

К. Т. Н. М. В. Зуев¹, д. т. н. В. Г. Лисиенко², В. С. Широков¹, А. Л. Засухин¹, М. И. Микурова¹

¹ ОАО «Северский трубный завод», г. Полевской Свердловской обл., Россия

² ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 669.18:[662.997+504.75]

ДИНАМИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ И ЭНЕРГО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

Приведены данные по динамике энергоемкости электростали при выходе предприятия на стабильный режим работы после реконструкции. Определена динамическая энергоемкость производства электростали, показан хороший результат предприятия по этому показателю. Проанализирована обстановка (в рамках энерго-экологического анализа), сложившаяся в результате эмиссии вредных и парниковых газов, показавшая концентрацию этих выбросов в пределах установленных норм и малую относительную величину топливно-экологических и топливно-парниковых чисел по отношению к топливно-технологическому числу (энергоемкости).

Ключевые слова: электросталеплавильное производство, сквозная энергоемкость, динамическая энергоемкость, эмиссия вредных и парниковых газов, газовый эквивалент, топливно-технологическое (ТТЧ), топливно-экологическое (ТЭЧ) и топливно-парниковое (ТПЧ) числа.

В течение последних лет в рамках стратегической инвестиционной программы Трубной металлургической компании на Северском трубном заводе проводится интенсивная поэтапная модернизация [1, 2]. При этом большое внимание уделяется энергетической компоненте развития предприятия. В этом плане на передовых позициях находится модернизация сталеплавильного производства — замена мартеновского производства стали на электросталеплавильное с электродуговой печью (ДСП-135), установкой внепечной обработки стали (ковш-печь), вакууматором, машинной непрерывной разливки стали. Отмечено [1–3], что при этом наблюдалось существенное снижение потребляемых энергоресурсов, в том числе расхода огнеупорных материалов.

В статье [3] приведен энергетический анализ электросталеплавильного производства в начальный период перехода от мартеновского производства стали на электросталеплавильное. Получены данные о сквозной энергоемкости продукции, показавшие значительные преимущества в этом плане электросталеплавильного производства уже начиная с первого года перехода на электросталь. При этом отмечены существенное снижение (на 61–76 %) энергетических затрат, экономия огнеупорных материалов (почти на порядок) и уменьшение расхода заправочных материалов (более чем в 2 раза).

В настоящей работе приведены данные уже в последующий год (2011 г.) в процессе выхода

предприятия на стабильный (проектный) режим при использовании целого ряда мероприятий по усовершенствованию процесса. При этом отмечены особенности формирования энергоемкости производства электростали и сопровождающей этот процесс эмиссии вредных выбросов и парникового газа CO₂. Энергоемкость производства стали определена без учета энергоемкости человеческого труда в виде так называемого топливно-технологического числа (ТТЧ) [3–6]. При определении ТТЧ использовали структурированную форму расчета:

$$\text{ТТЧ} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$, $\mathcal{E}_4$ — первичная (топливо), производная (электроэнергия, кислород, компрессорный воздух, аргон, азот, техническая вода), скрытая (сырьевые и огнеупорные материалы, ферросплавы, амортизация) энергия и вторичные (используемые) энергетические затраты соответственно. ТТЧ отдельных компонентов определены по данным [3–5], а также по данным Уралэнергочермета (аргон, азот)*. При определении ТТЧ природного газа его собственная энергоемкость как топлива (принято $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 8500 \text{ ккал/м}^3 = 35,6 \text{ МДж/м}^3$) увеличивалась на 10 % с учетом затрат энергии на добычу и транспортировку. Расходы отдельных компонентов ТТЧ принимались по результатам

* Щелоков Я. М. Личное сообщение.

годовой работы соответствующего сталеплавильного производства.

При переводе амортизационных расходов, выраженных в руб./т, в энергетические единицы (ТТЧ) использовали формулу

$$\text{ТТЧ}_A = \frac{AQ_H^P}{C(Q_H^P)_{\text{у.т.}}} = K_A A, \quad (2)$$

где A — амортизационные расходы, руб./т; C — цена единицы топлива, принятого за топливный эквивалент с теплотой сгорания Q_H^P ; $(Q_H^P)_{\text{у.т.}}$ — теплота сгорания условного топлива, $(Q_H^P)_{\text{у.т.}} = 7000$ ккал/кг = 29,309 МДж/кг; K_A — коэффициент перевода рублевых амортизационных расходов в энергетические единицы, кг у.т./руб.

При расчетах использован газовый эквивалент. При этом приняты следующие показатели: достаточно высокая цена природного газа, равная 350 долл. США за 1000 м³; соотношение 31 руб. за 1 долл. США; теплота сгорания природного газа $Q_H^P = 8500$ ккал/м³ = 35,6 МДж/м³. В этом случае в формуле (2) $K_A = 0,1119$ кг у.т./руб.

В случае применения нефтяного эквивалента (при цене нефти 80 долл. США за баррель (159 л =

= 135,5 кг) и $Q_H^P = 9500$ ккал/кг = 39,8 МДж/кг) величина K_A в формуле (2) равна 0,0763 кг у.т./руб., т.е. несколько меньше, но с учетом роста цены нефти до 100 долл. США за баррель эти величины вполне сравнимы. Результаты сравнительных расчетов ТТЧ электростали за 2010 и 2011 гг. представлены в табл. 1–3.

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что с 2010 по 2011 г. ТТЧ электростали в целом снизилось на 10,4 %. При этом произошло заметное снижение удельных энергозатрат природного газа, а также кислорода, компрессорного воздуха, аргона, чугуна, электродов, извести, FeSi, FeSiMn, Al, заправочных материалов и огнеупоров на ремонт печи. Удельные затраты электроэнергии также снизились, но незначительно. Несколько возросли удельные энергозатраты лишь по азоту, лому и FeMn. Что касается процентного распределения энергоемкости по ее структурным составляющим, то можно отметить снижение доли в энергоемкости первичной и скрытой энергий $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_3$ и увеличение доли производной энергии $\mathcal{E}_2$ (см. табл. 3).

Особый интерес в этих случаях представляет оценка так называемой динамической энергоемкости E_d , представляющей собой отношение в

Таблица 1. Оценка энергоемкости (ТТЧ) электростали за 2010 г.

Статьи расхода	ТТЧ*, кг у.т./ед.	Удельный расход, ед./т стали	Энергозатраты, кг у.т./т стали	Доля от ТТЧ, %
Первичная энергия $\mathcal{E}_1$ (6,19 %)				
Природный газ, м ³ /т	1,336	22,3	29,79	6,19
Производная энергия $\mathcal{E}_2$ (50,82 %)				
Электроэнергия, кВт·ч/т	0,388	585,4	227,14	47,19
Кислород, м ³ /т	0,2401	52,8	12,68	2,63
Компрессорный воздух, м ³ /т	0,0493	80,9	3,99	0,83
Аргон, м ³ /т	0,845	0,753	0,64	0,13
Азот, м ³ /т	0,082	0,473	0,04	0,01
Техническая вода, м ³ /т	0,12	1,19	0,14	0,03
Скрытая энергия $\mathcal{E}_3$ (42,99 %)				
Чугун, т/т	1083	0,02378	25,75	5,35
Лом, т/т	7,3	1,099	8,02	1,67
Электроды, т/т	7200	0,0021	15,12	3,14
Известь, т/т	283	0,0577	16,33	3,39
Ферросплавы, т/т:				
FeSi	4846	0,0038	18,41	3,82
FeMn	2862	0,0069	19,74	4,10
FeSiMn	2588	0,0054	13,98	2,90
Al	8500	0,0023	19,55	4,06
Амортизация, руб./т	0,1119	579,3	64,82	13,47
Заправочные материалы, т/т	490	0,0035	1,72	0,36
Огнеупоры на ремонты печи, т/т	500	0,007	3,5	0,73
* ТТЧ = 481,36 кг у.т./т стали = 14,11 ГДж/т стали.				100 %

рассматриваемом периоде процентного увеличения энергозатрат к процентному увеличению производства [4–6]:

$$E_{\pi} = \frac{\Delta Q}{\Delta P}, \quad (3)$$

где ΔQ — процентное увеличение энергозатрат в последующем и предыдущем году; ΔP — соответствующее процентное увеличение производства электростали. При этом величины ΔQ и ΔP определяются по соотношениям

$$\Delta Q = \frac{E_2 P_2 - E_1 P_1}{E_1 P_1} \cdot 100, \% \quad (4)$$

$$\Delta P = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \cdot 100, \% \quad (5)$$

где E_2 и E_1 — энергоёмкость в последующий и предыдущий периоды; P_2 и P_1 — производство стали в последующий и предыдущий периоды.

С 2010 по 2011 г., как отмечалось, энергоёмкость электростали снизилась на 10,4 %. В то же время производство электростали за этот же период возросло на 10,5 %. При этом в соответствии с формулой (4) произошло увеличение годовых энергозатрат ΔQ лишь на 0,149 % при росте производства ΔP на 10,5 %. Тогда по формуле (3)

$$E_{\pi} = \frac{0,149}{10,54} = 0,0142.$$

Таблица 2. Энергоёмкость (ТТЧ) электростали за 2011 г.

Статьи расхода	ТТЧ*, кг у.т./ед.	Удельный расход, ед./т стали	Энергозатраты, кг у.т./т стали	Доля от ТТЧ, %
Первичная энергия Э ₁ (5,79 %)				
Природный газ, м ³ /т	1,336	18,9	25,25	5,79
Производная энергия Э ₂ (55,39 %)				
Электроэнергия, кВт·ч/т	0,388	582,9	226,17	51,86
Кислород, м ³ /т	0,2401	48,9	11,74	2,69
Компрессорный воздух, м ³ /т	0,0493	57,7	2,84	0,65
Аргон, м ³ /т	0,845	0,644	0,54	0,12
Азот, м ³ /т	0,082	2,117	0,17	0,04
Техническая вода, м ³ /т	0,12	—	0,19	0,03
Скрытая энергия Э ₃ (38,85 %)				
Чугун, т/т	1083	0,0025	2,71	0,62
Лом, т/т	7,3	1,106	8,07	1,85
Электроды, т/т	7200	0,002	14,40	3,30
Известь, т/т	283	0,0537	15,20	3,49
Ферросплавы, т/т:				
FeSi	4846	0,0022	10,66	2,44
FeMn	2862	0,0074	21,18	4,86
FeSiMn	2588	0,0049	12,68	2,91
Al	8500	0,0022	18,70	4,29
Амортизация, руб./т	0,1119	576,4	61,14	14,02
Заправочные материалы, т/т	490	0,0034	1,67	0,38
Огнеупоры на ремонт печи, т/т	500	0,006	3,00	0,69
* ТТЧ = 436,12 кг у.т./т стали = 12,76 ГДж/т стали.				100 %

Таблица 3. Итоговые показатели энергоёмкости электростали за 2010 и 2011 гг.

ТТЧ, кг у.т./т (ГДж/т)	ТТЧ по данным [1–3], кг у.т./т (ГДж/т)	Энергия, %			Годовая произво- дительность, %
		Э ₁	Э ₂	Э ₃	
2010 г.					
481,36 (14,11)	509 (14,91)	6,19	50,82	42,99	100
2011 г.					
436,12 (12,76)	509 (14,91)	5,79	55,39	38,85	110,5

Этот показатель можно считать рекордно низким, так как уже при $E_d = 0,5$ можно считать, что результаты работы предприятия по соотношению роста энергозатрат и производительности на современном уровне вполне приемлемы [3, 4].

На данном этапе в рамках уже энерго-экологического анализа была проанализирована обстановка, касающаяся эмиссии вредных и парниковых газов в электросталеплавильном производстве. При этом были учтены: эмиссия в рамках предельно допустимых годовых выбросов, т; плата за эмиссию с соответствующими повышающими коэффициентами, руб./т; итоговая плата за выбросы, руб./год. Принимались во внимание как твердые, так и газообразные выбросы. При этом отмечена наибольшая массовая эмиссия: среди газов — оксида углерода, среди твердых веществ — пыли SiO_2 . В то же время наибольшая удельная плата за 1 т выбросов наблюдается по свинцу, а по газообразным веществам — по цианистому водороду. Общая годовая плата (с учетом массы выброса и удельной платы): наибольшая — по эмиссии марганца и SiO_2 , наименьшая — по цианистому водороду.

Был рассчитан коэффициент агрессивности A_i различных выбросов по отношению к удельной плате за эмиссию оксида углерода (0,6 руб./т), принятой за единицу. Соответственно, величина A_i получилась наибольшей у свинца ($A_i = 11388$), а также у оксидов марганца и никеля ($A_i = 3417$). Интегральная оценка платы за вредные выбросы по электросталеплавильному цеху показывает, что 89,0 % этой платы приходится непосредственно на ДСП; лишь 3,04 и 2,0 % приходятся на установку ковш-печь и шихтовое отделение соответственно, а на остальные участки еще меньше.

В рамках энерго-экологического анализа принято трансформировать величину платы за вредные выбросы R в энергетические единицы [3–7]. При этом рассчитывается топливно-экологическое число ТЭЧ (по аналогии с формулой (2)):

$$ТЭЧ = \frac{RQ_H^p}{C(Q_H^p)_{y.t.}} = K_R R, \quad (6)$$

где K_R — коэффициент перевода рублевой платы за вредные выбросы в энергетические единицы, кг у.т./руб.

При использовании газового эквивалента (как это сделано при расчетах амортизационных расходов) $K_R = 0,1119$ кг у.т./руб. Тогда при плате за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу по электросталеплавильному цеху на уровне 0,28 руб./т стали получаем

$$ТЭЧ_3 = 0,28 \cdot 0,1119 = 0,031 \text{ кг у.т./т.}$$

Эта величина по отношению к энергозатратам по электросталеплавильному цеху на уровне 266,8 кг у.т./т (см. табл. 2) составляет очень малую величину — всего около 0,01 %.

Расчет эмиссии парникового газа диоксида углерода (углеродный след) для ДСП был проведен по известной методике [8]. При этом учитывали удельную эмиссию CO_2 от выгорания углерода шихты (чугун, лом и ферросплавы), эмиссию при сжигании природного газа и эмиссию от выгорания электродов:

Источник эмиссии	Шихтовые материалы	Природный газ	Электроды	Сумма
Величина эмиссии, кг/т	3,468	95,950	9,193	108,611

Таким образом, величина для ДСП составляет 108,611 кг CO_2 /т стали.

В настоящее время достаточно сложно оценить, какую плату за эмиссию CO_2 можно было бы определить предприятию, тем более что Россия не является в настоящее время участником международного соглашения по решению этих проблем. Например, плата за 1 т эмиссии CO_2 может составлять от 15 до 1 долл. США. При оценке 1 долл. США за 1 т, или около 30 руб./т, величина платы за эмиссию CO_2 составит $30 \cdot 0,108 = 3,24$ руб./т стали.

По аналогии с формулами (2) и (6) получаем оценку топливно-парникового числа (ТПЧ) [7]:

$$ТПЧ = \frac{PQ_H^p}{C(Q_H^p)_{п.г.}} = K_{ПП}, \quad (7)$$

где P — эмиссия парникового газа, т/т стали.

При использовании того же газового эквивалента $K_{ПП} = K_R = K_A = 0,1119$ кг у.т./руб. получаем величину ТПЧ₃ по электросталеплавильному цеху:

$$ТПЧ_3 = 0,1119 \cdot 3,24 = 0,363 \text{ кг у.т./т,}$$

что также составляет очень небольшую величину от ТТЧ по электросталеплавильному цеху — на уровне около 0,14 %.

На предприятии принимаются меры в соответствии с европейскими нормами по своеобразной «продаже» парникового газа, так как уровень его эмиссии значительно ниже устанавливаемых норм. Определены также эмиссии мелкодисперсной пыли $RM_{2,5}$ и RM_{10} , показатели эмиссии по которым вошли в обновленные нормы по ПДК. Анализы продемонстрировали весьма низкий и вполне допустимый уровень этих очень токсичных выбросов. Так, средний уровень концентрата $RM_{2,5}$ и RM_{10} в районе ОАО «Северский трубный завод» составляет 0,022 и 0,020 мг/м³, максимальный — 0,064 и 0,066 мг/м³ (при ПДК 0,16 и 0,30 мг/м³ соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определена динамика изменения энергоемкости электростали от переходного режима (мартеновский цех — электросталеплавильный цех) до достаточно стабильного режима работы. При этом энергоемкость электростали за год уменьшилась на 10,4 % за счет снижения удельных энергозатрат природного газа, кислорода, компрессорного воздуха, аргона, чугуна, электродов, извести и ферросплавов. Динамическая энергоемкость составила при этом рекордно малую величину, равную 0,0142 (% роста энергозатрат / % увеличения производительности).

В рамках локального (по ДСП) энерго-экологического анализа оценены величины эмиссии твердых и газообразных вредных выбросов, коэффициенты их агрессивности, а также величины топливно-экологического (ТЭЧ) и топливно-парникового (ТПЧ) чисел. Отмечена эмиссия вредных выбросов (включая мелкодисперсную пыль) и парниковых газов в пределах установленных норм, а также получены соотношения величин ТЭЧ и ТПЧ к топливно-технологическому числу (по электросталеплавильному цеху) — 0,01 и 0,14 % соответственно, что свидетельствует о малых значениях этих показателей как в абсолютных величинах, так и в энергетических эквивалентах.

Библиографический список

1. **Зуев, М. В.** У нас на заводе каждый несет свой «чемоданчик» / М. В. Зуев // Промышленность и экология Севера. — 2012. — № 1 (21). — С. 18–25.
2. **Торопов, В.** Реконструкция завода — наша инженерная гордость / В. Торопов // Там же. — С. 26–29.
3. **Зуев, М. В.** Сравнительная энергоемкость стали в процессе модернизации ОАО «Северский трубный завод» // М. В. Зуев, В. Г. Лисиенко, А. Л. Засухин [и др.] // Новые огнеупоры. — 2011. — № 8. — С. 28–33.
4. **Лисиенко, В. Г.** Энергетический анализ. Методика и базовое информационное обеспечение : учебное пособие / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, С. Е. Розин [и др.]. — Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2001. — 100 с.
5. **Лисиенко, В. Г.** Хрестоматия энергосбережения : справочное издание. В 2 кн. Кн. 1 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев ; под ред. В. Г. Лисиенко. — М. : Теплотехник, 2002. — 688 с.
6. **Лисиенко, В. Г.** Плавильные агрегаты : справочное изд. В 4 кн. Кн. 1 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев ; под ред. В. Г. Лисиенко. — М. : Теплотехник, 2005. — 768 с.
7. **Лисиенко, В. Г.** Ресурсы и факторы управления в энергосбережении и экологии / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, А. В. Лаптева, П. А. Дюгай ; под ред. В. Г. Лисиенко. — М. : НИЯУ МИФИ, 2011. — 200 с.
8. **Чесноков, Ю. Н.** Математические модели косвенных оценок эмиссии CO₂ в некоторых металлургических процессах / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // Сталь. — 2011. — № 8. — С. 74–77. ■

Получено 25.12.12

© М. В. Зуев, В. Г. Лисиенко, В. С. Широков,
А. Л. Засухин, М. И. Микурова, 2013 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



25–26 июня 2013 г.

г. Прага, Чехия

HITHERM ПРАГА 2013

**Международная конференция
по высокотемпературным процессам**

Тематика:

- эффективность использования энергии и тепла в высокотемпературных процессах
- материал для службы при высоких температурах
- высокотемпературные процессы, оборудование для нагрева и отопления

За дополнительной информацией обращаться: hitherm2013@silikaty.cz