

## Анализ влияния неконтролируемых параметров на материалоемкость и энергоемкость конвертерной плавки

A. N. Stoyanov /Cand. Sci. (Tech.)/,  
K. G. Nizjaev /Dr. Sci. (Tech.)/,  
L. S. Molchanov /Cand. Sci. (Tech.)/, A. V. Righkin

National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro,  
Ukraine

### Analysis of uncontrolled parameters influence on material and energy consumption of bof melting

**Цель.** Анализ влияния неконтролируемых параметров конвертерной плавки (степень дожигания CO до CO<sub>2</sub>, содержание кремния и углерода в чугунах, удельный расход теплоносителя, теплопотери конвертера и др.) на материалоемкость и энергоемкость стали.

**Методика.** Исследование выполнено по средству математического моделирования кислородно-конвертерной плавки, базирующегося на выполнении теплового и материального балансов.

**Результаты.** В работе проведен анализ влияния основных параметров и качественных характеристик применяемых в конвертерной плавке материалов на изменение расхода металлошихты и энергоемкости стали. Показано, что использование для решения текущих производственных задач добавочных материалов в конвертерной плавке, таких как скрап, твердый чугун, магнезитовый флюс, теплоноситель, приводит к значительному росту энергоемкости стали – до 42 кг у.т./т.

**Научная новизна.** Определено влияние неконтролируемых факторов конвертерной плавки на материалоемкость и энергоемкость стали.

**Практическая значимость.** Развитие теории и практики кислородно-конвертерной плавки с учетом влияния неконтролируемых параметров на материалоемкость и энергоемкость стали. (Ил. 15. Библиогр.: 6 назв.)

**Ключевые слова:** конвертер, энергоемкость, металлошихта, сталь, технология, расход.

**Актуальность и постановка задачи исследования.** Предприятия горно-металлургического комплекса продолжают работать в сложных условиях, связанных с трудностями по их обеспечению железорудным сырьем, металлоломом, флюсами, энергоносителями, при этом сталеплавильные цеха пытаются самостоятельно решить задачу производства качественной стали с одновременной минимизацией затрат на производство исходя из имеющихся возможностей, без проведения предварительных исследований. Такой подход к решению задач, направленных на снижение материалоемкости и энергоемкости сталеплавильного производства, – «тупиковый» и не может обеспечить конкурентоспособность отечественной металлопродукции на мировом рынке.

Данное исследование направлено на определение затрат материалов и энергоресурсов в сталеплавильном производстве, что позволит определить скрытые резервы конвертирования металла и разработать направления для снижения энергоемкости стали.

**Методика проведения исследований.** Для оценки изменения материалоемкости и энергоемкости стали при конвертировании металла разработана программа расчета конвертерной плавки с использованием современных теоретических представлений о термодинамике и кинетике сталеплавильных процессов и практических результатов работы сталеплавильных цехов Украины.

В расчетах энергоемкости стали, как основного критерия энергоэффективности производства, принимали сумму затрат первичной энергии в перерасчете на килограмм условного топлива, затраченной на 1 т продукции (кг у.т./т), как в конвертерном переделе, так и на всех предшествующих ему этапах получения материалов, использованных на плавку.

При проведении исследований получены данные о влиянии неконтролируемых или частично контролируемых показателей конвертерной плавки (степень дожигания CO до CO<sub>2</sub>; содержание углерода в чугунах; теплопотери конвертера; количество миксерного шлака; зашлакованность скрапа; потери при прокали-

вании в извести и магнезиальном флюсе) на энергоёмкость процесса. Моделирование конвертерной плавки проводили с учетом получения следующих конечных результатов: основность шлака на уровне 3,0 единиц; содержание углерода в металле на повалке 0,18 % и температуры стали 1630 °С.

**Результаты проведенных исследований.** Как известно, наибольший вклад в формирование энергоёмкости стали вносит жидкий чугун. Поэтому на первом этапе выполнены исследования (рис. 1-7), обеспечивающие улучшение теплового баланса конвертерной плавки [1-3].

Как свидетельствуют полученные данные, увеличение степени дожигания СО до СО<sub>2</sub> на 2 % обеспечивает снижение удельного расхода чугуна на 9,2 кг/т стали при увеличении расхода лома на 8,7 кг/т стали. Увеличение степени дожигания приводит к значительному снижению удельного расхода металлошихты до 2,43 кг/т

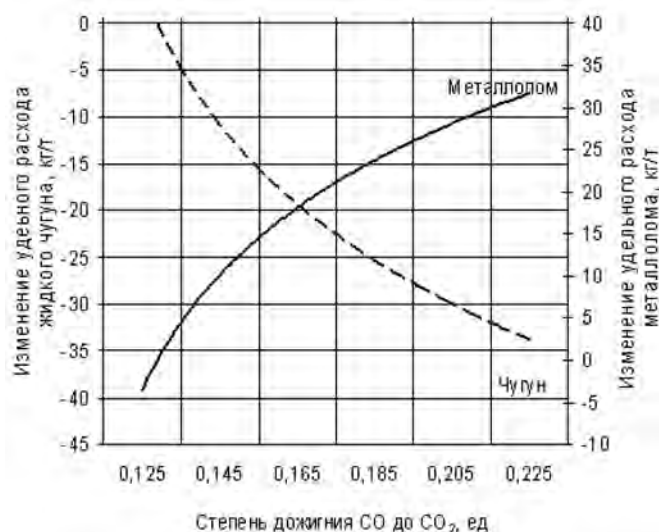


Рис. 1. Номограмма для определения влияния степени дожигания СО до СО<sub>2</sub> на удельный расход металлолома и жидкого чугуна

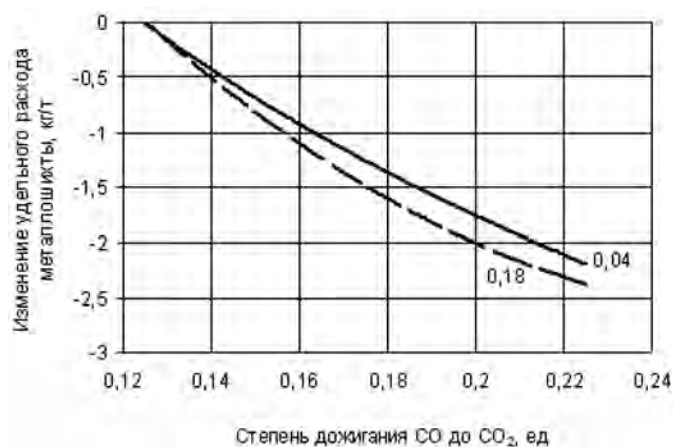


Рис. 2. Влияние степени дожигания СО до СО<sub>2</sub> на удельный расход металлошихты (цифры у кривых – содержание углерода в металле на повалке конвертера)

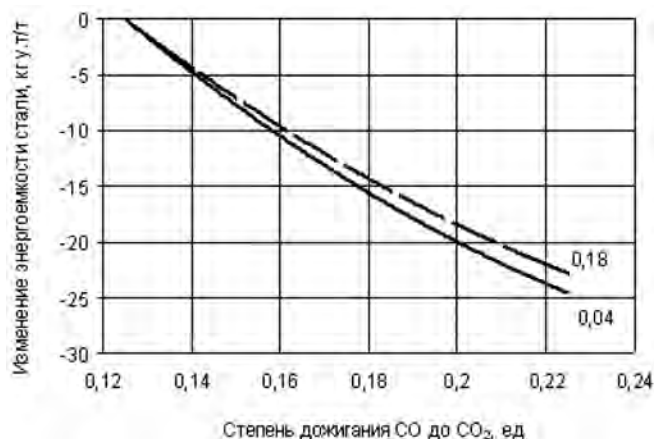


Рис. 3. Влияние степени дожигания СО до СО<sub>2</sub> на изменение энергоёмкости стали (цифры у кривых содержание углерода в металле на повалке конвертера)

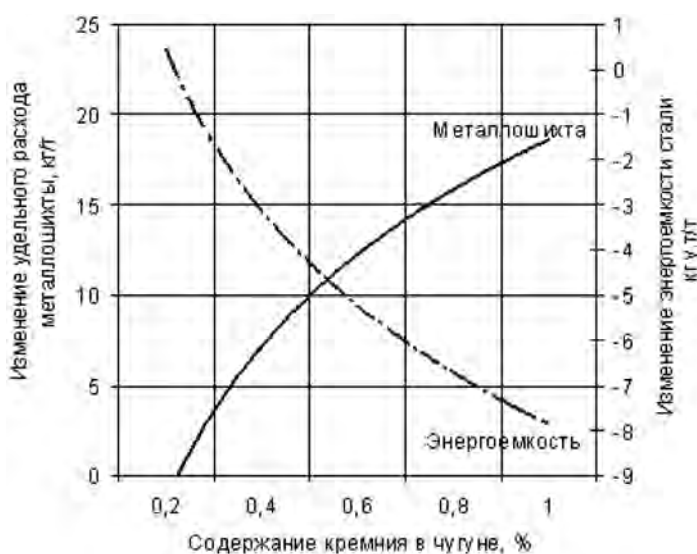


Рис. 4. Номограмма для определения влияния содержания кремния в чугуне на изменение удельного расхода металлошихты и энергоёмкости стали



Рис. 5. Номограмма для определения влияния расхода угля на изменение удельного расхода металлошихты и энергоёмкости стали

## СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

стали, при этом снижение концентрации углерода в металле до 0,04 % приводит к меньшей экономии металлошихты (рис. 2), что связано с развитием процессов окисления железа при низких концентрациях углерода [4–6]. Аналогичным образом снижается и энергоёмкость стали (рис. 3). При этом необходимо отметить, что более значимое снижение энергоёмкости стали при одинаковой степени дожигания достигнуто при содержании углерода в металле на уровне 0,04 % в связи с увеличением приходной статьи теплового баланса плавки за счет окисления железа и, соответственно, возможностью переработки большего количества стального металлолома.

В современной практике конвертерного производства до настоящего времени нет единой точки зрения о рациональных концентрациях кремния в чугунах, и это вполне оправдано. Все зависит от поставленных задач перед технологами – экономии материалов или энергоресурсов в процессе выплавки стали. Увеличение содержания кремния в чугунах влечет за собой существенное увеличение расхода металлошихты при значительном снижении энергоёмкости стали (рис. 4). Это связано с увеличением приходной статьи теплового баланса плавки и возможностью увеличения расхода стального металлолома, что и обеспечивает снижение энергоёмкости стали, однако рост количества образовавшегося шлака, ввиду повышенного расхода извести, приводит к существенным потерям металла и, соответственно, росту расхода металлошихты.

Анализ результатов моделирования плавки при использовании теплоносителя (при проведении расчетов в качестве теплоносителя применяли уголь марки АС), приведенных на рис. 5, указывает на незначительное снижение расхода металлошихты и жидкого чугуна, однако при этом наблюдается значительный рост энергоёмкости стали (до 2 кг у.т./т).

Данные о влиянии теплопотерь конвертера и содержания углерода в чугунах на энергоёмкость конвертерной стали приведены на рис. 6 и 7. Согласно выполненным расчетам установлено, что повышение теплопотерь конвертера на 1 % приводит к приросту энергоёмкости стали на 7 кг у.т./т стали, ввиду необходимости увеличения расхода чугуна для сходимости теплового баланса плавки, а увеличение содержания углерода в чугунах на 0,1 % снижает энергоёмкость стали на 3,4 кг у.т./т стали.

На втором этапе исследовали влияние расхода и состава шихтовых материалов на изменение удельного расхода металлошихты и энергоёмкости стали (рис. 8–12).

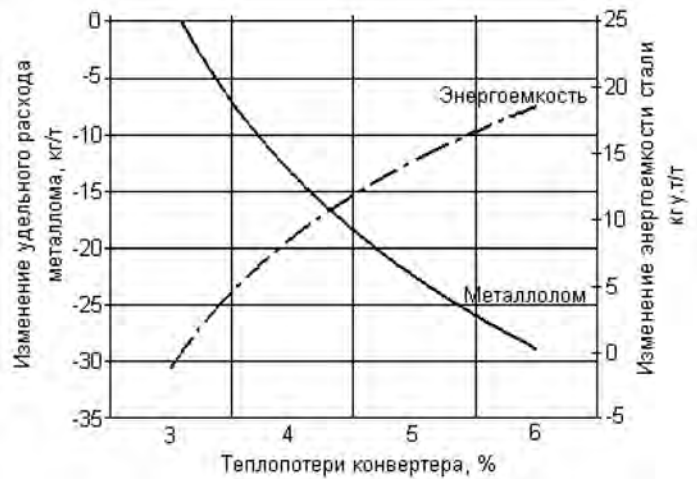


Рис. 6. Номограмма для определения влияния теплопотерь конвертера на изменение удельного расхода металлолома и энергоёмкости стали



Рис. 7. Номограмма для определения влияния содержания углерода в чугунах на изменение удельного расхода металлошихты и энергоёмкости стали

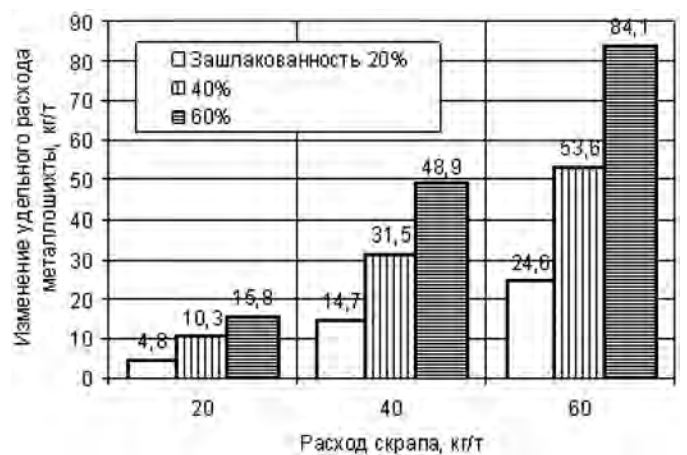


Рис. 8. Влияние расхода и различной степени зашлакованности скрапа на удельный расход металлошихты

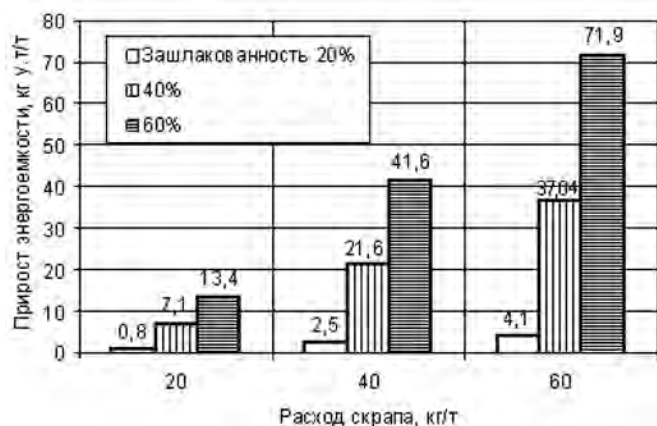


Рис. 9. Влияние расхода и различной степени зашлакованности скрапа на прирост энергоёмкости стали



Рис. 10. Номограмма влияния расхода твердого чугуна на изменение расхода металлошихты и энергоёмкости стали

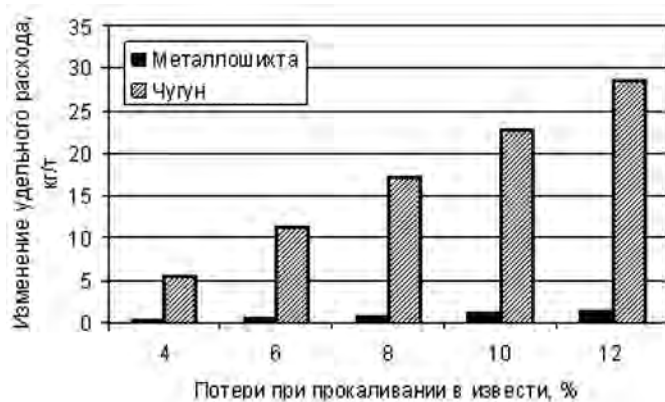


Рис. 11. Влияние роста потерь при прокаливании в извести на изменение удельного расхода чугуна и металлошихты

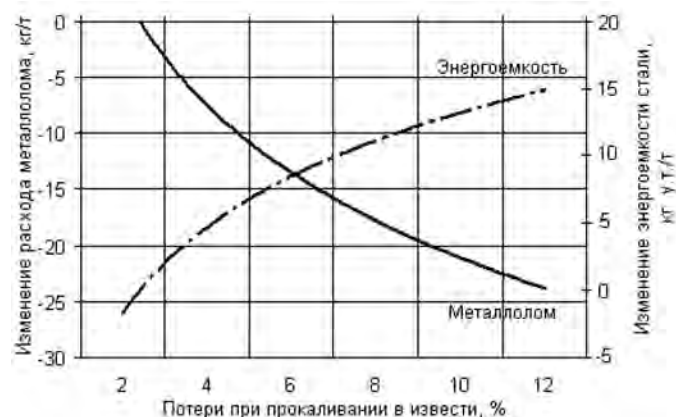


Рис. 12. Номограмма для определения влияния потерь при прокаливании в извести на изменение удельного расхода металлолома и энергоёмкости стали

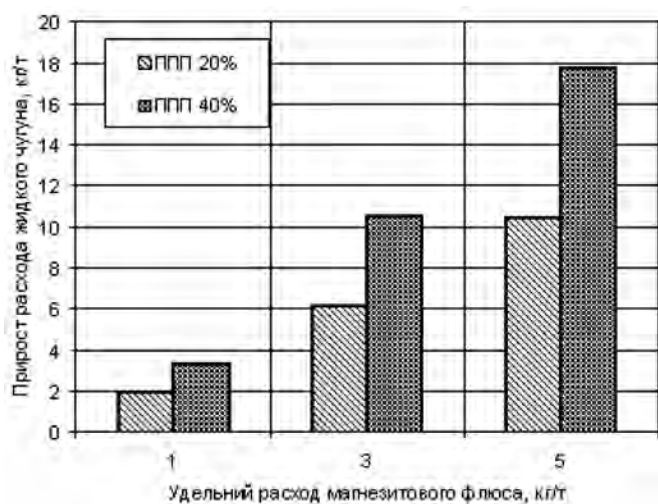


Рис. 13. Влияние расхода и роста потерь при прокаливании в магнезитовом флюсе на изменение удельного расхода чугуна



Рис. 14. Номограмма для определения влияния расхода магнезитового флюса на изменение удельного расхода металлолома и энергоёмкости стали

На рис. 8 и 9 приведены данные о влиянии расхода скрапа, используемого в качестве заменителя стального металлолома, и его зашлакованности на показатели конвертирования

металла. Учитывая, что энергоёмкость скрапа значительно меньше стального металлолома, следовало ожидать снижения энергозатрат при выплавке стали. Однако полученные данные

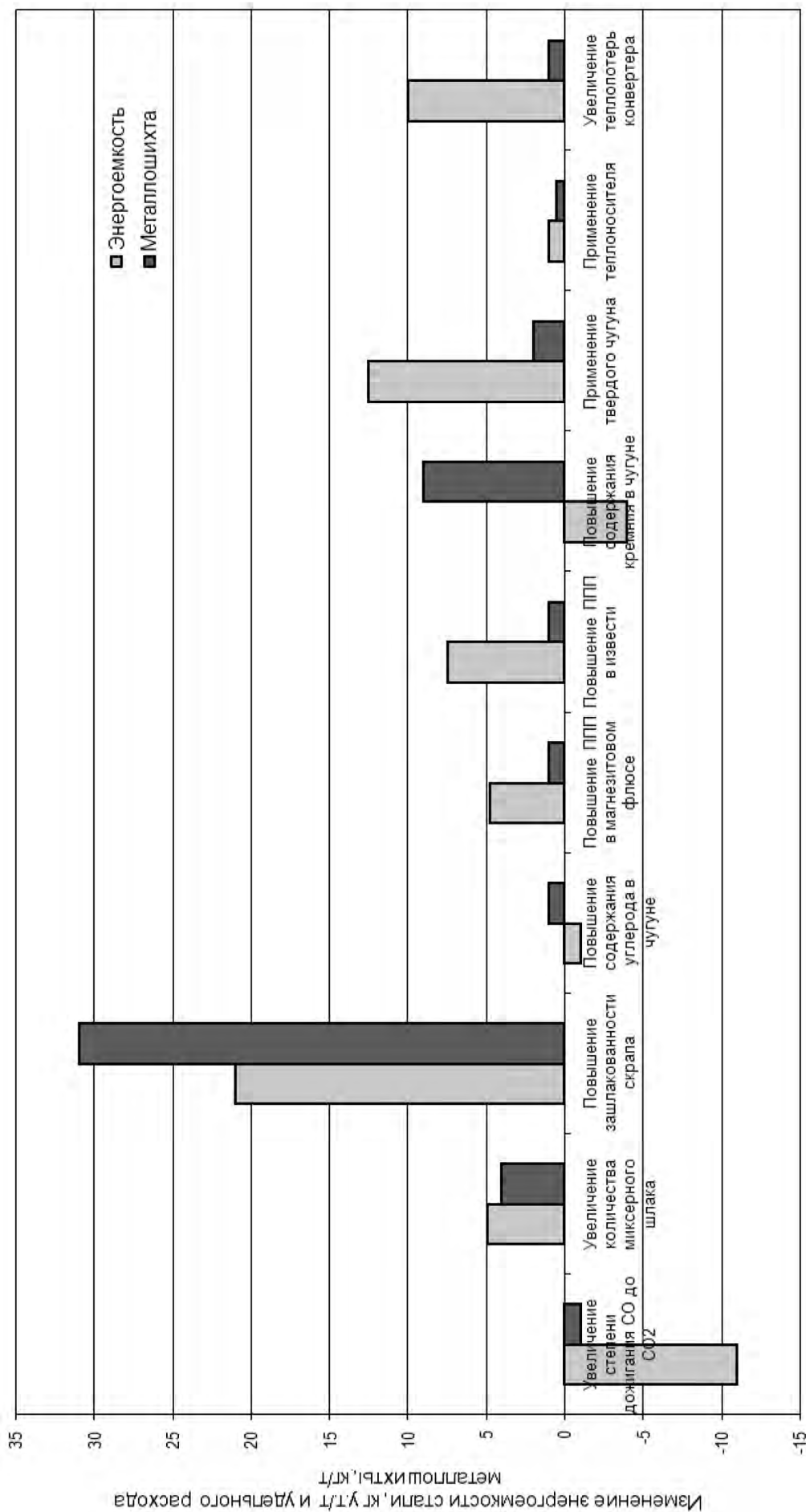


Рис. 15. Диаграмма средних значений изменения энергоёмкости стали и расхода металлошихты

свидетельствуют о значительном росте расхода металлошихты и, соответственно, энергоемкости стали.

В связи с дефицитностью стального металлолома все чаще конвертерные цеха используют в составе шихты твердый чугун. Анализ результатов моделирования конвертерной плавки (рис. 10) показал, что использование твердого чугуна приводит к увеличению расхода металлошихты, флюсующих добавок и как следствие – значительному повышению энергоемкости стали. Здесь необходимо отметить, что использование твердого чугуна в некоторой мере улучшает тепловой баланс плавки. Так, при расходе твердого чугуна 10 кг/т расход жидкого чугуна снижается на 0,7–0,9 кг/т.

Данные о влиянии качества и расхода флюсующих добавок, используемых в ходе конвертерной плавки, приведены рис. 11–14. Установлено, что увеличение потерь при прокаливании в извести и магнезитовом флюсе приводит к значительному росту удельного расхода металлошихты и энергоемкости стали. Здесь необходимо отметить, что при расчете энергоемкость извести и магнезитового флюса принимали постоянной, без учета возможного ее изменения в зависимости от содержания  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ .

На основании выполненных исследований составлена диаграмма (рис. 15) средних значений изменения энергоемкости стали и расхода металлошихты для различных вариантов технологии конвертерной плавки, находящихся применение на отечественных металлургических предприятиях.

**Выводы.** Выполненные исследования позволили определить влияние применяемых технологий и качественных характеристик материалов конвертерной плавки на изменение значений энергоемкости стали и расхода металлошихты. Полученные данные показывают, что использование для решения текущих производственных задач добавочных материалов в конвертерной плавке, таких как скрап, твердый чугун, магнезитовый флюс, теплоноситель, приводит к значительному росту энергоемкости стали (до 42 кг у.т./т). При этом, что особенно сказывается на технико-экономических показателях работы конвертера, наблюдается также и увеличение расхода металлошихты.

Наиболее привлекательными, с точки зрения снижения энергоемкости стали, являются технологические решения, направленные на повышение в первую очередь дожигания  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$  в полости конвертера. Следует отметить, что повышение содержания кремния и углерода в

чугуне также обеспечивает снижение энергоемкости стали.

Таким образом, современный этап конвертерного производства характеризуется разнообразием технологий и материалов, применяемых в ходе конвертирования металла, что в большинстве случаев, приводит к росту энергоемкости жидкой стали. Поэтому решать проблему снижения материало- и энергозатрат в конвертерном производстве необходимо путем «очистки» плавки от применения дополнительных материалов и разработки технологических схем производства стали в зависимости от сортамента выплавляемой продукции, материальной и технической базы конкретного металлургического предприятия.

### Библиографический список / References

1. Тепловая работа кислородных конвертеров / В. И. Баптизманский, Б. М. Бойченко, В. П. Черевко. – М.: Металлургия, 1988. – 174 с.  
Baptizmansky V. I., Boychenko B. M., Cherevko V. P. *Teplovay rabota kislorodnih konverterov*. Moscow, Metallurgiya, 1988, 174 p.
2. Бойченко Б. М. Конвертерне виробництво сталі / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. – 454 с.  
Boychenko B. M., Ohotskiy V. B., Harlashin P. S. *Konverterne virobnictvo stali*. Dnipropetrovsk, Dnipro-VAL, 2004, 454 p.
3. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С. В. Колпаков, Р. В. Старов, В. В. Смоктий [и др.]; под общ. ред. С. В. Колпакова. – М.: Машиностроение, 1991. – 464 с.  
Kolpakov S. V., Starov R. V., Smoktij V. V. *Tehnologiya proizvodstva stali v sovremennih konverternih cehah*. Moscow, Mashinostroenie, 1991, 464 p.
4. Кудрин В. А. Металлургия стали / В. А. Кудрин. – М.: Металлургия, 1996. – 488 с.  
Kudrin V. A. *Metallurgiya stali*. Moscow, Metallurgiya, 1996, 488 p.
5. Баптизманский В. И. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса / В. И. Баптизманский, В. Б. Охотский. – Киев; Донецк: Вища шк. головное изд-во, 1982. – 182 с.  
Baptizmansky V. I., Ohotskiy V. B. *Fiziko-himicheskie osnovi kislorodno-konverternogo processa*. Kiev; Doneck, Vishc. shk., 1982, 182 p.
6. Металлолом в шихте кислородных конвертеров / В. И. Баптизманский, Б. М. Бойченко, Е. В. Третьяков. – М.: Металлургия, 1982. – 136 с.  
Baptizmansky V. I., Boychenko B. M., Tretjakov E. V. *Metallolom v shihthe kislorodnih konverterov*. Moscow, Metallurgiya, 1982, 136 p.

**Purpose:** Analysis of the impact of uncontrolled BOF melting parameters (degree of post-combustion CO to CO<sub>2</sub>, carbon and silicon content in the pig iron, specific consumption of fuel consumption, the heat losses of the BOF and others) on the material and energy consumption of steel.

**Methodology:** The study was performed by using of mathematical modeling of BOF melt based on the thermal and mass balances.

**Findings:** The paper describes analysis of the influence of the main parameters and characteristics of charge materials used in the BOF melting on metal charge and energy consumption. It is shown that for resolving of current industrial problems the use of additional materials in the BOF process, such as scrap, solid iron, magnesia flux, heat carrier results to a significant increase in

energy consumption of steel up to 42 kilogram of coal equivalent / t.

**Originality:** The influence of uncontrollable factors of BOF melt on material and energy consumption of steel.

**Practical value.** Development of the theory and practice of BOF melt with the influence of uncontrollable parameters on material and energy consumption of steel.

**Key words:** converter, power consumption, metallic charge, steel, technology, consumption

Рекомендована к публикации  
д. т. н. К. Г. Низяевым

Поступила 07.11.2016



УДК 669.184.244.66

Наука

С. И. Семькин /к. т. н./, Т. С. Голуб /к. т. н./,  
Е. В. Семькина, С. А. Дудченко,  
В. В. Вакульчук

Институт черной металлургии НАН Украины,  
г. Днепро, Украина  
e-mail: isisemykin@gmail.com

## Поведение металлической фазы в шлаке в процессе продувки железом углеродистого расплава в конвертере

S. I. Semykin /Cand. Sci. (Tech.)/,  
T. S. Golub /Cand. Sci. (Tech.)/, E. V. Semykina,  
S. A. Dudchenko, V. V. Vakulchuk

Iron and steel institute of NAS of Ukraine,  
Dnipro, Ukraine  
e-mail: isisemykin@gmail.com

## Behaviour of the metal phase in slag during the blowing of iron-carbonaceous melt in the converter

**Цель.** Изучение особенностей формирования металлической фазы в шлаке в процессе продувки металла в конвертере, в том числе в условиях наложения низковольтного электрического потенциала на сталеплавильную ванну.

**Методика.** Промышленные эксперименты в 160-т конвертерах, отбор проб металла и шлака по технологическим периодам продувки плавки, анализ фракционного и химического состава металлической части шлака, аналитико-графическая оценка результатов экспериментов.

**Результаты.** Анализ фракционного состава корольков подтвердил наличие различных механизмов их поступления в шлаковый расплав: за счет газодинамического разбрызгивания кислородной струей и выносимых капелек металла с пузырьками CO. В работе показано позитивное влияние низковольтного потенциала на снижение количества корольков в шлаке.

**Научная новизна.** Показано, что подвод отрицательной полярности потенциала к фурме в наибольшей степени снижает общее количество корольков в шлаке, повышая при этом долю крупных капель, способных вернуться в металл. Установлено, что при достижении содержания углерода в металлическом расплаве уровней 0,25; 0,5 и 0,8% изменяется соотношение скоростей окисления углерода в пределах корольков и в основной массе сталеплавильной ванны, что, вероятно, связано со структурными изменениями, происходящими в металлическом расплаве.

**Практическая значимость.** Определяется разработкой эффективных ресурсосберегающих вариантов технологии конвертерной плавки на базе полученных в промышленных условиях новых научных