

В. П. Лялюк

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА И ГАЗОДИНАМИКИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ



«Инфра-Инженерия»

В. П. Лялюк

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА
И ГАЗОДИНАМИКИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2019

УДК 669.162
ББК 34.323
Л97

Рецензенты:

академик Академии инженерных наук Украины, заслуженный деятель
науки и техники Украины, доктор технических наук,
профессор *В. А. Петренко*;
академик Академии горных наук Украины,
лауреат премии НАН Украины, доктор технических наук,
профессор *И. Г. Товаровский*

Лялюк, В. П.

Л97 Теоретические основы процессов горения топлива и газодинамики доменной плавки : монография / В. П. Лялюк. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 280 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0349-8

Приведены исследования, уточняющие разделы теории доменной плавки, в частности механических процессов горения топлива перед фурмами и движения газового потока в доменной печи. Рассмотрена работа доменных печей в различных условиях и на различных фурмах, проведен системный анализ режимов плавки и работы горна.

Для специалистов черной металлургии и смежных с ней областей, а также студентов высших учебных заведений металлургического, экономического и управленческого профилей.

УДК 669.162
ББК 34.323

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно сложившийся подход к анализу доменной плавки основан на детальном изучении отдельных его явлений (тепло- и массообмена, газо- и гидродинамики, механики движения и характера превращений шихтовых материалов и др.) с последующим использованием выявленных закономерностей для определения возможных и желаемых тенденций в развитии процессов и управления ими. Такой подход является плодотворным, однако, не вполне достаточным для полного познания процессов доменной плавки с целью их совершенствования. Изучение отдельных, даже наиболее существенных, явлений в изолированном виде не может дать оснований для окончательных выводов относительно совершенствования доменной плавки, а дает лишь исходный материал для последующего анализа [1, 2].

Это обусловлено тем, что доменная плавка в целом является не простой совокупностью отдельных явлений, а сложной функцией их связей, природа которых сложнее самих явлений и включает свойства, не присущие отдельным явлениям. Изложенное позволяет характеризовать доменную плавку как большую систему, современное представление о которой включает четыре основных свойства [1].

Целостность и членимость. Система – целостное образование, но в ее составе могут быть четко выделены отдельные элементы (свойства).

Связи. Наиболее существенные связи между элементами системы превосходят по мощности связи этих элементов с элементами, не входящими в систему. Это отличает систему от простого конгломерата и выделяет ее из окружающей среды как целостное образование.

Организация. Наличие организации в системе формально выражается в том, что энтропия системы меньше, чем энтропия системоформирующих факторов, к числу которых относятся количество элементов, их свойства, связи и др.

Интегративные качества. Качества, присущие системе в целом, но не свойственные ее элементам в отдельности. Свойства системы, хотя и зависят от свойств ее элементов, но полностью не определяются ими. Система не сводится к простой совокупности элементов. Изучая элементы в отдельности, нельзя познать все свойства системы в целом.

Методологической основой изучения систем является системный подход, структуру которого можно представить в виде четырех компонентов [1]:

- изучение и учет внешних связей рассматриваемой системы или проблемы;
- иерархическое представление ее внутренней структуры и процессов управления;
- учет неопределенностей, обусловленных неполнотой исходной информации, многокритериальностью и другими факторами;
- применение математических методов и ЭВМ.

Процесс выплавки чугуна в доменных печах в числе методов производства металлов является одним из наиболее древних. Составляющие доменную плавку процессы: горения топлива, теплообмена, движения материалов и газов (газодинамика), восстановления, гидродинамики чугуна и шлака в коксовой на-

садке и др. разработаны достаточно глубоко. Наиболее обстоятельно рассмотрены вопросы теории теплообмена между газом и материалами в доменной плавке, при этом вопросы горения топлива и газодинамики требуют уточнения.

Так одними из важнейших факторов, берущихся во внимание при оценке состояния плавки и управлении ее ходом, является механическая энергия потока дутья истекающего из фурмы доменной печи и падение (перепад) давления газа при его движении от фурм к колошнику.

В качестве основной энергетической характеристики потока дутья истекающего из фурмы печи часто используют только кинетическую энергию, которая является лишь частью полной энергии потока дутья (см. уравнение Д. Бернулли) в связи с чем необходимо уточнить ряд теоретических представлений связанных с горением топлива у фурм доменной печи.

В качестве модели движения газового потока в доменной печи по-прежнему используется уравнение Дарси-Вейсбаха, полученное эмпирически для иного физического тела перемещающегося в условиях, которые коренным образом отличаются от условий движения газа в доменной печи.

Одной из главных причин некоторых несоответствий теории доменной плавки обнаруженных в последнее время является не только разрозненное рассмотрение коренных процессов плавки в отрыве их друг от друга, а также от обстоятельств места и времени, а иногда в отрыве также и от фундаментальных положений науки.

Из-за этого некоторые слагаемые металлургии чугуна, как науки противоречат законам физики, в частности молекулярно-кинетической теории газа. Другие не всегда могут дать ответ на вопросы поставленные практикой, объяснить ситуации, возникшие в тех или иных условиях доменной плавки.

Следует также отметить и то, что ряд закономерностей положенных в основу теории доменной плавки в прошлые годы были со временем уточнены или глубже осознаны. Изменились также условия работы доменных печей. Все вместе обуславливает необходимость уточнения ряда положений теории доменной плавки во взаимосвязи друг с другом, с основными законами науки и изменяющимися условиями работы доменных печей, т.е. необходим сущностный анализ [2].

“Сущность – совокупность всех необходимых сторон и связей (законов), свойственных вещи, взятых в их естественной взаимозависимости, в их жизни, в отличие от явления, которое есть обнаружение сущности через свойства и отношения, доступные чувствам. Сущность всегда находится в единстве с явлением, ибо она в явлениях не только обнаруживается, но через явления существует, действует. ...Но сущность и явление не совпадают...,...сущность скрыта под поверхностью явлений, тогда как явления обнаруживаются непосредственно... Нередко явления могут неправильно, извращенно передавать сущность предмета. Задача познания заключается в том, что бы за видимостью распознать сущность” [3].

Для металлургических процессов обозначенное актуально еще и потому, что между сущностью и явлением, т.е. проявлением сущности, располагаются иные субстанции в виде огнеупорной футеровки, охлаждения, кожуха печей,

энергетических и иных полей, которые затрудняют, а иногда и искажают проявление сущности. Для доменной плавки обозначенное особо (дополнительно) значимо в связи с ее многофакторностью и большим транспортным запаздыванием между свершением и проявлением сущностных сторон процессов составляющих плавку и примеров тому множество [2].

Эволюционное развитие доменной плавки идет по пути сокращения расхода кокса – основного энергоносителя, дефицит которого определяет развитие черной металлургии. Способы экономии кокса по существу сводятся к сокращению теплотребности процессов за счет улучшения подготовки сырьевых и топливных компонентов и организации технологического процесса; а также к замене тепла и восстановительного потенциала газов, образующихся из кокса, вводимым с дутьем теплом и восстановителем, получаемым из менее дефицитных энергоносителей.

Основные черты современной доменной плавки были сформированы к концу XIX века. К этому времени в большинстве развитых стран завершился переход на минеральное горючее – кокс, а конструкция доменной печи обрела формы, принципиально не отличающиеся от нынешних. Дальнейшая эволюция плавки шла по пути укрупнения агрегатов, повышения их производительности за счет интенсификации процессов при одновременном снижении удельного расхода кокса и затрат труда на производство единицы чугуна.

Наиболее крупными этапами этой эволюции являются:

- применение нагрева дутья и последующее использование увлажнения его для дальнейшего увеличения температуры;
- агломерация пылевидных руд и последующий ввод флюсов в состав агломерата;
- сжатие газа в рабочем пространстве печи;
- обогащение бедных руд с последующим их окускованием путем агломерации или окомкования;
- удаление мелких фракций из шихты перед загрузкой в печь;
- применение природного газа, мазута и измельченного угля (ПУТ) для дувания через фурмы;
- обогащение дутья кислородом;
- совершенствование управления доменной плавкой “сверху” и “снизу” на основе более совершенного контроля технологических параметров.
- загрузка кускового антрацита через колошник доменной печи.

Лучшие доменные печи конца XIX века работали с удельной производительностью 0,6-0,8 т/(м³·сутки) (КИПО – 1,2-1,6) при расходе кокса 900-1200 кг/т чугуна; суточная производительность одного агрегата составляла 300-600 т. В современных крупных доменных печах выплавляют ≥10 тыс. т чугуна в сутки. Их удельная производительность составляет 2,5-3,0 т/(м³·сутки), а расход кокса достигает 350-400 кг/т чугуна.

Таким образом, результат развития доменной плавки в течение XX века выражается в трех- четырехкратном увеличении удельной производительности доменных печей и в 2,5-3 – кратном сокращении удельного расхода кокса.

Совокупность известных и разрабатываемых мероприятий по совершенствованию доменной плавки позволит в XXI веке улучшить ее показатели примерно в 1,5 раза, достигнув удельной производительности 3,5-4 т/м³ в сутки и расходе кокса 250-300 кг/т чугуна, что близко к предельным возможностям доменной плавки в рамках присущих ей характерных свойств.

Следует отметить, что большая часть пути эволюционного развития доменной плавки уже пройдена. Оставшаяся меньшая часть характерна возрастающими трудностями дальнейшего совершенствования процессов, природа которых присуща всем техническим системам, а первые симптомы их обнаружены еще на ранних стадиях развития и выражены как частный случай в известном принципе Окермана-Павлова [5, 6]: “Всякая причина, уменьшающая расход тепла в доменной плавке, дает тем больше сбережения горючего, чем менее был коэффициент полезного действия тепла в доменной печи”.

Рассмотренная особенность доменной плавки как характерной сложной технической системы отражена во временной функции его развития. Замедление темпов улучшения показателей плавки обусловлено уменьшением эффективности, приходящейся на единицу затрат ресурсов по мере совершенствования процессов доменной плавки.

Товаровский И.Г. в своей работе [5] сформулировал ряд основных принципов совершенствования доменной плавки:

1. Максимальный эффект от применения каждого мероприятия по совершенствованию доменной плавки достигается при условиях, противоположных тем, к которым ведет данное мероприятие.

2. Наиболее эффективны сочетания таких мероприятий, которые воздействуют на основные процессы плавки в противоположных направлениях.

3. По мере совершенствования процессов доменной плавки и приближения их к некоторому предельному режиму эффективность всей совокупности мероприятий по ее дальнейшему улучшению снижается.

Первый основной принцип Товаровский И.Г. сформулировал также и в более общей форме [5]. Всякое воздействие на процесс, направленное на перевод его в другое состояние, вызывает явления, препятствующие этому переходу, и каждый последующий шаг воздействия оказывается менее эффективным, чем предыдущий.

Тем не менее, технические резервы совершенствования процессов доменной плавки еще достаточно велики не только в масштабах отраслей, фирм, корпораций и других объединений, но и для лучших доменных печей [4].

Анализ технологий получения чугуна, альтернативных доменной плавке, показал, что автономные агрегаты, являющиеся по существу фрагментами доменной печи, не имеют преимуществ в производстве массового металла. Интегральные оценки доменной плавки превосходят характеристики всех известных способов прямого получения железа в связи, с чем доменная плавка остается определяющим технологическим модулем черной металлургии, развитие которого будет формировать облик всего металлургического комплекса [1, 4].

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

1.1. Физическая сущность плавки

Доменная плавка предназначена для выплавки металла – чугуна из железных руд. Железные руды представляют собой горную породу, состоящую из рудного минерала (оксиды железа), пустой породы (оксиды кремния, кальция, магния, марганца и др. элементов), примесей полезных (Ni, Mg, Cr, W, V) и примесей вредных (S, P, Zn, Pb, As и др.).

С учетом этого в доменной плавке необходимо решить следующие основные задачи:

- восстановить оксиды железа, т.е. разделить железо с кислородом;
- отделить восстановленное железо от оксидов пустой породы;
- предотвратить насыщение выплавленного металла вредными примесями в то же время, обеспечить максимальное усвоение полезных примесей [2].

Перечисленные задачи решаются в противоточном тепло-массообменном металлургическом агрегате шахтного типа – доменной печи (рис. 1, 2).

В качестве восстановителей здесь используются углерод топлива твердого, а также газифицированного в кислороде дутья. Применяются также газообразные жидкие и пылевидные топливные добавки к дутью. Основным топливом в подавляющем большинстве случаев служит каменноугольный кокс.

Шихтовые материалы (железорудные компоненты и флюс) совместно с топливом загружаются в доменную печь сверху и в процессе плавки опускаются в рабочем объеме печи вниз навстречу поднимающемуся потоку горячего восстановительного газа. Этот газ образуется в нижней части печи, главным образом, в результате газификации (неполного горения) загруженного в домну углерода топлива, в кислороде подаваемого через воздушные фурмы дутья.

В ходе противотока протекают реакции, обеспечивающие превращение загруженных материалов в чугун и шлак. Железорудные материалы отдают потоку газа кислород, сами восстанавливаются до металлического железа, которое насыщаясь углеродом (растворяя в себе углерод) нагревается до расплавления, превращаясь в чугун.

Не восстановленные оксиды пустой породы в рабочем объеме печи опускаются в составе шихты, попадая в зону все более высоких температур, в результате нагреваются до расплавления, образуя сплав окислов – шлак.

Образующийся в нижней части печи горячий восстановительный газ формирует поток, поднимающийся снизу вверх навстречу опускающимся материалам. Газ отдает материалам тепло, сам при этом остывает и отнимает у них кислород, в результате чего окисляется.

Таким образом, в ходе доменной плавки происходит обмен теплом и массой между встречными потоками газа и материалов.

Продукты плавки чугун и шлак накапливаются в нижней части печи и периодически выпускаются из нее, разделяясь в процессе выпуска.

Важными особенностями доменной плавки являются [2]:

1) Организация процесса горения в условиях избытка топлива (углерода). В результате углерод окисляется только до CO, образуя восстановительный газ и, соответственно, создавая восстановительную атмосферу в рабочем объеме печи, обеспечивающую возможность решения основной задачи плавки по восстановлению оксидов железа. При этом выделяется тепло, необходимое для решения второй задачи плавки по разделению восстановленного железа и оксидов пустой породы, что осуществляется в жидком (расплавленном) состоянии при выпуске продуктов плавки из доменной печи.

2) Образование железа в доменной печи осуществляется в условиях тесного контакта с углеродом топлива. Поскольку железо способно растворять в себе углерод, то оно быстро им насыщается в пределах 4-6 %, образуя чугун – сплав железа с углеродом. Предотвратить насыщение железа углеродом в доменной плавке в связи с отмеченным невозможно. Углерод в чугуне повышает твердость, однако ухудшает вязкие и пластические свойства металла. Поэтому для его удаления из металла путем окисления и перевода в газовую фазу, выделяющуюся из металла, и повышения, таким образом, качества последнего предусматривается вторая ступень металлургического передела – производство стали.

1.2. Топливо доменной плавки и его роль

Основным видом топлива в современной доменной плавке является каменноугольный кокс, получаемый методом пиролиза (нагрев без доступа воздуха при температуре 1000-1100 °С) из смеси различных, главным образом коксующихся марок каменных углей. В дополнение к нему в ряде случаев используются также горючие газы (природный и коксовый), мазут, пылеугольное топливо и другие топливные добавки, как правило, подаваемые в горн доменной печи совместно потоку дутья. В последнее время разработана технология загрузки через колошник доменной печи кускового антрацита.

Кокс, загружаемый в печь совместно с шихтовыми материалами через колошник, в доменной плавке играет триединую роль:

- обеспечивает плавку газообразным восстановителем, частично принимая участие в прямом восстановлении оксидов железа и других элементов;
- обеспечивает необходимые температурно-тепловые условия протекания физико-химических превращений;
- является разрыхлителем столба шихтовых материалов заполняющих рабочее пространство печи.

Для выполнения перечисленных задач кокс должен отвечать ряду требований, главным из которых является высокая прочность в холодном и нагретом до высоких температур состоянии, высокая газопроницаемость насыпной массы, низкое содержание золы и вредных примесей, прежде всего, серы, не высокая стоимость.

В себестоимости чугуна стоимость кокса составляет около половины, поэтому сокращение расхода кокса при выплавке чугуна в доменной печи всегда было и продолжает оставаться одной из важных задач доменной плавки.

По ходу плавки, опускаясь в рабочем пространстве печи, загруженный через колошник кокс расходуется в следующих процессах:

- 1) выбрасывается, в большем или меньшем количестве, через чугунную лентку на выпусках продуктов плавки;
- 2) уносится колошниковым газом в виде мелких фракций;
- 3) растворяется в железе, образуя чугун;
- 4) расходуется в качестве восстановителя в реакциях прямого восстановления оксидов железа и других элементов (сгорает до CO в кислороде шихты);
- 5) сгорает до CO в кислороде дутья у фурм, образуя горновой восстановительный газ.

Необходимое для осуществления плавки тепло выделяется только в последнем случае при горении дошедшего до фурм углерода – $C_{\text{ф}}$.

Уже здесь можно сделать предварительный вывод о том, что в условиях постоянного потребности плавки в тепле, одним из путей сокращения расхода кокса является уменьшение его расходования по первым четырем из приведенных позиций [2].

Особый интерес здесь представляет позиция 4, т.е. расходование углерода в реакциях прямого восстановления, об “оптимальной” степени, развития которой, дискутируют более ста лет (с момента опубликования Л. Грюнером своего постулата о целесообразности максимально возможного развития в доменной плавке косвенного восстановления).

Рассматривая данные обстоятельства, следует учитывать еще и то, что при горении граммолекулы углерода до CO в кислороде дутья по реакции:



выделяется 117,845 МДж теплоты, а при горении углерода до CO в кислороде шихты по реакции:



поглощается 152,190 МДж теплоты.

Важно отметить, что в доменной плавке расход кокса регулируется только в связи с тепловым состоянием (нагревом) печи: при снижении нагрева добавляется, а при повышении – снижается.

При этом процесс регулирования заключается в изменении количества сгорающего у фурм углерода методом “сверху”, т.е. за счет изменения расхода кокса в каждую подачу.

Кроме кокса, загружаемого через колошник, и его заменителей, подаваемых сопутнo потоку дутья через фурмы энергоресурсы, т.е. топливо, расходуются также на компремирование и нагрев дутья.

В дополнение к этому используется также электрическая энергия для обеспечения доменной печи охлаждающей водой, иными энергоресурсами, а также в приводах необходимых механизмов.

Следует отметить, что электроэнергия расходуется, в частности еще и, для повышения запаса потенциальной энергии поднимаемых на колошник топлива и шихтовых материалов [2].

1.3. Энергетические затраты при выплавке чугуна

Актуальность проблемы энергосбережения, которая всегда занимала одну из центральных позиций при выплавке чугуна в доменных печах, с течением времени возрастает. Это связано с намечающимся истощением запасов необходимых энергоресурсов, ростом стоимости вырабатываемой энергии, а также с необходимостью сокращения всех видов выбросов в окружающую среду при ее производстве.

Доменная плавка в целом представляет собой сложный комплекс явлений, в рамках которой задача по получению чугуна из железорудных материалов решается за счет использования трех видов энергии: физической (тепловой), химической (восстановительной) и механической.

Необходимая для осуществления доменной плавки тепловая энергия выделяется при газификации топлива у воздушных фурм и расходуется на нагрев и плавление материалов. При газификации топлива высвобождается также химическая энергия и образуется горновой восстановительный газ, с помощью которого выполняется работа по восстановлению оксидов железа и других элементов, переходящих в чугун. Механическая энергия расходуется на перемещение (проталкивание) потока дутья, а затем газа от воздуходувной машины до доменной печи, в слое материалов в самой печи и далее в коммуникациях и агрегатах газоочистки [2].

Носителем энергии всех видов в доменной плавке является поток дутья – газа, который вначале насыщается (заряжается) энергетически, а затем – разряжаясь, совершает работу. При формировании потока дутья на воздуходувной машине ему сообщается запас энергии проталкивания (давления) и некоторое количество тепла. Это первая стадия зарядки потока – носителя энергии.

На второй стадии, в воздухонагревателе, дутьевому потоку сообщается дополнительное количество тепловой энергии, в связи с чем, возрастают его температура и запас внутренней энергии. В том и другом случаях расходуется внешняя по отношению к потоку энергия, требующая соответствующего расходования энергоресурсов.

В очагах горения у фурм в реакциях взаимодействия дутья с топливом выделяется внутренняя энергия реагентов. Существенно заметить, что здесь окислительный поток дутья превращается в восстановительный поток горнового восстановительного газа и на это расходуется часть восстановительного потенциала дошедшего до фурм углерода кокса и подаваемых сопутного потоку дутья топливных добавок. Выделившаяся здесь энергия усваивается образующимся газом. В результате дополнительно возрастает его тепловой потенциал и формируется потенциал восстановительный. Здесь также расходуются энергоресурсы – кокс и его заменители.

На третьей стадии завершается формирование рабочего тела доменной плавки – потока сжатого, горячего восстановительного газа.

Далее, за пределами зон горения, при движении в слое шихтовых материалов накопленная восстановительным газом энергия расходуется на превращение

загруженной в печь шихты в продукты плавки, после чего газ покидает доменную печь.

Ни один вид энергии в доменной печи полностью не расходуется. Поэтому уходящий через колошник газ обладает более или менее значительными запасами тепловой, химической и механической энергий.

Изложенное выше обуславливает необходимость разработки двух направлений по повышению эффективности использования энергии при производстве чугуна в доменных печах.

Прежде всего, безусловно, целесообразным представляются повторное применение и утилизация выбрасываемых ресурсов. Разработка данного направления входит в круг задач, решаемых энергетическими службами металлургического предприятия.

Главной задачей в ходе непосредственно доменной плавки является сокращение, на основе рационализации технологии, недоиспользования и выбросов всех видов энергий из печи, повышение коэффициента полезного действия используемых энергоресурсов и, на этой основе, сокращение их расходования [2]. Основным энергоресурсом для доменной плавки является кокс, расход которого определяется и регулируется в зависимости от теплового состояния (нагрева) печи. Исходя из этого, анализ эффективности энергозатрат целесообразно начать с рассмотрения коэффициента полезного действия (к.п.д.) углерода кокса в процессах теплopotребления.

1.4. К.п.д. углерода (кокса) в процессах нагрева

В общем случае под коэффициентом полезного действия подразумевается отношение полезно использованной энергии ко всей затраченной. Применительно к рассматриваемому случаю под к.п.д. следует подразумевать отношение количества тепла, полезно использованного в нижней высокотемпературной ступени теплообмена, ко всему количеству тепла, которое может быть получено при сжигании всего загруженного в печь углерода кокса.

Уяснение проблемы требует учета следующих особенностей использования топлива в доменной печи как в нагревательном аппарате [2]:

1. Топливо (кокс) загружается в домну сверху через колошник, а сжигается внизу печи у воздушных фурм. При загрузке и движении до фурм некоторое количество мелких фракций кокса уносится из печи колошниковым газом $C_{к.г.}$, т.е. теряется. Часть углерода кокса растворяется в чугуне ($C_ч$) и расходуется в реакциях прямого восстановления (C_d). Поэтому доходит до фурм, где сгорает, и, таким образом, принимает участие в процессах нагрева только некоторая часть загруженного в печь углерода кокса ($C_ф$). Данное обстоятельство может быть отражено в виде коэффициента участия углерода ($C_к$) кокса ($к$) в процессах нагрева:

$$\eta_c^T = \frac{к \cdot C_к - C_d - C_ч - C_{к.г.}}{к \cdot C_к} = \frac{C_ф}{к \cdot C_к}; \quad (1.1)$$

где k – удельный расход кокса, кг/т чугуна; C_k – содержание углерода в коксе, %; $C_d, C_q, C_{к.г.}$ – расход углерода на прямое восстановление, в чугун и в колошниковый газ, кг/т.

Здесь упущено некоторое не контролируемое количество кокса, которое иногда, не систематически, выбрасывается через чугунную летку во время выпусков продуктов плавки.

2. Дошедший до фурм углерод кокса сгорает здесь по реакции неполного горения, т.е. только до CO , с тепловым эффектом ($q_{co} = 117,845$ МДж), который существенно ниже эффекта реакции полного горения C до CO_2 ($q_{co_2} = 400,428$ МДж). Отсюда коэффициент высвобождения тепла при горении углерода у фурм:

$$\eta_r = \frac{q_{co}}{q_{co_2}} = \frac{117,845}{400,428} = 0,294. \quad (1.2)$$

3. Выделившееся в зонах горения у фурм тепло улавливается образующимся здесь горячим восстановительным газом, который затем, поднимаясь в слое опускающихся материалов, совершает тепловую и восстановительную работу последовательно в двух ступенях теплообмена: нижней, где водяное число газа (W_r) меньше водяного числа шихты ($W_{ш}$), и верхней, где $W_r > W_{ш}$. Указанные ступени теплообмена разделены “резервной зоной” той или иной высоты, что обеспечивает автономность их тепловой работы. Необходимое для процесса количество теплоты определяется в связи с этим потребностью в нем нижней высокотемпературной ступени теплообмена [7]. Важной особенностью этой зоны является высокая температура теплоносителя, с которой он покидает нижнюю ступень, равная пограничной по газу температуре двух зон теплообмена.

Количество тепла, полученное газом в зонах горения у фурм равно:

$$Q_\phi = W_\phi^r \cdot t_\phi; \quad (1.3)$$

часть полученного тепла (бросовая) уносится газом в верхнюю ступень:

$$Q_6 = W_6^r \cdot t_6. \quad (1.4)$$

Полезно израсходованное в высокотемпературной зоне тепло определяется как разность:

$$Q_\Pi = Q_\phi - Q_6; \quad (1.5)$$

а коэффициент полезного действия высокотемпературного тепла находится как отношение:

$$\eta_{BT} = \frac{Q_\Pi}{Q_\phi} = \frac{W_\phi^r \cdot t_\phi - W_6^r \cdot t_6}{W_\phi^r \cdot t_\phi}. \quad (1.6)$$

Полагая, что некоторое снижение теплоемкости газа при его охлаждении от t_ϕ до t_6 в пределах нижней ступени теплообмена компенсируется увеличением количества газа в реакциях прямого восстановления, находим:

$$\eta_{BT} = (t_\phi - t_6) / t_\phi. \quad (1.7)$$

Суммарный к.п.д. углерода кокса в процессах нагрева определяется как произведение найденных частных:

$$\eta_{\Sigma}^T = \eta_C^T \cdot \eta_{\Gamma} \cdot \eta_{BT} = 0,294 \cdot C_{\Phi} \cdot (t_{\Phi} - t_6) / k \cdot C_k \cdot t_{\Phi}. \quad (1.8)$$

Значения частных и суммарного к.п.д. углерода кокса (табл. 1) в процессах нагрева для различных вариантов плавки определены с использованием результатов расчёта технологических показателей доменной плавки А.Н. Раммом [8].

Таблица 1. К.п.д. углерода кокса в процессах нагрева

№	Показатели	Варианты плавки по А.Н. Рамму [8, с. 58]		
		0	1	2
1	Содержание кислорода в дутье, м ³ /м ³	0,21	0,25	0,25
2	Влажность дутья, м ³ /м ³	0,01	0,01	0,01
3	Температура дутья, °С	1000	1300	1300
4	Расход природного газа, м ³ /кг	0	0,08	0,08
5	Расход антрацита, кг/кг	0	0,04	0,04
6	Расход конвертированного газа, м ³ /кг	0	0	0,5
7	Расход кокса, кг/кг	0,5378	0,3822	0,2759
8	Количество углерода, сгорающего у фурм, кг/кг	0,3132	0,2072	0,1405
9	Теоретическая температура горения, °С	2220	2137	2017
10	Температура газа на выходе из нижней ступени теплообмена, °С	900	900	900
11	η_C^T	0,6618	0,6161	0,5787
12	η_{Γ}	0,294	0,294	0,294
13	η_{BT}	0,5946	0,5788	0,5538
14	η_{Σ}^T	0,1157	0,1048	0,0942

В ходе расчёта принято $C_k = 0,88$, а пограничная температура двух зон теплообмена для всех вариантов принята постоянной. Последнее вводит некоторую погрешность при определении η_{BT} , но не может существенно исказить найденную величину суммарного к.п.д. углерода кокса в процессах нагрева.

Не трудно видеть, что рассчитанный коэффициент η_{Σ}^T представляет собой отношение количества высокотемпературного тепла, полезно израсходованного в нижней ступени теплообмена, к суммарному количеству тепла, которое может быть получено при сжигании всего загруженного в печь углерода кокса по реакции полного горения. Значения коэффициента в существующих и перспективных условиях плавки совсем невелики и возможности по его увеличению в доменной плавке отсутствуют.

Из числа определяющих его величину сомножителей η_T является величиной постоянной, η_C^T при постоянной шихте и заданном составе чугуна может быть несколько увеличен за счёт снижения степени прямого восстановления. Однако даже при $g_d = 0$ коэффициент η_C^T не может достичь 1,0 в связи с расходом углерода на науглероживание железа и потерями через колошник. Тем не менее, снижение степени прямого восстановления следует отметить как метод повышения коэффициента участия углерода кокса в процессах нагрева и, следовательно, как метод повышения к.п.д. углерода в этих процессах.

Таким образом, прямое восстановление, увеличивая потребность в тепле определяющей расход кокса нижней ступени теплообмена, одновременно сокращает возможности по степени удовлетворения теплом возросшей теплопотребности, поскольку снижает к.п.д. углерода в процессах нагрева. Что же касается коэффициента использования высокотемпературного тепла η_{BT} , то только его повышение за счёт роста t_{ϕ} будет приводить к снижению расхода кокса; при снижении пограничной температуры t_6 одновременно с ростом η_{BT} увеличивается потребность в тепле высокотемпературной зоны и расход топлива может даже возрастать.

Приведенные обстоятельства обуславливают и объясняют высокую эффективность любых мер по снижению теплопотребности высокотемпературной зоны. В качестве примера можно воспользоваться широко известными результатами, полученными в 1829 году в Шотландии на заводе Клайд при нагреве дутья до 149 °С, где экономия горючего составила 2,9 т угля на 1 т чугуна. С учётом расходования 0,4 т сэкономленного угля на нагрев дутья, который производился в воздушнонагревателе весьма несовершенной конструкции, чистая экономия топлива составила порядка 30 %. Приведенные в табл. 1 значения коэффициента полезного действия углерода в процессах нагрева позволяют ожидать такой же высокой эффективности от любых других мероприятий по снижению теплопотребности высокотемпературной зоны.

Таковыми мерами являются: снижение выхода шлака, сокращение содержания Si и других элементов в чугуне, сокращение теплопотерь и степени прямого восстановления железа, нагрев добавок к дутью [2].

1.5. К.п.д. углерода кокса в процессах восстановления

Углерод кокса в доменной плавке расходуется также в восстановительных процессах. Основное количество кислорода отнимается от оксидов железа газообразными восстановителями в шахте печи. Окончательно оксиды железа довосстанавливаются в нижней ступени теплообмена за счет расходования в качестве восстановителя твердого углерода. Восстановление твердым углеродом в части расходования восстановителя, в общем случае, является более экономным, в сравнении с восстановлением газами, которое для своего осуществления требует некоторого избытка газообразного восстановителя против стехиометрических соотношений [6, с. 108].

Парадоксальность ситуации состоит в том, что сдвиг процесса восстановления в сторону увеличения доли реакции с более экономным расходом восстановителя (прямого восстановления) приводит к увеличению расхода кокса в доменной плавке. Это связано с тем, что в доменной плавке специально для получения газообразного восстановителя кокс не расходуется.

При отсутствии влаги и топливных добавок к дутью восстановительный газ СО образуется только в реакциях прямого восстановления и горения топлива у фурм, осуществляемого с целью получения необходимого для плавки тепла. При этом последнее возрастает при увеличении расхода углерода в процессах прямого восстановления. Таким образом, основная часть кислорода отнимается от оксидов железа в шахте углеродом уже отработавшим в процессах нагрева и прямого восстановления, определяющих расход кокса.

Иными словами, восстановительный газ это побочный продукт, образующийся в процессах горения углерода в кислороде дутья, для восполнения потребности плавки в тепле, и в кислороде шихты, т.е. в процессах прямого восстановления.

Здесь уместно также отметить, что доменная печь не есть газогенератор, где топливо расходуется на образование СО специально, а является нагревательным агрегатом по отношению ко всем загруженным в нее материалам и восстановительным агрегатом, по отношению к оксидам, восстанавливаемым прямым путем.

В процессе плавки углерод топлива сгорает в кислороде дутья, для получения необходимого для плавки тепла, и в кислороде шихты в реакциях прямого восстановления. В том и другом случае образуется газ СО попутно. Затем этот газ используется в шахте печи – своеобразном рекуператоре для восстановительной и нагревательной подготовки материалов, поступающих в “определяющую” расход кокса высокотемпературную зону. Чем лучше подготовлен по нагреву и восстановлению оксидов, поступающий сюда из указанного рекуператора материал, тем ниже потребность этой зоны в высокотемпературном тепле и в углероде для прямого восстановления, тем ниже расход кокса [2].

Если участие углерода кокса в процессах прямого восстановления выразить соотношением, подобным соотношению (1.1) получаем:

$$\eta_C^B = \frac{k \cdot C_k - C_\phi - C_\chi - C_{\text{к.г.}}}{k \cdot C_k} = \frac{C_d}{k \cdot C_k}. \quad (1.9)$$

Результаты определения η_C^B (табл. 2) с использованием указанных ранее вариантов плавки по А.Н. Рамму свидетельствуют о том, что к.п.д. твердого углерода кокса в процессах восстановления также не высоки и причины те же, т.е. расходование углерода по иным каналам.

Сравнение выражений (1.1) и (1.9) показывает, что коэффициенты η_C^T и η_C^B могут быть одновременно увеличены только за счет сокращения потерь углерода с колошниковым газом, что очевидно. Возможности по снижению растворения углерода в чугуна в условиях доменной плавки отсутствуют. Что же касается пары взаимосвязанных факторов C_ϕ и C_d , которые изменяются в проти-

воположных направлениях, то снижению расхода загруженного через колошник кокса в доменной плавке соответствует увеличение C_{ϕ} и, соответственно, сокращение C_d .

Отсюда следует вывод о том, что с позиции снижения расхода топлива в доменной плавке повышение к.п.д. твердого углерода (кокса) в процессах восстановления является фактором неблагоприятным и поэтому нежелательным. Это приводит, с одной стороны, к повышению теплопотребности нижней ступени теплообмена, из-за повышения степени прямого восстановления, с другой стороны, из-за уменьшения C_{ϕ} , – к снижению к.п.д. углерода в процессах нагрева [2].

Таблица 2. К.п.д. углерода кокса в процессах восстановления

№	Показатели	Варианты плавки по А.Н. Рамму [8]		
		0	1	2
1	C_d , кг/кг чугуна	0,1131	0,0821	0,0554
2	η_{co}	0,4082	0,4385	0,3701
3	η_{H_2}	0,4899	0,5262	0,4441
4	η_C^B	0,2399	0,2441	0,2282

Исходя из изложенного к.п.д. углерода кокса в процессах восстановления, рассчитываемый по уравнению 1.9, не является показателем вполне корректным для условий доменной плавки, поскольку не учитывает важнейших особенностей восстановительного процесса, протекающего в доменной печи. Вместе с тем применение такого показателя представляется целесообразным в части дополнительного раскрытия значений прямого и косвенного восстановления железа в доменной плавке.

Приведенные соображения, в частности, подтверждают справедливость широко известного постулата Грюнера о желательности непрямого восстановления железа в доменной плавке.

Обычно об эффективности восстановительной работы в доменном процессе судят по степени использования восстановительной энергии газа, которая выражается двумя показателями, рассчитываемыми по составу газа:

$$\eta_{CO} = CO_2 / (CO + CO_2), \quad (1.10)$$

$$\eta_{H_2} = H_2O / (H_2 + H_2O). \quad (1.11)$$

Каждый из показателей, по сути, представляет собой к.п.д. соответствующего газа в процессах непрямого восстановления. Повышение значений η_{CO} и η_{H_2} снижает к.п.д. твердого углерода в процессах восстановления, однако повышает к.п.д. углерода в процессах нагрева и сокращает теплопотребность нижней ступени теплообмена, из-за чего сокращается расход топлива в доменной плавке.

Иными словами, в данном случае степень использования восстановительной энергии газа оказывает влияние только на степень прямого восстановления, а

расход кокса снижается лишь в связи с сокращением прямого восстановления.

Из этого в частности вытекает вывод о том, что доменная печь, по крайней мере, в нижней ступени теплообмена, является агрегатом, прежде всего плавильным и лишь в какой-то части восстановительным. Чем эта часть меньше, тем топливо расходуется эффективнее и тем ниже его расход на тонну чугуна.

Таким образом, снижению энергозатрат при выплавке чугуна в доменных печах соответствует осуществление восстановительной работы газами в шахте при максимальном сокращении участия в восстановлении твердого углерода кокса. Практическая реализация данного направления осуществляется путем совершенствования взаимного распределения потоков шихты и газа в шахте доменной печи [2].

1.6. К.п.д. энергии проталкивания

Энергия проталкивания (давления сжатого газа) представляет собой: “...энергию вещества, зависящую от параметров его состояния и возникающую в системе за счет воздействия на него другими частями системы, стремящимися вытолкнуть это вещество из занимаемого сосуда” [9, с. 22].

В рассматриваемом случае такая энергия создается в компрессоре воздухоходовой машины, сжимающем воздух и выталкивающим его в воздухопровод. Сжатие осуществляется за счет расходования энергии пара, который вращает турбину, служащую приводом компрессора.

Удельный расход тепла и топлива на сжатие доменного дутья зависит от его давления (табл. 3).

Таблица 3. Расход энергии на сжатие дутья [10, с. 116]

Давление, кПа		Расход	
колошникового газа	дутья	тепла, кДж/нм ³	условного топлива, кг/1000 нм ³
10	280	553	19
70	320	754	26
180	420	880	30

Величина энергии давления, получаемой здесь одним килограммом веса дутья:

$$e_{\text{пр}} = p \cdot v, \quad (1.12)$$

или всем потоком дутья весом G :

$$E_{\text{пр}} = p \cdot V, \quad (1.13)$$

передается по пути потока от частиц движущихся сзади частицам, движущимся впереди.

Полученная энергия частично расходуется на преодоление сопротивлений при перемещении дутья до доменной печи, образовании зон горения у фурм и

движении газа в слое материалов в доменной печи, а также при движении газа в системе газоочистки до дроссельной группы и после нее. Это необходимые и поэтому полезные затраты энергии давления. Значительная часть данной энергии обычно бесполезно теряется при дросселировании газа [2, 11].

Такие потери для современных печей ориентировочно составляют до 40 % мощности, израсходованной на компримирование доменного дутья, и возрастают при повышении давления колошникового газа. Потери могут быть утилизированы путем установки на участке газоочистки газовых утилизационных бескомпрессорных турбин и выработки на них электрической энергии.

Важным путем повышения эффективности использования энергии давления является увеличение ее коэффициента полезного действия в самой доменной печи. К.п.д. энергии проталкивания может быть представлен традиционно, как отношение энергии использованной полезно ко всей затраченной (выработанной):

$$\eta_{\text{пр}} = (P_{\text{д}} - P_{\text{к}}) / P_{\text{д}} = \Delta P_{\Sigma} / P_{\text{д}}, \quad (1.14)$$

где: $P_{\text{д}}$ и $P_{\text{к}}$ – давления дутья и колошникового газа, кПа; ΔP_{Σ} – общий перепад статического давления газа в доменной печи, кПа.

Приведенное соотношение иллюстрирует весьма существенный момент доменной плавки, который зачастую упускается, либо недооценивается, либо вообще понимается превратно.

Здесь общий перепад статического давления газа представляет полезно израсходованную часть энергии проталкивания, а давление на колошнике – это бросовая часть энергии, сообщенной потоку дутья, которая лишь иногда (редко) утилизируется с помощью обозначенных турбодетандеров. В обыденной же терминологии, а часто и в сознании, например, увеличение перепада статического давления газа обозначается как рост “потерь” давления, а увеличение давления на колошнике – как “повышение” форсировки плавки [2].

Уместно отметить, что форсированием доменной плавки является увеличение расхода дутья или, точнее, расхода кислорода через воздушные фурмы. Повышение давления газа в печи это всего лишь один из методов увеличения расхода дутья, который на практике в направлении такого увеличения реализуется далеко не всегда. Нередко давление на колошнике повышают без одновременно увеличения нагрузки воздуходувной машины по пару и числа оборотов компрессора. При этом расход дутья сокращается [12] и к.п.д. энергии проталкивания (давления) снижается.

Исходя из изложенного, для повышения к.п.д. энергии давления сжатого газа при увеличении давления на колошнике одновременно необходимо обязательно увеличивать расход дутья и повышать до максимально возможного уровня перепад статического давления газа, а затем поддерживать его на этом уровне. Понятно, что его величина, при этом, должна обеспечивать положительное значение активного веса шихты и ровный ход доменной печи.

В таблице 4 дан пример форсирования хода плавки на печах металлургического комбината “Криворожсталь”, которое было осуществлено при повышении к.п.д. энергии проталкивания [13]. Как видно, на всех печах повышение эффективности применения повышенного давления и к.п.д. энергии в механи-

ческих процессах сопровождалось более экономным расходом тепловой и восстановительной энергий, о чем свидетельствует сокращение расхода кокса.

Таблица 4. Показатели работы доменных печей

Показатели	Доменные печи, объем, год					
	№1 (1719 м ³)		№5 (2000 м ³)		№8 (2700 м ³)	
	1996	1997	1996	1997	1996	1997
Продолжительность периода, сут.	365	120	365	90	366	60
Производительность, т/сут.	1551	2233	1941	2530	2468	3328
Расход кокса, кг/т чугу.	613	537	599	571	647	629
Интенсивность горения кокса, кг/(м ³ ·сут.)	554	698	584	722	590	776
Параметры дутья:						
расход, м ³ /мин	2041	2512	2341	3006	3283	4014
давление, кПа	221	196	212	192	204	202
температура, °С	852	905	900	898	843	863
Давление колошникового газа, кПа	123	79	113	73	111	76
Перепад статического давления газа, кПа	98	117	99	119	93	126
$\eta_{пр}$	0,443	0,597	0,467	0,620	0,456	0,624

Здесь существенно подчеркнуть, что на всех печах на протяжении длительного периода времени интенсификация плавки по дутью и сожженному коксу получена при сокращении использования “интенсификатора” – повышенного давления газа в рабочем пространстве печи (детальнее этот вопрос будет рассмотрен далее).

Достигнутый результат объясняется повышением действительных скоростей газа на фурмах, ростом по этой причине размеров зон горения и лучшим использованием газа.

Аналогичные данные по печам металлургического комбината “Криворож-сталь” были получены в работе [14].

На рис. 3 приведены построенные с использованием приемов математической статистики, зависимости степени использования оксида углерода от коэффициента использования повышенного давления по доменным печам различных заводов, который определяли как отношение интенсивности плавки по дутью (J_d) к давлению колошникового газа (P_k):

$$К.п.д. = J_d / P_k.$$

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ.....	7
1.1. Физическая сущность плавки.....	7
1.2. Топливо доменной плавки и его роль.....	10
1.3. Энергетические затраты при выплавке чугуна.....	12
1.4. К.п.д. углерода (кокса) в процессах нагрева.....	13
1.5. К.п.д. углерода кокса в процессах восстановления.....	16
1.6. К.п.д. энергии проталкивания.....	19
2. ОСНОВЫ ГАЗО- И ГИДРОДИНАМИКИ – БАЗА ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ.....	24
2.1. Основные параметры жидкости и законы ее движения в технической гидромеханике.....	24
2.2. Законы движения жидкости в разделе физики “Механика жидкостей и газов”.....	33
2.3. Основы молекулярно-кинетической теории газов.....	34
3. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА У ФУРМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ.....	38
3.1. Значение, механизм и реакции горения.....	38
3.2. Развитие представлений о процессах горения топлива.....	46
3.3. Циркуляционный режим горения.....	46
3.4. Другие физические модели зон горения.....	48
3.5. Влияние различных факторов на размеры зон горения.....	51
3.6. Элементы теории процесса горения у фурм.....	53
3.7. Полная энергия потока воздушного дутья.....	56
3.8. Полная энергия потока комбинированного дутья.....	59
3.9. Полная энергия потока горнового газа.....	
3.10. Управление размерами зон горения и глубиной проникнове- ния газов к центру горна.....	70
3.11. Контроль радиальной и окружной неравномерности процес- сов в горне доменной печи перед каждой фурмой.....	75
3.12. Методика расчета полной энергии горнового газа при вдувании пылеугольного топлива.....	83
3.13. Примеры работы доменных печей на неоптимальных полных энергиях потоков комбинированного дутья и горнового газа... 3.14. Исследование влияния энергетических параметров потока дутья на размеры зоны циркуляции на лабораторной модели.....	89 104
3.15. Исследование влияния кинетической энергии на длину зоны циркуляции на лабораторной модели.....	112
4. ОПЫТ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ ДИАМЕТРОМ И КОЛИЧЕСТВОМ ВОЗДУШНЫХ ФУРМ.....	116
4.1. Доменная плавка на фурмах разного диаметра.....	116
4.2. Доменная плавка на фурмах разного диаметра при загрузке в печь высококачественного агломерата.....	126

4.3. Работа доменных печей при чередовании фурм различного диаметра.....	138
4.4. Работа доменных печей при циклическом изменении диаметра воздушных фурм.....	145
4.5. Определение оптимального количества работающих фурм на основе полной энергии потока горнового газа.....	151
5. ГАЗОДИНАМИКА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ.....	157
5.1. Метод Лагранжа.....	157
5.2. Метод Эйлера.....	158
5.3. Методика определения траектории потока дутья вытекающего из фурмы доменной печи.....	159
5.4. Перепад давления при движении газа в доменной печи.....	170
5.5. Анализ факторов, определяющих перепад давления газа.....	171
5.6. Динамические характеристики потока дутья-газа на участке от воздуходувной машины до дроссельной группы.....	175
5.7. Энергетический путь исследования газового потока в доменной печи.....	182
5.8. Диссипация энергии проталкивания газового потока в доменной печи.....	184
5.9. Уточнение влияния параметров термодинамики на давление газа в доменной печи.....	187
5.10. Работа доменных печей с разным общим перепадом давления газа.....	195
5.11. Давление в рабочем объеме доменной печи.....	200
5.12. Расход дутья и значение повышенного давления на современных доменных печах.....	211
6. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПЛАВКИ И РАБОТА ГОРНА В ПЕРСПЕКТИВНЫХ УСЛОВИЯХ.....	224
6.1. Неоднородность процессов и выбор режимов плавки.....	224
6.1.1. Аналитические исследования неоднородности процессов плавки.....	224
6.1.2. Промышленные исследования неоднородности процессов плавки.....	228
6.2. Организация работы горна и фурменных очагов в перспективных условиях доменной плавки.....	236
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	256
СОДЕРЖАНИЕ.....	277

Научное издание

ЛЯЛЮК Виталий Павлович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА
И ГАЗОДИНАМИКИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

Монография

ISBN 978-5-9729-0349-8



Подписано в печать 26.02.2019
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».

Издательство «Инфра-Инженерия»
160011, г. Вологда, ул. Козленская, д. 63
Тел.: 8 (800) 250-66-01
E-mail: booking@infra-e.ru
<https://infra-e.ru>

Издательство приглашает
к сотрудничеству авторов
научно-технической литературы