

УДК 669.1.013:669.1.015:621.317.38:005

А.В.Бородулин, А.В.Воронцов, М.В.Темлянецв, А.Л.Чайка

**МАКРОАНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОДУКЦИИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ МЕТОДОМ
ПОЛНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА**

Целью исследования является дальнейшее развитие методов термодинамического анализа с построением полного энергетического баланса, используемого для оценки потенциала энергосбережения металлургического предприятия. На конкретном примере показана целесообразность и эффективность применения полного энергетического баланса проф. В.С.Степанова, использующего понятие «эксергия», для анализа энергоемкости металлопродукции в различных экономических условиях функционирования предприятия.

металлургическое предприятие, энергетического баланс, термодинамический анализ, эксергия, энергосбережение

Современное состояние вопроса. Сложные физико – химические превращения с материалами, поданными в металлургические печи, иные энерготехнологические агрегаты, установки и системы с целью получения готовой металлопродукции, в конечном итоге, отражаются материальными и энергетическими балансами. Развитие учения об энергетическом балансе, опирающегося на I и II – е начала термодинамики, как базовой составляющей экономики страны, роли пламенных печей, многочисленные дискуссии, в том числе и о роли качества исходной информации, показано в работе Л.А. Мелентьева [1].

Проблемы энергосбережения привлекают внимание и металлургов, особенно, в период кризисов, войнах и иных социальных потрясений. Так, «Британская Ассоциация» опросила в 1916 г. главнейшие фирмы Англии, заводы которых работают в типичных для разных металлургических районов условиях, относительно действительного расхода горючего при выплавке чугуна, его переделе и прокатке слитков. Цель опроса: определить при помощи полученных данных, какой перерасход топлива наблюдается в настоящее время, и оценить возможное сбережение топлива, на которое можно рассчитывать в будущем при соответствующем оборудовании и организации производства на металлургических заводах. Проф. W.Vone определил расход коксующегося угля в 1,6 т на 1 тонну слитков, а В. Talbot – в 1,75 т, из которых только 1,65 идет в коксовые печи и дает нужное для выплавки чугуна количество кокса. На практике только один завод имел расход угля 2 т, один 2,5 и один – 2,75, а остальные гораздо больше. [2].

В отечественной металлургии усилиями технологов, теплотехников и иных специалистов созданы научные основы управления энерго–потреблением в агрегатах различного технологического назначения. [2 – 12]. Отметим некоторые особенности основополагающих работ по созданию основ энергетических балансов металлургических печей.

В работах Н.Е. Скаредова для расчетов печей впервые использованы законы термодинамики (цикл Карно) и теплопередачи, дано удовлетворительное для того времени описание роли факела в рабочем пространстве печей и указаны важнейшие факторы, определяющие

его длину. Обращает на себя внимание и наличие взаимосвязи между отдельными элементами расчета печей – определение расхода топлива в зависимости от производительности, определение тепловой мощности и расчет регенераторов, боровов, тяги дымовой трубы и т.п., что характерно для современных методов расчета печей. По глубине понимания теплотехнических процессов, происходящих в печах, Н.Е. Скаредов опередил своих современников в области печной теплотехники, но его работы не были по достоинству поняты и оценены. Дальнейшее развитие идеи Н.Е. Скаредова получили в работах И.Д.Семикина.

Потребности народного хозяйства в металлопродукции стимулировали работы по металлургической теплотехнике, повышению производительности печей различного технологического назначения, сокращению, нормированию расхода топлива [7–12]. Эти работы, выполненные на высоком научном уровне в различных регионах страны, как говорят в настоящее время, в режиме «он лайн», способствовали формированию и становлению научных теплотехнических школ на Урале, в Украине, Центре, Сибири.

Г.П.Иванцов в [12] утверждает следующее: «Советская наука о нагреве металла начала сильно развиваться в начале тридцатых годов под влиянием запросов практики, возникших при освоении нагревательных печей на новостройках первой пятилетки. Сильнейшим толчком к ее дальнейшему развитию явилось стахановское движение. О советских исследованиях нагрева металла и о влиянии стахановского движения на развитие советской науки, о нагреве металла красноречиво свидетельствует составленная в хронологическом порядке библиография, приведенная в конце книги. Приятно отметить, что количество советских работ, опубликованных за полтора десятка предвоенных лет, значительно превышает количество работ, опубликованных за то же время во всей зарубежной печати».

Энергобаланс металлургического предприятия полного цикла формировался усилиями специалистов различного профиля – технологов, теплотехников, энергетиков, экономистов и др. Разобщенность действий специалистов разного профиля имела и известные недостатки, которые не ликвидированы и в настоящее время. Например, современный технолог, как правило, рассматривает проблему слишком узко, принимая во внимание лишь единичный сегмент того сложного энерготехнологического цикла, каким является производство металла. Это отрицательно сказывается на экономике предприятия, качестве металла, эксплуатационной надежности агрегатов и придает решающее значение так называемой гибкости, т.е. быстрой и экономичной перестройке технологических режимов, самих агрегатов и в целом человека – технических комплексов. Эффект от внедрения работ такого плана по мнению экспертов и зарубежной практики может составлять от 5 до 20 % от общих затрат энергии.

Используемые для этих целей традиционные методы управления энергией, наиболее распространенные на отечественных предприятиях, основаны на составлении перечня мероприятий и просты для контроля, но не позволяют наилучшим образом выбирать наиболее рациональные решения из множества возможных вариантов особенно в нестабильных экономических условиях. Внедрение того или иного энергосберегающего мероприятия скорее вопрос времени и денег, а выбор наиболее рационального из огромного количества мероприятий, имеющихся в арсеналах техники и технологии, является важнейшей задачей современной прикладной науки.

Классические методы оптимизации управления производством, широко используемые на металлургических предприятиях стран Запада, Японии, Китая, России – наиболее эффективно развиваются учеными Московского энергетического института и др. Методы эти дороги и наукоемки, требуют целенаправленных действий специалистов различного профиля, соответствующего финансирования. Пока не видно на просторах СНГ металлургического предприятия, на котором решена эта задача.

Постановка задачи. Проблемы и перспективы развития методов энергетического баланса в управлении энергоемкостью металлопродукции давно заслуживает, как и в большой энергетике, исключительного внимания [1,13–27]. Для оценки потенциала энергосбережения целесообразно использовать методы термодинамического анализа с построением полного энергетического баланса предприятия, которые под руководством В.С.Степанова апробированы на ЗСМК [20–27]. Это позволяет оценить и потери энергии по различным причинам: техническим, связанным с необратимостью технологического процесса и управленческим.

Изложение основных материалов исследования. Покажем конкретный пример. В таблице и на рис.1–6, приведена динамика полного энергобаланса ЗСМК, по сравнению с иными металлургическими предприятиями Украины, России и мира. Особый интерес представляют результаты анализа влияния потребления энергетических и сырьевых ресурсов на КПИ энергии и эксергии в энергетическом балансе ЗСМК. Макроанализ влияния энергетической и сырьевой базы, потребления вторичных энергоресурсов на коэффициент полезного использования (КПИ) энергии и эксергии показывает, что увеличение использования металлолома, углей и угольных концентратов, кокса, доменного и коксового газа, электроэнергии однозначно повышает КПИ, а использование полуфабрикатов уменьшают КПИ энергии и эксергии.

Коэффициент полезного использования энергии растет с ростом объемов производства металлопродукции и количества переработанных отходов. Переработка продуктов коксохимического производства в углеводородное топливо понижает КПИ, а использование в качестве топлива в пределах ЗСМК повышает КПИ энергии и эксергии.

Нестабильность поставок энергетических и материальных ресурсов, их качество, конъюнктурные соотношения, экологические ограничения и иные факторы определяют состав, параметры работы энерго – технологических агрегатов и энергоемкость металлопродукции. В нестабильных, конъюнктурно – кризисных условиях 1994 и 1995 гг. эффективность использования энергии, по сравнению с 1988, 1990 и 2003 годами, снизилась в среднем на 35%, а коэффициент полезного использования (КПИ) энергии – на 21%. Анализ показывает, что главной причиной высоких энергетических затрат является не отсутствие наличия технических мероприятий, а трудности в управлении, отсутствие достоверной информации, нечеткое определение приоритетов и эффективно работающего механизма управления в сложной финансово-экономической обстановке. В доменном производстве потребляется 50–75% энергетических ресурсов предприятия металлургического полного цикла, экономия энергетических ресурсов в производстве чугуна на 1% снижает энергоемкость производства стали на 0,5 – 0,75%.

Таблица. Полный энергетический баланс АО «ЗСМК» за 1988, 1990, 1994, 1995, 2003 годы

Статьи баланса	Масса, килотонн					Энергия, ТДж					Эксергия, ТДж				
	1988	1990	1994	1995	2003	1988	1990	1994	1995	2003	1988	1990	1994	1995	2003
П Р И Х О Д															
Сырье (всего), в т. ч.:	10555,0	15292,2	10405,8	11056,1	14320,0	19766	40941,0	24278	21692	28639	15860	27518	15658	12962	25692
Руда и железорудные материалы	8761,9	10711,8	7713,1	8274,4	10570,0	4994	16325	11755	10335	6025	4381	7691	5538	3571	5285
Известняк	66,6	1840,2	1285,6	1556,1	550,0	26	723	506	616	214	42	1146	800	971	343
Металлолом	1726,5	2326,1	1407,1	1225,6	3200,0	14745	19866	12017	10741	22400	11438	15407	9320	8420	20064
Чугун жидкий	–	41,4	0	0	–	–	4607	0	0	–	–	3693	0	0	–
Топливо (всего), в т. ч.:	9345,0	9093,9	4610,0	4963,4	9200,0	306222	280744	129862	155864	265689	253398	267798	129314	148310	250406
Угли рядовые	6164,2	6149,3	2788,2	2977,4	6500,0	193066	152191	69006	73693	150150	157719	150437	68211	72845	144950
Угольный концентрат	2100,0	2281	1371	1356,9	2400,0	81481	97627	38377	58075	102720	65101	88959	38196	52919	93600
Природный газ	1080,8	665,6	450,8	492,2	300,0	31675	30926	22479	20021	12819	30578	28402	22900	18469	11856
Кокс	–	0	0	1367	–	–	0	0	4075	–	–	0	0	4077	–
Электроэнергия	3197,0	–	–	–	3300	11509	11531	9833	10173	11880	11509	11531	9833	10173	11880
Теплоэнергия	2132,9	–	–	–	1450	8930	5209	5904	5342	6071	2674	1563	1771	1602	1822
Полуфабрикаты	202,3	216,1	292,7	312,2	197,2	5552	6432	9931	10862	6172	5437	6335	9860	10818	6081
ИТОГО ПРИХОД:	19900,0		15308,5	16331,7	23717,2	351979	344857	179808	203933	318451	288878	314745	166436	183865	295881
Р А С Х О Д															
Металлопродукты (всего), в т. ч.:	7372,0	6574	4163,1	5111,1	7405,0	64887	60861	36677	44952	54554	50908	45429	28805	35283	48850

Сталь в слитках	1409,1	921,4	0	0	–	13411	8075	0	0	–	10816	6330	0	0	–
Заготовка то-варная	–	697,7	651,1	837,9	–		6114	5706	7343	–		4792	4472	5756	–
Прокат товар-ный	5402,4	4693	3302,9	4098,9	7400,0	46141	41128	28946	35923	54539	35791	32240	22690	28159	48841
Чугун товарный	560,5	86,3	136,5	98,9	–	5335	9839	1328	962	–	4302	682	1080	782	–
Изложницы	–	170,6	61,3	66	–	–	1660	597	642	–	–	1350	485	522	–
Прочие (литье)	–	5,1	11,4	9,4	–	–	45	99,6	82	–	–	35	78	64	–
Топливо (всего)	4478,9	4621,7	880,9	859,3	5287,0	103925	114164	13276	13289	127075	90342	107356	12928	12520	120227
Промпродукт, в т. ч.:	736,5	614,3	241,5	176,7	650,0	12182	11638	4575	3347	10750	12064	11432	4494	3289	10647
Доменный газ	1267,0	1416	399,8	462,2	1600,0	4919	4488	1245	1465	4592	4450	4059	1126	1325	4160
Коксовый газ	151,0	81,1	26,1	24,1	110,0	3001	3426	1169	1093	4755	2663	3039	1037	970	4217
Угольный кон-центрат	1624,3	1527,3	43,8	118,5	1527,0	63023	65370	1238	5071	65356	50353	59566	1219	4621	59553
Кокс на сторону	699,1	982,9	169,7	77,8	1400,0	20800	29242	5049	2313	41622	20811	29260	5052	2315	41650
Коксохимиче-ские продукты	433,7	389,8	398,6	415	412,0	13800	12873	13143	14679	12808	13625	12754	13021	14397	12697
Переработанные отходы	1827,9	3701,1	2650,2	2946,4	4110,0	581	290,2	269,3	303,3	2920	350	1710	1601	1306	1854
ИТОГО РАС-ХОД:	12363,6	21905,4	8113,8	9350,8	23717,2	183193	188188	63365	73223	197357	155225	167249	56355	63506	183628
Коэфф. использ. энергии,%	–	–	–	–	–	52,9	54,6	35,2	35,9	62,0	–	–	–	–	
Коэфф. использ. эксергии,%	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	54,8	53,1	33,9	34,5	62,1

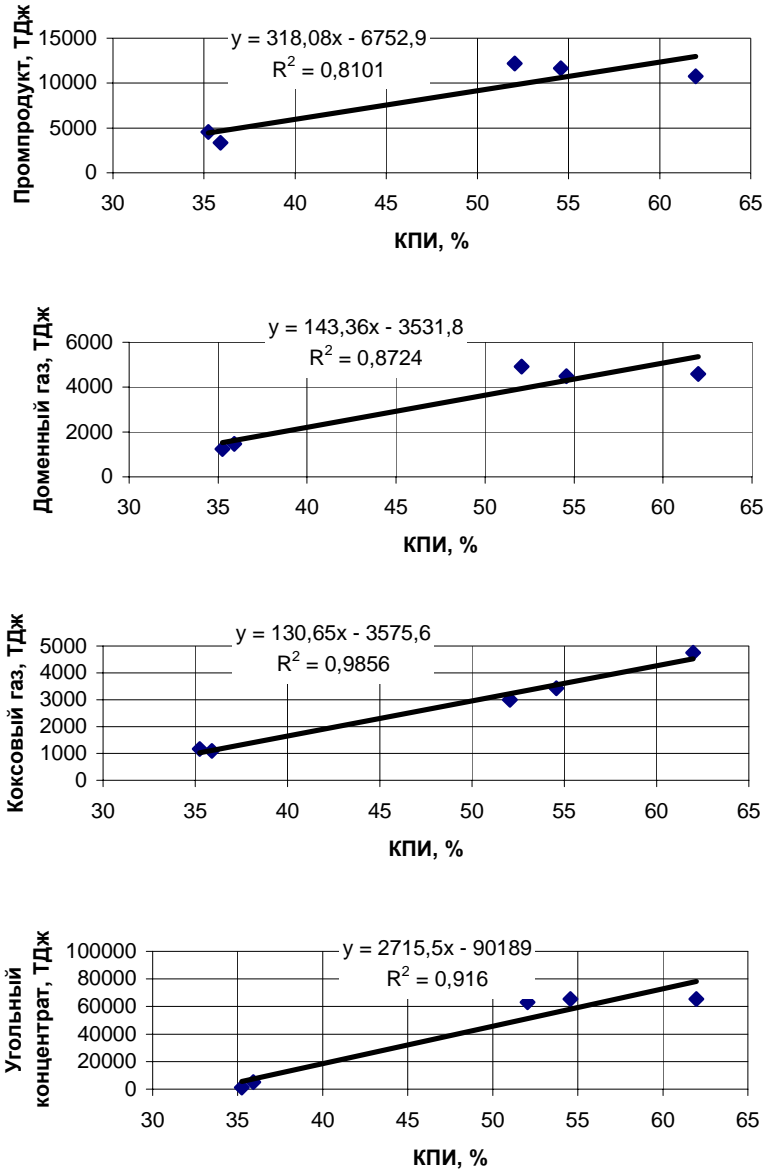


Рис.1. Взаимосвязь потребления вторичных энергоносителей и коэффициента полезного использования (КПИ) энергии на ЗСМК.

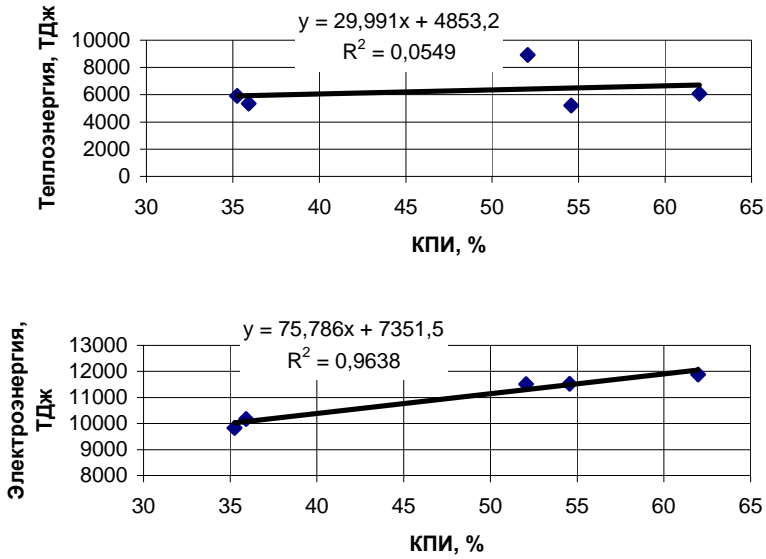


Рис.2. Взаимосвязь потребления тепловой и электроэнергии с коэффициентом полезного использования (КПИ) энергии на ЗСМК

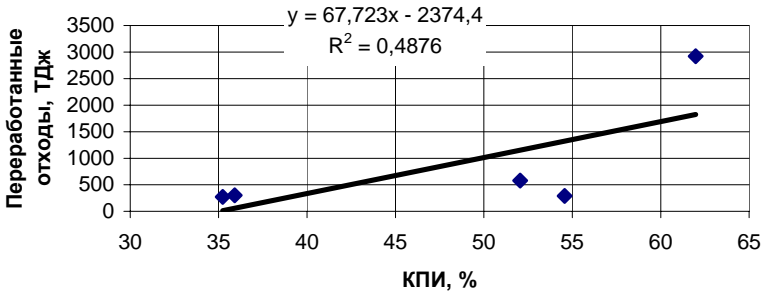


Рис.3. Взаимосвязь количества переработанных отходов и коэффициента полезного использования (КПИ) энергии на ЗСМК.

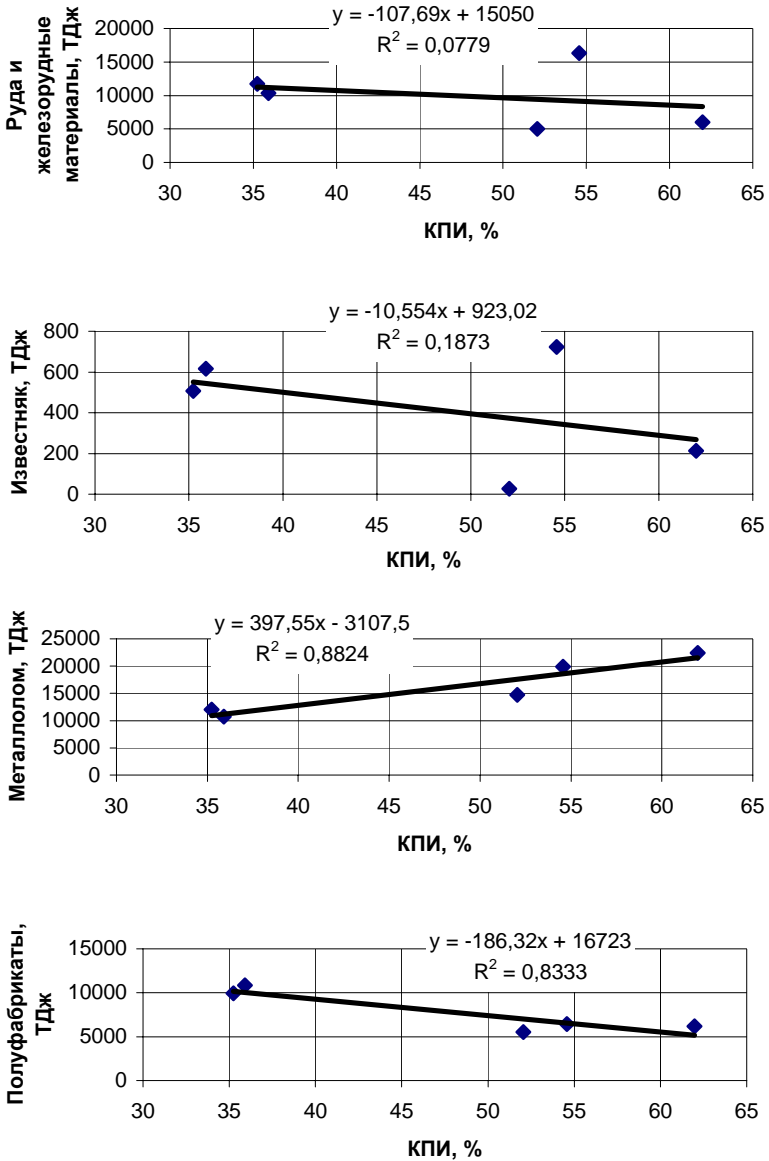


Рис.4. Зависимость между материальной базой ЗСМК и коэффициентом полезного использования (КПИ) энергии на ЗСМК

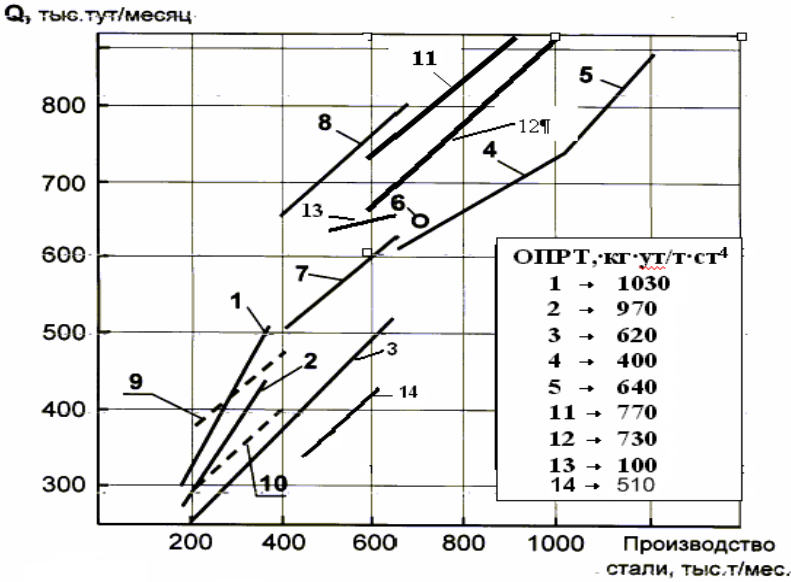


Рис.5. Энергетические характеристики меткомбинатов: «Запорожсталь» – (1, 2), ЗСМК – (3, 6), в Хирохате – (4, 5). НТМК – (7, 8), ОХМК – (9,10), «Северсталь» – (11, 12) и «Криворожсталь» – (13). Q– общие затраты энергоресурсов (1, 4–6, 8, 9, 11) и топлива (2, 3, 7, 10, 12). Точка (6) – среднемесячные данные по ЗСМК за 1989 год; 14– среднемесячные данные по ЗСМК за 2001–07 годы

Σ ГДж/т стали

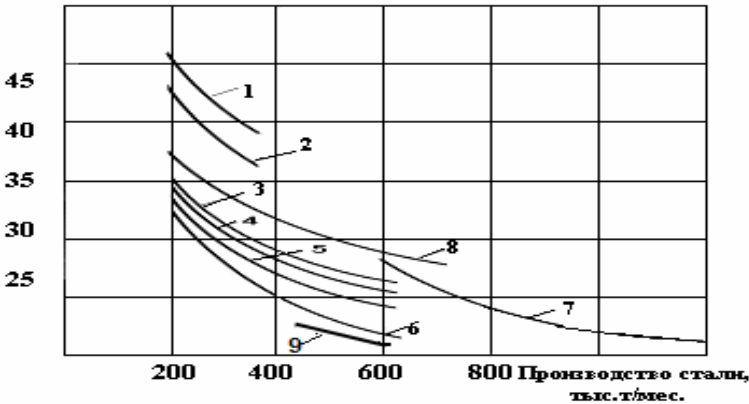


Рис. 6. Характеристики удельных расходов энергии ΣТ (1, 7, 8) и топлива (2–6) для комбинатов: (1, 2) – «Запорожсталь», (3 – 6, 8, 9 – 2001 – 07) –ЗСМК, (7) – Хирохате. Доля чугуна в шихте конвертеров, %: (3) – 92, (4) – (88), (5) – 84, (6) –80, (9) – 79–82

Продолжение данной работы видится в двух направлениях. Опираясь на результаты системного анализа эффективности использования энергии в металлургических технологиях, для выработки стратегии сокращения энергоемкости производства металла в переменных условиях, при возможном сокращении подачи природного газа, выделен следующий метод исследования. В нем используется принцип доминирующего звена, каким в металлургии является производство чугуна, его оптимизация во взаимосвязи с ранжированием целей, полным энергетическим балансом предприятия, построением энергетических характеристик агрегатов, производств, энерготехнологических линий, техническим состоянием агрегатов и широкое применение иных алгоритмов – эвристических методов исследования.

В период «кризиса» регулировать интенсивность выплавки металла при отсутствии природного газа, поддерживать на рабочем уровне газораспределение в печи, выход доменного газа и его теплоту сгорания с наименьшими потерями по производству, расходу кокса и сокращению простоев мощнейших агрегатов, позволит использование в доменном производстве дутья, обогащенного нагретым азотом. Это повысит надежность технического состояния агрегатов. Применение дутья, обогащенного нагретым азотом, позволяет максимально использовать тепловые мощности воздухонагревателей системы Калугина в доменной печи, работающей с низкой интенсивностью плавки.

Общий путь видится в расширении данного подхода как информационно – аналитической базы для управления энергетическими ресурсами в масштабе региона, отрасли и государства в целом. В развитых странах Востока и Запада составляется и анализируется полный энергетический баланс государства (например, ФРГ) и отрасли (например, министерстве обороны Норвегии). В Японии показатель энергоемкости валового национального продукта является комплексным энерго – экологическим критерием функционирования экономики.

Заключение. Анализ рационального использования энергетических и сырьевых ресурсов при производстве металла показывает, что эта проблема комплексная, где ведущую роль играют экономические, научно-организационные, а не только технические и технологические факторы. В условиях кризиса возрастает роль формализованных методов выбора рациональных путей развития и структуры производства, оптимизации параметров работы агрегатов, взаимодействия со смежниками и иных проблем управления экономикой в экстремальных условиях.

Расширение энергетической базы производства чугуна необходимо совмещать с повышением энерговооруженности доменного производства: нагревом дутья свыше 1200⁰С в воздухонагревателях системы «Калугин», нагревом природного газа, широкого применения азота и др. Применение пылеугольного топлива в доменной плавке целесообразно совмещать с вдуванием природного газа, что позволит получать в различных дутьевых и шихтовых условиях наиболее высокие и устойчивые технико-экономические показатели производства металла на комбинате полного цикла.

1. *Мелентьев Л.А.* Очерки по истории отечественной энергетики. // М.: Наука, 1987. – 280 с.
2. *Скаредов Н.Е.* Теоретические основания расчета мартеповских печей. // Горный журнал. – 1915. – Том II. – № 5–6. – С.109 – 66.
3. *Павлов М.А.* Обзор успехов в металлургии железа за последние три года (1919–1921). //Отдельный оттиск из журнала «Технико–экономический вестник». – М. – Петербург. – № 4/5. – 1922.
4. *Соколов И.А.* О сбережении горючего при доменной плавке. // Первый Уральский съезд теплотехников. – 1924. – УОСНХ. –С.53.
5. *Рубин П.Г.* Усовершенствованный металлургический завод с точки зрения экономии топлива: примерный анализ заводов Юга //Вестник металлопромышленности. – 1924. – №4 – 6. – 186 с.
6. *Семикин И.Д., Шабли М.Д.* Тепловая работа отражательных печей. // Цветные металлы. – 1939. – № 3. – С.71 – 85.
7. *Масловский П.М., Мясников Б.В.* Исследование теплообмена в методических печах. // Сб. научно – технических статей КМЗ. – №4. –Изд. Центральной лаборатории КМК, 1939. – С.99 – 110.
8. *Тимофеев В.Н., Кавадеров А.В.* Тепловая работа нагревательной печи. // Повышение экономичности и производительности нагревательных и мартеповских печей. Сб. НИР УО ВТИ. – Вып.5. – М.– Свердловск, 1940. –С.5 – 38
9. *Скворцов А.А.* Определение наивыгоднейшей производительности методических печей с точки зрения расхода топлива и к.п.д. // Горьковский индустриальный институт. Труды. – Том. III. – Вып. III. – 1940.
10. *Печи для нагрева металла./ Н.Н.Доброхотов, В.А.Куроедов, В.Ф.Копытов и др.* Под ред. и с предисл. Н.Н. Доброхотова.// М. – Л.: ГОСИНТИ, 1941 – 416 с.
11. *Китаев Б.И.* Схема теплообмена в доменной печи и подготовка руд к плавке. // Сталь. – 1944. – №7 – 8. – С.202 – 205.
12. *Иванцов Г.П.* Нагрев металла (теория и методы расчета). Под редакцией и с добавлениями Д.В. Будрина.–Свердловск // М.: Металлургияиздат, 1948.– 191с.
13. *Голдобин М.* Единые показатели по бруто – балансам. // Сталь. – 1940. – №11 – 12. – С.78 – 85.
14. *Вейц В.И.* Энергетические характеристики и коэффициент полезного действия промышленной энергетики // Известия Академии наук СССР, отделение технических наук. – 1946. – №11. – С.1549 – 1565.
15. *Гофман И.В.* Энергетические характеристики промышленного производства, // Известия Академии наук СССР, отд.техн.наук. – 1948. – №12. – С.1803–1817.
16. *Виленский Н.М, Еремин И.И.* Оптимизация топливо – энергетического баланса. – Свердловск, УФ АН СССР, 1966. – 100 с.
17. *Виленский Н.М, Лац В.М.* Топливо – энергетический баланс металлургического завода. – М.: Металлургия, 1970. – 129 с.
18. *Системный анализ энерготехнологического комплекса как основа выбора путей снижения энергоемкости металлургической продукции / Ф.Н.Демченко, Л.С. Горностаев, О.В.Баклан и др.* // Сталь. – 1984. –С.83 – 87.
19. *Вишневский Б.Н., Банников Ю.Г., Цуканов А.А.* Концепция создания автоматизированной системы формирования и оптимизации энергетического баланса металлургического предприятия. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1993. – № 3, –С.58 – 62

20. *Степанов В.С.* Анализ энергетического совершенства технологических процессов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 273 с.
21. *Озолинг И.Х., Тажбеков Н.И.* Энергетический баланс предприятий цветной металлургии. – Алма – Ата: Наука Казахской ССР, 1986. – 112 с.
22. *Степанов В.С.* Химическая энергия и эксергия веществ. – Изд. 2–е – Новосибирск: Наука, 1990. – 163 с.
23. *Степанов В.С., Степанова Т.Б.* Эффективность использования энергии. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1994. – 257с.
24. *О научном обеспечении энергосберегающей и природоохранной деятельности в горно – металлургических регионах.* / Б.А.Кустов, Н.Е.Рехтин, В.С.Степанов, А.В.Бородулин и др. // Сталь. – 1992. – №12. – С.75–81
25. *Проблемы и политика энергосбережения на Западно – Сибирском металлургическом комбинате.* / Р.С.Айзатулов, А.В.Бородулин, В.С.Степанов и др.// Сталь. – 1997. – № 8. – С.70–77
26. *Домна в энергетическом измерении* / А.В.Бородулин, А.Д.Горбунов, В.И.Романенко, Г.И.Орел. – Кривой Рог.: СП «Мир», 2004. – 412 с.
27. *Об информационном обеспечении энергетической безопасности Украины* / А.В.Бородулин, Б.Н. Вишневатский, Л.Д.Чумаков и др. // – Тр. междунар. конф. «Экология и теплотехника – 1996» (доп. доклады и тезисы), Днепропетровск: – 1996. – С.3–8

Статья рекомендована к печати:

Ответственный редактор

раздела «Организация научных исследований и производства»:

академик НАН Украины В.И.Большаков

докт.техн.наук, проф. И.Г.Товаровский

А.В.Бородулін, А.В.Воронцов, М.В.Темлянець, А.Л.Чайка

Макроаналіз динаміки енергоємності продукції металургійного підприємства методом повного енергетичного балансу

Метою дослідження є подальший розвиток методів термодинамічного аналізу з побудовою повного енергетичного балансу, що використовується для оцінки потенціалу енергозбереження металургійного підприємства. На конкретному прикладі показано доцільність і ефективність застосування повного енергетичного балансу проф. В.С.Степанова, використання поняття «ексергія» для аналізу енергоємності металопродукції в різних економічних умовах функціонування підприємства.