработке газовых вагранок, рекуператоров, горелочных систем, способов плавки материалов на газообразном топливе применялось моделирование на основе теории подобия, теории размерностей, выполнялись исследования в лабораторных и производственных условиях, систематизировались и анализировались результаты исследований, выявлялись математические модели на ЭВМ по программам, разработанным на языках Бейсик, ПЛ/1, Турбо Паскаль. Наиболее совершенные программы математического моделирования, расчетов по математическим моделям и графических построений собраны в пакет программ математического моделирования на языке Бейсик (программы VL0, VN0, VN4, VN5, VN6, VN7, VN8, VN9, WN3, WN4, WN5, WN6, WN7, WN8, WN9). Пакет программ зарегистрирован в «Национальном информационном фонде неопубликованных документов», свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 6894, номер государственной регистрации 50200601653.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе исследований выявлены рациональные конструкции газовых вагранок для плавки чугуна.

Процесс плавки чугуна основывается на применении шахтной плавильной печи (вагранки) с использованием в качестве технологического топлива вместо кокса экологически чистого природного газа.

В газовой вагранке можно получать чугун требуемого химического состава без удорожания шихты, с механическими свойствами, удовлетворяющими любой марке серого чугуна. В газовой вагранке значительно облегчается получение высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Технологический процесс плавки чугуна в газовой вагранке отличается минимальными затратами по сравнению с другими процессами плавки, экономным энергохозяйством, минимальными вредными выбросами (SO_2 , CO и пыли), гибкостью и возможностью работы с получением требуемого для литейного производства количества металла, причем требования по качеству всегда могут быть учтены.

2. Выявлены закономерности процессов в горящих факелах и при взаимодействии факелов, что позволило разработать эффективные горелочные системы для газовых вагранок.

3. Разработаны эффективные экономичные рекуператоры для газовых вагранок и воздухоподогреватели. Способ работы этих теплообменников основан на приближении горячих газов и воздушных потоков к тепловоспринимающим стенкам, на многоструйном распределении воздушных потоков. Теплообменники долговечны, имеют строительную прочность, высокий КПД, позволяют нагревать воздух до 500°C .

При использовании горячего воздушного дутья повышается на 15-20% производительность газовых вагранок, уменьшается путь сгорания горючих веществ в факелах и в холостой огнеупорной колоше, повышается температура получаемого жидкого металла, снижаются потери металла в связи с окислением при плавке.

4. Плавка чугуна на газообразном топливе решает проблему улучшения экологических условий в чугунолитейных цехах. Разработаны способы плавки в чугуноплавильных агрегатах, позволяющие уменьшить расход топлива на 15-20%; повысить термический коэффициент полезного действия печей на 18-25%, снизить потери металла в связи с окислением на 10-14%. Основой этих способов плавки является применение горячего воздушного дутья с регулированием в зависимости от температуры воздуха величины коэффициента расхода воздуха и температуры газообразного топлива, подаваемого на сжигание, с учетом состава шихты. Выявлены математические модели, позволяющие управлять процессом плавки чугуна в газовых вагранках с достижением эффективности способов.

5. Исследованы тепловые процессы в газовых вагранках.

В газовых вагранках созданы оптимальные условия для теплообмена между горячими продуктами сгорания газообразного топлива и

расплавляемым металлом. На основе исследований подобран рациональный состав холостой огнеупорной колоши. Нагрев металла в противотоке горячих газов и перегрев расплава при стекании по нагретым до 1650⁰С кускам огнеупорных материалов позволяют получать жидкий чугун с температурой до 1500⁰С при термическом коэффициенте полезного действия чугуноплавильного агрегата до 50%. Разработана рекуперация тепла отходящего ваграночного газа на основе новых, эффективных многоструйных рекуператоров. Достигнута экономия топлива при плавке чугуна.

6. Выявлены особенности металлургического процесса при плавке чугуна на газообразном топливе – природном газе. Установлено, что рационально сжигать природный газ в газовых вагранках в горячих воздушных потоках при коэффициенте расхода воздуха, величина которого меньше единицы, и оптимум, которой зависит от температуры в печи. Оптимальные температурные условия в печи и состав горячих газов с наличием в продуктах сгорания водорода и сажистого углерода приводят не только к улучшению теплопередачи, к повышению КПД печи, но и уменьшению потерь металла в связи с окислением, снижению угара углерода, кремния, марганца, железа в чугуне в 2-2,5 раза по сравнению с обычными условиями плавки металла на газообразном топливе, достигается значительный экономический эффект.

7. Разработаны рациональные составы шихты для плавки в газовых вагранках. Выявлено, что в газовых вагранках рационально плавить чугуновый лом (до 50%), передельный чугун (до 40%), стальной лом (до 10%). В этом случае достигаются экономичность процесса плавки, высокий КПД плавильного агрегата, минимальный угар полезных элементов в металле.

8. Разработаны эффективные технологии плавки чугуна применительно к использованию газовых вагранок в промышленности. Применение новых технологических процессов плавки чугуна на газообразном топливе в промышленности позволяет улучшить качество отливок, повысить механические свойства металла. Разработаны конструкции газовых вагранок производительностью до 20 тонн жидкого чугуна в час и рациональные способы плавки металла в потоке горячих продуктов сгорания природного газа.

Предложен способ плавки материала в вагранке, заключающийся в том, что сжигают топливо, нагревают и плавят материал поступающими в шахту продуктами сгорания, но в отличие от известных способов, продукты сгорания топлива подают к нагреваемому материалу попеременно, то увеличивая, то уменьшая расход в пределах 2-60 процентов от средней величины расхода с частотой изменения этого расхода 3-120 колебаний в минуту, причем, чем меньше величина изменения расхода продуктов сгорания, тем больше частота колебаний расхода этих продуктов во времени.

Такое сочетание новых признаков с известными позволяет достигать многократного перераспределения горячих газов в шахте вагранки, интенсифицировать турбулизацию газовых потоков в слоях нагреваемого

материала, улучшить теплопередачу от горячих газов шихте, уменьшить тепловые потери, увеличить термический коэффициент полезного действия (к.п.д.), повысить производительность теплового агрегата, уменьшить расход топлива на 1 тонну получаемого жидкого материала.

Выявлены математические модели, позволяющие оптимизировать ваграночные процессы в зависимости от ряда факторов, влияющих на показатели процесса. Экологически чистые процессы плавки чугуна на газообразном топливе внедрены в производство.

Результаты выполненной фундаментальной работы по газовой плавке чугуна используются в учебном процессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Грачев, А.А. Черный. Применение природного газа в вагранках. – Саратов: Приволж. кн. изд., 1967. – 172 с.
2. В.А. Грачев, А.А. Черный. Современные методы плавки чугуна. – Саратов: Приволж. кн. изд., 1973. – 342 с.
3. Черный А.А. Особенности сжигания природного газа в газовых вагранках // Литейное производство. – 1996. - № 5.
4. Черный А.А. Планирование экспериментов и математическое моделирование процессов / А.А. Черный. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1977. – 80 с.
5. Черный А.А. Практика планирования экспериментов и математического моделирования процессов / А.А. Черный. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1984. – 103 с.
6. Черный А.А. Математическое моделирование применительно к литейному производству: учеб. пособие / А.А. Черный. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1998. – 121 с.
7. Моделирование сложных процессов по результатам экспериментов: метод. указ. / Сост. А.А. Черный. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1990. – 37 с.
8. Задания по математическому моделированию в литейном производстве: метод. указ. / Сост. А.А. Черный. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 27 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
СЖИГАНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ВАГРАНКАХ.....	4
ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПЛАВКИ ЧУГУНА НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ	7
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗОВЫХ ВАГРАНКАХ	9
ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПЛАВКЕ ЧУГУНА НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ – ПРИРОДНОМ ГАЗЕ	14
РАЦИОНАЛЬНЫЕ СОСТАВЫ ШИХТЫ ДЛЯ ПЛАВКИ В ГАЗОВЫХ ВАГРАНКАХ	17
ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ ЧУГУНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ГАЗОВЫХ ВАГРАНОК В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	17
НОВЫЙ СПОСОБ ПЛАВКИ В ГАЗОВОЙ ВАГРАНКЕ.....	20
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАННОЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГАЗОВЫХ ВАГРАНОК И ПРОЦЕССОВ ПЛАВКИ В НИХ ЧУГУНА	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
ЛИТЕРАТУРА	30

Анатолий Алексеевич Черный

ГАЗОВЫЕ ВАГРАНКИ И ВОЗДЕЙСТВИЕ НА
НАГРЕВАЕМЫЙ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЙ МАТЕРИАЛ
ПРИМЕНЕННОЙ ПОДАЧИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОДУКТОВ
СГОРАНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА

Учебное пособие

Пензенский государственный университет
440026, Пенза, Красная, 40.