

# УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ЦЕХА

Л.А. Копцев, Ю.П. Журавлев

В статье рассматриваются подходы к управлению энергетической эффективностью электросталеплавильного цеха, приводятся эмпирические зависимости, позволяющие оптимизировать энергобаланс дуговой сталеплавильной печи при прогнозируемых изменениях стоимости входящих в него энергоресурсов.

*Ключевые слова:* электросталеплавильный цех, дуговая сталеплавильная печь, энергобаланс, энергетическая эффективность.

Металлургические предприятия являются наиболее крупными потребителями энергоресурсов. Затраты на обеспечение энергоресурсами составляют значительную долю себестоимости производства, при этом повышение качественных показателей и потребительских свойств продукции, снижение её себестоимости являются важнейшими приоритетами деятельности металлургических предприятий. В то же время повышение качественных показателей продукции может быть обеспечено только за счёт дополнительного потребления энергоресурсов соответствующими новыми агрегатами без увеличения объёмов продукции, что ведёт к повышению показателя её энергоёмкости. И вместе с тем, удельная энергоёмкость продукции остаётся показателем эффективности использования энергоресурсов на предприятиях и относится к основным показателям эффективности их деятельности. Снижение энергоёмкости продукции и финансовых затрат на обеспечение энергоресурсами (что зачастую не совпадает) является одной из основ выживания предприятий, поскольку в значительной степени определяет их конкурентоспособность.

Очень существенное влияние на изменение энергоёмкости продукции металлургического предприятия оказывает ввод в работу принципиально новых основных технологических агрегатов. Происходит это в силу многих причин: изменения структуры потребляемых энергоресурсов, перераспределения потоков сырья и промежуточной продукции, слабой загрузки нового оборудования на первых порах в силу его неосвоенности персоналом и других.

В апреле 2006 г. в ОАО «ММК» введена в работу дуговая сталеплавильная печь (ДСП) ёмкостью 185 т и образован электросталеплавильный цех. В сентябре того же года заработала вторая ДСП. В настоящее время в составе цеха имеются две ДСП, двухванный сталеплавильный агрегат

(ДСА), четыре агрегата внепечной обработки и три машины непрерывной разливки стали. Динамика затрат энергоресурсов на производство стали электросталеплавильным цехом в целом с учётом затрат предыдущих переделов (известково-доломитовое, горно-обогащительное и коксохимическое производства, выплавка чугуна) помесечно в 2006 г. (с момента ввода в работу первой ДСП) приведена на рис. 1. Диаграмма отражает значительный рост потребления энергоресурсов собственно электросталеплавильным цехом к концу года, что естественно в связи с ростом выплавки стали.

Динамика удельных затрат энергоресурсов на выплавку тонны стали электросталеплавильным цехом (ЭСЦ) с учётом затрат предыдущих переделов за тот же период приведена на рис. 2. Из последней диаграммы очевидно, что энергоёмкость выплавки стали электродуговым способом (ноябрь-декабрь - 4,4-4,7 ГДж/т) в 1,5 раза выше, чем мартеновским с кислородной продувкой (апрель - 3,0 ГДж/т), но при этом затраты энергоресурсов на весь цикл получения тонны стали с учётом предыдущих переделов снижаются в 1,8 раза - на 8,4 ГДж/т. Объясняется это явление значительно меньшей долей чугуна в загрузке ДСП по сравнению с долей чугуна в загрузке ДСА, а именно производство чугуна определяет 60% энергоёмкости стали на металлургическом предприятии полного цикла.

Основной объём стали в ОАО «ММК» выплавляется конвертерным способом. Для сравнения на рис. 3 приведена динамика удельных затрат энергоресурсов на выплавку тонны стали кислородно-конвертерным цехом (ККЦ) с учётом затрат предыдущих переделов за тот же период. Сравнение удельных расходов энергоресурсов на выплавку стали в этих двух цехах указывает на то, что энергоёмкость всего цикла производства стали в ЭСЦ (10,3 ГДж/т) почти на 43% ниже, чем в ККЦ (18,3 ГДж/т). Решающим фактором и в этом случае является соотношение долей жидкого чугуна в загрузке ДСП и конвертера в соответствии с требованиями организации технологического процесса. При этом удельные затраты энергоресурсов собственно ЭСЦ (4,53 ГДж/т) оказываются в 3,57 раза выше, чем конвертерного цеха (1,27 ГДж/т).

---

Копцев Леонид Алексеевич - к.т.н., начальник лаборатории анализа и управления энергоресурсами ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»; lak\_energy@mmk.ru.

Журавлев Юрий Петрович - главный энергетик ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»; jup@mmk.ru.

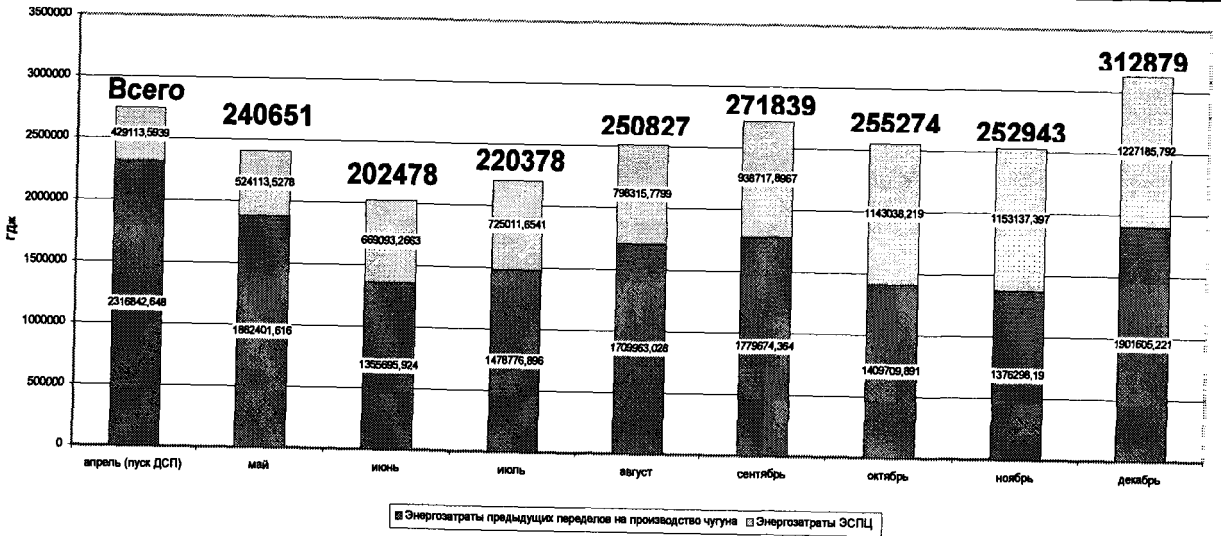


Рис. 1. Структура энергозатрат на производство стали ЭСПЦ в 2006 г.

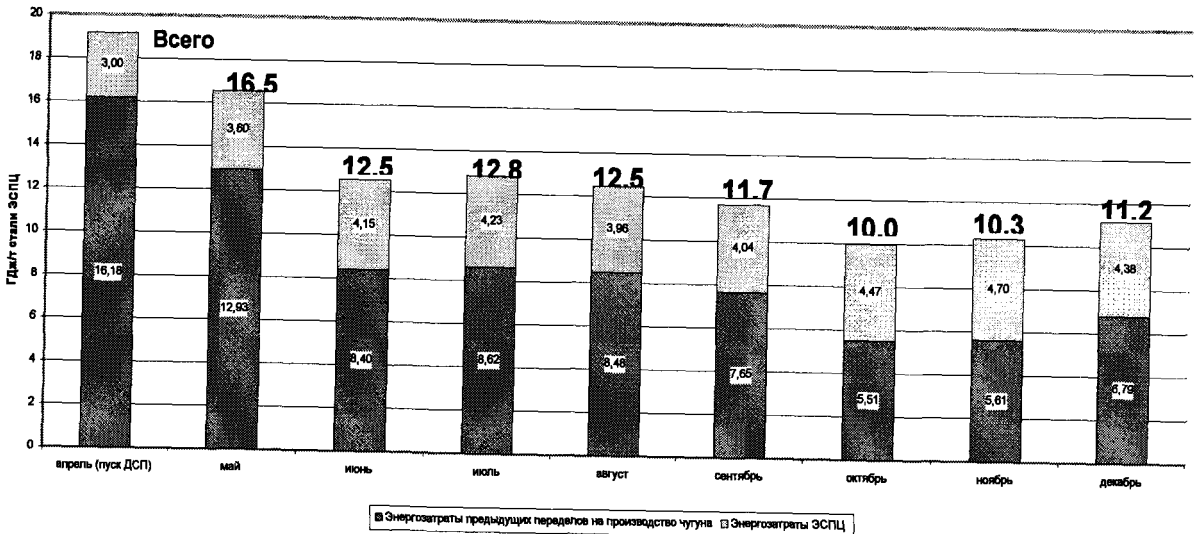


Рис. 2. Структура удельных энергозатрат на производство стали ЭСПЦ в 2006 г.

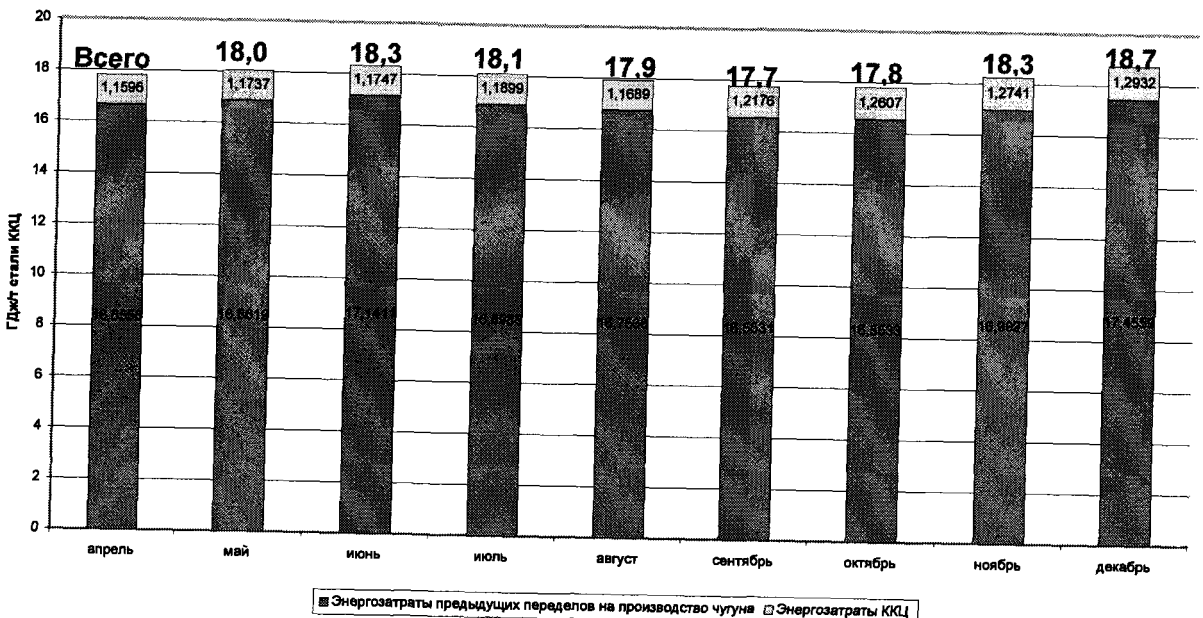


Рис. 3. Структура удельных энергозатрат на производство стали ККЦ в 2006 г.

Наращивание объёмов выплавки стали в ЭСПЦ по мере освоения оборудования определило снижение энергоёмкости продукции комбината с 6,52 Гкал/т стали в 2005 г. до 5,98 Гкал/т стали в 2006 г. Динамика снижения энергоёмкости продукции комбината помесечно в 2006 г. приведена на рис. 4. Наиболее значимыми факторами в этом процессе являются, конечно, собственно наращивание объёмов выплавки стали и среднее снижение доли чугуна при выплавке стали. Косвенной характеристикой последнего фактора может быть принято соотношение выплавки чугуна и стали на комбинате в целом: в 2005 г. этот показатель составил 848 кг/т, а в 2006 г. снизился до 781,4 кг/т в среднем по году.

Общее снижение энергоёмкости продукции комбината за счёт повышения загрузки ЭСПЦ целесообразно закрепить и усилить снижением удельных затрат энергоресурсов непосредственно в цехе за счёт освоения оборудования и совершенствования энергобаланса цеха, не забывая при этом о стоимости различных энергоресурсов и необходимости снижения энергозатрат, то есть финансовых затрат на обеспечение основного производства энергоресурсами. Динамика потребления энергоресурсов электросталеплавильным цехом в целом, с учётом физического тепла жидкого чугуна, в 2006 г. (с момента ввода в работу первой ДСП) приведена на рис. 5.

Динамика изменения удельного расхода энергоресурсов (включая физическое тепло жидкого чугуна) электросталеплавильным цехом в целом на тонну выплавляемой в цехе стали за тот же период приведена на рис. 6. В удельных затратах энергоресурсов, а более точно, в энергоёмкости технологического процесса ЭСПЦ (на примере ноября) электроэнергия составляет наиболее крупную долю - 60,3 %, природный газ - 16,4 %, кислород - 9,1 %. Эти энергоресурсы используются в технологическом процессе выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах. Доля физического тепла жидкого чугуна в структуре удельных затрат энергоресурсов ЭСПЦ с 24,8 % в апреле снизилась до 6,6 % в ноябре. Необходимо отметить, что в данных, использованных для построения диаграмм на рис. 1-3, физическое тепло жидкого чугуна, во избежание двойного счёта, не учитывается, поскольку оно определяется потреблением первичных энергоресурсов (природного газа, коксующегося угля) при выплавке чугуна. Расчёты проведены на основе методики сквозного энергетического анализа [1], применяемой в ОАО «ММК» для мониторинга энергоёмкости продукции комбината с 1996 г.

В процессах плавления и доводки в ДСП используются три энергоресурса: электрическая энергия, природный газ и кислород. Основную долю энергии, необходимой для расплавления шихтовых материалов и доводки расплава, в печь вносит, как видно из диаграммы на рис. 6, электроэнергия. Кроме того, значительную долю в

энергобалансе ДСП составляет физическое тепло жидкого чугуна, являющегося частью загрузки печи. Двухвальный сталеплавильный агрегат (ДСА) для своей работы потребляет кислород (продувка кислородом обеспечивает основную долю тепловыделения в период плавления), природный газ и пар. Так же существенную долю тепла в ДСА вносит жидкий чугун, тем более что жидкий чугун в загрузке ДСА (как уже говорилось выше) составляет значительно большую долю, нежели в загрузке дуговой печи. Таким образом, электроэнергия, природный газ, кислород и физическое тепло чугуна, составляющие в сумме решающую долю 92,4 % в энергобалансе ЭСПЦ, используются в технологическом процессе различных по принципу действия сталеплавильных агрегатов. Существующая система учёта энергоресурсов внутри цеха не позволяет достоверно выделить доли каждого из основных технологических агрегатов в потреблении перечисленных энергоресурсов в структуре энергобаланса цеха. По соотношению же объёмов выплавки стали между дуговыми печами и ДСА можно сделать вывод, что доля ДСП в энергобалансе ЭСПЦ составляет 75-80 %. Таким образом, в оптимизации работы ДСП могут быть получены наибольшие результаты энергосбережения.

Обычно под энергосбережением подразумевается снижение физических объёмов потребления энергоресурсов предприятием на производство единицы продукции, что ведёт к снижению показателя энергоёмкости. Основными направлениями энергосберегающей деятельности являются повышение эффективности использования энергоресурсов в технологических процессах производства продукции, оптимизация энергобаланса предприятия в целом и отдельных технологических цехов - потребителей энергоресурсов. При этом *важнейшим результатом энергосбережения предполагается снижение энергозатрат*, то есть финансовых затрат на покупку и выработку внутри предприятия энергоресурсов для обеспечения производственных процессов, и в конечном итоге - уменьшение доли энергозатрат в суммарных затратах на производство продукции. Такая постановка задачи заставляет обратить внимание на тот факт, что снижение финансовых затрат на обеспечение энергоресурсами металлургического предприятия иногда сопровождается повышением энергоёмкости продукции.

С этих позиций рассмотрим структуру потребления энергоресурсов непосредственно дуговыми печами. С января 2007 г. организован автоматический учёт энергоресурсов, потребляемых печами, что даёт возможность анализировать энергобаланс ДСП с учётом влияния некоторых технологических, производственных факторов. Динамика удельного энергопотребления ДСП в 2007 г. приведена на рис. 7. При этом динамика структуры энергобаланса ДСП (по энергосодержанию) приведена на рис. 8.

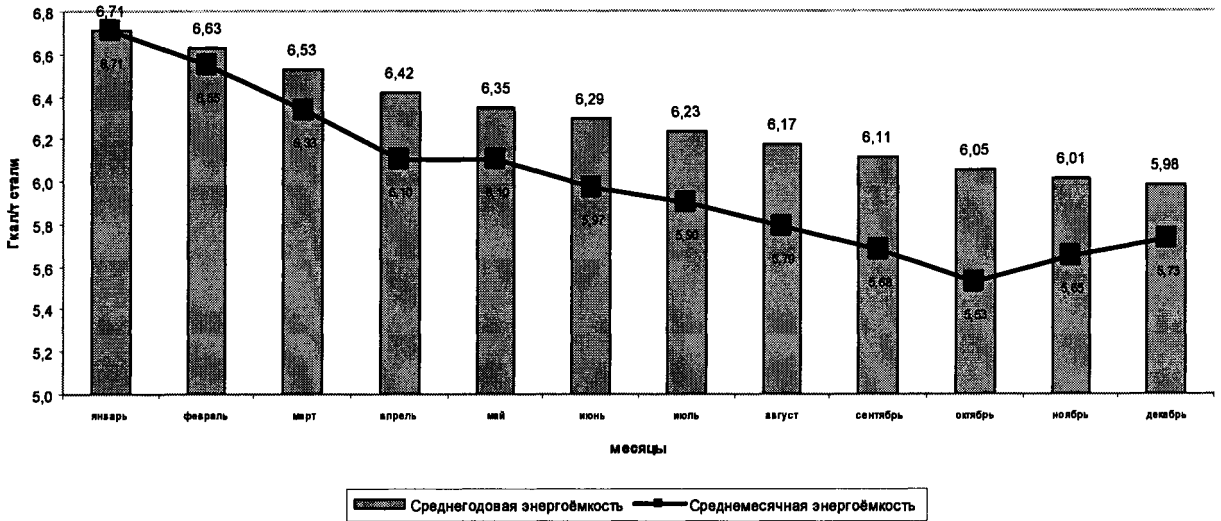


Рис. 4. Динамика энергоёмкости стали ОАО «ММК» в 2006 г.

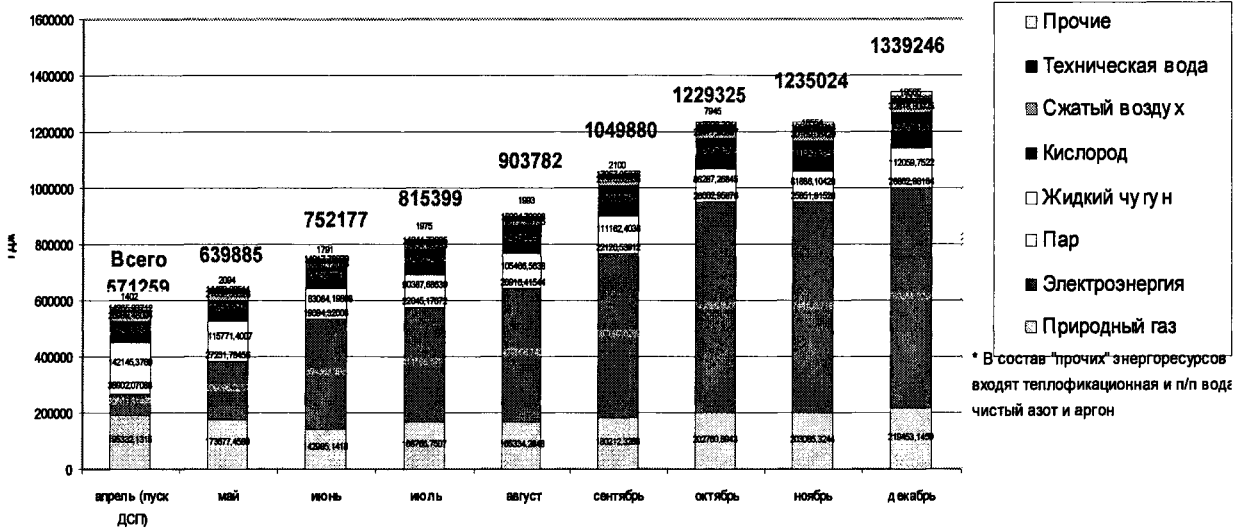


Рис. 5. Структура потребления энергоресурсов и жидкого чугуна ЭСПЦ в 2006 г.

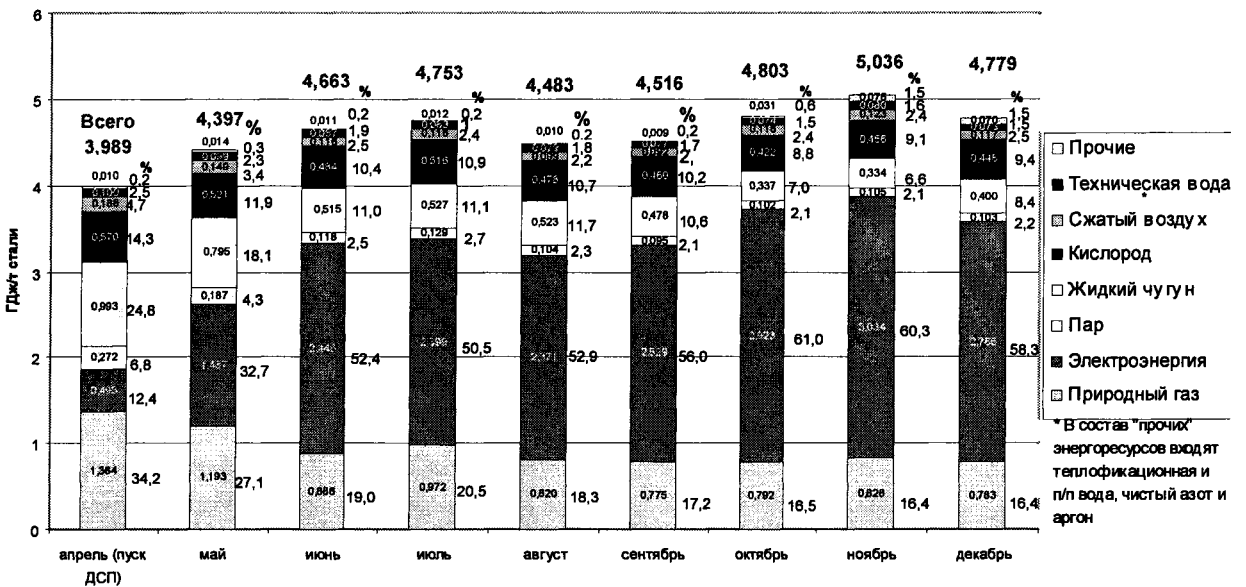
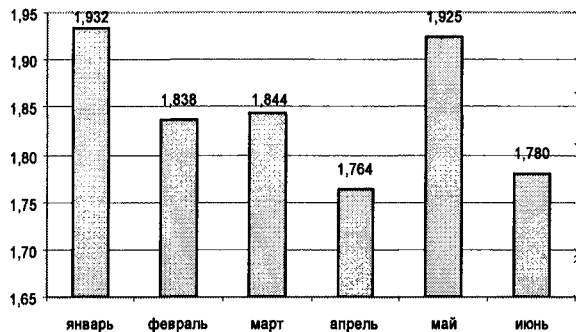
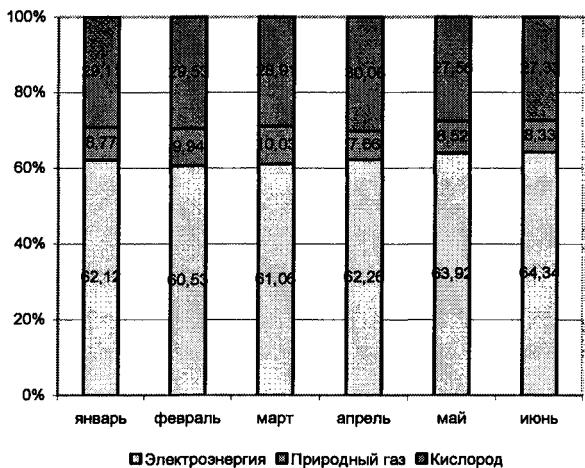


Рис. 6. Структура удельного потребления энергоресурсов и жидкого чугуна ЭСПЦ в 2006 г.



**Рис. 7. Удельное энергопотребление ДСП в 2007 г.**

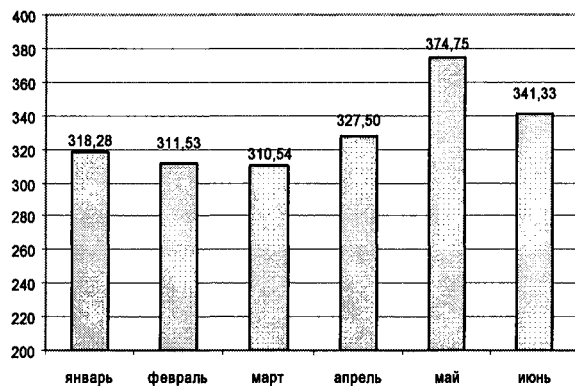


**Рис. 8. Энергобаланс ДСП (энергия) в 2007 г.**

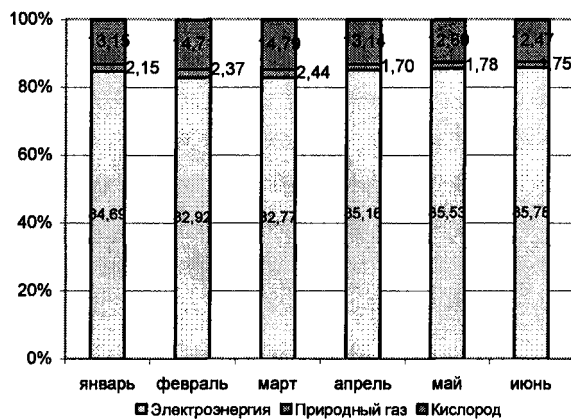
Необходимо отметить, что при построении диаграмм на рис. 7, 8 и последующих учитываются данные об объёмах потребления только электроэнергии, природного газа и кислорода, используемых для осуществления технологического процесса выплавки стали в ДСП (приведение к одним единицам измерения энергии осуществлялось на основе технических коэффициентов эквивалентирования энергоресурсов). Энергосодержание кислорода определялось количеством тепла, выделяющегося при окислении углерода чугуна единицей объема газа. Динамика изменения *удельных энергозатрат*, то есть финансовых затрат на обеспечение перечисленными энергоресурсами технологического процесса ДСП, имеет существенно отличающийся характер и приведена на рис. 9. Структура удельных энергозатрат или энергобаланса ДСП в стоимостном выражении ежемесячно в 2007 г. приведена на рис. 10.

Сопоставление удельного энергопотребления ДСП (см. рис. 7) и удельных энергозатрат (см. рис. 9) для обеспечения технологического процесса в ДСП указывает на слабую коррелированность этих показателей. Безусловно, что на удельное энергопотребление оказывает влияние большое количество режимных технологических и производственных факторов, а также и структура потребления энергоресурсов (см. рис. 8) и их стоимость. Последний фактор кардинально меняет структуру энергобаланса ДСП (см. рис. 10) в случае представ-

ления его в стоимостном выражении. Стоимость энергоресурсов (единицы энергии, руб/ГДж) ежемесячно за первую половину 2007 г. приведена на рис. 11. Для повышения наглядности влияния изменений стоимости энергоресурсов на энергозатраты для обеспечения выплавки стали в ДСП приведены *соотношения* стоимости энергоресурсов (на единицу энергии) в 2007 г. по отношению к природному газу (рис. 12) и к стоимости соответствующих энергоресурсов в январе (рис. 13).



**Рис. 9. Удельные энергозатраты ДСП в 2007 г., руб./т стали**



**Рис. 10. Энергобаланс ДСП (стоимость) в 2007 г.**

Очевидно, что электроэнергия является наиболее дорогим энергоресурсом в пересчёте на единицу энергии (см. рис. 12) даже с учётом покрытия части потребности ДСП выработкой электроэнергии на собственных электростанциях ОАО «ММК». Именно это обстоятельство и увеличивает долю электроэнергии в энергобалансе ДСП при его стоимостном представлении. Одновременно стоимость электроэнергии для ДСП очень вариативна: и по сравнению с природным газом, и по отношению к данным января. Доля собственной электроэнергии в потреблении и определяет в наибольшей степени изменения её стоимости для цеха. Однако, стоимость единицы энергии кислорода, при относительно небольшой её величине, характеризуется наибольшим диапазоном изменений (см. рис. 13).

Рассмотрим возможность оптимизации энергобаланса ДСП на основе метода линейного про-

граммирования [2]. Задача решается с целью снижения *энергозатрат* до минимально возможного уровня при соблюдении условия затрат необходимого количества энергоресурсов для обеспечения технологических операций расплавления и доводки металла в печи. В качестве необходимого количества энергии для обеспечения проведения технологических операций принимаем среднюю за месяц величину суммарных удельных затрат энергоресурсов для ДСП. Допущение это вынужденное, с тем чтобы упростить задачу, поскольку очевидно, что необходимо добиваться снижения самой этой величины удельных затрат энергоресурсов, однако это является целью сопряжённой, но всё же другой задачи. Для выражения необходимых удельных затрат энергоресурсов (ГДж/т) получаем следующее уравнение:

$$x_1 k_1 + x_2 k_2 + (x_3 - 2x_2) k_3 = \mathcal{E}_{\text{мин}}, \quad (1)$$

где  $x_1$  – удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т;  $x_2$  – удельный расход природного газа, м<sup>3</sup>/т;  $x_3$  – удельный расход кислорода, м<sup>3</sup>/т;  $k_1, k_2, k_3$  – переводные коэффициенты к общим единицам измерения энергии, соответственно, электроэнергии, природного газа и кислорода;  $\mathcal{E}_{\text{мин}}$  – удельный минимально необходимый суммарный расход энергоресурсов, ГДж/т. При формировании энергетического уравнения (1) принято, что кислород расходуется на обеспечение сжигания природного газа в соотношении 2 к 1 и на окисление углерода в чугуне.

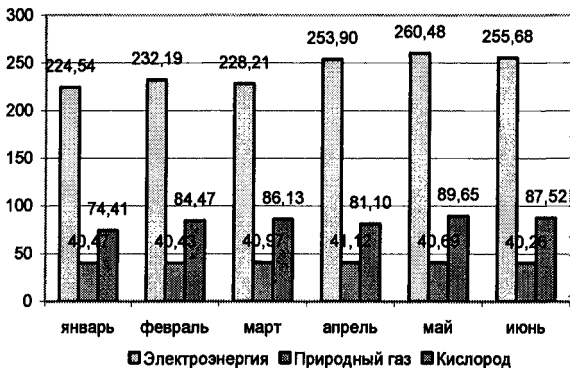


Рис. 11. Стоимость энергоресурсов (единицы энергии) для ДСП в 2007 г., руб./ГДж

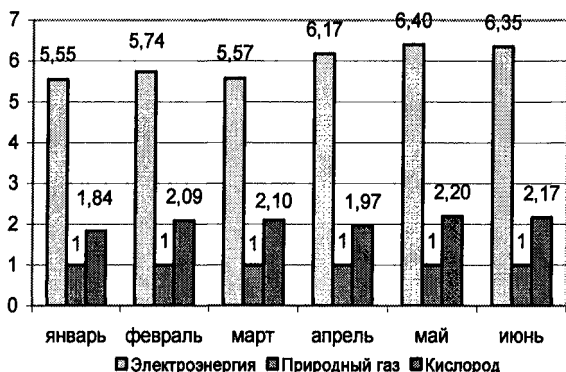


Рис. 12. Соотношение стоимости энергоресурсов (единицы энергии) для ДСП в 2007 г. по отношению к природному газу, относительные единицы

Поскольку целью нашей работы является снижение энергозатрат на обеспечение выплавки стали в ДСП, то вторым уравнением – целевым, безусловно, должно быть уравнение, определяющее удельные энергозатраты на получение тонны стали, руб./т:

$$x_1 C_1 + x_2 C_2 + x_3 C_3 = Z_{\text{уд}} \geq \min, \quad (2)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  – цены в рублях на единицу физической величины энергоресурсов, соответственно, на электроэнергию, природный газ и кислород;  $Z_{\text{уд}}$  – суммарные удельные затраты на выплавку 1 т стали.

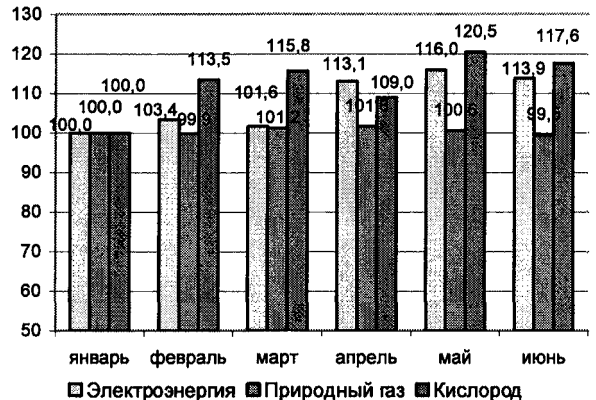


Рис. 13. Соотношение стоимости энергоресурсов (единицы энергии) для ДСП в 2007 г. по отношению к данным января, %

Таким образом, имеется два уравнения с тремя неизвестными. Решение такой задачи вполне возможно методом линейного программирования. Для этого необходимо определить область допустимых решений путём учёта и формулирования ограничений на переменные. Первым очевидным ограничением является условие неотрицательности значений переменных – потребление энергоресурсов не может быть отрицательным:

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0. \quad (3)$$

Другие ограничения определяются пропускной способностью фурм, горелок. Пересчёт паспортных характеристик упомянутых агрегатов от часовой производительности к возможным максимальным удельным расходам на тонну стали природного газа и кислорода приводит к следующим значениям:

$$x_2 \leq 19 \text{ м}^3/\text{т}; \quad (4)$$

$$x_3 \leq 65 \text{ м}^3/\text{т}. \quad (5)$$

Дополнительным ограничением, определяющимся требованиями технологии, является необходимость по меньшей мере двукратного превышения расхода кислорода по отношению к природному газу:

$$2x_2 \leq x_3. \quad (6)$$

В качестве условий, определяющих нижние границы величин параметров, примем близкие к средним фактическим за соответствующий месяц значения параметров. Для февраля 2007 г. минимальные ограничения примут следующие значения:

$$x_2 \geq 5 \text{ м}^3/\text{т}; \quad (7)$$

$$x_3 \geq 52 \text{ м}^3/\text{т}. \quad (8)$$

В данной работе не учитываются возможные ограничения, вытекающие из баланса кислорода, природного газа, определяющиеся пропускной способностью кислородных и газовых магистралей, достаточным количеством жидкого чугуна и, соответственно, достатком углерода для окисления предполагаемым количеством кислорода и другие. Это факторы для дальнейшего исследования. В настоящей работе изучаются основные тенденции влияния некоторых факторов на энергозатраты, энергоёмкость электросталеплавильного производства. В результате, область допустимых решений для задачи (1)–(2), построенная на основе ограничений (3)–(8) с использованием данных февраля 2007 г. и отвечающая условию достаточности суммарных затрат энергоресурсов для выполнения технологических операций расплавления и доводки металла, приведена на рис. 14.

Выразим переменную  $x_1$  через две другие. Выражение (1), после преобразований и подстановки численных значений коэффициентов, принимает вид:

$$x_1 = 510,556 - 2,187x_2 - 3,559x_3. \quad (9)$$

Выражение (2), после подстановки (9), преобразований и подстановки численных значений цен энергоресурсов, принимает вид:

$$Z_{уд} = 426,763 - 0,473x_2 - 2,114x_3 \geq \min. \quad (10)$$

Иследуем полученную область допустимых решений. Из теории математического программирования известно, что наилучшее решение находится на границе области. На рис. 14 исходный режим, характеризующийся фактическими средними за месяц удельными расходами энергоресурсов, обозначен точкой И. Возможные решения определяются из (9) и могут быть представлены семейством параллельных прямых, имеющих наклон влево от оси ординат. Причём графики допустимых решений смещаются вправо по мере снижения величины параметра  $x_1$  (удельного расхода электроэнергии) по отношению к исходной. Значения удельных энергозатрат, соответствующих точкам возможных

решений А – М, определяются из (10). Результаты расчётов приведены в таблице.

Расчёты удельных затрат на производство электростали в феврале 2007 г.

| Точка | $x_1$ , кВт·ч/т | $x_2$ (ПГ), м <sup>3</sup> /т | $x_3$ (O <sub>2</sub> ), м <sup>3</sup> /т | Затраты, руб./т |
|-------|-----------------|-------------------------------|--|-----------------|
| И     | 309,03          | 5,45                          | 53,3                                       | 311,57          |
| А     | 300             | 11,63                         | 52   | 311,27          |
| Б     | 300             | 5                             | 56,1                                       | 305,79          |
| В     | 283,89          | 19                            | 52   | 307,78          |
| Г     | 283,89          | 5                             | 60,6                                       | 296,22          |
| Д     | 280             | 19                            | 53,1                                       | 305,47          |
| Е     | 280             | 5                             | 61,7                                       | 293,91          |
| Ж     | 268,24          | 19                            | 56,4                                       | 298,48          |
| З     | 268,24          | 5                             | 65   | 286,92          |
| К     | 250             | 19                            | 61,5                                       | 287,65          |
| Л     | 250             | 13,34                         | 65   | 282,97          |
| М     | 237,62          | 19                            | 65   | 280,29          |

Необходимо отметить, что наилучшее решение, которому соответствуют наименьшие удельные энергозатраты, находится в точке М, для которой характерны максимально возможные удельные расходы природного газа и кислорода и наименьшее удельное потребление электроэнергии. Для всех промежуточных решений характерно следующее положение: более выгодно работать с минимальными удельными расходами природного газа до достижения точки З (см. пары точек А – Б, В – Г, Д – Е, Ж – З), а в дальнейшем – на границе максимальных удельных расходов кислорода (см. пару точек К – Л). Иными словами, наиболее целесообразно работать на нижней и правой границах зоны допустимых решений, а именно, с максимально возможным превышением расхода кислорода над расходом природного газа. Аналогичные результаты достигаются и в расчётах для других месяцев, например, марта и апреля, в том числе наилучший результат достигается близкий к февральскому: 279,5 руб./т в марте и 281,25 руб./т в апреле. Следу-

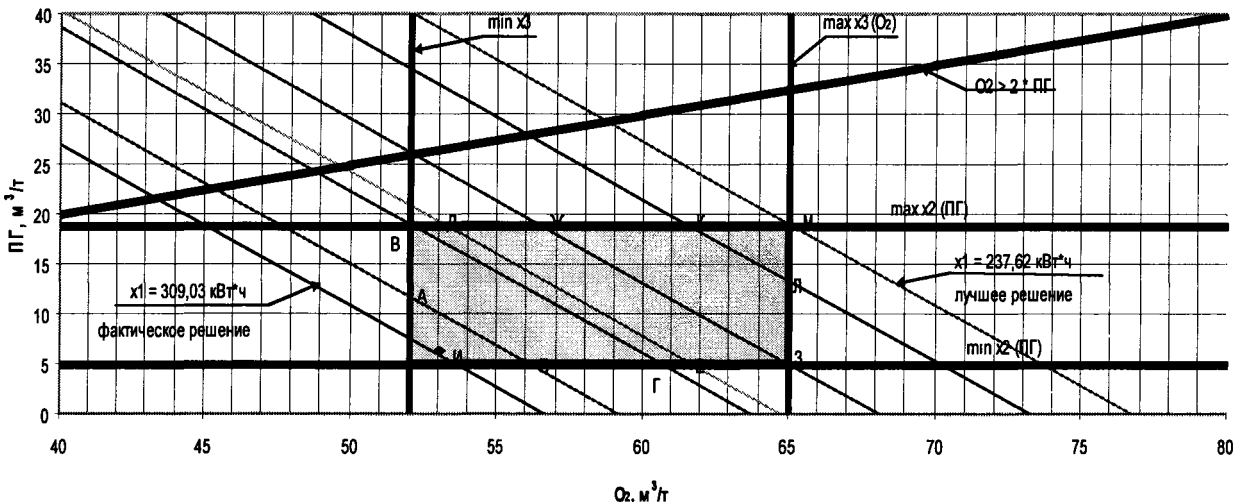


Рис. 14. Область допустимых решений (февраль 2007 г.)

ет отметить, что с помощью рассмотренной оптимизации энергобаланса (пока без учёта упомянутых выше дополнительных факторов) теоретически возможно снижение удельных энергозатрат для обеспечения работы ДСП на 10 %.

Обследование работы ДСП было проведено и на основе статистического анализа производственных и технологических факторов с использованием метода пошаговой линейной корреляции. Базу для исследования составили все параметры, отражаемые количественными характеристиками в паспортах плавов печей и фиксируемые автоматически. Все марки выплавляемой стали для облегчения возможности анализа были сгруппированы в четыре группы по следующим признакам: первая группа – легированные ( $Si \geq 1,0\%$  или  $Mn \geq 1,0\%$ ), вторая группа – высокоуглеродистые ( $C > 0,30\%$ ), третья группа – низкосернистые ( $S < 0,010\%$ ), четвёртая группа – рядовые ( $C < 0,30\%$ ). Объём выборки ограничен двумя месяцами: с 1 января по 28 февраля 2007 г. Значения параметров усреднялись в пределах соответствующих суток для каждой из печей отдельно. Таким образом, обследование характеристик работы каждой из печей проводилось отдельно, поскольку срок эксплуатации печей измеряется пока месяцами и значительно различается. Фактор освоенности оборудования нельзя сбрасывать со счетов.

Поскольку электроэнергия составляет наиболее значительную долю в энергобалансе ДСП и по энергосодержанию, и в денежном выражении, то статистический анализ был направлен, главным образом, на выявление факторов, наиболее значимо влияющих на удельный расход электроэнергии. Наиболее значимыми, оказывающими наиболее сильное влияние на удельный расход электроэнергии ДСП-2, являются следующие факторы: количество лома в загрузке печи, масса плавки, количество плавов металла четвёртой группы за сутки. В приведённом перечислении факторы расставлены по степени уменьшения их влияния. Множественная линейная зависимость, полученная на основе указанного статистического анализа, выглядит следующим образом:

$$w_2 = 290,7 + 1,05 \cdot \text{«Лом»} - 0,9375 \cdot \text{«Плавка»} - 1,05 \cdot \text{Me4}, \quad (11)$$

где  $w_2$  – удельный расход электроэнергии на ДСП-2, кВт·ч/т стали; «Лом» – средняя масса лома в загрузке печи за сутки, т; «Плавка» – средняя масса плавки (слитого металла) за сутки, т; Me4 – среднее количество плавов металла четвёртой группы за сутки, штук. Структура зависимости указывает на то, что увеличение загрузки лома определяет повышение удельного расхода электроэнергии на выплавку стали, увеличение же массы плавки и количества плавов рядовых сталей ведёт к снижению удельного расхода электроэнергии.

Аналогичный статистический анализ для ДСП-1 даёт существенно отличающиеся результаты. При этом первыми двумя наиболее значимыми остаются те же показатели, что и для ДСП-2, и к ним добавляются степень окисленности металла, количество плавов металла третьей группы и температура металла при сливе. Множественная линейная зависимость удельного расхода электроэнергии на ДСП-1 от указанных факторов выглядит следующим образом:

$$w_1 = 132,8 + 1,48 \cdot \text{«Лом»} - 0,7419 \cdot \text{«Плавка»} + 0,03148 \cdot \text{«Окисл»} + 3,993 \cdot \text{Me3} + 0,02001 \cdot \text{«Темпер»}, \quad (12)$$

где  $w_1$  – удельный расход электроэнергии на ДСП-1, кВт·ч/т стали; «Лом» – средняя масса лома в загрузке печи за сутки, т; «Плавка» – средняя масса плавки (слитого металла) за сутки, т; «Окисл» – средняя степень окисленности металла за сутки, ppm; Me3 – среднее количество плавов металла третьей группы за сутки, штук; «Темпер» – средняя температура металла при сливе за сутки, °С.

Структура выражений (11) и (12) в главном подтверждает результаты, полученные выше методом линейного программирования: увеличение количества лома в загрузке ДСП, приводящее к повышению удельного расхода электроэнергии, определяет снижение количества жидкого чугуна и тем самым ограничивает применение кислородного дутья. А между тем соотношение цен на энергоресурсы диктует противоположную стратегию – повышение доли кислорода в энергобалансе ДСП, для чего необходимо достаточное количество жидкого чугуна либо добавление углеродистой массы в плавку. Здесь опять пока не учитывается стоимость упомянутых компонент процесса производства стали.

Рассмотренные закономерности позволяют выбирать пути оптимизации энергобаланса ДСП при прогнозируемых изменениях стоимости входящих в него энергоресурсов. Однако, очевидно, что повышение стоимости природного газа повлечёт за собой определённое изменение стоимости электроэнергии, угля, чугуна, лома и других компонентов плавки стали. Всё это указывает на необходимость дальнейших более глубоких обследований с учётом большего числа факторов.

### Литература

1. Копцев, Л. А. Сквозной энергетический анализ и подходы к оптимизации энергобаланса в ОАО «ММК» / Л. А. Копцев, Ф. А. Рашкин, Д. В. Поварницын // *Промышленная энергетика*. - 2002. - №9. - С. 5-8.
2. Абчук, В. А. *Экономико-математические методы: Элементарная математика и логика. Методы исследования операций* / В. А. Абчук. - СПб.: Союз, 1999. - 320 с.

Поступила в редакцию 20 мая 2008 г.