

*Р.А. Казаков<sup>1</sup>, Г.С. Подгородецкий<sup>2</sup>, Ю.С. Юсфин<sup>2</sup>,  
В.П. Зволинский<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> ЗАО «Национальная организация поддержки проектов поглощения углерода»

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МЕТАНА ОТ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ

Многочисленные исследования, выполненные в области экологического мониторинга, позволили сформировать методологические подходы к учету выбросов парниковых газов в атмосферу и определить возможные уровни содержания диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и метана (CH<sub>4</sub>) в них по основным переделам черной металлургии (табл. 1).

В то же время остается недостаточно изученным вопрос о выбросах CH<sub>4</sub> в доменном производстве – крупнейшем источнике парниковых газов в черной металлургии, на долю которого приходится более 60 % количества CO<sub>2</sub> или более 1,5 т CO<sub>2</sub>/т чугуна [1, 2]. Вследствие недостаточности данных по CH<sub>4</sub> при производстве чугуна, эти количества, как правило, не включены в экологическую отчетность предприятий и не оцениваются при составлении Национального

кадастра антропогенных выбросов парниковых газов России [1].

В связи с этим очевидна актуальность представленных в настоящей работе результатов исследования условий образования и поступления CH<sub>4</sub> в атмосферу в результате потерь и при использовании доменного газа.

В общем виде механизмы образования и источники поступления метана при доменном производстве можно представить в виде схемы (рис. 1).

Выбросы CH<sub>4</sub> в доменном производстве могут возникать из следующих источников при наличии CH<sub>4</sub> в доменном газе:

- утечки (потери) доменного газа при загрузке шихты в доменные печи и распределении газа в газовых сетях;
- неполное сгорание доменного газа при использовании в тепло-технических агрегатах и сжигании на свече.

Опубликованные данные по химическому составу доменных газов [5, 6], а также инструментальные замеры свидетельствуют о возможном содержании CH<sub>4</sub> в доменном газе в количестве до 1,4 %.

Следует выделить следующие механизмы поступления метана в доменный газ.

*Поступление CH<sub>4</sub> в колошниковый газ из летучих кокса.* Летучие кокса, содержащие до 20 % CH<sub>4</sub>, выделяются при температуре более 800 °С и поступают в колошниковый газ [5]. При этом содержание CH<sub>4</sub> в колошниковом газе может составить 0,08 – 0,10 % (при расходе кокса 400 – 500 кг/т чугуна, содержании летучих 1,1 %, среднем выходе доменного газа 1500 м<sup>3</sup>/т чугуна).

*Поступление CH<sub>4</sub> в колошниковый газ из топлива, вдвухаемого в горн печи.* Исследование горения топлива в доменной печи [5, 7] указывает на то, что продуктами реакций в фурменной зоне являются только CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>. Тем не менее, не следует исключать возможность попадания CH<sub>4</sub> топлива в колошниковый газ при неравномерном распределении газов по сечению печи и нарушении ровного хода печи.

Т а б л и ц а 1

**Удельные выбросы CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> по основным переделам предприятий черной металлургии [3, 4]**

Производство	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Кокс	175 – 200 кг/т стали	27 г/т стали
Окатыши	15,6 – 31,8 кг/т стали	Нет данных <sup>1</sup>
Агломерат	205 – 240 кг/т стали	70 г/т агломерата
Железо прямого восстановления	589 – 813 кг/т железа прямого восстановления	10,5 – 14,5 г/т железа прямого восстановления
Чугун	280 – 500 кг/т стали <sup>2</sup>	Нет данных
Конвертерная сталь	11,2 – 140 кг/т стали	–

<sup>1</sup> Поступление CH<sub>4</sub> от высокотемпературного обжига окатышей могут быть оценены на основе данных о расходе топлива на обжиг и коэффициентов выбросов CH<sub>4</sub> от сжигания топлива, определенных, например, по данным [3].

<sup>2</sup> Не включает выбросы CO<sub>2</sub> от сжигания доменного газа за пределами доменного производства [4].

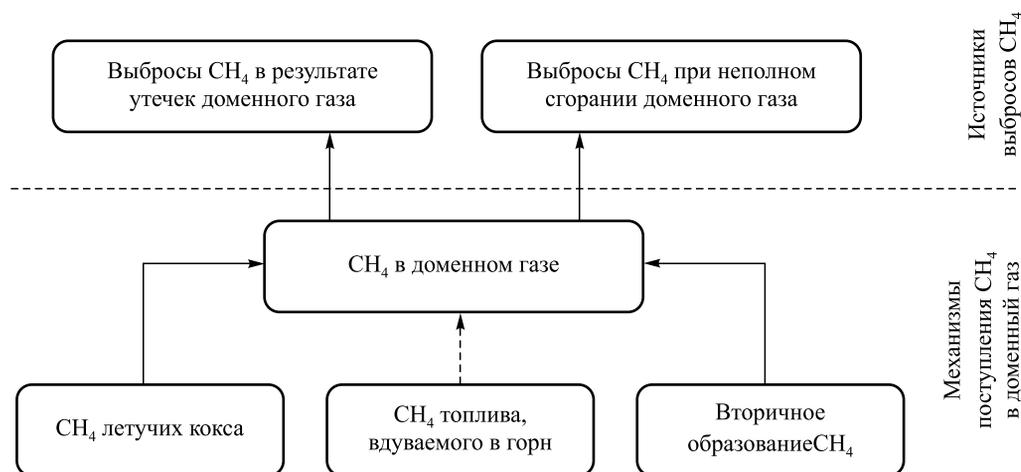


Рис. 1. Возможные механизмы образования и источники выбросов метана в доменном производстве

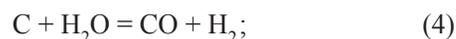
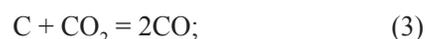
*Вторичное образование CH<sub>4</sub> в доменной печи.* Вторичное образование CH<sub>4</sub> в результате взаимодействия компонентов газовой фазы печи и шихты не было ранее исследовано и предложено авторами для уточнения данных о возможных выбросах парниковых газов в черной металлургии.

С целью определения возможности вторичного образования CH<sub>4</sub> в доменном газе выполнены расчеты равновесных концентраций веществ в доменной печи в диапазоне температур от 100 до 1500 °С, характеризующем температурные условия в доменной печи от колошника до фурменной зоны.

В качестве основы для расчетов использовались следующие параметры доменной плавки [8]: расход офлюсованного агломерата 1475 кг/т чугуна, расход кокса 482 кг/т чугуна, расход атмосферного дутья 1490 кг/т чугуна, влажность дутья 1,0 %, влажность кокса 3,5 %. Химический состав сырья и топлива принят следующим [7, 8], %: агломерат (Fe<sub>общ</sub> = 64,195; FeO = 12,000; SiO<sub>2</sub> = 3,205; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,329; CaO = 5,808; MgO = 0,237), кокс (C<sub>нел</sub> = 86,41; A<sup>c</sup> = 11,9 (SiO<sub>2</sub> = 50,46; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 29,60; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 8,98; CaO = 5,89); S = 0,68; V<sub>лет</sub> = 1,01 (CO<sub>2</sub> = 13,20; CO = 24,10; CH<sub>4</sub> = 0,9; H<sub>2</sub> = 39,50; N<sub>2</sub> = 22,30).

Расчет равновесных концентраций выполнялся с учетом возможности вдувания в горн доменной печи природного газа от 0 до 150 м<sup>3</sup>/т чугуна и обогащения дутья кислородом от 0 до 150 м<sup>3</sup>/т чугуна. Химический состав природного газа принят следующим, % (об.): CH<sub>4</sub> = 97,807; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 0,922; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> = 0,293; C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 0,099; C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> = 0,017; C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> = 0,006; CO<sub>2</sub> = 0,069; N<sub>2</sub> = 0,725; O<sub>2</sub> = 0,05; He = 0,012. Коэффициент замены кокса природным газом принят 0,7 кг/м<sup>3</sup> [5].

Исходный состав газовой фазы доменной печи для определения равновесных концентраций рассчитывался исходя из реакций неполного окисления углеродсодержащего топлива и взаимодействия кислорода дутья с углеродом кокса в фурменной зоне печи:



Результаты расчета равновесных концентраций газовых компонентов и соединений железа в доменной печи, выполненного с использованием программы HSC Chemistry 6.12, при вдувании 100 м<sup>3</sup> природного газа/т чугуна и обогащении дутья кислородом в количестве 100 м<sup>3</sup>/т чугуна показаны на рис. 2.

Полученные данные свидетельствуют о возможности вторичного образования CH<sub>4</sub> в условиях доменной печи. Концентрация CH<sub>4</sub> в доменном газе зависит от количества водорода, образовавшегося в горновом газе, источником которого может быть вдуваемое то-

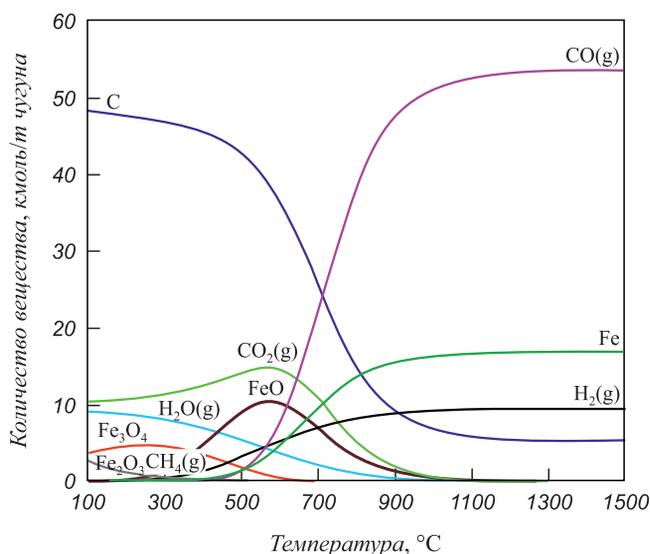


Рис. 2. Результаты моделирования равновесных концентраций веществ в доменной печи

пливо и влажность дутья. Принимая во внимание, что влажность дутья, как правило, поддерживается на минимальном уровне, выполнен расчет зависимости равновесной концентрации  $\text{CH}_4$  от количества вдуваемого в горн природного газа. Полученные данные равновесной концентрации  $\text{CH}_4$  при вдувании природного газа (до  $150 \text{ м}^3/\text{т}$  чугуна) и обогащении дутья кислородом ( $1 \text{ м}^3/\text{м}^3$  природного газа) показаны на рис. 3.

Наличие  $\text{CH}_4$  в доменном газе наблюдается и при отсутствии природного газа, однако оно является незначительным [менее 0,1 % (об.)]. При увеличении количества вдуваемого топлива равновесная концентрация существенно возрастает до 1,58 % (об.) при расходе  $150 \text{ м}^3/\text{т}$  чугуна.

Концентрация  $\text{CH}_4$  возрастает при понижении температуры в печи ниже  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует верхней ступени теплообмена, достигая максимальных значений в диапазоне  $300 - 360 \text{ }^\circ\text{C}$ . Дальнейшее снижение температур ведет к сокращению концентрации метана. Следует отметить, что температура выхода колошникового газа ( $150 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) соответствует максимальным равновесным концентрациям  $\text{CH}_4$ .

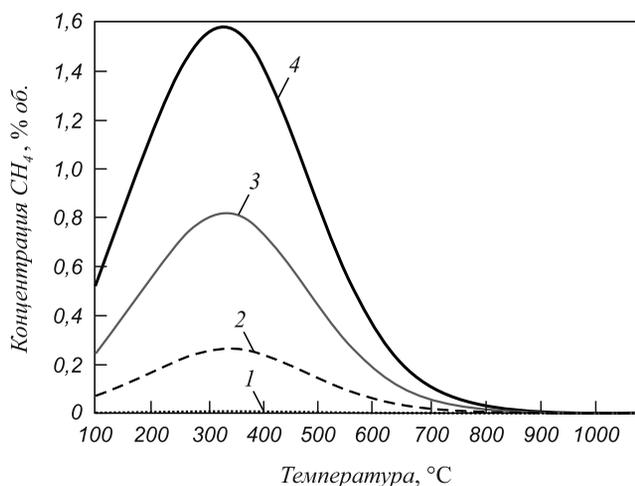


Рис. 3. Зависимость равновесной концентрации  $\text{CH}_4$  в доменном газе от температуры и количества вдуваемого природного газа в горн печи:  
1 – без природного газа; 2 –  $50 \text{ м}^3$  природного газа/т чугуна; 3 –  $100 \text{ м}^3$  природного газа/т чугуна; 4 –  $150 \text{ м}^3$  природного газа/т чугуна

Обогащение дутья кислородом обеспечивает снижение концентрации  $\text{CH}_4$  в колошниковом газе до  $0,4 \text{ } \%/ \text{м}^3$  кислорода и сдвиг температур максимальной концентрации  $\text{CH}_4$  в сторону увеличения (рис. 4). Повышение давления в печи ведет к увеличению концентрации  $\text{CH}_4$  в размере около 0,3 % на 1 атм.

При использовании в качестве альтернативы пылеугольного топлива также возможно вторичное образование  $\text{CH}_4$  в колошниковом газе. Расчет равновесных концентрация  $\text{CH}_4$  в доменном газе при использовании пылеугольного топлива выполнен для трех марок углей (АС, Г, Т), а также смеси углей (50 % АС, 50 % Г). Характеристики пылеугольного топлива, приготовленного из указанных марок углей для вдувания в доменную печь, приняты согласно [9] и представлены в табл. 2.

Для расчетов принимался расход пылеугольного топлива в количестве  $200 \text{ кг}/\text{т}$  чугуна с коэффициентом замены кокса 0,8 [10]. Состав горнового газа рассчитывался, исходя из полной газификации пылеугольного топлива в фурменной зоне доменной печи при обогащении дутья кислородом в количестве  $0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$  пылеугольного топлива [11].

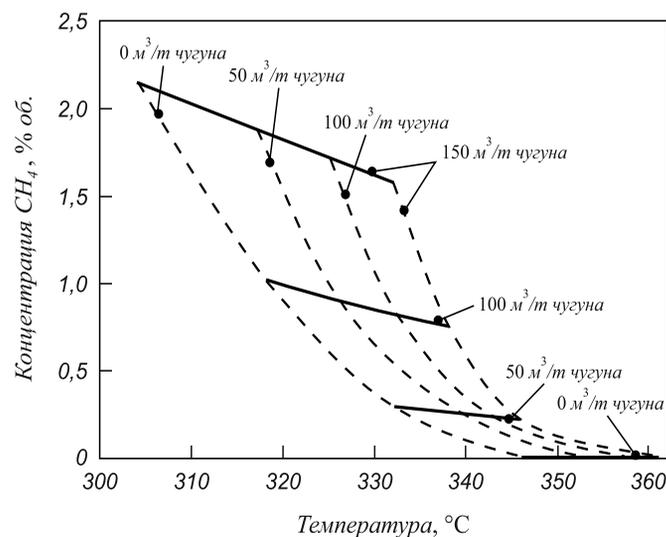


Рис. 4. Зависимость максимальной равновесной концентрации  $\text{CH}_4$  в доменной печи от температуры, расхода природного газа и кислорода:  
- - - - расход кислорода; — — — расход природного газа

Таблица 2

**Состав пылеугольного топлива из донецких углей при вдувании их в доменную печь**

Марка угля	Состав углей, %						
	С <sup>p</sup>	Н <sup>p</sup>	О <sup>p</sup>	Н <sup>p</sup>	С <sup>p</sup>	W <sup>p</sup>	А <sup>p</sup>
АС	86,60	2,25	0,85	1,20	1,00	0,50	7,60
Т	81,00	3,80	1,00	1,30	1,30	0,50	11,10
Г	70,20	5,20	9,20	2,50	0,30	0,50	12,10
Смесь (50 % АС + 50 % Г)	78,50	3,80	5,10	1,35	0,65	0,50	9,92

Результаты расчета равновесных концентраций компонентов доменного газа при использовании пылеугольного топлива показали возможность образования  $\text{CH}_4$  в концентрациях, % (об.): до 0,2 для газовых углей; до 0,12 для тощих углей; до 0,05 для антрацита; до 0,11 для смеси углей.

Таким образом, увеличение содержания летучих в углях для приготовления пылеугольного топлива ведет к повышению равновесных концентраций  $\text{CH}_4$  в колошниковом газе. Принимая во внимание, что оптимальные параметры работы доменных печей достигаются при использовании смеси углей с различной степенью углефикации, вторичное образование метана не исключено даже при работе печей без природного газа. Влияние температуры, давления и содержания кислорода в дутье на образование  $\text{CH}_4$  в колошниковом газе при использовании пылеугольно-

го топлива имеет аналогичные закономерности, как и для природного газа.

Механизм вторичного образования  $\text{CH}_4$  в шахте доменной печи вероятно связан с реакциями, происходящими в газовой фазе между компонентами  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , а также реакциями с углеродом кокса при температуре 300 – 900 °С. При понижении температуры ниже 300 °С происходит снижение концентрации  $\text{CH}_4$  (см. рис. 2) в результате преобладающих реакций  $\text{CH}_4$  с  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  с образованием  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  и выпадением сажистого углерода (табл. 3).

Результаты выполненных расчетов позволяют сделать оценку объемов выбросов  $\text{CH}_4$  в атмосферу при производстве чугуна на металлургических предприятиях России. Для расчета потенциальных выбросов  $\text{CH}_4$ , приведенных в табл. 4, 5, использовались следующие параметры и источники данных:

Таблица 3

**Характеристика некоторых реакций вторичного образования и разрушения  $\text{CH}_4$  в доменной печи,  $\log(K)^1$**

Реакция	Температура, °С					
	0	200	400	600	800	1000
$\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$	10,04	3,88	1,19	-0,33	-1,32	-2,01
$\text{CO} + 3\text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	28,16	11,32	4,23	0,30	-2,20	-3,92
$\text{C} + 2\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + 2\text{CO}_2$	21,39	8,62	3,35	0,50	-1,27	-2,47
$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	22,49	8,95	3,15	-0,12	-2,22	-3,70
$2\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	33,83	13,69	5,31	0,72	-2,17	-4,15
$\text{CH}_4 + \text{CO} = 2\text{C} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$	10,29	2,41	-0,34	-1,50	-2,03	-2,27
$\text{CH}_4 + 2\text{CO} = 3\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$	26,19	11,00	4,89	1,60	-0,44	-1,82
$\text{CH}_4 + 2\text{CO} = 2\text{C} + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	13,74	5,93	2,93	1,39	0,47	-0,14
$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$	2,40	1,19	0,77	0,55	0,42	0,32
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	153,21	88,38	62,12	47,90	38,96	32,83
$2\text{CH}_4 + \text{O}_2 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2$	31,53	26,03	24,17	23,29	22,77	22,42

<sup>1</sup> Константы равновесия реакций определены с использованием программы HSC Chemistry 6.12

Таблица 4

**Расчет выбросов  $\text{CH}_4$  в результате потерь доменного газа**

Параметр	Значение		
	минимальное	максимальное	среднее
Выход доменного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	1250	2150	1430
Потери доменного газа, % (об)	0,5	2,5	1,5
Содержание метана в доменном газе, % (об.)	0,2	1,3	0,6
Удельные выбросы $\text{CH}_4$ , м <sup>3</sup> /т чугуна	0,013	0,699	0,129
Плотность $\text{CH}_4$ , кг/м <sup>3</sup>	0,668	0,668	0,668
Удельные выбросы $\text{CH}_4$ , кг/т чугуна	0,008	0,467	0,086
Производство чугуна в России (2010 г.), тыс. т/год	47 812,7	47 812,7	47 812,7
Выбросы $\text{CH}_4$ , т/год	399,4	22 324,0	4111,8
Коэффициент перевода в $\text{CO}_2$ -эквивалент, т $\text{CO}_2$ /т $\text{CH}_4$	21,0	21,0	21,0
Выбросы $\text{CH}_4$ в $\text{CO}_2$ -эквиваленте, т $\text{CO}_2$ -экв./год	8386,5	468 803,3	86 347,0

- выход доменного газа, расход природного газа, расход кислорода, производство чугуна в России приняты по состоянию на 2010 г. согласно [12];
- содержание  $\text{CH}_4$  в доменном газе определено на основе диаграммы (рис. 3), исходя из фактического расхода природного газа (40 – 125 м<sup>3</sup>/т чугуна) и кислорода (до 115 м<sup>3</sup>/т чугуна) при производстве чугуна в России и составляет от 0,2 до 1,3 % (об.), что хорошо согласуется с имеющимися данными по химическому составу доменного газа металлургических предприятий [6];
- потери доменного газа оценены по данным балансов доменного газа некоторых металлургических предприятий России в диапазоне 0,5 – 2,5 %;
- коэффициент недожога доменного газа при его сжигании и коэффициент перевода выбросов  $\text{CH}_4$  в эквивалент выбросов  $\text{CO}_2$  определены согласно данным МГЭИК [3, 13];
- плотность  $\text{CH}_4$  при стандартных условиях принята согласно [14].

Результаты расчетов, приведенные в табл. 4, 5 показывают, что удельные выбросы  $\text{CH}_4$  в атмосферу в результате потерь доменного газа при загрузке шихты в доменные печи и распределении доменного газа могут составлять 0,008 – 0,467 кг/т чугуна при содержании  $\text{CH}_4$  в доменном газе от 0,2 до 1,3 %. Удельные выбросы от неполного сжигания доменного газа могут составлять 0,008 – 0,091 кг/т чугуна.

По данным Национального кадастра антропогенных выбросов парниковых газов России выбросы  $\text{CH}_4$  от предприятий черной металлургии в 2010 г. составили 21,5 тыс. т, не включая поступления при использовании доменного газа [1]. Таким образом, рассчитанный (см. табл. 4, 5) средний уровень выбросов при производстве чугуна в России в 2010 г. (около 5,5 тыс. т  $\text{CH}_4$

или 115 тыс. т  $\text{CO}_2$ -эквивалента) составляет дополнительно около 25 % выбросов  $\text{CH}_4$  в черной металлургии от данных Национального кадастра.

Дальнейшие инструментальные и теоретические исследования условий образования метана в доменных печах, установления их зависимости от технологических параметров печей, а также эффективности использования доменного газа позволят усовершенствовать мониторинг выбросов загрязняющих веществ на металлургических предприятиях и повысить полноту и точность данных в Национальном кадастре антропогенных выбросов парниковых газов России.

**Выводы.** На основе термодинамических расчетов показана возможность вторичного образования  $\text{CH}_4$  в колошниковом газе доменных печей в результате взаимодействия водорода с углеродом кокса,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  доменного газа в верхней части шахты доменной печи при температуре ниже 1000 °С, соответствующей верхней ступени теплообмена. Концентрация  $\text{CH}_4$  может составлять от 0,2 до 1,3 % (об.) в зависимости от используемых видов топлива, обогащения дутья кислородом, температуры выхода колошникового газа и избыточного давления. В связи с высокой скоростью прохождения дутья через доменную печь равновесные концентрации газов в печи могут не достигаться, тем не менее содержание  $\text{CH}_4$  в доменном газе следует ожидать при вдувании в печь природного газа и температуре выхода колошникового газа 150 – 400 °С, соответствующей максимальным равновесным концентрациям  $\text{CH}_4$ . Выбросы  $\text{CH}_4$  в атмосферу в результате потерь доменного газа и его неполного окисления при горении могут составить от 0,008 до 0,558 кг/т чугуна. Средний уровень выбросов при производстве чугуна в России в 2010 г. по данным расчетов составил около 5,5 тыс. т  $\text{CH}_4$  или 115 тыс. т  $\text{CO}_2$ -эквивалента.

Таблица 5

Расчет выбросов  $\text{CH}_4$  в результате недожога доменного газа

Параметр	Значение		
	минимальное	максимальное	среднее
Выход доменного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	1250	2150	1430
Потери доменного газа, % (об.)	0,5	2,5	1,5
Объем сжигания доменного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	1 244	2 096	1 409
Содержание метана в доменном газе, % (об.)	0,2	1,3	0,6
Коэффициент недожога	0,005	0,005	0,005
Удельные выбросы $\text{CH}_4$ , м <sup>3</sup> /т чугуна	0,012	0,136	0,042
Плотность $\text{CH}_4$ , кг/м <sup>3</sup>	0,668	0,668	0,668
Удельные выбросы $\text{CH}_4$ , кг/т чугуна	0,008	0,091	0,028
Производство чугуна в России (2010 г.), тыс. т/год	47 812,7	47 812,7	47 812,7
Выбросы $\text{CH}_4$ , т/год	397,4	4353,2	1350,0
Коэффициент перевода в $\text{CO}_2$ -эквивалент, т $\text{CO}_2$ /т $\text{CH}_4$	21,0	21,0	21,0
Выбросы $\text{CH}_4$ в $\text{CO}_2$ -эквиваленте, т $\text{CO}_2$ -экв./год	8344,5	91 416,6	28 350,6

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2009 г. Ч. 1 / А.И. Нахутин, М.Л. Гитарский, А.А. Романовская и др. – М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2012. – 386 с.
2. Люнген Х.Б., Петерс М., Шмеле П. // Черные металлы. Август – сентябрь 2010. С. 52 – 65.
3. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. // Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов / Под ред. Х.С. Игглестон, Л. Буэндиа, К. Мива и др. – Япония: ИГЕС, 2007.
4. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel. – European Commission, 2001. – 383 p.
5. Металлургия чугуна: Учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Ю.С. Юсфина – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
6. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Хрестоматия энергосбережения: Справ. В 2-х т. Т. 1 – М.: Теплотехник, 2005. – 688 с.
7. Доменное производство: Справ. В 2-х т. Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Вегмана Е.Ф. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.
8. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 469 с.
9. Аносов В.Г., Фоменко А.П., Крутас Н.В., Цаплина Т.С. // Металургія (Наукові праці ЗДІА). – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2009. Вип. 20. С. 37 – 43.
10. Ярошевский С.Л. // Наукові праці. «Металургія». – Донецький національний технічний університет, 2007. Вип. 9(122). С. 19 – 30.
11. Аносов В.Г., Лаптев Д.А. // Металургія (Наукові праці ЗДІА). – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2011. Вип. 23. – 8 с.
12. Технико-экономические показатели работы печей и агрегатов предприятий черной металлургии России в 2010 году. Ежегодный статистический сборник. Ч. 1. Работа аглофабрик, доменных печей и коксовых батарей // ЦНИИ Информации и технико-экономических исследований черной металлургии, 2011 г.
13. Пересмотренные руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов, МГЭИК. 1996. Т. 2: Рабочая книга по инвентаризации парниковых газов. / Под ред. Д.Т. Хоутона, Л.Г. Мейра Филхо, Б. Лим и др. – Великобритания, Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), Международное энергетическое агентство (МЭА), 1997.
14. ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки.

© 2012 г. *Р.А. Казаков, Г.С. Подгородецкий, Ю.С. Юсфин, В.П. Зволинский*  
 Поступила 15 мая 2012 г.