КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ ВЫБОРА НДТ

Я. М. ЩЕЛОКОВ¹, член Коллегии, канд. техн. наук, доцент; В. Г. ЛИСИЕНКО², д-р техн. наук, профессор;
Ю. Н. ЧЕСНОКОВ³, канд. техн. наук, доцент; А. В. ЛАПТЕВА³, канд. техн. наук, доцент, annalapteva@mail.ru
(¹ СРО Ассоциация “Союз “Энергоэффективность”, Россия, г. Екатеринбург;
² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия, г. Екатеринбург; ³ Уральский государственный экономический университет,
Россия, г. Екатеринбург)

Аннотация. Во введенных в Российской Федерации информационно-технических справочниках по наилучшим доступным технологиям (НДТ) для различных процессов черной металлургии приведены допустимые максимальные значения выбросов вредных веществ. Первый опыт применения НДТ выявил проблему совмещения энергетической и экологической эффективности. Для ее решения предложен комплексный критерий выбора НДТ по минимуму сквозного технологического топливного экологического парникового числа, который одновременно характеризует энергоемкость, экологический ущерб производства и эмиссию парниковых газов технологического продукта. В предложенной методике экологический ущерб и эмиссия парниковых газов выражаются в энергетических единицах, что позволяет сопоставлять ранее определенную энергоемкость продукции рассматриваемых производств с ущербом от выбросов вредных и парниковых газов. Предложено понятие “технологическое топливное число” (ТТЧ), определяемое как суммарный расход всех видов энергии в рассматриваемом и во всех предшествующих технологических процессах за вычетом ТТЧ, образуемых вторичными энергетическими ресурсами. Приведены значения ТТЧ для различных видов продукции предприятий черной металлургии и ресурсов, используемых для их производства, значения нормативной платы за выбросы вредных веществ и их удельных выбросов в черной металлургии.

Ключевые слова: черная металлургия, наилучшие доступные технологии, энергоемкость, выбросы вредных веществ, технологическое топливное число, плата за вредные выбросы, парниковый газ.

Ссылка для цитирования: Щелоков Я.М., Лисиенко В.Г., Чесноков Ю.Н., Лаптева А.В. Комплексный критерий выбора НДТ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 12. С. 1385–1391.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-12-1385-1391

A COMPREHENSIVE CRITERION FOR BAT SELECTION

YA. M. SCHELOKOV¹, a member of the Board, PhD (Tech.), Prof. Ass.; V. G. LISIENKO², HD (Tech.), Prof.;
YU. N. CHESNOKOV³, PhD (Tech.), Prof. Ass.; A. V. LAPTEVA³, PhD (Tech.), Prof. Ass., annalapteva@mail.ru
(¹ SPO Association “Soyuz “Energoeffektivnost”, Russia, Ekaterinburg;
² Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Russia,
Ekaterinburg; ³ Ural State Economic University, Russia, Ekaterinburg)

Abstract. All introduced in Russian Federation information and technical reference books on the best available technologies (BAT) for various processes of steel industry have acceptable maximum values of harmful substances emission. The first experience of BAT application revealed a problem of matching of energy and ecology effectiveness. For its solving, a comprehensive criterion proposed for selection of BAT by minimum end-to-end technological fuel ecological greenhouse number, which at the same time characterizes energy intensity, ecological losses of a plant and emission of greenhouse gases of a technological product. In the proposed methodology, the ecological losses and greenhouse gases emission is expressed in energy units, that enables to compare a product energy intensity, determined before for various plants, with the losses resulted in harmful and greenhouse gases emissions. A concept of “technological fuel number” (TFN), determined as summery consumption of all kinds of energy in the considered and in all the previous technological processes less TFN, formed by secondary energy resources. Values of TFN for various kinds of products of steel industry plants and resources, used for their production quoted, as well as values of normative payment for harmful substances emission and their specific emissions in steel industry.

Key words: steel industry, best available technologies, energy intensity, harmful substances emissions, technological fuel number, payment for harmful emissions, greenhouse gas.

For citation: Schelokov Ya.M., Lisienko V.G., Chesnokov Yu.N., Lapteva A.V. A comprehensive criterion for BAT selection. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 12, pp. 1385–1391. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-12-1385-1391

Наилучшая доступная технология (НДТ) — это технология организации и производства продукции (товаров), выполнения работ, оказания услуг, определяемая на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды [1]. В Российской Федерации введены информационно-технические справочники (ИТС) по НДТ в каждом виде экономической деятельности. Критерии для определения НДТ следующие [1]:

- наименьший удельный уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу времени или объем продукции;
- экономическая эффективность внедрения НДТ и эксплуатации;
- применение ресурсо- и энергосберегающих методов.

Таким образом, оценка эффективности НДТ должна быть энергоэкологической, т. е. комплексной.

Первый опыт показал проблемы в части “сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды”, а именно обеспечение энергоэкологической эффективности НДТ.

Существует следующая проблема. Три основные стороны производственного персонала (экологи, технологи, энергетики предприятий) пока не находят понимания, как совместить в НДТ энергетическую и экологическую эффективности. Поэтому не наблюдается комплексного (энергоэкологического) подхода и в ИТС. Покажем пример энергоэкологического подхода, используя данные из ИТС 26–2017 (сталь, чугун) [2].

Показатели технологической и энергетической эффективности приведены в приложениях к ИТС. Там же дан перечень загрязнителей и энергоносителей, их удельное содержание.

В Европейском Союзе справочные документы (СД) по НДТ являются обязательными, а не информационными. В ЕС действуют всего 33 справочника. В том числе принят отдельно СД по энергоэффективности.

В отраслевых СД Российской Федерации по НДТ есть раздел, посвященный нормативам потребления материалов и выбросов загрязняющих веществ. То есть в отечественных ИТС имеется та же раздельная схема изложения показателей эффективности НДТ.

Предлагаем комплексный критерий выбора НДТ по минимуму сквозного технологического топливного экологического парникового числа, который характеризует энергоемкость, экологический ущерб производства и эмиссию парниковых газов технологического продукта.

Экологический ущерб и эмиссия парниковых газов выражены в энергетических единицах. Это дает возможность сопоставлять ранее определенную энергоемкость продукции рассматри-

ваемых производств с ущербом от выбросов вредных и парниковых газов.

Суть существующей методики сквозного энерго-экологического анализа состоит в приведении энергоемкости продукции, эмиссии вредных выбросов и удельных выбросов парниковых газов к энергетическим единицам [3–6]. Сквозной анализ означает, что все его параметры определяются с момента добычи и транспортировки ресурсов и по всей технологической цепочке производства продукта.

Технологическое топливное число (ТТЧ) равно суммарным расходам всех видов энергии в данном и во всех предшествующих производствах технологических процессов, пересчитанных на необходимое для их получения первичное топливо, за вычетом ТТЧ, образуемых вторичными энергетическими ресурсами (ВЭР). Его единица измерения — кг у.т/ед. продукции. Следовательно, ТТЧ имеет следующий состав [3–6]:

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

где $\mathcal{E}_1$ — энергия ископаемого топлива с учетом затрат на его добычу, подготовку или обогащение, транспортировку и др.; $\mathcal{E}_2$ — 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 ВЭР. Примеры некоторых значений ТТЧ для различных ресурсов черной металлургии приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ЗНАЧЕНИЯ ТТЧ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕСУРСОВ

TABLE 1. VALUES OF TFN FOR VARIOUS RESOURCES

Энергоноситель	ТТЧ, кг у.т/ед. продукции
Агломерат, т	111,00
Вода (техническая), м ³	0,12
Дутье (подогрев), м ³	0,104
Дутье холодное, м ³	0,096
Известь, т	136,00
Кислород, м ³	0,240
Кокс, т	1396,00
Мазут, м ³	1260,00
Окатыши металлизированные, т	806,80
Природный газ, м ³	1,34
Руда обогащенная, т	39,00
Сталь конвертерная, т	926,00
Электросталь, т	637,00
Уголь, т	962,00
Флюсы, т	9,60
Чугун доменной плавки, т	946,00
Электроды, т	7200,00
Электроэнергия, кВт·ч	0,39

Скрытая энергия, которая затрачена в исходных материалах, оборудовании, капитальных сооружениях данного процесса, в операциях по поддержанию оборудования в работоспособном состоянии, соответствует амортизационным отчислениям в финансовых единицах A . В статье [6] предложена формула перевода финансовых единиц в энергетические в форме технологического амортизационного числа (ТАЧ):

$$ТАЧ = \frac{A}{C_{пр.г}} \cdot \frac{Q_{н.пр.г}^p}{Q_{н.у.т}^p} = AK_{п}, \quad (2)$$

где A — величина амортизационных отчислений в денежном эквиваленте; $C_{пр.г}$ — цена природного газа; $Q_{н.пр.г}^p$ — низшая рабочая теплота сгорания природного газа, МДж/кг у.т.; $Q_{н.у.т}^p = 29,33$ МДж/кг у.т. — низшая рабочая теплота сгорания условного топлива; $K_{п}$ — коэффициент приведения. Для природного газа примем $Q_{н.пр.г}^p = 35,8$ МДж/кг у.т. В связи с инфляцией значение A изменяется с годами.

В коэффициенте приведения $K_{п}$

$$K_{п} = \frac{Q_{н.пр.г}^p}{C_{пр.г} Q_{н.у.т}^p} \quad (3)$$

использованы цена и низшая теплота сгорания природного газа по причине того, что природный газ является основным ресурсом в черной металлургии. В свое время цена этого газа была достаточно стабильной, что обеспечивало стабильную оценку ТАЧ. В настоящее время эту цену необходимо корректировать с учетом годовых изменений амортизационных отчислений A . Эту цену приводим к текущим амортизационным выплатам. Таким образом, ТАЧ является нестабильной величиной в отличие от значения ТТЧ. ТАЧ входит в состав ТТЧ (до введения понятия ТАЧ параметр ТТЧ рассчитывался при энергетическом представлении амортизационных отчислений, равных 50 кг у.т./ед. продукции). Уточненная формула для расчета ТТЧ имеет вид

$$ТТЧ_{\Sigma} = [\Sigma(\Psi_i ТТЧ_i) + ТАЧ],$$

где $ТТЧ_{\Sigma}$ — суммарное ТТЧ, кг у.т./ед. продукции; Ψ_i — коэффициент расхода i -го ресурса; $ТТЧ_i$ — ТТЧ i -го ресурса, кг у.т./ед. продукции; ТАЧ — технологическое амортизационное число, кг у.т./ед. продукции.

Плата предприятий за выбросы вредных веществ в окружающую среду определяется нормативными документами. Суммарную плату i -го процесса в энергетических единицах определяет технологическое экологическое число (ТЭЧ) [7]:

$$ТЭЧ_i = K_{п} \sum_1^n (C_{в.в.k} M_k), \quad (4)$$

где M_k — фактическая удельная масса вредных выбросов k -го загрязняющего вещества; $C_{в.в.k}$ — плата (нормативная, лимитная и сверхлимитная) природопользователя за загрязнение окружающей среды k -м веществом, руб/т; n — количество вредных веществ, образующихся в i -м процессе. Применительно к НДТ в качестве $C_{в.в.k}$ следует выбирать нормативную плату. Лимитная и сверхлимитная платы возникают при нарушении технологического процесса, т. е. в технологиях, которые нельзя отнести к наилучшим доступным.

В табл. 2 приведены размеры нормативной платы за загрязнение окружающей среды образующимися в черной металлургии вредными веществами*. В табл. 3 указаны удельные массы выбросов вредных веществ в процессах аглодомного цикла [2]. В табл. 4 приведены значения выплат за выбросы по конкретным вредным веществам, суммарных выплат в i -м процессе и ТЭЧ_{*i*}. При вычислении коэффициента приведения цена природного газа была принята равной 33 руб/м³, или 45 руб/кг.

ТАБЛИЦА 2. ЗНАЧЕНИЯ НОРМАТИВНОЙ ПЛАТЫ ЗА ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

TABLE 2. VALUES OF STANDARD PAYMENT FOR EMISSIONS OF HARMFUL SUBSTANCES

Вредное вещество	Нормативная плата, руб/кг
Диоксид азота NO ₂	0,1388
Оксид азота NO	0,0935
Оксид углерода CO	0,0016
Диоксид серы SO ₂	0,0454
Диоксид углерода CO ₂	Норматива оплаты нет

* Постановление Правительства РФ от 29.06.2018 г. № 758 "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительные коэффициенты".

ТАБЛИЦА 3. УДЕЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

TABLE 3. SPECIFIC EMISSIONS OF HARMFUL SUBSTANCES IN STEEL INDUSTRY

Вредное вещество	Выбросы в окружающую среду, кг/т продукции				
	агломерационная машина	коксовая батарея	доменная печь	кислородный конвертер	ЭДП
Диоксид азота NO ₂	0,40	0,80	0,30	0,20	0,6
Оксид азота NO	0,15	0,80	0,02	0,05	0,2
Оксид углерода CO	14,00	5,50	5,00	5,00	4,5
Диоксид серы SO ₂	4,00	1,50	—	0,05	0,3

ТАБЛИЦА 4. ПЛАТА ЗА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РАЗЛИЧНЫХ ЕДИНИЦАХ ИЗМЕРЕНИЯ

TABLE 4. POLLUTION CHARGES IN VARIOUS UNITS

Вредное вещество	Агломерационная машина	Коксовая батарея	Доменная печь	Кислородный конвертер	ЭДП
Плата за загрязнение окружающей среды (руб/т продукции)					
Диоксид азота NO ₂	0,0555	0,1110	0,0416	0,0278	0,0833
Оксид азота NO	0,0140	0,0748	0,0019	0,0047	0,0187
Оксид углерода CO	0,0224	0,0088	0,0080	0,0080	0,0072
Диоксид серы SO ₂	0,1816	0,0681	0,0000	0,0023	0,0136
Плата	0,2735	0,2627	0,0515	0,0427	0,1228
Технологическое экологическое число (кг у.т/т продукции)					
ТЭЧ _i	0,0074	0,0071	0,0014	0,0012	0,00333
ТЭЧ _{сi}	0,01681	0,00732	0,02691	0,02269	0,02217

Вычисление значения сквозного ТЭЧ удобно и наглядно выполнять с использованием графа ТЭЧ [7]. В качестве примера такой граф для данных из табл. 2–4 представлен на рисунке. Граф имеет вершины в виде овалов (см. рисунок), внутри которых указаны: название процесса,

значение ТЭЧ_i, а через косую черту значение сквозного ТЭЧ_{сi}. Вершины соединены дугами (см. рисунок, изображены стрелками), на которых показаны расходы соответствующих ресурсов Ψ . Процессы пронумерованы слева направо числами от 1 до n .

Граф ТЭЧ производства стали:

ГОК — горно-обогатительный комбинат; УД — угледобывающее предприятие; КБ — коксовая батарея; АМ — агломерационная машина; ДП — доменная печь; КК — кислородный конвертер; 1–7 — номера процессов

Diagram TENC of steel production:

ГОК — mining and processing plant; УД — coal-mining plant; КБ — coke battery; АМ — sintering machine; ДП — blast furnace; КК — BOF converter; 1–7 — numbers of processes

На рисунке количество процессов $n = 7$. В предложенном примере аглодоменный передел условно разбит на семь процессов. Значение сквозного ТЭЧ_{сi} в i -й вершине определяется

суммой ТЭЧ_i i -го процесса и транзитных ТЭЧ, рассчитываемых как сумма произведений сквозных эмиссий предыдущих вершин на расходы ресурсов из этих вершин. В таком случае рекур-

рентная формула вычисления сквозного ТЭЧ_{Ci} в *i*-м процессе имеет вид

$$\text{ТЭЧ}_{Ci} = \sum_{k=1}^{i-1} (\Psi_{i-k,i} \text{ТЭЧ}_{i-k}) + \text{ТЭЧ}_i, \quad (5)$$

где $\Psi_{i-k,i}$ — расход на *i*-м процессе ресурса, который был образован в (*i-k*)-м процессе; ТЭЧ_{i-k} — сквозное ТЭЧ (*i-k*)-го процесса, кг у.т/ед. продукции. Причем $\Psi_{i-k,i} = 0$, если (*i-k*)-й процесс и *i*-й процесс между собой не связаны технологической цепочкой.

По формуле (5) значение сквозной ТЭЧ_{C4} определяется как

$$\text{ТЭЧ}_{C4} = \Psi_{3,4} \text{ТЭЧ}_{C3} + \Psi_{2,4} \text{ТЭЧ}_{C2} + \Psi_{1,4} \text{ТЭЧ}_{C1} + \text{ТЭЧ}_4.$$

Однако $\Psi_{1,4} = 0$ (на графе таких связей нет), таким образом,

$$\text{ТЭЧ}_{C4} = \Psi_{3,4} \text{ТЭЧ}_{C3} + \Psi_{2,4} \text{ТЭЧ}_{C2} + \text{ТЭЧ}_4.$$

Расходы ресурсов взяты из работы [8]. Общая формула (5) усложнена необходимостью выявления $\Psi_{i-k,i}$ с нулевыми значениями. По изображению графа ТЭЧ (см. рисунок) определение значения сквозного ТЭЧ_i упрощается (видны связи между процессами). Для приведенных данных в табл. 2–4 справедливы следующие результаты, кг у.т/т продукции:

$$\text{ТЭЧ}_{C3} = 1,4 \times 0,00014 + 0,0071 = 0,00732;$$

$$\text{ТЭЧ}_{C4} = 0,9 \times 0,00014 + 1,3 \times 0,00732 + 0,0072 = 0,01681;$$

$$\text{ТЭЧ}_{C5} = 1,3 \times 0,01681 + 0,5 \times 0,00732 + 0,0014 = 0,02691;$$

$$\text{ТЭЧ}_{C6} = 0,8 \times 0,02691 + 0,0012 = 0,02269;$$

$$\text{ТЭЧ}_{C7} = 0,7 \times 0,02691 + 0,0033 = 0,02217.$$

Эмиссия парниковых газов предприятиями в Российской Федерации не подлежит оплате и не относится к экологическим проблемам, однако необходимость снижения ее обусловлена международными соглашениями. По этой причине при выборе НДТ целесообразно оценивать эмиссии парниковых газов. В работе [6] предложено технологическое парниковое число (ТПЧ), измеряемое в кг у.т/т продукции и вычисляемое по формуле

$$\text{ТПЧ}_{\text{ли}} = K_n \sum_{k=1}^N (C_{\text{п.г.к}} M_{\text{п.г.к}}), \quad (6)$$

где $C_{\text{п.г.к}}$ — ожидаемая плата за выбросы парниковых газов; $M_{\text{п.г.к}}$ — фактическая удельная масса выбросов парниковых газов, т/ед. продукции

для *i*-го процесса; N — количество учитываемых парниковых газов. В черной металлургии образуется единственный парниковый газ — диоксид углерода. Другие парниковые газы сгорают в составе вторичных энергетических ресурсов до CO_2 , т. е. $N = 1$. Параметр ТПЧ рассматривается для процесса и для сквозной цепи производства соответствующего продукта — сквозное ТПЧ.

В работе [9] приведены значения сквозных ТПЧ переделов черной металлургии (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. ТПЧ ПРОДУКТОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

TABLE 5. TGN OF STEEL INDUSTRY PRODUCTS

Продукт	Сквозное ТПЧ, кг у.т/т продукции
Чугун из доменной печи	2575
Сталь из кислородного конвертера	2440
Сталь из электродуговой печи	1575

Найденные сквозные энергетические, экологические и парниковые характеристики производства стали приведены в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ

TABLE 6. CHARACTERISTICS OF STEEL PRODUCTION

Технологический параметр, кг у.т/т стали	Сталь конвертерная	Электросталь
ТТЧ [10, 11]	926	637
ТЭЧ	0,02269	0,02217
ТПЧ [10, 11]	2440	1575

Так как их значения не соизмеримы, то в качестве комплексного критерия выбора НДТ можно использовать наименьшее значение сквозного технологического топливного экологического парникового числа (ТТЭПЧ):

$$\begin{aligned} \text{ТТЭПЧ} &= a_1 \text{ТТЧ}_\Sigma + a_2 \text{ТЭЧ}_C + a_3 \text{ТПЧ}_C = \\ &= a_1 [\sum (\Psi_i \text{ТТЧ}_i) + \text{ТАЧ}] + a_2 \text{ТЭЧ}_C + a_3 \text{ТПЧ}_C, \quad (7) \end{aligned}$$

где ТЭЧ_C — сквозное технологическое экологическое число, кг у.т/ед. продукции; ТПЧ_C — сквозное технологическое парниковое число, кг у.т/ед. продукции; a_i — коэффициенты приведения к одному диапазону, *i* изменяется в диапазоне от 0 до *n*.

Необходимо заметить, что параметр ТТЭПЧ характеризует не одну, а цепочку технологий, так как ТТЧ определяет сквозную энергоемкость продукта. Соответственно ТЭЧ и ТПЧ в формуле (7) также пересчитываются в сквозные парамет-

ры по значениям $TЭЧ_C$ и $ТПЧ_C$ для технологических процессов, которые участвуют в получении продукта.

Так как за парниковые газы в РФ плата не взимается, то целесообразно рассмотреть следующее соотношение:

$$TTЭПЧ = a_1 TTЧ_{\Sigma} + a_2 TЭЧ_C. \quad (8)$$

Значения величин $TTЧ$ и $TЭЧ$ значительно различаются. Например, $TTЭПЧ = 1135 + 0,02269 = 1135,02269$ кг у.т/т продукции. Предположим, $TЭЧ$ увеличилось на 10 %, т. е. $TЭЧ = 0,02496$ кг у.т/т продукции. Тогда $TTЭПЧ = 1135 + 0,02496 = 1135,02496$ кг у.т/т продукции. Таким образом, $TTЭПЧ$ увеличилось всего на 0,0002 %, т. е. $TTЭПЧ$ практически не изменилось. Следовательно, при таких соотношениях $TЭЧ$ и $TTЧ$ комплексный критерий для выбора НДТ не отражает экологический показатель, поэтому выбрать его в качестве комплексного критерия невозможно. Необходимо значения $TTЧ$ и $TЭЧ$ сделать соизмеримыми, для чего введены коэффициенты a_1 и a_2 в формуле (8).

Для выбора коэффициентов a_1 и a_2 рассмотрим соотношение $C = A + B$. Зададим $\Delta B = 0,1B$, тогда $\Delta C = \Delta B$. Допустим $A = B$. Относительное изменение $\Delta C = \Delta B / (A + B) = 0,1B / (2B) = 0,05$. То есть при равенстве исходных слагаемых изменение одного из них на 10 % приводит к изменению результата на 5 %. Примем $a_1 = 1$ и выберем $a_2 = TTЧ / TЭЧ$. Получим $a_2 = 926 / 0,02269 = 40811$. Следовательно, $TTЭПЧ = TTЧ_{\Sigma} + 40811 TЭЧ$. Такой критерий в 2 раза менее чувствителен по сравнению с изменениями его компонентов. Если $A > B$, то чувствительность $TTЭПЧ$ меньше 5 % при изменении B на те же 10 %. Зато чувствительность $TTЭПЧ$ к изменению A на 10 % будет выше 5 %.

Протестируем выражение (8). Примем $a_2 = 41000$. При исходных значениях $TЭЧ = 0,02269$ кг у.т/т продукции и $TTЧ = 926$ кг у.т/т продукции исходное значение $TTЭПЧ = 1856,29$ кг у.т/т продукции. Уменьшим $TЭЧ$ на 10 %, получим $TЭЧ = 0,02042$ кг у.т/т продукции и при исходном значении $TTЧ$ получим $TTЭПЧ = 1763,25$ кг у.т/т продукции, т. е. его значение уменьшилось от исходного на 5,012 %. Уменьшим $TTЧ$ на 10 %, получим $TTЧ = 833$ кг у.т/т продукции. При исходном значении $TЭЧ$ получим $TTЭПЧ = 1763,69$ кг у.т/т продукции, т. е. значение критерия (8) уменьшилось от исходного на 4,988 %. Критерий (8) обладает практически одинаковой чувствительностью к изменениям как $TTЧ$, так и $TЭЧ$.

Для ЭДП при том же значении $a_2 = 41000$ получим $TTЭПЧ = 637 + 41000 \cdot 0,02217 = 1545,97$ кг у.т/т продукции. Уменьшим $TЭЧ$ на 10 %, получим $TЭЧ = 0,01995$ кг у.т/т продукции и при исходном значении $TTЧ$ получим $TTЭПЧ = 1455,07$ кг у.т/т продукции, т. е. его значение уменьшилось от исходного на 5,880 %. Уменьшим $TTЧ$ на 10 %, получим $TTЧ = 573,3$ кг у.т/т продукции. При исходном значении $TЭЧ$ получим $TTЭПЧ = 1482,27$ кг у.т/т продукции, т. е. значение критерия (8) уменьшилось от исходного на 4,120 %. Критерий (8) обладает близкой чувствительностью к изменениям как $TTЧ$, так и $TЭЧ$. При $a_2 = 28732,52$ эта чувствительность будет одинаковой, но значение этого коэффициента целесообразно выбирать не зависящим от технологического процесса.

Возможен другой подход к получению соизмеримых изменений $TTЭПЧ$ по сравнению с изменениями его компонентов. Следуя примеру работы [7], коэффициенты a_1 и a_2 можно привести к безразмерной величине, например, по формулам:

$$a_1 = a_1 TTЧ_{\Sigma} / TTЧ_{\Sigma \max};$$

$$a_2 = a_2 TЭЧ / TЭЧ_{\max} = a_2 \Sigma(C_{в.в.к} M_k) / \max \Sigma(C_{в.в.к} M_k);$$

$$a_3 = a_3 ТПЧ / ТПЧ_{\max} = a_3 \Sigma(C_{п.г.к} M_{п.г.к}) / \max \Sigma(C_{п.г.к} M_{п.г.к}),$$

где $TTЧ_{\Sigma \max}$, $TЭЧ_{\max}$, $ТПЧ_{\max}$ — наибольшие возможные значения величин $TTЧ_{\Sigma}$, $TЭЧ$, $ТПЧ$, кг у.т/ед. продукции; a_1 , a_2 , a_3 — весовые коэффициенты, причем $a_1 + a_2 + a_3 = 1$; $\max \Sigma(C_{в.в.к} M_k)$, $\max \Sigma(C_{п.г.к} M_{п.г.к})$ — максимально возможные выплаты за выбросы вредных веществ и парниковых газов. Введение таких коэффициентов устраняет влияние цены природного газа на значение $TTЭПЧ$.

Например, зададим $TTЧ_{\Sigma \max} = 2500$ кг у.т/т продукции, $TЭЧ_{\max} = 0,05$ кг у.т/т продукции, $ТПЧ_{\max} = 3000$ кг у.т/т продукции, $a_1 = 0,4$, $a_2 = 0,3$, $a_3 = 0,3$. В этом случае получим $TTЭПЧ = 0,52688$ кг у.т/т продукции. Уменьшим $TЭЧ$ на 10 %, т. е. $TЭЧ = 0,02042$ кг у.т/т продукции. В этом случае $TTЭПЧ = 0,51327$ кг у.т/т продукции, т. е. уменьшилось на 2,6 %. При уменьшении $TTЧ$ на 10 % найдем, что $TTЭПЧ = 0,50872$ кг у.т/т продукции уменьшилось более чем на 3 %. Таким образом, предложенный критерий почти в 3 раза снижает чувствительность к изменениям его компонент. Изменением значений коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 можно значение параметра $TTЭПЧ$ выбрать таким, чтобы можно было отдать предпочтение энергоемкости, экологичности или климатической нейтральности производства.

Заключение

Предложен комплексный критерий НДТ для который учитывает энергетический, экологический и парниковый аспекты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон “Об охране окружающей среды” от 10.01.2002 № 7-ФЗ (редакция от 26 июля 2019 г.).
2. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство чугуна, стали и ферросплавов. — М.: Бюро НДТ, 2017. — 478 с.
3. Щелоков Я.М. Об энерготехнологической производительности сталеплавильных производств // *Сталь*. 1988. № 9. С. 20–21.
4. Лисиенко В.Г., Розин С.Е., Щелоков Я.М. Методика расчета и использование технологических топливных чисел // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1987. № 2. С. 108–112.
5. Лисиенко В.Г., Пареньков А.Е., Лаптева А.В. Оценка энергоэффективности альтернативных бескоксковых металлургических технологий // *Сталь*. 2009. № 2. С. 72–77.
6. Лисиенко В.Г., Чесноков Ю.Н., Лаптева А.В. Сравнительный эколого-парниковый анализ альтернативных бескоксковых процессов производства чугуна и стали // *Металлург*. 2011. № 7. С. 40–45.
7. Трофимова О.Г. ТЭЧ-графы в анализе металлургических переделов // IV Международная интерактивная научно-практическая конференция “Инновации в материаловедении и металлургии”. — Екатеринбург: ФГАОУ ВПО “УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина”, Институт материаловедения и металлургии, 2015. С. 99–102.
8. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. — М.: Академкнига, 2002. — 768 с.
9. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Разработка графов эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями // *Металлург*. 2012. № 12. С. 23–26.
10. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Лаптева А.В. Энергетические проблемы развития технологий производства черных металлов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2008. № 8 (1304). С. 60–67.
11. Лисиенко В.Г., Чесноков Ю.Н., Лаптева А.В. Анализ энергоемкости и эмиссии CO₂ при различных сочетаниях коксовых и бескоксковых процессов при производстве стали // *Металлург*. 2015. № 5. С. 18–24.

Поступила 29 октября 2019 г.

REFERENCES

1. *Federal'nyi zakon "Ob okhrane okruzhayushchei sredy" ot 10.01.2002 № 7-FZ (redaktsiya ot 26 iyulya 2019 g.)* [Federal law “About Environmental Protection” of 10.01.2002 No. 7-FL (edition of July 26, 2019)]. (In Russ.).
2. *Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Proizvodstvo chuguna, stali i ferrosplavov* [Information and technical reference book on the best available technologies. Production of cast iron, steel and ferroalloys]. Moscow: Byuro NDT, 2017, 478 p. (In Russ.).
3. Shchelokov Ya.M. Regarding the power-technological productivity of steelmaking plants. *Stal'*, 1988, no. 9, pp. 20–21. (In Russ.).
4. Lisienko V.G., Rozin S.E., Shchelokov Ya.M. Procedure of calculation and use of technological fuel number. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1987, no. 2, pp. 108–112. (In Russ.).
5. Lisienko V.G., Paren'kov A.E., Lapteva A.V. Assessment of energy efficiency of alternative cokeless metallurgical technologies. *Stal'*, 2009, no. 2, pp. 72–77. (In Russ.).
6. Lisienko V.G., Chesnokov Yu.N., Lapteva A.V. Comparative ecological greenhouse analysis of alternative cokeless processes of production of cast iron and steel. *Metallurg*, 2011, no. 7, pp. 40–45. (In Russ.).
7. Trofimova O.G. *TECh-grafy v analize metallurgicheskikh peredelov* [TEN-columns in the analysis of metallurgical conversions]. IV Mezhdunarodnaya interaktivnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Innovatsii v materialovedenii i metallurgii” [IV International interactive scientific and practical conference “Innovacii v materialovedenii i metallurgii”]. Ekaterinburg: FGAOU VPO “UrFU im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina”, Institut materialovedeniya i metallurgii, 2015, pp. 99–102. (In Russ.).
8. Voskoboinikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya* [General metallurgy]. Moscow: Akademkniga, 2002, 768 (In Russ.).
9. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Elaboration of counts of emission of carbon dioxide by metallurgical enterprises. *Metallurg*, 2012, no. 12, pp. 23–26. (In Russ.).
10. Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M., Lapteva A.V. Energy problems of the elaboration of technologies for the production of ferrous metals. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2008, no. 8 (1304), pp. 60–67. (In Russ.).
11. Lisienko V.G., Chesnokov Yu.N., Lapteva A.V. Analysis of energy intensity and CO₂ emissions in various combinations of coke and coke-less processes in steel production. *Metallurg*, 2015, no. 5, pp. 18–24. (In Russ.).

Received October 29, 2019