

ОСНОВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Казаков Р.А.¹, Дарда И.В.², Зволинский В.П.³

¹ ЗАО «Национальная организация поддержки проектов поглощения углерода», Москва, Россия (115230, г. Москва, Варшавское ш., 36, стр. 8), e-mail: kazakovra@ncsf.ru

² АНО ВПО «Институт открытого образования», Шахты, Россия (346500, г. Шахты, ул. Советская, 279), rector@ioo.ru

³ НОУ ВПО «Академия МНЭПУ», Москва, Россия (115230, г. Москва, ул. Космонавта Волкова, 20), info@mnepu.ru

В работе дан теоретический анализ энергетической и экологической эффективности металлургических предприятий. Тепловой КПД – отношение полезной энергии к суммарной энергии. Эксергетический анализ основан на расчете эксергии – максимальной работы, совершаемой при обратимом переходе системы из исходного состояния в состояние равновесия с окружающей средой. В концепции интенсивного энергосбережения решается задача предельного энергосбережения. Сквозной энергетический анализ основан на расчете технологического топливного числа, характеризующего процесс и готовое изделие. В энерго-экологическом анализе предложен расчет экологической эффективности процессов. В методе экобалансов анализируются три группы показателей: расход природных материальных ресурсов; энергосбережение; выбросы в окружающую среду. В качестве показателя для оценки эффективности процессов в части выбросов парниковых газов авторами предложено использовать показатель выбросов, выраженный в тоннах углерода на тонну железа проката (т С / т Fe проката).

Ключевые слова: чёрная металлургия, выбросы и отходы, энергоэффективность, методы расчёта, анализ теплового КПД, эксергетический анализ, концепция интенсивного энергосбережения, сквозной энергетический анализ, энерго-экологический анализ, анализ экобалансов.

MAIN IDEAS OF THEORETICAL ANALYSIS OF THEORETICAL ANALYSIS OF ECOLOGY EFFICIENCY OF METALLURGICAL ENTERPRISES

Kazakov R.A.¹, Darda I.V.², Zvolinski V.P.³

¹ National Carbon Sequestration Foundation, Moscow, Russia (115230, Moscow, Varshavskaya avenue, 36, house 8) e-mail: kazakovra@ncsf.ru

² Institute of open education, Shakhty, Russia (346500, Shakhty, Sovetskay street, 279) rector@ioo.ru

³ Academy MNEPU, Moscow, Russia (115230, Moscow, st. Kosmonavta Volkova, 20) info@mnepu.ru

The paper presents a theoretical analysis of energy and environmental efficiency of metallurgical enterprises. Thermal efficiency – the ratio of useful energy to total energy. Exergy analysis is based on the calculation of exergy. Exergy is a maximum work, which was done in a reversible transition from the initial state of the system to equilibrium with the environment. The concept of energy intensive to solve the problem of the limit of energy saving. Through an energy analysis based on the calculation of the fuel technology that characterizes the process and the finished product. In energy and environmental analysis was proposed calculation of the environmental performance of processes. In the eco-balance method for analysis of three groups of indicators: consumption of natural resources; energy conservation; emissions into the environment. Authors offered using an indicator of discharge of hothouse's gas for valuation of affectivity of processes of discharge. The indicator is expressing in a tone of carbon on a tone of iron of rolled of iron (C/Fe of rolled of iron).

Key words: Iron and steel, emissions and waste, energy efficiency, methods of calculation, analysis of thermal efficiency, analysis of energetic, concept of intensive energy savings, pass-through energy analysis, energy and environmental analysis, environmental balance.

Обзор законодательства и анализ энергопотребления и выбросов парниковых газов в черной металлургии России показывает необходимость повышения энергетической и экологической эффективности предприятий отрасли. Основные положения по анализу энергетической и экологической эффективности металлургических предприятий (технологий производства) сформулированы в рамках следующих подходов: анализ теплового КПД,

эксергетический анализ, концепция интенсивного энергосбережения, сквозной энергетический анализ, энерго-экологический анализ, анализ экобалансов.

Анализ теплового КПД. Наиболее простым показателем эффективности системы (технологического процесса) в отношении используемой энергии является коэффициент полезного действия (КПД), основанный на первом законе термодинамики [1]. КПД определяется как отношение полезно используемой в системе энергии (полезной работы) к суммарному количеству подведенной энергии (затраченной работе):

$$\eta = A / W * 100,$$

где η – коэффициент полезного действия (%); A – полезная работа; W – затраченная работа.

Таким образом, условие повышения энергетической эффективности технологического процесса может быть сформулировано в виде $d\eta / dt < 0$, т.е. повышение энергоэффективности происходит при увеличении коэффициента полезного действия системы. Анализ энергетического КПД технологического процесса для различных вариантов совершенствования (изменения) процесса и выбор варианта с наибольшим КПД может быть использован для обоснования выбора методов повышения энергоэффективности.

Анализ теплового КПД процессов,, отражает количественные показатели использования энергии, но не учитывает их качественные параметры. В связи с этим для оценки эффективности энерготехнологических процессов получили развитие методы эксергетического анализа.

Эксергетический анализ. Под эксергией понимается максимальная работа, которая может быть совершена при обратимом переходе какой-либо термодинамической системы из состояния с заданными параметрами в состояние равновесия с окружающей средой [1]. Оценка эффективности энерготехнологических процессов проводится методом эксергетических балансов, отражающих равенство подведенной к системе эксергии и отведенной от нее эксергии и потерь [6–9].

Основными задачами эксергетического анализа являются [6]:

- оценка всех энергоресурсов и энергоносителей, в т.ч. и вторичных, в пределах одного технологического процесса, цеха, предприятия, отрасли;
- определение степени термодинамического совершенства технических систем, установок, аппаратов по проектным и эксплуатационным данным;
- определение на всех этапах преобразования и использования энергии потерь эксергии во всех элементах систем и установок;
- термодинамическая оптимизация систем, установок и их элементов.

Эксергетический анализ существующих систем проводится в следующей последовательности [6; 9]:

- рассматриваемая система (или ее часть) мысленно отделяется некоторой замкнутой контрольной поверхностью от других объектов;
- выбираются параметры окружающей среды (давление и температура), при анализе открытых систем необходимо знать также и состав окружающей среды, принимаемой для начала отсчета;
- проводится оценка совершенства рассматриваемой системы, определяется эксергетический КПД системы и отдельных ее элементов, оцениваются относительные эксергетические потери.

Для составления эксергетического баланса необходимо знать: технологическую схему производственного процесса со всеми входящими и выходящими потоками вещества и энергии, термодинамические параметры потоков вещества и энергии, материальные и энергетический балансы. Для рабочей системы эксергетический баланс может быть записан в виде:

$$\Sigma E'_{\text{э}} + \Sigma E'_{\text{q}} + \Sigma E'_{\text{топ}} + \Sigma G'_i e'_i = \Sigma E''_{\text{э}} + \Sigma E''_{\text{q}} + \Sigma G''_i e''_i + \Sigma D,$$

где $\Sigma E'_{\text{э}}$, $\Sigma E''_{\text{э}}$ – эксергия энергетических потоков на входе и выходе системы; $\Sigma E'_{\text{q}}$, $\Sigma E''_{\text{q}}$ – эксергия теплоты на входе и выходе системы; $\Sigma E'_{\text{топ}}$ – эксергия топлива на входе в систему; $\Sigma G'_i e'_i$, $\Sigma G''_i e''_i$ – эксергия потоков вещества на входе (сырье) и выходе (продукты, полупродукты и т.д.) системы; ΣD – потери эксергии в системе.

Эксергетический КПД представляет собой отношение полезно усвоенной эксергии к затраченной и определяется по формуле:

$$\eta_{\text{экс}} = E_{\text{пол}} / E_{\text{затр}} * 100 = (E_{\text{затр}} - E_{\text{пот}}) / E_{\text{затр}} * 100,$$

где $\eta_{\text{экс}}$ – эксергетический КПД (%); $E_{\text{пол}}$ – полезно усвоенная эксергия; $E_{\text{затр}}$ – затраченная эксергия; $E_{\text{пот}}$ – потери эксергии.

Условие повышения энергетической эффективности технологического процесса может быть сформулировано в виде $d\eta_{\text{экс}} / dt < 0$, т.е. повышение энергоэффективности происходит при увеличении эксергетического КПД системы. Несмотря на то что условие повышения энергетической эффективности при эксергетическом анализе формулируется аналогично тепловому КПД, результаты эксергетического анализа дают отличные результаты.

При сопоставлении эксергетического КПД с тепловым КПД для некоторых энерготехнологических агрегатов – эксергетический КПД в 1,5–2 раза меньше (например, для парогенератора $\eta_{\text{экс}} = 46\%$, $\eta_{\text{тепл}} = 90\%$) [6]. Такие относительно низкие эксергетические КПД обусловлены значительными потерями при передаче тепла от топлива и теплообменом.

Таким образом, эксергетический анализ позволяет выявить основные пути повышения эффективности энерготехнологических процессов, которыми являются совершенствование процессов горения и теплообмена.

Концепция интенсивного энергосбережения. Концепция интенсивного энергосбережения, разработанная в Московском энергетическом институте проф. Ключниковым А.Д. и др., направлена на решение задач предельного энергосбережения, энергетической эффективности, безотходности и экологичности, интенсивного технического прогресса теплотехнических установок, систем и комплексов [3; 4]. Последовательные этапы разработки концепции интенсивного энергосбережения включают:

- определение общей энергоемкости производства конечного продукта;
- формирование энергетически идеальной технологии и установление принципиально возможного уровня энергосбережения технологии;
- разработку термодинамически идеальной модели теплотехнологического комплекса – эталона предельно высокой принципиально возможной энергетической эффективности;
- установление универсальной характеристики энергетической эффективности – интегрального коэффициента полезного использования теплоэнергетических ресурсов в действующем теплотехнологическом комплексе;
- прогноз потенциала резерва интенсивного энергосбережения;
- разработка теплотехнических основ и корректировки энергетически идеальной технологии, формирование энергосберегающей теплотехнически реализуемой технологии;
- формирование и определение характеристик теплотехнически идеальной модели в границах принципиальных конструктивных схем элементов теплотехнологического комплекса.

Таким образом, методология интенсивного энергосбережения формирует принципиально новый подход к оптимизации использования энергоресурсов, согласно которому:

- полный резерв энергосбережения есть вполне определенная количественная величина, устанавливаемая совместно с конкретной последовательностью технических решений, позволяющая достичь принципиально возможный минимум энергопотребления;
- алгоритм интенсивного энергосбережения неуклонно ведет к созданию не просто новой, но предельно эффективной техники;
- прогресс в разработке технологических систем в своих предельных, но принципиально допустимых формах является результатом решения предельных задач энергосбережения.

Сквозной энергетический анализ. Методология сквозного энергетического анализа разработана и введена в практику Лисиенко В.Г., Розиным С.Е., Щелоковым Я.М. и др. [2]. Основными особенностями данного анализа являются:

- введение технологического топливного числа как основной характеристики технологического процесса и готового изделия;
- рассмотрение в каждом процессе трех форм энергозатрат, различающихся по технологии получения, потребления и подходу к их экономии: первичная, производная и скрытая энергия;
- признание равноправности и необходимости учета всех видов энергоносителей и форм потребления энергии при определении энергоемкости готовой продукции;
- последовательное сквозное применение технологического топливного числа от добычи сырья до выпуска готовой продукции;
- использование в качестве средства анализа технологических топливных чисел вместо индивидуальных норм расхода топлива;
- одновременное исследование и оптимизация всех существенных факторов, влияющих на использование энергии в технологическом процессе;
- учет энергии вторичных ресурсов по экономии энергии при их полезном использовании;
- совместное использование различных видов анализа – энергетических (расчет энергозатрат), экономических (расчет переноса энергозатрат на продукцию), технологических (разработка и проверка вариантов технологий) и др.;
- отыскание и первоочередное решение проблем лимитирующих звеньев технологической цепи с целью получения максимального эффекта.

Выделено два подхода к оценке сквозной энергоемкости – структурированная и диссипативная формы.

Структурированная форма ТТЧ представляется в виде

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

где ТТЧ – технологическое топливное число; \mathcal{E}_1 – первичная энергия – химическая энергия топлива с учетом затрат на добычу, подготовку и транспортировку топлива, определяется как сумма низшей теплоты сгорания топлива и ТТЧ добычи, подготовки и транспортировки топлива; \mathcal{E}_2 – энергия произведенных энергоносителей – пара, теплоэнергии, электроэнергии, сжатого воздуха, кислорода, воды и т.д., определяется как сумма произведений ТТЧ соответствующих энергоносителей на их удельный расход; \mathcal{E}_3 – скрытая энергия – энергия, израсходованная в процессе подготовки сырья, производства оборудования, инструментов и т.д., определяется как сумма произведений ТТЧ соответствующих компонентов скрытой энергии на их удельный расход; \mathcal{E}_4 – энергия вторичных ресурсов – полезно использованные в данном или других производствах вторичные тепловые, топливные и материальные ресурсы, определяется как сумма произведений ТТЧ соответствующих вторичных энергоресурсов на их удельный выход и на коэффициент их полезного использования.

Диссипативная форма ТТЧ основывается на термодинамическом тепломассообменном анализе и представляется в виде

$$\text{ТТЧ}_n = \Delta q_1 / \eta_1 + \sum (\Delta q_{i\varepsilon} / \eta_{i\varepsilon}) \Psi_{i\varepsilon},$$

где ТТЧ_n – технологическое топливное число получения конечного продукта в цепочке из n технологических операций; Δq – удельный полезный расход энергии для операции i ; η – топливно-энергетический КПД для звена ε операции i ; Ψ – обобщенный (сквозной) расходный коэффициент для операции i .

На основе представленной формулы определяется КПД технологического процесса (глобальный энергетический КПД)

$$\eta_{ГЭ} = \Delta q_{\Sigma n} / \text{ТТЧ}_n,$$

где $\eta_{ГЭ}$ – глобальный энергетический КПД процесса; $\Delta q_{\Sigma n}$ – суммарная полезная удельная теплота, необходимая для получения конечного продукта в цепочке из n технологических операций; ТТЧ_n – технологическое топливное число получения конечного продукта в цепочке из n технологических операций.

Основы энерго-экологического анализа. В рамках энерго-экологического анализа предложено ввести в технологическую составляющую сквозной энергоемкости экологическую компоненту – технологическое экологическое число (ТЭЧ), как величину экологического ущерба, выраженную в энергетических единицах. Определение ТЭЧ может быть выполнено в структурированной и диссипативной форме, основными показателями для расчета которых являются количество загрязняющих компонентов, их концентрация в продуктах сгорания, агрессивность загрязняющих веществ, расход топлива, коэффициенты перевода стоимостной оценки ущерба окружающей среде к оценке в условных энергетических единицах.

Энерго-экологический анализ позволяет сформулировать новые подходы к повышению экологической эффективности технологических процессов, основными из которых являются сквозная оценка вредных выбросов по всей технологической цепочке и выявление взаимосвязи энергетических затрат и экономического ущерба, наносимого окружающей среде. Развитие энерго-экологического анализа связано с учетом выбросов парниковых газов в металлургическом производстве. Лисиенко В.Г., Лаптевой А.В., Чесноковым Ю.Н. предложено ввести показатель технологического парникового числа (ТПЧ) – количество килограммов условного топлива, требуемого для погашения стоимости экономического ущерба от выбросов парниковых газов на единицу выпускаемой продукции [5]. Результирующее значение ТПЧ для конкретной продукции вычисляется по значениям ТПЧ предыдущих переделов с учетом их массовых долей Ψ_i :

$$\text{ТПЧ} = K_b \sum_{i=1}^M \left(\Psi_i \sum_{k=1}^N M_{ik} \right),$$

где M_{ik} – фактическая удельная масса выбросов парниковых газов k -го загрязняющего вещества, т выбр/т прод., для i -го передела; K_b – коэффициент перевода стоимостной оценки ущерба к оценке в условных энергетических единицах (кг у.т/т п.г.).

Величина K_b характеризует степень компенсации экологического ущерба при действующем соотношении цен на условное топливо и платы предприятия за выбросы парниковых газов.

Анализ экобалансов разработан Черноусовым П.И., Неделиным С.В., Юсфиным Ю.С., Леонтьевым Л.И. для оценки эффективности развития предприятий металлургической промышленности [8; 10]. Под экобалансом авторы понимают совокупность показателей, оценивающих эффективность производственного процесса (технологии):

- расходование всех видов материальных и энергетических ресурсов;
- учет выбросов всех видов во все природные среды и рециклинга всех видов продукции, что позволяет прогнозировать последствия процессов для окружающей среды и общества.

Особенностью анализа экобалансов является возможность комплексной оценки эффективности металлургического производства. Авторами выделено три группы показателей для оценки эффективности:

1. *Показатели расхода природных материальных ресурсов*: удельный расход сырьевых материалов, коэффициент сокращения сплошной природной среды, удельный расход сырьевых материалов для производства основной и попутной продукции, сквозной коэффициент извлечения основного элемента, коэффициент потенциального техногенного накопления элемента.

2. *Показатели энергосбережения*: удельный расход энергоносителей на технологическую цепочку, общие затраты энергии на производство проката, удельный расход на единицу железа проката, энергоэкологическая эффективность газоочистки, коэффициент приближения к идеальной экстракции

3. *Показатели выбросов в окружающую среду*: показатель суммарных выбросов в атмосферу (CO , SO_x , NO_x , пыль), коэффициент депонирования мелкодисперсных отходов, показатель накопления техногенных грунтов, показатель эмиссии парниковых газов.

Расчет экобалансов и определение приведенных показателей эффективности позволяет выбрать наиболее выгодные технологические схемы производства. Анализ экобаланса углерода позволяет отличать выбросы CO_2 от металлургических процессов. В качестве показателя для оценки эффективности процессов в части выбросов парниковых газов авторами предложено использовать показатель выбросов, выраженный в тоннах углерода на тонну железа проката (т С / т Fe проката).

Список литературы

1. Данилов Н.И., Щелоков Я.М. Основы энергосбережения : учеб. – 2-е изд., доп. и перераб. / Н.И. Данилов, Я.М. Щелоков; под общ. ред. Н.И. Данилова. – Екатеринбург : Издательский дом «Автограф», 2010. – 528 с.
2. ГОСТ Р 51750-2001. Энергосбережение. Методика определения энергоемкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Общие положения. – М. : ИПК «Изд-во стандартов», 2001. – 27 с.
3. Картавцев С.В. Интенсивное энергосбережение и технический прогресс черной металлургии : монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 311 с.
4. Ключников А.Д. Критерии энергетической эффективности и резерва энергосбережения теплотехнологии, теплотехнологических установок, систем и комплексов : учеб. пособие по курсу «Энергоэкономическая оптимизация высокотемпературных систем». – М. : Изд-во МЭИ, 1996. – 38 с.
5. Лисиенко В.Г., Лаптева А.В., Чесноков Ю.Н. Сравнительный эколого-парниковый анализ альтернативных бескоксовых процессов производства чугуна и стали // Металлург. – 2011. – № 7.
6. Меркер Э.Э., Карпенко Г.А., Тынников И.М. Энергосбережение в промышленности и эксергетический анализ технологических процессов : учеб. пособ. – 2-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол : ООО «ТНТ», 2007. – 316 с.
7. Сидельсковский Л.Н., Юренев В.Н. Парогенераторы промышленных предприятий. – М. : Энергия, 1978. – 336 с.
8. Черноусов П.И. Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии : монография. - Изд. дом «МИСиС», 2011. – 428 с.
9. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. – М. : Энергия, 1968. – 379 с.
10. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2002. – 469 с.

Рецензенты:

Каплин Л.А., д.т.н., профессор, ректор НОУ ВПО «Московский институт управления и сервиса», г. Москва.

Сидоренко С.Н., д.х.н., профессор, заведующий кафедрой управления эколого-экономическими системами ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов», г. Москва.