

УДК 504.064.2.001.18+661.97:669.1

**В.Г. ЛИТВИНЕНКО**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, **Г.Н. ГРЕЦКАЯ**, к.э.н., заведующий отделом, **В.Я. ДАМРИН**, заместитель директора структурного подразделения, **В.А. ТУРЕЦКАЯ**, научный сотрудник Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь» (УкрГНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков  
**И.В. ХОЛИНА**, заместитель начальника лаборатории ОАО «Запорожсталь», г. Запорожье

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭМИССИИ ДВУОКСИ УГЛЕРОДА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ\*

Приведены расчеты эмиссии парниковых газов на ОАО «Запорожсталь» за 1990, 2004 и 2005 годы в целом по комбинату, в т.ч. за счет производства извести, агломерата, чугуна, стали, проката и теплоэнергии в ТЭЦ. Изучены основные закономерности эмиссии и влияние состава топлива и энергоемкости продукции на величину коэффициентов эмиссии. Предложена методика прогнозирования эмиссии двуокси углерода, выполнены расчеты с учетом объемов производства различных видов товарной продукции и изменения в технологии выплавки стали.  
**эмиссия, парниковые газы, топливо, чугун, сталь, прокат, теплоэнергия, прогноз, технология, товарная продукция**

\* Статья опубликована по материалам XVI Международной конференции «Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов», г. Щелкино, АР Крым, 2008 г.



В результате производственной деятельности металлургических предприятий в атмосферу выбрасывается большое количество парниковых газов, в подавляющем большинстве (более 99,0 %) – двуокиси углерода.

Проведенные на ОАО «Запорожсталь» исследования показали, что диоксид углерода образуется в результате сгорания (в т.ч. потерь) доменного газа (63–65 %), природного газа (11,7–12,2 %), твердого топлива (9,0–9,4 %), коксового газа (0,5–0,9 %), окисления углерода чугуна в мартеновском цехе (6,3 %) и в результате разложения известняка (6,5 %) в процессе получения известняка, агломерата и выплавки стали. Незначительное количество  $\text{CO}_2$  ( $\approx 0,7$  %) образуется в доменных печах при диссоциации известняка. Однако дать точную количественную оценку этой величине двуокиси углерода весьма сложно, так как в доменных печах в результате сложных физико-химических процессов частичного окисления углерода кокса, природного газа и, возможно, известняка в восстановительной среде печи образуется доменный газ, содержащий как  $\text{CO}_2$ , так и  $\text{CO}$ .

В целом по комбинату эмиссия двуокиси углерода в атмосферу составляет (табл. 1) в настоящее время около 8 млн т, в 2004 г. – 7947 тыс. т, в 2005 г. – 8222 тыс. т, а это на 1526–1800 тыс. т меньше, чем в 1990 г. Снижение эмиссии в 2004 г. по сравнению с 1990 г. связано прежде всего со снижением удельного расхода топлива на производство годного проката на 87,7 кг у.т./т, что позволило уменьшить выбросы в атмосферу  $\text{CO}_2$  на 1353 тыс. т при одновременном росте производства горячекатаного листа приблизительно на 25 %. Вследствие снижения выработки пара в котлах ТЭЦ на 1580 тыс. Гкал эмиссия  $\text{CO}_2$  снизилась на 238 тыс. т. На аглофабрике эмиссия двуокиси углерода уменьшилась на 430 тыс. т из-за снижения на 9 % производства агломерата и на 9 % – удельного расхода топлива.

В 2005 г. (по сравнению с 2004 г.) эмиссия  $\text{CO}_2$  увеличилась на 274 тыс. т вследствие роста объема производства агломерата, чугуна и горячекатаного листа (г/к лист), а также некоторого увеличения удельного расхода топлива в агломерационном, обжимном цехах и на ТЭЦ.

Производство каждого вида продукции в цехе характеризуется коэффициентом эмиссии диоксида углерода ( $e_{\text{ц}}$ , кг/т), т.е. количеством  $\text{CO}_2$ , образующимся при изготовлении единицы продукции. Величина  $e_{\text{ц}}$  (цеховой коэффициент эмиссии) зависит от удельного расхода топлива, известняка (извести) и вида используемого топлива, особенно газообразного. При сгорании 1 кг условного топлива в виде коксового газа в атмосферу выделяется около 1,25 кг  $\text{CO}_2$ , при сгорании природного газа – 1,75 кг  $\text{CO}_2$ , доменного газа – 7,0 кг  $\text{CO}_2$ .

В 2004–2005 гг. (табл. 1) наибольшее количество  $\text{CO}_2$  ( $\approx 30$  %) образовалось в доменном цехе ( $e_{\text{ц}} = 701,7\text{--}703,6$  кг/т). Основная часть  $\text{CO}_2$  получается в результате нагрева кауперов доменным газом (453,5–555,6 кг/т) и сгорания доменного газа на «свече» (114–186 кг/т). Наблюдается четкая тенденция увеличения доли доменного газа в газообразном топливе в связи с экономией природного газа и, следовательно, увеличения эмиссии  $\text{CO}_2$  даже при постоянстве удельного расхода условного топлива.

**Таблица 1 – Динамика эмиссии диоксида углерода на ОАО «Запорожсталь» при производстве различных видов продукции**

Цехи, продукция	Эмиссия диоксида углерода, тыс. т/год				
	Фактическая			Прогнозируемая	
	1990 г.	2004 г.	2005 г.	2008 г.	2030 г.
Известь	322,0	235,0	229,9	229,4	428,2
Агломерат	1377,0	947,6	1027,4	997,9	983,9
Чугун	2114,0	2360,9	2484,3	2210,8	1994,8
Сталь*	1127,7	1225,9	1199,0	1170,2	571,6
Прокат**	2169,0	816,4	876,1	796,7	250,7
Теплоэнергия ТЭЦ	2526,0	2288,2	2330,9	2216,4	1983,0
Прочая продукция, услуги	112,5	73,5	74,0	69,8	48,6
Всего по комбинату	9748,2	7947,5	8221,6	7691,2	6260,8

\* – до 2008 г. – мартеновская сталь, в 2030 г. – конвертерная сталь  
 \*\* – включая гнутые профили проката и жель

Аналогичная тенденция – и на ТЭЦ, где при выработке пара в котлах образуется 28,3–28,8 % общего по комбинату количества  $\text{CO}_2$ . Коэффициент эмиссии  $\text{CO}_2$  в 2004–2005 гг. составлял 953 кг/Гкал, что в 1,5 раза больше, чем в 1990 г. Рост  $e_{\text{ц}}$  произошел вследствие увеличения доли доменного газа в топливном балансе ТЭЦ с 44 % (1990 г.) до 82 % (2004 г.).

Мартеновское производство сопровождается эмиссией 14,6–15,4 % общего по комбинату количества  $\text{CO}_2$ . Величина  $e_{\text{ц}}$  относительно постоянна – 275 кг на тонну стали; 49–51 % этого количества образуется в результате сжигания топлива; 41–43 % – в результате окисления углерода чугуна и 7–8 % – при разложении  $\text{CaCO}_3$  известняка и извести.

При производстве агломерата в атмосферу выделяется 11,9–12,5 % общего по комбинату количества  $\text{CO}_2$  ( $e_{\text{ц}} = 180$  кг/т – в 2004 г. и 239 кг/т – в 1990 г.). 71 % этого количества получается при сгорании газообразного и твердого топлива; 7,2–7,4 % – за счет окисления углерода колшниковой пыли и 29 % – при разложении известняка и извести (недопала).

Прокатное производство в 2004–2005 гг. сопровождалось эмиссией 10,3–10,7 % общего по комбинату количества CO<sub>2</sub> в основном за счет слябинга и цеха горячей прокатки тонкого листа (ЦГПТЛ). В 2004 – 2005 гг. по сравнению с 1990 г. объем эмиссии CO<sub>2</sub> сократился в 2,5–2,6 раза, несмотря на рост объема производства готового проката на 2 %. Сокращение объема эмиссии – это следствие снижения расхода условного топлива в 2,7–2,8 раза.

При производстве извести в атмосферу выделяется всего около 3 % общего по комбинату количества CO<sub>2</sub> (e<sub>ц</sub> = 788–807 кг/т). Из этого количества около 37 % CO<sub>2</sub> образуется при сгорании топлива и 63 % – при разложении известняка.

Остальные производства и цехи вместе дают около одного процента общей эмиссии CO<sub>2</sub>.

Знание цеховых коэффициентов эмиссии позволяет оценивать возможные изменения эмиссии CO<sub>2</sub> по каждому цеху (производству) в результате изменения удельного расхода топлива и его состава, а также потерь энергосносителей или топлива. Например, при снижении расхода топлива в агломерационном цехе на 4 % величина e<sub>ц</sub> снизится на 4·0,71 = 2,84 %. В доменном цехе снижение потерь доменного газа в 3 раза (с 186 до 62 м<sup>3</sup>/т) позволит снизить e<sub>ц</sub> на 170 кг/т.

Однако с помощью цеховых коэффициентов эмиссии невозможно оценить влияние мероприятий, связанных с изменением технологии производства или сортамента продукции, на изменение эмиссии CO<sub>2</sub> в целом по комбинату. Дело в том, что такие мероприятия предопределяют необходимость изменения объема производства полуфабрикатов и, следовательно, ведут к изменению затрат топлива. Например, при разливке стали в слитки увеличение доли спокойной стали в общем сор-

таменте выплавляемой стали ведет к росту обрезки металла в обжимном цехе. Поэтому для получения одного и того же количества катаных заготовок необходимо выплавить больше стали, а следовательно, и чугуна, произвести больше агломерата и извести, выработать в ТЭЦ больше пара для дутья. Все это ведет к росту эмиссии CO<sub>2</sub> в целом по комбинату при постоянном объеме производства заготовок. Изменение эмиссии CO<sub>2</sub> в целом по комбинату удобнее всего оценивать с помощью сквозных коэффициентов эмиссии, которые отражают удельную эмиссию CO<sub>2</sub> (кг/т) в целом по предприятию, т.е. то количество CO<sub>2</sub>, которое образуется на предприятии в пересчете на единицу товарной продукции. Сквозной коэффициент эмиссии (e<sub>цп</sub>, т/т) учитывает образование двуокиси углерода также и при производстве необходимого количества полуфабрикатов для изготовления товарной продукции на всех ступенях производственного процесса. Величина e<sub>цп</sub> определяется удельным расходом полуфабрикатов, удельным расходом топлива на каждой стадии технологического процесса и составом топлива.

С помощью сквозных коэффициентов эмиссии (e<sub>цп</sub>, т/т) легко рассчитывается величина образующегося диоксида углерода (E, тыс. т) в зависимости от предполагаемого производства каждого вида товарной продукции (Q<sub>цп</sub>, тыс. т)

$$E = \sum Q_{цп} \cdot e_{цп} \tag{1}$$

В табл. 2 показан расчет величины E для прогнозируемого производства товарной продукции на ближайшую перспективу (условно – 2008 г., вариант 1) без значительных изменений в технологии производства по сравнению с 2005 г. Сквозные коэффициенты эмиссии для 2008 г. принимались в основном на уровне 2005 г. Для доменно-

**Таблица 2 – Влияние сквозных коэффициентов эмиссии CO<sub>2</sub> (e<sub>цп</sub>) и объемов производства товарной продукции (Q<sub>цп</sub>, тыс. т) на эмиссию двуокиси углерода (E, тыс. т)**

Наименование	2008 г.					2030 г.				
	e <sub>цп</sub> , т/т	Вариант 1		Вариант 2		e <sub>цп</sub> , т/т	Вариант 3		Вариант 4	
		Q <sub>цп</sub> , тыс. т	E, тыс. т	Q <sub>цп</sub> , тыс. т	E, тыс. т		Q <sub>цп</sub> , тыс. т	E, тыс. т	Q <sub>цп</sub> , тыс. т	E, тыс. т
Чугун	1,407	233	327,8	250	351,8	1,438	233	335,0	250	359,5
Слябы*	1,734	95	164,7	95	164,7	1,405	95	133,5	95	133,5
Изложницы	1,251	17	21,3	17	21,3	–	–	–	–	–
Лист горячекатаный	1,898	2315	4393,9	2800	5314,4	1,564	2315	3620,7	2800	4379,2
Лист холоднокатаный	2,081	1125	2341,1	1600	3329,6	1,712	1125	1926,0	1600	2739,2
Жесть луженая	2,605	25	65,1	40	104,2	2,201	25	55,0	40	88,0
Гнутые профили проката	1,939	100	193,9	120	232,7	1,598	100	159,8	120	191,8
Прочая продукция** на сторону			190,0		190,0			190,0		190,0
Итого			7697,8		9708,7			6420,0		8001,2

\* – для 2008 г. – катаные слябы; для 2030 г. – литые слябы конвертерной стали

\*\* – горячая вода, пар, кислород и т.п.





го цеха  $e_{\text{ц}}$  принята на 75–80 кг/т меньше, чем в 2005 г., за счет предполагаемого снижения потерь доменного газа на «свече» на 250 м<sup>3</sup>/т. На 54 кг/т предполагается рост  $e_{\text{ц}}$  для пара ТЭЦ за счет увеличения расхода доменного газа на 82 м<sup>3</sup>/Гкал при снижении расхода природного газа на 13 м<sup>3</sup>/Гкал и при одновременном снижении расхода условного топлива на 3,1 кг/Гкал. Кроме того, предполагается уменьшение выработки пара ТЭЦ на 240 тыс. Гкал за счет более полного использования ВЭР. Расчетные значения  $e_{\text{ц}}$  приведены в табл. 2. Прогнозируемые объемы производства в 2008 г. (вариант 1) близки к фактическим за 2005 г. При указанных условиях величина  $E$  в 2008 г. (7698 тыс. т) будет на уровне 2004 г., т.е. приблизительно на 500 тыс. т меньше, чем в 2005 г., и на 2050 тыс. т меньше, чем в 1990 г., когда производство агломерата и чугуна было больше, чем в 2005 г., на 2–10 %, а стали и листового проката – на 7–30 % меньше.

Расчеты показывают, что при такой технологии производства эмиссия  $\text{CO}_2$  уровня 1990 г. (9748 тыс. т) не будет превзойдена вплоть до увеличения объема товарного горячекатаного (г/к) листа до 2800 тыс. т и холоднокатаного (х/к) листа до 1600 тыс. т (вариант 2). В этом случае  $E = 9709$  тыс. т.

Используя сквозные коэффициенты эмиссии  $\text{CO}_2$ , можно также с большей достоверностью прогнозировать изменение эмиссии  $\text{CO}_2$  в целом по комбинату при внедрении различных технологических мероприятий.

Снижение расхода чугуна на выплавку стали в мартеновском или конвертерном цехах на 100 кг/т позволит уменьшить  $e_{\text{ц}}$  на 165 кг в пересчете на производство 1 т г/к листа и снизить на 7,5 % общую по комбинату эмиссию  $\text{CO}_2$ . Эффект при этом будет достигнут за счет уменьшения производства полуфабрикатов на 1 т г/к листа: чугуна – на 116 кг, агломерата – на 185,8 кг, извести – на 5,7 кг, пара ТЭЦ для выработки дутья – на 0,0494 Гкал. Если считать эффект на 1 т х/к листа, то все показатели следует увеличить на 3 %, учитывая расходный коэффициент г/к листа на производство х/к листа.

Еще большее снижение эмиссии возможно при внедрении непрерывной разливки стали. В условиях ОАО «Запорожсталь» внедрение МНЛЗ в пересчете на 1 т г/к листа позволит уменьшить потребность в жидкой стали на 130,8 кг; в чугуне – на 97,6 кг; в изложницах и поддонах – на 14 кг; в агломерате – на 176,4 кг; в извести – на 7,1 кг; в паре ТЭЦ – на 0,0468 Гкал. Если учесть увеличение газообразного топлива на подогрев промежуточных ковшей для МНЛЗ, то внедрение непрерывной разливки стали позволит снизить  $e_{\text{ц}}$  на 309 кг/т или на 14,1 % общей по заводу эмиссии  $\text{CO}_2$ .

При замене мартеновского способа выплавки стали конвертерным следует учитывать снижение эмиссии  $\text{CO}_2$

за счет исключения расхода природного газа на нагрев стали в мартеновских печах при одновременном увеличении количества образующейся двуокиси углерода за счет роста расходного коэффициента чугуна на выплавку стали. При этом учтено увеличение расхода извести на конвертерную выплавку стали. Правда, при таком изменении способа выплавки стали, возможно, понадобится сооружение нового известково-обжигового цеха для улучшения качества извести с повышенным расходом топлива. С учетом этого внедрение непрерывной разливки стали может снизить эмиссию  $\text{CO}_2$  на комбинате на 5,2 %.

Для прогноза эмиссии  $\text{CO}_2$  на более отдаленную перспективу (условно – 2030 г.) была смоделирована технология производства с учетом замены мартеновского цеха конвертерным с непрерывной разливкой стали в слябы, вывода из строя обжимного цеха и сооружением нового известково-обжигового цеха с кольцевыми печами. Расход чугуна на выплавку стали – 800 кг/т (в 2005 г. – 746,5 кг/т). Предусмотрено еще более полное использование ВЭР с сокращением выработки пара ТЭЦ на 560 тыс. Гкал по сравнению с 2005 г. В качестве топлива на ТЭЦ будет использоваться только доменный газ, вследствие чего  $e_{\text{ц}}$  возрастет до 1102 кг/Гкал (в 2005 г. – 954 кг/Гкал, в 2008 г. – 1008 кг/Гкал). Нагрев кауперов предусматривается только с использованием доменного газа, а его потери в доменном цехе – не более 75 м<sup>3</sup> на тонну чугуна. В результате этого цеховой коэффициент эмиссии при выплавке чугуна не будет превышать 600 кг/т.

Из-за отсутствия потребности в поддонах и изложницах объем производства чугунолитного литья сократится в 10–12 раз и, соответственно, выплавка чугуна для литейного цеха.

Рассчитанные для этих условий сквозные коэффициенты эмиссии приведены в табл. 2. Расчет количества образующегося  $\text{CO}_2$  в целом по комбинату проведен для тех же объемов товарной продукции, что и в 2008 г. (за исключением товарных изложниц). При производстве 2315 тыс. т г/к листа и 1125 тыс. т х/к листа (вариант 3) объем эмиссии  $\text{CO}_2$  составит 6420 тыс. т или в 1,2 раза меньше, чем при аналогичных объемах производства товарного листа в условиях 2008 г., или на 3328 тыс. т меньше, чем в 1990 г.

При увеличении производства г/к листа до 2800 тыс. т и х/к листа до 1600 тыс. т (вариант 4) эмиссия  $\text{CO}_2$  составит около 8000 тыс. т, что приблизительно равно уровню эмиссии в 2004–2005 гг. (табл. 1) и на 1747 тыс. т меньше, чем в 1990 г. Используя сквозные коэффициенты эмиссии, легко можно спрогнозировать выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу и для других объемов товарной продукции при любой технологии производства.

## ВЫВОДЫ

Исследование механизма и закономерностей образования диоксида углерода показало, что на ОАО «Запорожсталь» около 87 % всего количества  $\text{CO}_2$  образуются в результате сгорания топлива в атмосфере, около 6,3 % – при окислении углерода чугуна в сталеплавильном цехе и около 6,5 % – при диссоциации известняка. Более 55 % общего количества  $\text{CO}_2$  образуются в доменном цехе и ТЭЦ при нагреве кауперов и выработке пара. Разработана методика расчета сквозного коэффициента эмиссии  $\text{CO}_2$ , учитывающая его образование на всех стадиях производства товарной продукции, включая из-

Наведено розрахунки емісії парникових газів на ВАТ «Запоріжсталь» за 1990, 2004 та 2005 роки у цілому на комбінаті, у т.ч. за рахунок виробництва вапна, агломерату, чавуну, сталі, прокату та теплоенергії у ТЕЦ. Вивчено основні закономірності емісії та впливу складу палива та енергоємності продукції на величину коефіцієнтів емісії. Запропоновано методику прогнозування емісії двоокису вуглецю, виконано розрахунки з урахуванням обсягів виробництва різних видів товарної продукції та зміни у технології виплавки сталі.

готовление всех полуфабрикатов и выработку пара ТЭЦ. Используя сквозной коэффициент, можно прогнозировать изменение эмиссии  $\text{CO}_2$  при изменении объема производства товарной продукции и количественно оценивать снижение выбросов  $\text{CO}_2$  в целом по предприятию при внедрении различных мероприятий. Показано, что наиболее эффективными мероприятиями для комбината являются:

- внедрение непрерывной разливки стали;
- замена мартеновских печей конвертерами;
- снижение расхода чугуна на выплавку стали;
- более широкое использование ВЭР.

*Поступила в редакцию 10.04.2008*

Calculations of greenhouse gas emissions at JSC «Zaporozhstal» in 1990, 2004 and 2005 in total on the Works, including manufactures of lime, agglomerate, pig-iron, steel, rolled products and heat & power plant are shown. The basic factors of emission and influence of fuel composition and energy intensity of products on emission coefficient are studied. The technique to forecast carbon dioxide emission is suggested and calculations taking into account output of different products and change in steel-making practice were effected.