

## О ПОПЫТКАХ РЕВИЗИИ НЕКОТОРЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

*Санкт–Петербургский Государственный Политехнический Университет*

*«Чугун — это дитя, родившееся в борьбе за несостоящуюся свободу» [1]*

Представлены материалы по обсуждению фундаментальных положений теории доменной плавки. Показано, что критика постулатов классической теории требует подтверждения контрольным тестированием доменной плавки.

Данный доклад подготовлен в связи с публикацией доклада Г.В.Коршикова и Е.Г.Коршиковой «Доменная печь как объект термодинамического анализа» [2], а также в связи с их публикациями в [1,5,8,11].

Авторы [2], полагая, что «наиболее достоверно термодинамическая сущность доменного процесса описывается моделью тепловой машины, важнейшей характеристикой которой является величина мощности», подтверждают свой «постулат» статистической зависимостью удельной производительности печей ( $P$ , т/м<sup>3</sup> в сутки) от их удельной энергетической мощности ( $(N_r)_0$ , кВт/м<sup>3</sup> объема печи) [2, (6)]:

$$P = 0,0161(N_r)_0 + 0,9436 \quad (1)$$

Функциональные зависимости, связывающие удельную производительность и расход тепла с теплотехническими характеристиками печей, основанные на балансовом методе и использующие комплексные теплотехнические параметры, имеющие четкий физический смысл, известны давно, например [3]:

$$P_1 = \frac{M_{\text{общ}} \cdot \eta - Q_{\text{ПРП}}}{\Delta J} \quad (2)$$

$$K = \frac{\Delta J}{\eta} - \frac{Q_{\text{ПРП}}}{\eta \cdot P_1} \quad (3)$$

где  $P_1$  – часовая производительность, т;  $K$  – удельный расход тепла, МДж/т чугуна;  $M_{\text{общ}}$  – общая тепловая мощность печи, МВт;  $\eta$  – коэффициент использования топлива;  $Q_{\text{ПРП}}$  – тепловые потери рабочего пространства печи, МВт;  $\Delta J$  – тепловой дефицит единицы продукции (тепловая работа на 1 т чугуна), МДж/т чугуна.

Именно статистическая зависимость (1) фигурирует в первом пункте выводов доклада [2], как важное положение, подтверждающее новую концепцию его авторов в описании доменного процесса, опрокидывающую нагроможденные предыдущими поколениями теоретиков догмы.

Легко убедиться, что безликая линеаризованная статистическая зави-

симось производительности печи от ее удельной энергетической мощности, предлагаемая авторами [2] как новое слово в переосмыслении устаревших канонов теории доменного процесса, по своей информативности уступает зависимости производительности печи ( $P$ ) и удельного расхода кокса ( $K$ ) от интенсивности плавки по сожженному коксу ( $J_V$ , т кокса/( $\text{м}^3 \cdot \text{сутки}$ )) – аналог энергетической мощности печи  $N_T$ ), найденной доменщиками еще до использования технологии плавки на комбинированном дутье (рис.1 и 2).

График на рис.2 предостерегает доменщиков от безудержного увлечения интенсивностью плавки (или энергетической мощностью), так как при  $J_V > J_{V_{кр}}$  производительность печи не возрастает, а понижается, и печь начинает работать в режиме газогенератора. Представленная же на рис.1 зависимость разве что напоминает студентам [5] иллюзорную идею создания еще одного perpetuum mobile (при  $N_T \rightarrow 0 \quad P \rightarrow 1 \text{ т}/(\text{м}^3 \text{ сутки})$ ).

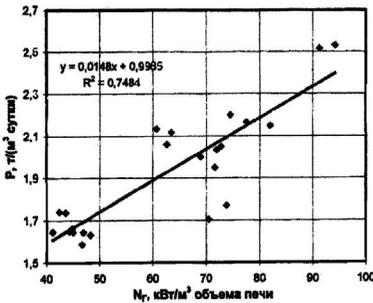


Рис.1. Зависимость удельной производительности доменной печи от удельной тепловой мощности горна [2]

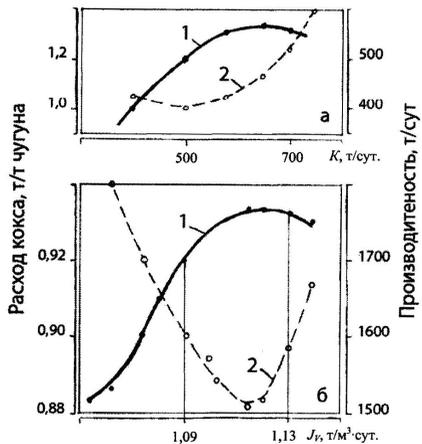


Рис.2. Влияние интенсивности плавки ( $J_V$ ) или суточного расхода кокса ( $K$ ) на производительность (1) и относительный расход кокса (2) [4]: а – по данным ФРГ (1952)% б – доменная печь № 5 завода «Запорожсталь» (1955)

Но вернемся к рассуждениям авторов [2]. Отдавая должное вкладу отечественных и зарубежных ученых в развитии теории доменной плавки, авторы отмечают: «Некоторые положения (теории) превратились в своего рода догмы, не вызывающие сомнений, и вошли в учебники по доменному производству. Особенно это касается оценки роли обогащения дутья кислородом, температуры дутья и дополнительного топлива, вдуваемого в горн доменной печи. Приведем некоторые из этих утверждений...» [2, с.223].

Для дискуссии полезно повторить приводимые в [2] цитаты из источника [6], изменив его нумерацию в соответствии с библиографией на-

стоящей статьи: «Известно, что обогащение дутья кислородом повышает теоретическую температуру горения любого топлива, так как выделившееся в результате горения тепло распределяется в меньшем объеме газобразных продуктов» [6, страница 77]. И еще: «... природный газ, сгорая в горне печи, не только не приносит в печь тепло, то есть не только не греет горн, а неизбежно охлаждает его» [6, страница 78]. И далее: «Считать метан топливом для доменной плавки просто смешно» [6, страница 51].

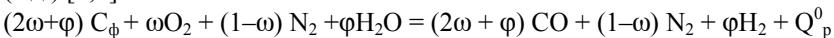
Далее идут комментарии авторов [2]: «Выполненные нами исследования дали основание пересмотреть эти положения. Для раскрытия сущности и характера теплообменных процессов в доменной печи был применен *принципиально новый метод анализа*, а именно – *за координату отсчета* параметров состояния дутья и горнового газа *была принята единица вдуваемого дутья*: содержание кислорода в дутье и количество образующихся горновых газов оцениваются в относительных единицах –  $m^3/m^3$  дутья. По отношению к единице дутья оценивается нами и расход основного ( $C_K$ ) и дополнительного топлив» [2, страницы 223–224].

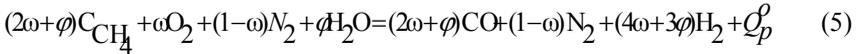
В источниках [4, страницы 36, 41–42, 91, 93, 108] и [5, страницы 77, 81], на которые ссылаются авторы [2], все реакции горения углерода основного ( $C_\Phi$ ) и дополнительного ( $C_{CH_4}$ ) топлив записаны с участием единицы вдуваемого в печь дутья (одного моля сухого дутья с.д.), а содержание кислорода, влаги дутья и добавок к дутью взяты, естественно, в относительных единицах – моль/моль с.д. или, что одно и то же,  $m^3/m^3$  с.д. Это, по-видимому, и подвигло авторов [2] на «принципиально новый метод анализа», так как они считают, что дело здесь не в форме записей реакций горения, а в толковании результатов расчета.

Чтобы читателю была понятна позиция авторов [2], продолжим их комментарии к приведенной выше цитате из нашей работы [6, страница 77].

«В теории и практике доменного производства утвердился способ расчета тепловых и материальных балансов по отношению к 1 кг углерода кокса, сгоревшего в фурменной зоне горна. При этом содержание кислорода в дутье оценивается  $m^3/m^3$  дутья, а количество горнового газа соотносят с 1 кг  $C_\Phi$  или с 1 кг чугуна. В принципе расчет можно вести по отношению к любому параметру доменного процесса (например, по отношению к единице чугуна, единице дутья и др.). Однако правила математического моделирования требуют неукоснительного соблюдения размерностей основного фактора на «входе» и «выходе» из системы. Когда это условие не соблюдается, рождаются выводы и заключения, которые далеко не адекватны сущности реального процесса» [2, с.225].

Запишем реакции горения  $C_\Phi$  и  $C_{CH_4}$  в расчете на 1 моль сухого дутья (с.д.) [6,7]:





(где  $\omega$  и  $\varphi$  – содержания кислорода в дутье и влажность дутья, моль/моль с.д. Кроме теплового эффекта реакций, в зону горения привносятся тепло нагретого дутья ( $J_d$ , Дж/моль с.д.), тепло влаги дутья ( $\varphi J_{H_2O}$ , Дж/моль с. д.) и тепло топлива [( $2\omega + \varphi$ ) $J_c$ , Дж/моль с.д.] или [( $2\omega + \varphi$ ) $J_{CH_4}$ , Дж/моль с. д.]. Из баланса тепла зоны горения как адиабатической системы находим теплосодержание фурменных газов, приняв для упрощения выражения  $t_d = 0$  и  $\varphi = 0$ :

$$J_{\phi(4)} = \frac{2\omega(117500 + J_c)}{1 + \omega} = \frac{117500 + J_c}{(1 + \omega)/2\omega} = \frac{const}{v'_\Gamma}; \quad (6)$$

$$J_{\phi(5)} = \frac{2\omega(35600 + J_{CH_4})}{1 + 5\omega} = \frac{117500 + J_{CH_4}}{(1 + 5\omega)/2\omega} = \frac{const}{v_\Gamma} \quad (7)$$

где  $v'_\Gamma$  и  $v_\Gamma$  – выход фурменных газов по реакциям (4) и (5), моль/моль  $C_\phi$  и моль/моль  $CH_4$ .

Отношения (6) и (7) представляют собой математическую форму цитаты из [6, с.77]. Неужели можно серьезно утверждать, что, деля числители и знаменатели дробей (6) и (7) на  $2\omega$ , мы попираем правила математического моделирования?!

Если, встав на позиции авторов [2], рассматривать очаг горения  $C_\phi$  в кислороде дутья, т.е. фурменную зону как самостоятельную термодинамическую систему, входными «компонентами» которой являются дутье и  $C_\phi^K$ , а выходным – фурменный газ, то, не нарушая правил математического моделирования, в качестве координаты, т.е. базы для расчета результатов их взаимодействия с учетом стехиометрических коэффициентов реакции газификации  $C_\phi$  в кислороде дутья и влаги можно выбрать любой из трех названных потоков (табл. 1), либо даже любой из компонентов дутья ( $O_2, N_2, \omega$ ).

Выбор координаты (базы) расчета – дело вкуса каждого, а вовсе не повод для беспочвенных ревизий положений теории.

Авторы [2] против координаты (базы) 1 моль  $C_\phi$ , при которой выход фурменных газов при повышении  $\omega$  сокращается. Тогда они должны быть против расчетов, базой которых выбран 1 моль кислорода дутья и по тем же причинам: при расчете выхода фурменных газов на 1 моль  $C_\phi$  или 1 моль  $O_2$  дутья выход фурменных газов с ростом  $\omega$  уменьшается в связи с фиксированным значением  $M_{C_\phi}$  (см. табл. 1).

Таблица 1. Балансовые соотношения взаимодействующих потоков реакции (4)

| База (координата) | Расход дутья, моль/моль дутья базы ( $V_d$ ) | Выход фурменного газа, моль/моль базы ( $V_{FG}$ ) | Расход углерода кокса, моль/моль базы ( $M_{C_\phi}$ ) |
|-------------------|--|--|--|
| 1 моль $C_\phi$   | $1/(2\omega + \phi)$                         | $(1 + \omega + 2\phi) / (2\omega + \phi)$          | 1  |
| 1 моль сух.       | 1  | $(1 + \omega + 2\phi)$                             | $(2\omega + \phi)$                                     |
| 1 моль фурм.      | $1/(1 + \omega + 2\phi)$                     | 1  | $(2\omega + \phi) / (1 + \omega + 2\phi)$              |
| 1 моль $O_2$      | $1/\omega$                                   | $(1 + \omega + 2\phi) / \omega$                    | 2  |
| 1 моль $N_2$      | $1/(1-\omega)$                               | $(1 + \omega + 2\phi) / (1-\omega)$                | $(2\omega + \phi) / (1-\omega)$                        |
| 1 моль $H_2O$     | $1/\phi$                                     | $(1 + \omega + 2\phi) / \phi$                      | $(2\omega + \phi) / \phi$                              |

При выборе же в качестве базы для расчета входящих для определения  $t_T$  величин 1 моль дутья, 1 моль  $N_2$  дутья или 1 моль  $H_2O$  выход фурменных газов ( $V_{FG}$ ) с повышением  $\omega$  будет возрастать в связи с одновременным увеличением участвующей в образовании  $V_{FG}$  массы  $C_\phi - M_{C_\phi}$  (см. табл. 1).

Нарушает ли выбор той или иной координаты при расчете зависимости  $t_T$  от  $\omega$  правила математического моделирования, сохраняя безупречную строгость самой зависимости? Разумеется, нет!

Чтобы подтвердить это, встанем на позиции авторов [1,2] и будем вести все расчеты на 1 моль с. д. (или на  $1 \text{ м}^3$  с. д.) для варианта совместного сжигания  $C_\phi$  и  $CH_4$ .

Авторы [1,2] для своих расчетов ввели, и весьма удачно, коэффициент  $\psi$ , отражающий долю  $C_\phi$  в сумме  $C_\phi + C_{CH_4}$  при работе печи на комбинированном дутье. Поэтому нашу запись совместной газификации углерода кокса ( $C_\phi$ ) и углерода ПГ (у нас ПГ – 100 %  $CH_4$ ) в одном моле сухого дутья [6,7]:



где  $D$  – расход ПГ, моль/моль с. д., изменим, приспособив ее к использованию коэффициента  $\psi$ :

$$(2\omega + \phi)\psi C_\phi + \omega O_2 + (1 - \omega)N_2 + \phi H_2O + [(2\omega + \phi)(1 - \psi)]C_{CH_4} = (2\omega + \phi)CO + (1 - \omega)N_2 + [2(2\omega + \phi)(1 - \phi) + \phi]H_2 + Q_p^\circ, \quad (9)$$

где  $Q_p^\circ = 235000\omega - 124300\phi - 81900(2\omega + \phi)(1 - \psi)$ , Дж/моль.

Выход фурменных газов определяем по сумме стехиометрических коэффициентов правой части уравнения (9):

$$V_{\Gamma} = 1 + 5\omega + 4\varphi - 2\psi(2\omega + \varphi), \text{ моль/моль с.д. (м}^3/\text{м}^3 \text{ с.д.)} \quad (10)$$

или при  $\varphi = 0$ .

$$V_{\Gamma} = \omega(5 - 4\psi) + 1, \text{ моль/моль с.д. (м}^3/\text{м}^3 \text{ с.д.)} \quad (11)$$

Уравнение (11) является аналогом уравнения (3) в [8]. Авторы [8] избегают написания уравнений реакций газификации как алгоритмов и неоправданно усложняют методики расчета «параметров горения топлива в горне доменной печи» в своих методических указаниях [5].

Из (8) находим:  $M_{C_{\Phi}} = 2\omega\varphi$ , моль/моль с.д.

$$\text{или } M'_{C_{\Phi}} = \frac{12}{22.4} M_{C_{\Phi}} = 1,071\omega\varphi, \text{ кг/м}^3 \text{ с.д.} \quad (12)$$

или количество сгоревшего дополнительного топлива:

$$\xi = 2\omega(1 - \psi), \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ с.д.} \quad (12),$$

которые в [8] обозначены как (6) и (7) соответственно.

«Кислород при взаимодействии с углеродом генерирует новый компонент газовой смеси (CO) в объемном соотношении 1:2. Поэтому при обогащении дутья кислородом количество горнового газа не уменьшается, а наоборот, увеличивается. Аналитически это выражается формулой:

$$V_{\Gamma} = 2(\omega + \varphi) + N_2, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (13)$$

где  $\omega$ ,  $\varphi$  и  $N_2$  – содержания кислорода, влаги и азота в дутье ( $\omega + \varphi + N_2 = 1$ ),  $\text{м}^3/\text{м}^3$  « [8, с.10].

Из (4) непосредственно вытекает, что:

$$V_{\Gamma} = 1 + \omega + 2\varphi, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (14)$$

Формула (14) более четко дает зависимость  $V_{\Gamma} = f(\omega)$ , в то время как в формуле (2) из [8, с.10] и эта зависимость дана в неявной форме (с повышением  $\omega$  содержание  $N_2$  в дутье уменьшается). Но это – к слову.

Из уравнений (12) и (13) следует, что «при вдувании ПГ кислород дутья распределяется на сжигание двух топлив –  $C_{\Phi}$  и  $C_{CH_4}$ . Количество каждого из сгорающих топлив зависит от концентрации кислорода и распределения его между ними. При расчете на 1 кг  $C_{\Phi}$  вдувание дополнительного топлива не влияет на количество сгорающего углерода кокса (его количество остается постоянным – 1 кг)... В такой модели процесса горения количество выделенного топлива определяется как сумма тепла сгорания 1 кг  $C_{\Phi}$  и  $x \text{ м}^3$  вдуваемого природного газа [4, с. 193–194]. В новой модели процесса горения обогащения дутья кислородом играет совершенно другую роль... Анализ данных показывает, что количество тепла, выделяющегося от горения топлива ( $Q_{III}$ ) возрастает с повышением

доли кислорода в дутье при любом соотношении  $C_{\phi}$  и природного газа.

Причиной этого является увеличение количества сжигаемого топлива на единицу дутья. В этом и только в этом заключается причина повышения теоретической температуры горения при увеличении концентрации кислорода в дутье, а не уменьшение количества горновых газов, как это принято объяснять» [8, с.10–11].

Мы привели здесь эту довольно обширную цитату из [8], чтобы читатель смог сам предостеречь и оценить позицию авторов.

Ошибочность такой трактовки причин повышения  $t_T$  при увеличении  $\omega$  очевидна: теоретическая температура горения – это частное от деления прихода тепла в фурменную зону на выход фурменных газов. Судить о величине дроби только по изменению ее числителя недопустимо. Да, действительно, при увеличении  $\omega$  приход тепла (числитель) возрастает, но одновременно возрастает и знаменатель! И если величина дроби при этом возрастает, то это означает, что темп повышения числителя дроби (приход тепла в зону горения) превосходит темп повышения знаменателя дроби (выход фурменных газов), т.е. приход тепла на единицу фурменного газа возрастает и его энтальпия повышается.

Теперь вопрос: всегда ли сохраняется указанное соотношение? Оказывается, далеко не всегда.

И об этом четко сказано в источнике [6, с.77], цитата из которого приведена авторами [1, 2]. Но цитата некорректно оборвана перед словом «однако»! Продолжим цитату, закончив абзац: «... Однако это положение верно лишь при сжигании топлива в холодном дутье. При сжигании топлив в горячем дутье возможно и обратное явление, причем оно тем вероятнее, чем ниже теплота сгорания топлива и выше нагрев дутья» [6, с.77].

Следовательно, наше утверждение о том, что при повышении концентрации кислорода в дутье  $t_T$  повышается из-за сокращения фурменных газов ( $v'$ ,  $m^3/kg C_{\phi}$ ) безоговорочно относится лишь к холодному дутью. Этим, собственно, и отличается позиция автора [6] от позиции других доменщиков, т. к. после слова «однако» речь идет о возможности противоположного изменения  $t_T$ , но уже для случая использования горячего дутья при сжигании низкокалорийных топлив.

Для устранения неопределенности в определении «холодное» и «горячее» дутье, автор [9] ввел понятие критической температуры дутья:

$$t_{\partial_{кр}} = \frac{(w_S + i_S)(0,4 + 0,6\varphi) + 10800\varphi}{C_O + C_{H_2O} \cdot \varphi} \quad (15)$$

где  $w_S$  и  $i_S$  соответственно теплота горения и теплосодержание сжигаемого топлива, при которой  $t_T$  не зависит от  $\omega$ . При  $t_d < t_{\partial_{кр}}$   $t_T$  возрастает с повышением  $\omega$ , а при  $t_d > t_{\partial_{кр}}$ , наоборот, уменьшается.

Примером «нестандартного» влияния со на  $t_T$  служит воздушная конвекция природного газа (ПГ у нас – 100 %  $CH_4$ ) в фурменной зоне домен-

ной печи – см. уравнение (5). Критическое значение температуры дутья для случая сжигания метана в кислороде сухого дутья невелико – всего  $475^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). При  $t_d > t_{d, \text{кр}}$  теоретическая температура горения метана уменьшается с повышением концентрации кислорода в дутье. При этом приход тепла от конверсии метана в кислороде горячего дутья, рассчитанный, как это и требуют авторы [1, 2] не на 1 кг, а на 1 моль ( $\text{м}^3$ ) сухого дутья, по мере повышения  $\omega$  по-прежнему возрастает, и, несмотря на это,  $t_T$  уменьшается (рис. 4).

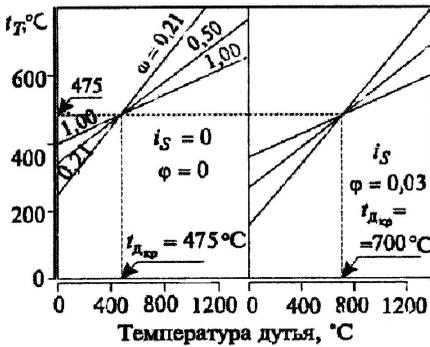
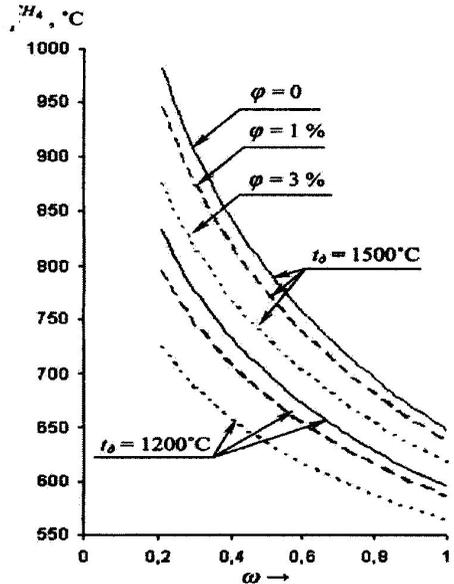


Рис.4. Зависимость теоретической (адиабатической) температуры воздушно-кислородной конверсии метана в горне доменной печи от концентрации кислорода в дутье ( $\omega$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  сух. дутья)

Теперь резонно спросить, какую из этих догм собираются пересмотреть авторы [1,2]? Теоретическая температура горения метана при  $t_d > t_{d, \text{кр}}$  понижается по мере роста  $\omega$  в связи с тем, что темп повышения прихода тепла в числителе дроби ( $\text{кДж}/\text{м}^3$  с.д.) уступает темпу роста выхода фурменного газа ( $\text{м}^3/\text{м}^3$  с.д.):

Рис.3. Зависимость теоретической температуры воздушной конверсии метана ( $t_T$ ) от температуры дутья при различной влажности дутья – сухого и с  $\psi = 0,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$  : цифры на линиях – концентрация кислорода в дутье ( $\omega$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  с. д. [9]



$$J_{\phi} = \frac{\Sigma Q}{V_{\Gamma}}, \quad (16)$$

При совместной газификации  $C_{\phi}$  и  $CH_4$  (см. реакцию 9)  $J_{\phi}$  повышается с ростом  $\omega$  только для случая  $\psi > 0.3$ ; при  $\psi < 0.3$   $J_{\phi}$  понижается (рис. 5). Расчет выполнен для условий, обозначенных на рис. 5–6. Рис. 5 противопоставляется нами рис.1 из [8], который отражает зависимость части прихода тепла ( $Q_{III}$  из  $\Sigma Q$ ) от  $\omega$  и который послужил авторам [8] основанием для ошибочного вывода о причинах повышения  $t_T$  с ростом  $\omega$ . Апломб, с которым сделан этот вывод, лишь усиливает ошибку одностороннего анализа явления, когда о величине дроби  $J_{\phi}$  судят только по изменению ее числителя ( $Q_{III}$ ), пренебрегая динамикой изменения знаменателя ( $V_{\Gamma}$ ). Суть же явления в том, что при  $t_d > t_{d,кп}$  теоретическая температура горения метана ниже  $t_d$  и вывод части азота горячего дутья при повышении со естественно снижает  $t_T$  метана.

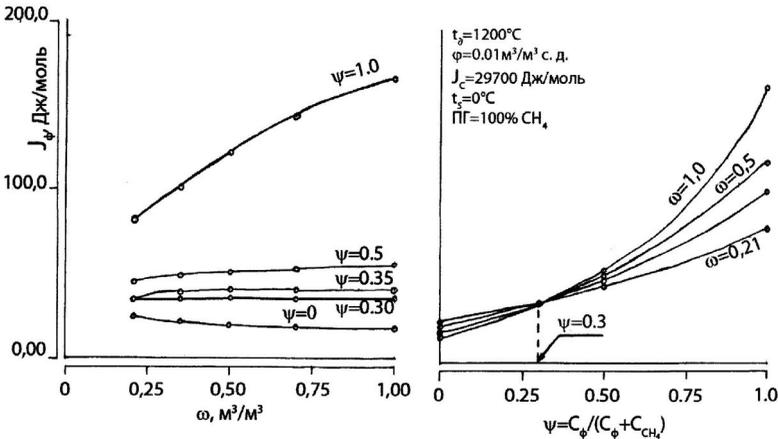


Рис.5. Теплосодержание фурменных газов при совместной газификации  $C_K$  и  $CH_4$  в зависимости от  $\omega$  (5–а) и от (5–б); условия расчета указаны на графике 5–б

В [9] указывается, что для случая горения  $C_K$  в фурменной зоне печи величина  $t_{d,кп}$  достигает нескольких тысяч градусов (нагрев дутья в плазматронах), поэтому обогащение дутья кислородом «всегда» повышает  $t_T$ .

В [1, с.53] прослеживается новая смена координат: «чем выше содержание кислорода в дутье, тем больше газа образуется на 1 м<sup>3</sup> дутья. Всего же горновых газов образуется:

$$V_{\Gamma}^* = V_d \cdot V_{\Gamma}, \text{ м}^3/\text{мин}$$

где  $V_d$  – расход дутья, м<sup>3</sup>/мин.

Следовательно, широко распространенное мнение, что при обогаще-

нии дутья кислородом сокращается выход горновых газов [6, 9–11] нельзя принять за абсолютный постулат».

Здесь речь идет о выходе фурменного газа в единицу времени, и отрицание «широко распространенного мнения» не столь категорично: постулат, но не абсолютный. Тем не менее, во втором выводе доклада [2] четко указано, что в горне печи «в единицу времени ... образуется горновых газов больше, а не меньше, как было принято считать, ... увеличивается и их температура» [2, с.229].

Покажем, что интенсивность плавки по количеству фильтрующихся через столб шихты газов ( $\text{м}^3/\text{м}^3$  объема печи в минуту или  $\text{м}^3/\text{м}^3$  площади горна в час) все же не увеличивается, а уменьшается.

Уравнение Дарси–Вейсбаха применительно к нашей задаче выглядит следующим образом:

$$\Delta P_{\text{кр}} = k' \cdot w^{2-m} \cdot \frac{T}{P}, \quad (17)$$

где  $\Delta P_{\text{кр}}$ , – критические потери напора газа в определяющей (по М.А.Стефановичу) зоне, кПа;  $w$  – приведенная к пустой шахте и к нормальным условиям скорость (расход) газам<sup>3</sup>/мин;  $T$ ,  $P$  – средние значения температуры ( $K$ ) и давления (кПа) газов в определяющей зоне;  $m = 0.2$  (неустойчивый турбулентный режим движения газа);  $k'$  – коэффициент пропорциональности.

Выполним расчет изменения расхода (скорости) газа в печи по условию  $\Delta P_{\text{кр}} = \text{const}$  при изменении концентрации кислорода в сухом ( $\varphi = 0$ ) нагретом до  $1000^\circ\text{C}$  дутье с  $0.21$  до  $0.25 \text{ м}^3/\text{м}^3$ :

$$W_i = w_o \left( \frac{T_o}{T_i} \right)^{\frac{1}{2-m}} = w_o \left( \frac{2543}{2730} \right)^{0,556} = 0,961 w_o \quad (18)$$

Итак, количество газов, фильтрующихся через столб шихты в определяющей интенсивность плавки зоне (низ печи) по условию  $\Delta P_{\text{кр}} = \text{const}$  не возрастает при повышении  $\omega$  с  $0.21$  до  $0.25 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , как полагают авторы [2], а уменьшается примерно на  $1\%/1\% \Delta\omega$ . При этом расход дутья сократится, естественно, в еще большей мере:

$$V_{\partial_i} = 0,961 \frac{V_{\partial_0}}{V_{\partial_i}} = 0,961 \cdot 0,968 \cdot V_{\partial_0} = 0,93 \cdot V_{\partial_0} \quad (19)$$

Интенсивность плавки по коксу  $J_V$  (по количеству сожженного  $C_\phi$ ), несмотря на довольно резкое сокращение расхода дутья ( $1,75\%/1\% \Delta\omega$ ), увеличивается примерно на  $2,7\%/1\% \Delta\omega$  :

$$J_{V_i} = 0,93 \frac{2\omega_i}{2\omega_o} \cdot J_o = 1,107 \cdot J_o \quad (20)$$

Подведенная к «тепловой машине» мощность также повышается:

$$W_i = W_o \cdot \frac{V_{\partial o}}{V_{\partial i}} \cdot \frac{2\omega_i}{2\omega_o} \cdot \frac{(117,5 + J_C)}{(117,5 + J_C) + J_{\partial}} = 1,047 \cdot W_o, \quad (21)$$

но производительность печи возрастет не «прямо пропорционально ее удельной энергетической мощности» [2, с.223], а заметно меньше в связи с неизбежным повышением удельного расхода кокса.

Повышение теоретической температуры горения при увеличении  $\omega$  опасно интенсифицирует процесс возгона шлакообразующих ( $\text{SiO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ), а понижение потерь напора газов в шахте печи (в шахту печи горновые газы поступают при  $t_H \approx 900^\circ\text{C}$ , независимо от  $\omega$  и  $t_T$ ) понижает давление газов в нижней определяющей зоне печи, что, в свою очередь, неизбежно понижает интенсивность плавки по газу (аналогично парадоксальному действию загруженного в печь сортированного по крупности агломерата на интенсивность плавки – см. [6, с.21–22]).

Впрочем, «каждая машина имеет предел скорости, с которой она может превращать энергию» и это «известно хорошему технологу–доменщику» [2, с.218]. Вследствие этого технология доменной плавки на обогащенном кислородом дутье не прижилась (удорожание себестоимости перелыжного чугуна и аварийная обстановка на печи).

В связи с этим третий вывод доклада [2] глубоко ошибочен: приход тепла в шахту (во вторую ступень теплообмена) при увеличении  $\omega$  не увеличивается, а уменьшается (в нашем примере на 1%/1%  $\Delta\omega$ ), шахта не греется, а охлаждается (температура колошника понижается), причем кризис в верхней ступени теплообмена наступает, когда неравенство  $W_r > W_{\text{ш}}$  приближается к равенству  $W_r = W_{\text{ш}}$  при  $\omega = \omega_{\text{кр}}$  (в приведенном в [6, с.76] примере расчета  $\omega_{\text{кр}} = 0.277 \text{ м}^3/\text{м}^2$ ) и, наконец удельный расход кокса не уменьшается, а неизбежно возрастает (уменьшается приход тепла с дутьем), если речь идет о перелыжных чугунах, а не о доменных ферросплавах.

Технологический кислород (кислород обогащения) был востребован как обязательный компонент комбинированного дутья лишь со второй половины XX века. Технологический кислород в составе комбинированного дутья никогда нами не рассматривался как интенсификатор плавки – он был и остается до сих пор средством для повышения расхода заместителя кокса – топливной добавки, а повышение производительности печи в этом случае следует считать несомненно положительным, но сопутствующим фактором. Многократными опытами на промышленных печах доказано, что любое превышение концентрации кислорода в дутье сверх необходимого для повышения топливной добавки (природный газ, мазут

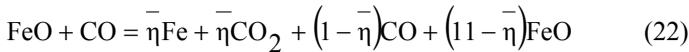
и т.п.) по условию  $t_T = const$  приводит лишь к повышению себестоимости чугуна. Этим отступлением хотелось бы подчеркнуть, что и сегодня кислород обогащения необходим не для повышения мощности «тепловой машины», а для повышения расхода более дешевых и менее дефицитных топливных добавок, позволяющих снизить расход кокса. Эту же роль, и более эффективно, чем технологический кислород, могут сыграть дальнейшее повышение температуры дутья, нагрев природного газа, предварительно пассивированного кислородом, осушение дутья, т.е. все те мероприятия, которые повышают  $t_T$ , не уменьшая, по крайней мере, расход дутья ( $\text{м}^3/\text{м}^3 \text{С}_\Phi$ !) и вносимого им тепла ( $v'_d \cdot i_d$ , кДж/кг Сф!). Только исчерпав все другие резервы, направленные на повышение  $t_T$ , которая тут же «гасится» повышением расхода топливной добавки, следует обращаться к услугам технологического кислорода, который, как будет показано ниже, также способствует повышению расхода топливной добавки, но всегда (!) понижает коэффициент замены ею кокса ( $K_3$ ), в отличие от «заменителей» кислорода обогащения  $\left( t_\partial^\uparrow, t_S^\uparrow \text{ и } \varphi^\downarrow \right)$ , которые, повышают расход добавки не снижая  $K_3$ , да еще и сами экономят кокс!

Но вернемся к обсуждению доклада [2].

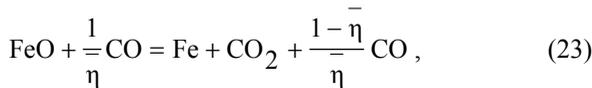
Вдувание в горн печей природного газа обусловлено, как известно [6,7], дефицитом газообразного восстановителя для реализации идеального хода печи по Грюнеру. Дефицит восстановителя вызван низким расходом кокса, обусловленным, в свою очередь высоким нагревом дутья. Частичная подмена функции углерода кокса как источника тепла внешним источником тепла в виде непрерывно повышающегося нагрева дутья рано или поздно и должна была привести к дефициту газообразного восстановителя, поскольку углерод кокса по-прежнему оставался его единственным источником. Внешний источник тепла (нагрев дутья) не мог бы быть реализован, т.е. не мог бы привести к понижению расхода кокса ниже  $K_{нд}$  при  $r_d = 0$  (идеальный ход Грюнера), без задействования более экономичного по расходу восстановителя процесса – процесса прямого восстановления железа. В условиях дефицита газообразного восстановителя, минимальному расходу кокса соответствует минимально возможная (т.е. термодинамически обусловленная по условиям потоколимитируемого режима косвенного восстановления вюстита в шахте, когда эта реакция прекращается «в результате истощения восстановительной способности газа» [10]) степень прямого восстановления железа ( $r_{d_{\min}}$ ). Лимитирующей обший расход кокса функцией стала его функция как источника газообразного восстановителя. Возникло вполне логичное предложение: частично подменить и эту функцию углерода кокса, вдувая в горн печи, например, природный или коксовый газ (важно чтобы сэкономленный при этом кокс «с лихвой» окупал затраты, связанные с вдуванием восстановительных газов).

Судя по литературным сноскам, авторы [1, 2] были знакомы и с этими «постулатами» доменщиков. Тем не менее, и здесь они высказывают свою, безусловно, оригинальную, но глубоко ошибочную концепцию: «При работе доменных печей с расходом кокса менее 500 кг/т чугуна восстановление низших окислов железа в шахте печи лимитируется количеством газообразных восстановителей. Обогащение дутья кислородом снижает степень несоответствия реакций восстановления вюстита равновесному соотношению  $\text{CO} : \text{CO}_2$  за счет увеличения содержания  $\text{CO}$  в газовом потоке. И здесь стоит подчеркнуть, что стехиометрические коэффициенты реакций восстановления  $\text{FeO}$  при равновесном соотношении  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  соответствуют не количеству этих газов, а их концентрации в газовом потоке. По этой причине обогащение дутья кислородом способствует повышению степени косвенного восстановления железа и, как следствие, снижению удельного расхода кокса. Однако степень реализации этой возможности зависит от равномерности распределения газового потока...» [1, с.54].

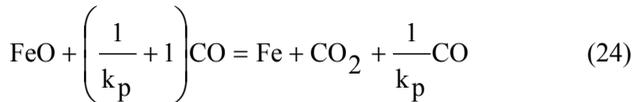
Запишем реакцию косвенного восстановления  $\text{FeO}$  оксидом углерода в условиях равновесия:



или



или

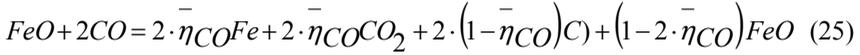
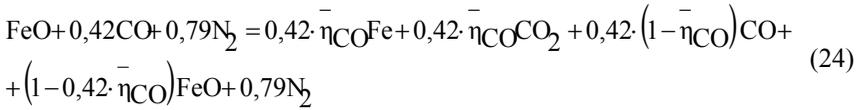


где  $\bar{\eta}$  – равновесная степень использования  $\text{CO}$ :  $\bar{\eta} = \frac{k_p}{k_p + 1}$ ;

$k_p$  – константа равновесия реакции  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$

Из сравнения (22) и (23) видно, что количество восстановленного железа определяется количеством восстановителя ( $\text{CO}$ ), а степень использования восстановителя в условиях равновесного протекания (22), (23) всегда одинакова ( $\bar{\eta} = k_p / (k_p + 1)$ ) и не зависит от количества  $\text{CO}$ .

При сжигании  $\text{C}_\phi$  в воздухе или чистом  $\text{O}_2$  образуются фурменные газы, содержащие 34,7 %  $\text{CO}$  и 100 %  $\text{CO}_2$ , причем количество  $\text{CO}$  в расчете на 1 моль дутья 0,42 моль и 2 моль соответственно, тогда следуя логике авторов [2]:



Откуда при  $\bar{\eta}_{\text{CO}} = \text{const}$  во втором случае восстановится в 4,76 раз больше Fe на единицу (моль, м<sup>3</sup>) дутья! Но ведь в цитируемой фразе речь идет не о мощности и производительности по количеству восстановленного железа, а о степени косвенного восстановления железа! Концентрация CO в фурменных газах (34,7 % CO + 65,3 % N<sub>2</sub> при  $\omega = 0.21$  или 100 % CO при  $\omega = 1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) не влияет на степень использования CO в реакции (22), если речь идет не о кинетике восстановления, а о минимально необходимом по условиям равновесия реакции (22) расходе восстановителя ( $C_{\text{K}}^{\text{B}}$ , моль/моль Fe). Все это – азы химической термодинамики. Убирая из воздуха азот, мы уменьшаем приход тепла с дутьем ( $t_d > t_{d_{\text{кр}}}$ ) и возмещаем его повышением расхода кокса. Повышая расход кокса, мы увеличиваем количество восстановителя (CO) и действительно снижаем степень прямого восстановления железа, т.к. уменьшаем дефицит восстановителя и это, безусловно, смягчает норму вынужденного повышения расхода кокса. Норма ( $\partial K/\partial \omega$ ) была бы выше, если бы не сопутствующее повышение  $r_i$ .

Итак, при повышении  $\omega$  мы ожидаем не понижение  $r_d$  и, как следствие этого, понижение расхода кокса, а действительно имеем повышение расхода кокса и, как следствие этого, некоторое снижение  $r_d$ !

Теперь мы вплотную придвинулись к технологии доменной плавки с вдуванием в горн природного газа, которая также стала предметом обсуждения авторов [2]. Сравнение теплоотдач углерода кокса ( $q'_{\text{C}_\phi}$ ) в нижней ступени теплообмена печи при смене координат (на 1 кг C<sub>φ</sub> и на 1 м<sup>3</sup> с.д.), сделанное авторами [12], только подчеркивает большую информативность первого варианта зависимости  $q'_{\text{C}_\phi}$  (кДж/кгC<sub>φ</sub>) от  $t_d$  при  $\omega = \text{var}$  (рис.6), которая представлена пучком пересекающихся в одной точке ( $t'_{d_{\text{кр}}}$ ) прямых, отличающихся между собой значениями  $\omega$ . Из графика рис.6 видно, что при  $t_d > t_{d_{\text{кр}}}$  теплоотдача углерода кокса повышается с ростом  $\omega$ , при  $t_d > t'_{d_{\text{кр}}}$ , наоборот, уменьшается; при  $t_d > t'_{d_{\text{кр}}}$   $q'_{\text{C}_\phi}$  не зависит от  $\omega$  вообще. Это позволило автору [10] дать четкий ориентир практикам при выборе  $t_T$  в зависимости от используемой  $t_d$ : при низких температурах дутья ( $t_d < t'_{d_{\text{кр}}}$ ) необходимо стремиться к  $t_T^{\text{max}}$ , а при высоких ( $t_d > t_{d_{\text{кр}}}$ ), наоборот, необходимо минимально возможное значение  $t_T$  по условиям нормальной эксплуатации горна. При наблюдавшемся на практике разбросе значений

$t_T$  (от 1750 до 2350<sup>0</sup>С) указанный ориентир имеет принципиальное значение, т. к. способствует минимизации расхода кокса в печи.

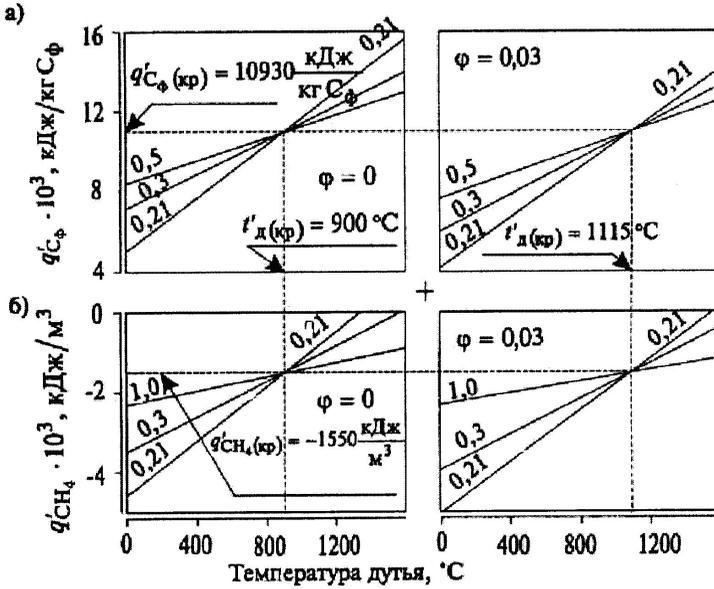


Рис.6. Зависимость теплоотдачи углерода кокса, сгорающего у фурм (а), и метана (б) от температуры дутья в условиях завершеного теплообмена в нижней зоне печи при различных значениях влажности дутья  $\varphi$  (0 и 0,03 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) и содержания в нем кислорода (цифры на линиях) при  $t_H = 900^{\circ}\text{C}$

Монотонная малоинформативная зависимость теплоотдачи, возрастающей по мере обогащения дутья кислородом, массы углерода кокса ( $C_{\phi}$ ), приходящийся на единицу дутья:

$$(H_{\Gamma\Gamma})_2 = c_o \cdot t_H \cdot (1 + \omega + 2\gamma) = 1257,7(1 + \omega + 2\varphi),$$

сподвигла авторов [11] лишь на «очевидной», но сугубо ошибочный вывод о якобы большем поступлении тепла в шахту печи с газами нижней зоны по мере роста в дутье концентрации кислорода.

Теплообмен в шахте печи контролируется взаимодействием двух потоков (газа и шихты) и определяется отношением их водяных эквивалентов. Делать заключение о теплообмене в шахте только по изменению одного потока газов – такая же ошибка, как и суждение авторов о дроби  $J_{\phi} = \Sigma Q / V_{\Gamma}$  только по изменению ее числителя. При обогащении дутья кислородом отношение  $W_r / W_{ш}$  уменьшается (а не увеличивается, как считают авторы [11]), что сказывается на понижении температуры колошниковых газов ( $t_K$ ) при  $\omega \rightarrow \omega_{кр}$   $W_{ш} / W_r \rightarrow 1,0$ , что и ставит естественный

предел повышения  $\omega$ . Это азы технологии плавки при повышенных концентрациях кислорода: понижение прихода тепла с горячим дутьем и опасная интенсификация процессов возгона шлакообразующих при повышении  $t_T$  сопровождались повышением удельного расхода кокса и неровным ходом печи. Вот почему технология работы печей на обогащенном кислородом дутье при выплавке передельных чугунов оказалась неприемлемой (увеличение себестоимости передельных чугунов и аварийная ситуация на печи из-за участвовавших осадок шихты и неровного хода процесса).

Кислород как высокоэффективный компонент дутья был востребован только при освоении технологии плавки на комбинированном дутье.

Авторы [5, 11] грубо ошибаются, считая повышение концентрации в газах CO при обогащении дутья кислородом причиной экономии кокса (понижение  $r_d$ ). В условиях дефицита газообразных восстановителей для реализации идеального хода печи ( $r_d = 0$ ) газ в шахте печи на стадии восстановления вюстит-железо использует полностью свою восстановительную способность ( $\bar{\eta}_{CO} \rightarrow \bar{\eta}_{CO}$  и  $CO_2/CC \rightarrow k_p$ ) и величина  $r_{d_{min}}$  контролируется потоколимитируемым режимом восстановления вюстита. При этом имеет значение не концентрация CO в печных газах, а количество CO, необходимое для восстановления вюстита.

Нам предстоит ответить на вопрос: является ли природный газ топливом, т.е. источником тепла, для доменной печи? И стоит ли серьезно об этом говорить?

Обращают на себя внимание низкие теоретические температуры горения метана в горячем дутье, которые к тому же резко снижаются по мере обогащения дутья кислородом (рис.4). Очевидно, что если газы покидают нижнюю ступень теплообмена печи при температуре  $t_H$  (у нас  $t_H = 900$  °C), а метан, конвертируясь в кислороде дутья, генерирует газы с  $t_T < t_H$ , то эти газы даже при самом смелом воображении «не только не привносят в горн тепло, но неизбежно охлаждают его» [6]. Другими словами, теплоотдача  $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$  в горне печи  $t_d < 1400$  °C и  $\varphi \geq 0.01 \text{ м}^3/\text{м}^3$  всегда отрицательна (кДж/м<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>):

$$q_{CH_4} = (w_S + \bar{v} \bar{d} i_{\bar{d}} + i_S t_S) - \bar{v} z i_H < 0 \quad (26)$$

Естественно, что теплоотдача метана не изменит знака и при расчете ее не на  $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$ , а на  $1 \text{ м}^3$  дутья (кДж/м<sup>3</sup> дутья):

$$Q_{CH_4} = (2\omega + \varphi) \cdot q_{CH_4} < 0, \text{ т.к. } (2\omega + \varphi) > 0 \quad (27)$$

Неравенства (26) и (27) – математическое обоснование второй и третьей цитаты из [6, с. 51 и 78].

Технология плавки с вдуванием природного газа (ПГ) перечеркнула любые попытки «наиболее достоверно описывать термодинамическую

сущность доменного процесса моделью тепловой машины» [2]. С позиций этой модели вдувание ПГ – чистейший абсурд, т.к. второй закон термодинамики еще никто не опроверг. Охлаждая горн, мы его греем! Парадокс? С позиций модели машины – безусловно! С позиций теории доменной плавки как химико–технологического процесса здесь нет никакого противоречия: да, мы охлаждаем горн, вдувая ПГ, но... в несравненно большей мере мы понижаем на него тепловую нагрузку, сокращая или прекращая полностью приток в нижнюю ступень теплообмена недовосстановленного в шахте (из–за существовавшего до вдувания ПГ там дефицита газообразного восстановителя) вюстита (у нас – FeO), прямое восстановление которого внизу печи резко эндотермично:



Поэтому при вдувании в горн печи ПГ печь греется, и мы можем смело снижать удельный расход кокса. Печь греется..., но не сразу: вначале она действительно охлаждается и, только спустя некоторое время, начинает разогреваться, достигая, а затем и превышая планку нормального уровня нагрева, контролируемого концентрацией кремния в чугуне. И это хорошо известно каждому, кто снимал на печи динамические характеристики ее нагрева по каналу ПГ – [Si] (рис. 7).

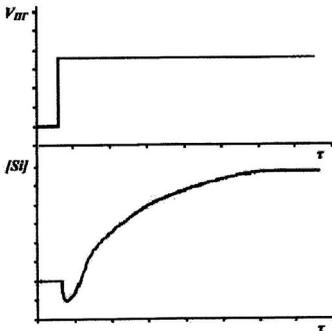


Рис.7. Динамическая характеристика доменной печи по каналу расход природного газа – содержание кремния в чугуне (схема)

В связи со сказанным выше, пятый пункт выводов в докладе [2] сделан с нарушением второго закона термодинамики: повышение  $\omega$  «при любой концентрации  $\text{C}_\Phi$  и ПГ» [2, с. 227–228]

при отрицательной теплотдаче метана в нижней ступени теплообмена печи не может сопровождаться повышением прихода тепла, которым мы располагаем (available heat, по выражению Дж. Джонсона), т. е. которое мы можем превратить в полезную для нас работу.

Буквально два слова о четвертом выводе доклада. Нагрев дутья, т. е. дальнейшее повышение температуры дутья (хотя бы до рекордов, достигнутых по этому показателю еще до распада СССР [12]), на наш взгляд, остается по–прежнему самым выгодным каналом для инвестиций в доменное производство с минимальным, по сравнению с другими каналами, сроком окупаемости капиталовложений. Относить дальнейший нагрев дутья к мероприятиям, не оказывающим «интенсифицирующего влияния на ход доменной печи» [2] прошу прощения за повтор, просто смешно.

### Заключение

Энергетическая теория печей сыграла выдающуюся роль в развитии печной теплотехники. Поскольку доменная печь является не только химико–технологическим, но и крупнейшим в отрасли теплотехническим агрегатом, было вполне естественным попытаться проанализировать ее работу с позиций ведущей роли в ней теплотехнических процессов. Одна из первых таких попыток была сделана более 60 лет назад Г.И.Деминым.

Более поздние последователи теплотехнических моделей исходили уже из зональных тепловых балансов доменной плавки, пытаясь увязать их с теплообменными процессами, используя температурно–тепловые диаграммы. Главным аргументом в пользу обозначенного подхода к описанию процессов в печи и работоспособности созданной ими математической модели процесса авторы [13] считали ее непротиворечивость известным зависимостям и постулатам классического описания доменной печи как химико–технологического агрегата, и, естественно, возможность использования этой модели для повышения качества контроля теплового состояния печи.

В 40–е годы прошлого столетия проф. Б.И.Китаевым была разработана теория теплообмена в доменной печи, учитывающая специфику доменного процесса, в частности, в показателях химической (кажущейся) теплоемкости шихты. Именно учет специфики доменного процесса, наряду с использованием строгого математического аппарата теплообмена в противотоке, сделал теорию Б.И.Китаева выдающимся достижением в развитии теории доменной плавки.

Несколько иной и неожиданный подход к описанию доменного процесса продемонстрировали авторы [2], используя модель тепловой машины с ее главной характеристикой – мощностью и главной координатой – временем. Эта модель не только не позволяет «пересмотреть» постулаты теории доменной плавки на комбинированном дутье, но она абсолютно неприемлема именно для случая вдувания в горн природного газа... С позиций этой «теории» нельзя объяснить, например, и парадокс Дж. Нейльсона [7], когда при нагреве дутья до 150<sup>0</sup>С расход каменного угля снизился с 8,06 до 5,16 кг/кг чугуна при затратах угля на нагрев дутья всего 0.4 кг/кг чугуна.

В связи с многочисленными ошибочными заключениями авторов [1] о влиянии обогащения кислородом дутья на доменный процесс, которые никоим образом не опровергают ни существующие взгляды, ни разработанные методы расчета плавки [6, 7], их «грозное предупреждение» о том, что вопрос «как рассчитывать?» или «что принять за точку отсчета?» выходит за рамки риторики и имеет принципиальное значение [12, с. 9], вызывает лишь недоумение. Авторам [2] следовало бы сначала подтвердить в качестве контрольного тестирования хотя бы некоторые постулаты классической теории, а потом уже свою теорию, как сказал поэт: «закрыть, почистить, а затем открыть вторично».

1. *Коришков Г.В., Коришкова Е.Г.* // Сб. научн. тр., посвященный 45-летию ЛГТУ.4.2. – Липецк: ЛГТУ, 2001. – С.51–56.
2. *Коришков Г.В., Коришкова Е.Г.* // Сб. научн. тр. «Нелинейная динамика металлургических процессов и систем» – Липецк: ЛГТУ, 2003.–С. 218–213.
3. *Демин Г.И.* // Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ДМетИ, 1940. – №8. – С 119–121.
4. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс. М.: Металлургия, 1980. – 303 с.
5. *Коришков Г.В., Коришкова Е.Г.* Методика расчета параметров горения топлива в горне доменной печи / Методические указания – Липецк, изд-во ЛГТУ, 2004. – 40 с.
6. *Андронов В.Н.* Современная доменная плавка. Учебное пособие – СПб.: изд-во СПбГТУ, 2001. –100 с.
7. *Андронов В.Н.* Минимально возможный расход кокса. Учебное пособие – СПб.: изд-во СПбГТУ, 2001. – 142 с.
8. *Коришков Г.В., Коришкова Е.Г.* // Сталь. – 2003. – №4. – С.9–13
9. *Андронов В.Н.* //Сталь, 1978. – №7. – С.587–592.
10. *Мишар Ж.* Тепловые балансы и теплообмен в доменной печи. Пер. с франц. – М.: Металлургиздат, 1963. – 151 с.
11. *Коришков Г.В., Коришкова Е.Г.* // Сталь. – 2002. – № 6. – С.7–10.
12. *Шокул А.А., Лазовой В.П., Шаркевич Л.Д.* Работа доменной печи с нагревом дутья до1200... 1380 °С // Сталь. – 1983. –№3. – С.10–13.
13. *Бородулин А.В. и др.* // Межвуз. сб. «Производство чугуна». Свердловск: МГМИ им. Г.М.Носова, 1985. – С.33–40.

*Сведения об авторе:*

**Андронов В.Н.**, *докт.техн.наук, профессор, Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет*