

11.12.2013 № 599.

8. НиП 41–01–2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
9. СП 2.2.1.1312–03. Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий.
10. Thurley J. // Industrial Process Heating. 1970. Vol. 10. No 1. P. 30–38.
11. Колядич М.Н., Гринберг А.А., Жигалов В.П. // Гигиена и санитария. 1985. № 4. С. 36–38.
12. Царев В.К., Ляпаков В.М., Капошилов А.Н. и др. // Промышленная энергетика. 1993. № 6. С. 21–22.
13. Мысляков А.Л., Плотников В.В., Балдин Д.А. // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 11. С. 11–12.
14. Кравченко А.Н., Маликов Ю.К., Мысляков А.Л. и др. // Безопасность труда в промышленности. 2005. № 10. С. 22–24.
15. Величковский Б.Т., Маликов Ю.К., Троицкая Н.А. и др. // Гигиена и санитария. 2011. № 4. С. 41–45.

УДК 669.162

В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева, Ю. Н. Чесноков

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

СКВОЗНОЙ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ

Аннотация

В статье рассмотрены основные понятия сквозного энергоэкологического анализа, базирующихся на технологических топливных числах, которые измеряются в килограммах условного топлива на тонну продукции. В килограммах условного топлива на тонну продукции измеряются вредные выбросы в форме технологического экологического числа, которое переводит платы предприятия за ущерб, нанесенный природой в энергетические единицы. Введено технологическое парниковое число, переводящее плату предприятия за выбросы парниковых газов в килограммы условного топлива на тонну продукции. Энергетические затраты, произведенные при строительстве или ремонте агрегатов, цехов, которые представлены в виде амортизационных отчислений, представлены технологическим амортизационным числом. Так как все перечисленные параметры приведены к единой системе единиц, то можно рассматривать их ту или иную сумму в качестве характеристики того или иного процесса. Взвешенная сумма перечисленных параметров – технологическое топливно-эколого-парниковое число энергоэкологического анализа, позволяет выявить наилучшие доступные технологии для внедрения.

Ключевые слова: сквозной энергоэкологический анализ, технологическое амортизационное число, технологическое парниковое число, цена природного газа, теплота сгорания условного топлива.

Abstract

In article the basic concepts of the through power ecological analysis, based on technological fuel numbers which are measured in kilograms of conditional fuel on production ton are considered. Harmful emissions in the form of technological ecological number which translates payments of the enterprise for damage caused the nature in power units are measured in kilograms of conditional fuel on ton of production. The technological greenhouse number transferring a payment of the enterprise for emissions of greenhouse gases in kilograms of conditional fuel to production ton is entered. The power expenses made at construction or repair of units, shops which are presented in the form of depreciation charges are presented by technological depreciation number. As all listed

parameters are specified to uniform system of units, it is possible to consider their this or that sum as the characteristic of this or that process. The weighed sum of the listed parameters – technological fuel ecological - greenhouse number of the power ecological analysis, allows to reveal the best available technologies for introduction.

Key words: Through power ecological analysis, technological depreciation number, technological greenhouse number, price of natural gas, heat of combustion of conditional fuel.

Анализ энергопотребления в технологических процессах существующих методик определения тепловых энергетических балансов отдельно взятых переделов не позволяет найти показатели использования топливных энергоресурсов на конечную продукцию без проведения сквозных суммарных расчётов энергоёмкости технологического продукта. В наиболее представительном виде такая методика (методика расчёта технологических топливных чисел (ТТЧ)) была детально разработана (а далее успешно развивалась и применялась) в работах ученых УГТУ–УПИ и Уралэнергочермета (Лисиенко В. Г., Розин С. Е., Щелоков Я. М. и др.) в 80-х годах XX века [1, 2].

Был введен показатель сквозного энергетического анализа (СЭА) – ТТЧ. Оно равно суммарным расходам всех видов энергии в данном и во всех предшествующих технологических процессах, пересчитанные на необходимое для их получения первичное топливо, за вычетом ТТЧ полученных вторичных энергетических ресурсов. Энергоёмкость человеческого труда плохо пока определяется и в значение ТТЧ не входит. Методика использования ТТЧ процесса позволяет сравнивать удельные энергоёмкости отдельных видов продукции по различным отраслям промышленности, определять основные источники потерь энергии, направления её экономии, объективные результаты энергосберегающих мероприятий в отдельных технологических процессах.

Структурированная методика СЭА рассматривает следующий состав ТТЧ:

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

где \mathcal{E}_1 – энергия (естественного) ископаемого топлива (кг у.т./ед. прод.) с учетом затрат на его добычу, подготовку или обогащение, транспортировку и др.; \mathcal{E}_2 – производная энергия, например, электроэнергия, пар, компрессорный воздух, кислород и т. п.; \mathcal{E}_3 – скрытая энергия в исходных материалах, оборудовании, капитальных сооружениях данного процесса, а также в операциях по поддержанию оборудования в работоспособном состоянии, например, ремонты и т. п.; \mathcal{E}_4 – энергия вторичных ресурсов (коксовый, доменный газ и т. п.)

ТТЧ естественного топлива определяется как (далее м^3 даётся при н. у.):

$$\text{ТТЧ} = 1,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{Q_{\text{нпр.г}}^{\text{p}}}{Q_{\text{н.у.т}}^{\text{p}}}, \quad (2)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий добычу, транспортировку и подготовку топлива; 10^3 – коэффициент служит для перевода размерности кг у.т./кг прод. в кг у.т./т прод.

Для других продуктов ТТЧ определяется суммой ТТЧ ресурсов, используемых для их производства и умноженных на их расходы. Проиллюстрируем это на примере расчета ТТЧ дутья доменной печи. Удельный расход топлива на выработку сжатого воздуха для доменной печи составляет 17–20 кг у.т. на 1 000 приведенных м^3 [3]. Для расчетов примем значение этой величины 20 кг у.т. на 1 000 приведенных м^3 . ТТЧ подогрева дутья определяется по формуле

$$\text{ТТЧ}_{\text{пв}} = C_p \cdot V \cdot \Delta t / 29\,300, \quad (3)$$

где C_p – удельная теплоёмкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; V – объем воздуха, 1 000 м^3 ; Δt – приращение температуры воздуха, $^\circ\text{C}$. Удельная теплоемкость воздуха зависит от температуры. Определим $\text{ТТЧ}_{\text{пв}}$ одного кубического метра воздуха с плотностью 1,247 $\text{кг}/\text{м}^3$ для температуры 10°C : $1\,005 \cdot 1\,000 \cdot 1,247 / 29\,300 = 42,77$ кг у.т./1 000 м^3 . Суммарное ТТЧ_{Σ} дутья определяется как

$$\text{ТТЧ}_{\Sigma} = \text{ТТЧ}_{\text{пв}} + 20 + 117 \cdot 0,395 + 1\,270 \cdot 0,00024,$$

где 20 кг у.т./1 000 м^3 – удельный расход топлива на выработку сжатого воздуха для доменной печи на 1 000 приведенных м^3 ; 117 и 1 270 кг у.т./1 000 м^3 – ТТЧ доменного газа и природного

газа, соответственно; 0,395 и 0,00024 м³/1 000 м³ – расходы доменного газа и природного газа на нагрев дутья, м³/1 000 м³, соответственно. В случае большого количества ресурсов ТТЧ продукта вычисляется с помощью таблицы (таблица 1).

Таблица 1

Пример расчета ТТЧ дутья доменной печи

Ресурс	Единица измерения	ТТЧ ресурса, кг у.т./ед.	Расход ресурса, ед.	ТТЧ _и , кг у.т.
ТТЧ _{ПВ}				43
Топливо	кг	–	20	20
Доменный газ	1 000 м ³	117	0,395	46,2
Природный газ	1 000 м ³	1 270	0,00024	0,3
Оборудование и капитальные сооружения				50
Дутье	1 000 м ³	109,5		159,5

Таблица 2

ТТЧ на подогрев и дутье воздуха для доменной печи

t дутья, °С	C_p , кДж/(м ³ ·°С)	ТТЧ _{ПВ} , кг у.т./1 000 м ³	ТТЧ _Σ дутья, кг у.т./1 000 м ³
900	1,1706	35,957	152,477
1 000	1,1844	40,423	156,943
1 100	1,1970	44,939	161,458
1 200	1,2080	49,474	165,994
1 300	1,2179	54,037	170,556

Суммарное ТТЧ_Σ дутья вместе с выработкой и подогревом воздуха от $t = 0$ °С до указанной температуры t дутья приведены в таблице 2.

Дальнейшее развитие СЭА получил с разработкой методики комплексного сквозного энергоэкологического анализа (СЭЭА) для энерготехнологических объектов и процессов. В СЭЭА введено понятие технологического экологического числа (ТЭЧ), которое определяет плату предприятия за нанесенный ущерб окружающей среде [3]. ТЭЧ определяется как:

$$\text{ТЭЧ} = m_{\text{п}} \cdot K_{\text{вэ}}, \quad (4)$$

где $m_{\text{п}}$ – удельная приведенная масса вредных выбросов (т у. выбр./ед. прод.); $K_{\text{вэ}}$ – условный показатель, характеризующий степень компенсации экологического ущерба в кг у.т./т у. выбр. Согласно [38] величина $m_{\text{п}}$ может определяться формулой:

$$m_{\text{п}} = \sum_k (M_k \cdot A_k) \quad (5)$$

где M_k – фактическая удельная масса вредных выбросов k -го загрязняющего вещества, т выбр./ед. прод. для i -го передела; A_k – коэффициент агрессивности k -го загрязняющего вещества, т у. выбр./т выбр. Величина A_k на каждой иерархической ступени для одних и тех же вредных выбросов может изменяться, так как для локального воздействия на значения A_k больше влияют санитарно-гигиенические нормативы, для удаленного – экологические. Коэффициент перевода $K_{\text{вэ}}$ стоимостной оценки ущерба к оценке в условных энергетических единицах равен

$$K_{\text{вэ}} = \frac{C_{\text{в.в.}}}{C_{\text{п.г}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.п.г}}^{\text{р}}}{Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{р}}}, \quad (6)$$

где $C_{\text{в.в.}}$ – плата природопользователя за сверхлимитное загрязнение окружающей среды, \$ США/т у. выбр.; $C_{\text{п.г}}$ – цена природного газа; \$ США/м³; $Q_{\text{н.п.г}}^{\text{р}}$ – низшая рабочая теплота сгорания природного газа, МДж/м³, $Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{р}}$ – низшая рабочая теплота сгорания у.т., МДж/кг у.т. В качестве нормирующего эквивалента могут использоваться различные виды топлива: нефтяной, дизельный, газовый. Для России, как мощнейшей сырьевой державы, целесообразно применять газовый эквивалент, т.е. за стоимость топлива принята цена

природного газа. Величина $C_{\text{вв}}$ принята равной 0,045 \$ США/т у. выбр., $C_{\text{пг}} = 0,55$ \$ США/м³; $Q_{\text{н.пг}}^{\text{р}} = 35,8$ МДж/м³, $Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{р}} = 29,33$ МДж/кг у.т. В результате величина измерения ТЭЧ – кг у.т./ед. прод. С учетом численных значений:

$$K_{\text{вз}} = \frac{0,045 \text{ \$ США} / \text{т у.выбр.}}{0,547 \text{ \$ США} / \text{м}^3} \cdot \frac{35,8 \text{ МДж} / \text{м}^3}{29,33 \text{ МДж} / \text{кг у.т.}} = 0,101 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{т у.выбр.}}$$

Параметры ТТЧ и ТЭЧ имеют одинаковую размерность, поэтому было введено понятие технологического топливно-экологического числа (ТТЭЧ) – итоговая оценка энерго-экологических затрат при производстве продукции в кг у.т./ед. прод.:

$$\text{ТТЭЧ} = \text{ТТЧ} + \text{ТЭЧ}. \quad (7)$$

Чем меньше эта сумма, тем лучше энергоэкологические параметры анализируемого технологического процесса. Сквозные энергетические затраты рассчитываются в форме ТТЧ.

Методика СЭЭА с введением чисел ТТЧ и ТЭЧ не приобрела еще законченного вида. Необходимо было решить вопросы, касающиеся других затрат и выбросов. Дальнейшее развитие СЭЭА получил введением технологического амортизационного числа (ТАЧ), чтобы при расчетах ТТЧ учитывать затраты на оборудование и капитальные сооружения (амортизацию оборудования), представленные в энергетических единицах, израсходованных в предыдущих процессах – Эз. Эта величина ранее оценивалась приблизительно в $\text{Эз} = 50$ кг у.т./ед. прод. (таблица 1) В усовершенствовании методики СЭЭА амортизационные отчисления приводятся к энергетической форме с помощью ТАЧ. По определению, ТАЧ – это количество энергии (кг у.т.), эквивалентной величине амортизационных отчислений на единицу выпускаемой продукции и используемой при определении величины Эз для учета степени износа оборудования в каждом технологическом переделе. Значение ТАЧ рассчитывается по формуле

$$\text{ТАЧ} = \frac{A}{C_{\text{пр.г.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.пр.г}}^{\text{р}}}{Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{р}}}, \quad (8)$$

где A – величина амортизационных отчислений в денежном эквиваленте, \$ США/ед. прод. С учетом численных значений:

$$\text{ТАЧ} = \frac{A \text{ \$ США} / \text{ед. прод.}}{0,547 \text{ \$ США} / \text{м}^3} \cdot \frac{35,8 \text{ МДж} / \text{м}^3}{29,33 \text{ МДж} / \text{кг у.т.}} = 2,231 \cdot A \frac{\text{кг у.т.}}{\text{ед. прод.}} \quad (9)$$

Амортизационные платежи A могут начисляться по любому из применяемых на предприятии методов. Что касается скрытой энергии (Эз), то она имеется в балансах всех сравниваемых процессов. Для всего доменного процесса можно определить ТАЧ равной 6 кг у.т./ед. прод. Следовательно, число 50 в таблице 1 в строке «Оборудование и капитальные сооружения» велико. Введение параметра ТАЧ повышает точность определения ТТЧ продукции.

По аналогии с ТТЧ и ТЭЧ [5, 6] введено понятие технологического парникового числа (ТПЧ) технологического процесса и продукта (сквозное ТПЧ). ТПЧ определяется количеством кг у.т., необходимого для погашения стоимости экономического ущерба от выбросов парниковых газов на единицу выпускаемой продукции. ТПЧ преобразует рубли в кг у.т., т.е. экономические параметры в энергетические. Это позволяет говорить об энергетической экономике, которая оперирует более стабильными величинами. При этом за стоимость топлива принята цена природного газа [6]:

$$\text{ТПЧ}_{\text{пи}} = K_{\text{вп}} \cdot \sum_{k=1}^N M_k^{\text{н.г.}} \quad (10)$$

где $K_{\text{вп}}$ – коэффициент перевода стоимостной оценки ущерба к оценке в условных энергетических единицах (кг у.т./т п. г.); $M_k^{\text{н.г.}}$ – фактическая удельная масса выбросов парниковых газов, т выбр./ед. прод. для i -го передела; N – количество учитываемых парниковых газов (здесь учитывается эмиссия только диоксида углерода, т.е. $N = 1$). Величина $K_{\text{вп}} = K_{\text{вз}}$ (раздел 1.2). Коэффициент $K_{\text{вп}}$ представляется в виде:

$$K_{\text{вп}} = \frac{C_{\text{п.г.}}}{C_{\text{пр.г.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.пр.г.}}^{\text{р}}}{Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{р}}}, \quad (11)$$

где $C_{\text{п.г.}}$ – учитывает плату за эмиссию парниковых газов природопользователя за загрязнение окружающей среды выбросами в атмосферу парниковых газов, принято значение 0,045 \$ США/т парн. газ. В результате размерность ТПЧ – кг у.т./ед. прод. С учетом численных значений:

$$K_{\text{вп}} = \frac{0,045 \$ \text{ США} / \text{т у.выбр.}}{0,547 \$ \text{ США} / \text{м}^3} \cdot \frac{35,8 \text{ МДж} / \text{м}^3}{29,33 \text{ МДж} / \text{кг у.т.}} = 0,101 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{т п.г.}}$$

Таким образом, ТПЧ для металлургических процессов однозначно определяется эмиссией диоксида углерода.

Основная идея интегрированного энерго-эколого-парникового анализа выражается следующей формулой, заменившей формулу (7):

$$\text{ТТЭПЧ} = \alpha_1 \cdot \text{ТТЧ}_{\Sigma} + \alpha_2 \cdot \text{ТЭЧ} + \alpha_3 \cdot \text{ТПЧ}, \quad (12)$$

ТТЭПЧ – технологическое топливно-эколого-парниковое число, кг у.т./ед. продукта; ТТЧ_{Σ} – суммарное технологическое топливное число (энергоемкость продукции без учета энергоемкости человеческого труда), равное $\text{ТАЧ} + \sum \Psi_i \cdot \text{ТТЧ}_i$; Ψ_i – коэффициент расхода i -го ресурса; ТТЧ_i – ТТЧ i -го ресурса, кг у.т./ед. продукта; α_i – коэффициенты, предназначенные для обеспечения соизмеримости слагаемых.

Заключение

1. Введение новых понятий ТАЧ и ТПЧ усовершенствовало методику сквозного энергоэкологического и парникового анализа.

2. Параметр ТТЭПЧ определяет сквозную энергоэкологическую и парниковую характеристику процесса. Чем меньше значение ТТЭПЧ у процесса, тем меньше его энергоёмкость и меньший ущерб он наносит окружающей среде. По этому параметру целесообразно выбирать наилучшие доступные технологии для внедрения.

Список использованных источников

1. Лисиенко В.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: справочное издание: в 3-х книгах. Книга 1 / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 608 с.
2. Лисиенко В.Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности: монография / В.Г. Лисиенко, Н.В. Соловьева, О.Г. Трофимова; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.
3. Розенгарт Ю.И. Теплоэнергетика металлургических заводов: учеб. для вузов / Ю.И. Розенгарт [и др.]. – М.: Металлургия, 1985. – 303 с.
4. Лисиенко В.Г. Энергоэкологический анализ, программное обеспечение и снижение эколого-экономического ущерба: учеб. пособие для вузов / В.Г. Лисиенко, О.Г. Дружинина, Б.Б. Зобнин [и др.]; под ред. В.А. Морозовой. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 310 с.
5. Лисиенко В.Г. Анализ энергоемкости и эмиссии CO_2 при различных сочетаниях коксовых и бескоксовых процессов при производстве стали / В.Г. Лисиенко, Ю.Н. Чесноков, А.В. Лаптева // Металлург. – 2015. – № 5. – С. 18–24.
6. Ануфриев В.П. Исследование конкурентоспособности по углеродному следу продукции различных сочетаний металлургических переделов / В.П. Ануфриев, В.Г. Лисиенко, Н.В. Стародубец, Ю.Н. Чесноков, А.В. Лаптева // Экономика и предпринимательство. – 2013. – № 10. – С. 312–316.