

УДК 62-932.2

**Константин Владимирович Строгонов**

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: strogonovkv@mpei.ru

**Алексей Витальевич Колотыгин**

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», аспирант кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: avkolotygin@severstal.com

**Андрей Николаевич Рогалев**

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», доктор технических наук, заведующий кафедрой инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: rogalavan@mpei.ru

**Андрей Константинович Бастынец**

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», студент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: bastynetsak@mpei.ru

## Оценка целесообразности применения чистого азота в качестве циркулирующего газа в установках сухого тушения кокса

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В условиях растущего промышленного потребления энергоресурсов, сокращения запасов сырья на планете, а также возрастающего загрязнения окружающей среды промышленными отходами задача рационального использования энергетических и сырьевых ресурсов становится все более важной. Эти проблемы особенно остро стоят перед предприятиями черной металлургии, которые являются крупнейшими потребителями энергоресурсов. Одним из основных процессов производства металлопродукции является коксохимическое производство, технологический процесс которого включает охлаждение кокса, в частности, сухим способом. Главным преимуществом сухого тушения является утилизация теплоты охлаждающегося кокса и его повышенное качество на выходе по сравнению с мокрым тушением. Однако существенным недостатком данной технологии является снижение выхода кокса из-за его угара. В связи с этим разработка технического решения по снижению угара кокса при сухом тушении является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** В процессе проведения исследования использованы аналитические методы, в том числе: метод теплового баланса для расчета энергетической эффективности установки сухого тушения кокса; расчет параметров теплообмена между коксом и циркулирующим газом; метод сравнительного анализа угара кокса при использовании различных составов циркулирующего газа (традиционный газ, технический азот); инженерные методы теплотехнических расчетов, включая определение количества теплоты, переданного теплоносителю, тепловых потерь через корпус установки, паропроизводительности котла-утилизатора, экономической эффективности от внедрения предлагаемой технологии. А также использованы данные из литературы и предыдущих инженерных разработок, в том числе сведения о составе газовой смеси и теплоте сгорания кокса.

**Результаты.** Представлено описание способа сухого тушения кокса. Предложены способ, снижающий угар кокса, и схема, описывающая его реализацию. На основе литературного обзора принят угар кокса при использовании азота в качестве циркулирующего газа. Представлены результаты расчета энергетических характеристик с учетом предлагаемой схемы. Определены производительность камеры тушения и паропроизводительность котла-утилизатора. Выполнена оценка экономического эффекта от внедрения предлагаемого технического решения.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют говорить о целесообразности внедрения предлагаемого мероприятия по замене циркулирующего газа на промышленных установках металлургических комбинатов. Процесс внедрения на промышленных установках представляется перспективным для дальнейших исследований с учетом возможностей промышленного производства.

**Ключевые слова:** коксохимическое производство, энергоэффективность, сухое тушение кокса, угар кокса, технический азот

**Konstantin Vladimirovich Strogonov**

National Research University MPEI, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Innovative Technologies of High-tech Industries Department, Russia, Moscow, e-mail: strogonovkv@mpei.ru

**Aleksey Vitalievich Kolotygin**

National Research University MPEI, Post graduate Student of Innovative Technologies of High-tech Industries Department, Russia, Moscow, e-mail: avkolotygin@severstal.com

**Andrey Nikolaevich Rogalev**

National Research University MPEI, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Head of Innovative Technologies of High-tech Industries, Russia, Moscow, e-mail: rogalevan@mpei.ru

**Andrey Konstantinovich Bastynets**

National Research University MPEI, Student of Innovative Technologies of High-tech Industries Department, Russia, Moscow, e-mail: bastynetsak@mpei.ru

## Assessment of the viability of employing pure nitrogen as a circulating gas in coke dry quenching facilities

### Abstract

**Background.** The task of sustainable use of energy and raw materials resources is becoming increasingly important due to growing industrial consumption of energy resources, decreasing raw material stocks on the planet, as well as growing environmental pollution with industrial waste. These problems are especially important for ferrous metallurgy enterprises that are the largest consumers of energy resources. One of the main processes of metal production is coke-chemical production, the technological process of which includes coke cooling-off, in particular by dry method. The main advantage of dry quenching is the utilization of the heat of the cooling coke and its increased quality at the output in comparison with wet quenching. However, a significant disadvantage of this technology is the decrease of the coke output due to its burnout. Thus, the goal of this study is the development of a technical solution to reduce coke burnout during dry quenching.

**Materials and methods.** The following analytical methods have been used in the course of the study: heat balance method to calculate the energy efficiency of a dry coke quenching unit; calculation of heat exchange parameters between coke and circulating gas; method of comparative analysis of coke burn-off when using different compositions of circulating gas (air, technical nitrogen); engineering methods of thermotechnical calculations, including determination of the amount of heat transferred to the coolant, heat losses through the unit body, steam capacity of the waste heat boiler, and economic efficiency of the modified technology. Also, data from the literature and previous engineering developments have been used, including information on the composition of the gas mixture and the heat of combustion of coke.

**Results.** A description of the method of dry quenching of coke is presented. A method to reduce coke burn and a scheme describing its implementation have been proposed. Based on the scientific review, coke burn is assumed when nitrogen is used as a circulating gas. The results of the calculation of energy characteristics taking into account the proposed scheme have been presented. The capacity of the coke cooler plenum and the steam-production capacity of the waste heat boiler have been determined. An assessment of the economic effect of the implementation of the proposed technical solution has been carried out.

**Conclusions.** The results obtained allow us to talk about the expediency of implementing the proposed measure to replace circulating gas at industrial installations of metallurgical plants. The implementation process at industrial plants seems promising for further research, taking into account the possibilities of industrial production.

**Key words:** coke chemical production, energy efficiency, dry coke quenching, coke waste, industrial nitrogen

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.2.022-028

**Введение.** Черная металлургия является одной из энергоемких отраслей промышленности. Отечественная черная металлургия потребляет около 18 % добываемого в стране топлива и 16 % объема вырабатываемой электроэнергии. При производстве черных металлов по агло-коксо-доменной технологии кокс является одним из основных материалов, используемых в качестве источника восстановительных элементов и энергии в доменном процессе и обеспечивающих газопроницаемость шахты доменной печи [1]. Мировые запасы угля для производства кокса оцениваются в настоящее время в 900 млрд т и составляют менее 10 % общих ресурсов каменных углей [2].

Ключевым является решение задачи повышения энергоэффективности наиболее энергоемких процессов металлургического производства [3–6].

Одним из основных процессов производства металлопродукции является коксохимическое производство (КХП), основная задача которого – выпуск качественного кокса. Определяющим фактором качества кокса является его

прочность, которая зависит от состава шихты и способа тушения [7, 8]. Существует два способа тушения кокса – мокрое тушение и сухое [9].

Одним из методов, повышающих качество используемого в черной металлургии кокса и улучшающих технико-экономические показатели его производства, является метод сухого тушения кокса, основанный на охлаждении раскаленного кокса циркулирующими газами в установке сухого тушения кокса (УСТК) и последующем использовании теплоты газов для выработки пара в котле-утилизаторе [10].

В связи с этим важным является снижение доли угара кокса в процессе его охлаждения (угар кокса может достигать 8 %). Основной причиной выгорания является подача воздуха в камеру тушения для компенсации объема циркулирующего газа. Чтобы исключить или минимизировать выгорание кокса и тем самым повысить производительность и общую энергоэффективность установок, необходимо исключить кислород в циркулирующем газе и поддерживать содержание азота 97–100 %.

Для достижения таких показателей необходимо подмешивать в циркулирующий теплоноситель азот, который подведен к установкам сухого тушения кокса и используется в момент их запуска, остановки и аварийных ситуаций.

**Методы исследования.** *Расчет теплового баланса схемы сухого тушения кокса.* На сегодняшний день процесс сухого тушения кокса можно описать следующим образом.

Раскаленный кокс загружается в форкамеру установки, расположенную над камерой тушения. Между камерой и форкамерой находится кольцевой канал, через который осуществляется вывод из камеры тушения горячих газов. В форкамере кокс постепенно спускается в камеру тушения, с помощью разгрузочного устройства охлажденный кокс из нижней части камеры тушения попадает на конвейер.

В камере тушения кокс охлаждается движущимся снизу вверх циркулирующим газом и за счет непрерывной выгрузки его на конвейер постепенно опускается вниз.

Поднимаясь вверх камеры, газ нагревается, за счет охлаждения раскаленный кокс поступает в верхний кольцевой канал, затем в камеру обеспыливания и газовый тракт котла, после чего охлажденные газы поступают в дымоходы через специальные циклоны для дополнительного отделения пыли. Дымосос снова подает циркулирующие газы в камеру тушения.

Замена состава охлаждающего газа на технический азот позволяет поддерживать процент угара кокса на уровне 0,3–0,5 %, ненулевое значение связано с постоянными подсосами воздуха в систему циркуляции [10].

На рис. 1 представлена схема предлагаемой установки сухого тушения кокса. В камеру тушения 1 через охлаждаемый кокс с начальной температурой 1000–1100 °С подаются циркулирующий газ температурой 150–180 °С. Охлаждаясь до температуры 150–200 °С, кокс нагревает циркулирующий газ. После чего газ температурой 700–800 °С очищают в пылеосадителе 2, далее направляют в котел-утилизатор 3, где он отдает свою теплоту поверхностям нагрева, за счет чего вырабатывается пар. После котла-утилизатора 3 охлажденный до 150–180 °С газ очищают в пылеулавливающем циклоне 4, затем нагнетают дутьевым вентилятором 5 в камеру тушения. Через свечу 6 сбрасывается избыточный газ, образовавшийся в результате присосов воздуха. Для поддержания заданного состава циркулирующего газа подают технический азот, поступающий по трубопроводу 7 от кислородной станции и вновь направляют в камеру тушения 1. Кокс под действием силы тяжести перемещается в нижнюю часть камеры 1, где поступает в устройство для непрерывной выгрузки 8, затем на конвейер. При подаче технического азота (99,9 % N<sub>2</sub>) концентрации CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> в газе снижаются, поскольку разбавление газа азотом

осуществляется после его выброса, возникшего в результате присоса воздуха в систему и избытка циркулирующего газа.

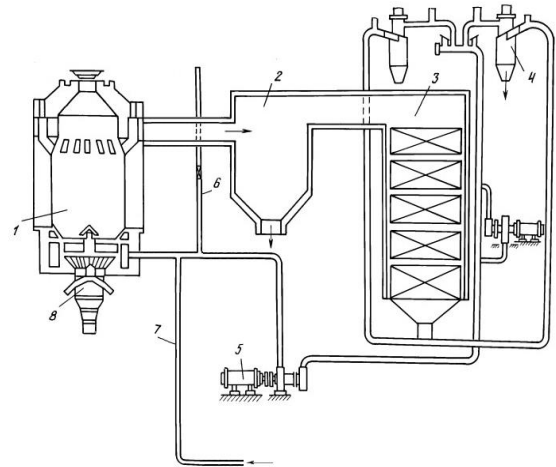


Рис. 1. Схема предлагаемого технического решения установки сухого тушения кокса: 1 – камера тушения; 2 – пылеосадитель; 3 – котел-утилизатор; 4 – пылеулавливающий циклон; 5 – дутьевой вентилятор; 6 – свеча; 7 – трубопровод от кислородной станции; 8 – устройство непрерывной выгрузки

При расчете теплового баланса предлагаемой УСТК, в отличие от установок, описанных в [11–23], не учитывались сбросы лишнего теплоносителя через горячую свечу и соответствующие тепловые потери, так как предполагается, что циркулирующий теплоноситель не будет вступать в химические реакции с раскаленным коксом.

Уравнение теплового баланса УСТК имеет следующий вид:

$$Q_k + Q_y = Q_T + Q_{пы} + Q_{атм} + Q_{хс}. \quad (1)$$

Количество теплоты, переданное циркулирующему теплоносителю при охлаждении кокса, рассчитывается по уравнению

$$Q_k = G_k \left( c'_{рк} t'_k - \left( 1 - \frac{\varphi_k}{100} \right) c''_{рк} t''_k \right), \quad (2)$$

где  $G_k$  – количество кокса, поступающее в камеру тушения, т/ч;  $c'_{рк}$  – теплоемкость кокса на входе в УСТК, ккал/(м<sup>3</sup>·°С);  $t'_k$  – температура горячего кокса, поступающего в УСТК, °С;  $\varphi_k$  – доля угара кокса, %;  $c''_{рк}$  – теплоемкость кокса на выходе из УСТК, ккал/(м<sup>3</sup>·°С);  $t''_k$  – температура холодного кокса на выходе из УСТК, °С.

Количество теплоты, выделившееся в результате угара части кокса, определяется как

$$Q_y = G_k \frac{\varphi_k}{100} Q_{н}^p, \quad (3)$$

где  $Q_{н}^p$  – низшая теплота сгорания кокса, ккал/кг.

Количество теплоты, сбрасываемой холодной свечой, расположенной в нижнем газоходе, соединяющем нижнюю часть камеру тушения и котел-утилизатор, определяется как

$$Q_{xc} = G_{xc} c_p^{yx} \vartheta_{yx}, \quad (4)$$

где  $G_{xc}$  – количество газа, сбрасываемое холодной свечой, м<sup>3</sup>/ч;  $c_p^{yx}$  – теплоемкость уходящего циркулирующего газа, ккал/(м<sup>3</sup>·°C);  $\vartheta_{yx}$  – температура уходящего циркулирующего газа, °C.

Количество теплоты, теряемое вследствие подсосов воздуха в систему, рассчитывается по уравнению

$$Q_n = G_k \frac{\varphi_k}{100} V_n \left( \frac{c_p^{bx} + c_p^{yx}}{2} \vartheta_{cp}^r - c_p^b t_b \right), \quad (5)$$

где  $V_n$  – объем воздуха для сжигания 1 кг кокса по реакции  $C + O_2 = CO_2$ , м<sup>3</sup>/кг;  $c_p^{bx}$  – теплоемкость циркулирующего газа на входе в котел, ккал/(м<sup>3</sup>·°C);  $\vartheta_{cp}^r$  – средняя температура циркулирующего газа, °C;  $c_p^b$  – теплоемкость воздуха при нормальных условиях, ккал/(м<sup>3</sup>·°C);  $t_b$  – температура воздуха при нормальных условиях, °C.

Количество тепловой энергии, теряемое камерой тушения в атмосферу, рассчитывается по уравнению

$$Q_{атм} = (\alpha_n + \alpha_k) (t_{cp}^{кам} + t_b) F_{кам}, \quad (6)$$

где  $\alpha_n$ ,  $\alpha_k$  – коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией в атмосферу, ккал/(м<sup>3</sup>·ч·°C);  $t_{cp}^{кам}$  – средняя температура поверхности камеры УСТК, °C;  $F_{кам}$  – площадь наружной поверхности камеры тушения, м<sup>2</sup>.

Из уравнения теплового баланса УСТК выразим теплоту, переданную циркулирующим газом при охлаждении раскаленного кокса:

$$Q_T = Q_k + Q_y - Q_{xc} - Q_n - Q_{атм}. \quad (7)$$

**Результаты исследования.** *Определение основных энергетических показателей.* Пользуясь основными уравнениями теплового баланса по пару и по циркулирующему газу, выразим паропроизводительность, учитывая потери в котле:

$$\begin{aligned} Q_k &= Q_r, \\ Q_k &= Q_n + Q_{пот}, \\ Q_n &= D_{пп} (h_{пп} - h_{пв}) + D_{пр} (h_{нп} - h_{пв}), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $Q_n$  – величина теплопроизводительности котла, кВт;  $Q_{пот}$  – величина потерь теплоты в

котле, кВт;  $Q_r$  – теплота, отданная циркулирующими газами, кВт;  $h_{пп}$  – энтальпия перегретого пара, кДж/кг;  $h_{пв}$  – энтальпия питательной воды, кДж/кг;  $h_{нп}$  – энтальпия насыщенного пара, кДж/кг;  $D_{пп}$  – паропроизводительность котла, т/ч;  $D_{пр}$  – расход воды на продувку котла, т/ч.

Количество кокса на выходе из УСТК рассчитывается следующим образом:

$$G_k^{вых} = G_k \frac{100 - \varphi_k}{100}. \quad (9)$$

Для определения процента угара кокса в рассматриваемой УСТК был составлен тепловой баланс при заданных величине парообразования  $D_{пп}$ , равной 35,6 т/ч, и составе циркулирующего теплоносителя (табл. 1). После чего из системы уравнений (1)–(8) выражена доля угара кокса в УСТК с учетом начальных параметров (табл. 2).

Таблица 1. Состав циркулирующего теплоносителя в рассматриваемой УСТК

Содержание двуокиси углерода	CO <sub>2</sub>	%	15,8
Содержание кислорода	O <sub>2</sub>	%	0,61
Содержание окиси углерода	CO	%	5,144
Содержание водорода	H <sub>2</sub>	%	0,3
Содержание метана	CH <sub>4</sub>	%	0,006
Содержание азота	N <sub>2</sub>	%	78,86
Содержание водяных паров	H <sub>2</sub> O	%	0
Содержание воздуха	–	%	0

В табл. 3 представлены основные энергетические показатели рассматриваемой УСТК, установки с наработкой более 5 лет и предлагаемой УСТК, работающей на техническом азоте. Принципиальное отличие рассматриваемой УСТК от установки с наработкой 5 лет заключается в герметичности элементов УСТК, таких как шахта котла-утилизатора, что приводит к повышенным подсосам и большему содержанию кислорода в циркулирующем газе.

*Определение энергетического эффекта.* При применении в качестве циркулирующего газа азота значение угара кокса составит  $\varphi_k = 0,4\%$  [24, 25]. Расчеты показывают, что снижение угара кокса приведет к снижению паропроизводительности котла-утилизатора до  $D_{пп} = 24,4$  т/ч. Основным фактором снижения паропроизводительности является снижение количества теплоты, выделяющегося в результате угара кокса. Чем меньше сгорело кокса, тем меньше выделилось пара заданных параметров.

Таблица 2. Исходные данные для расчета УСТК

Параметр	УСТК	
	рас- сма- три- ваемая	с нарабо- ткой бо- лее 5 лет
Количество кокса, поступающее в камеру тушения $G_k$ , т/ч	50	50
Температура горячего кокса, поступающего в УСТК $t'_k$ , °С	1050	1050
Температура холодного кокса, покидающего УСТК $t''_k$ , °С	161	161
Количество газа, сбрасываемое горячей свечой $G_{гс}$ , М <sup>3</sup> /ч	5000	42000
Количество газа, сбрасываемое холодной свечой $G_{хс}$ , М <sup>3</sup> /ч	1000	2800
Низшая теплота сгорания кокса $Q_H^p$ , ккал/кг	7300	7300
Температура циркулирующих газов на выходе из УСТК $\vartheta_{вх}$ , °С	850	850
Температура циркулирующих газов на входе в УСТК $\vartheta_{ух}$ , °С	163	163
Средняя температура поверхности камеры УСТК $t_{ср}^{кам}$ , °С	35 [12]	35 [12]
Площадь наружной поверхности камеры $F_{кам}$ , М <sup>2</sup>	400 [12]	400 [12]
Температура воздуха $t_b$ , °С	20	20

Таблица 3. Результаты расчетов энергетических показателей

Параметр	Регламен- тирован- ная УСТК	УСТК нарабо- ткой бо- лее 5 лет	Предлага- емая УСТК
$\varphi_k$	3,5	7,3	0,4
$G_{к,вых}^{вх}$ , т/ч	48,25	46,3	49,8
$D_{пп}$ , т/ч	35,6	35,6	24,4

Процент угара кокса является обратным показателем выхода качественного кокса: чем больше кокса сгорело в процессе тушения, тем меньше производительность УСТК. Исходя из этого, количество кокса на выходе рассчитывается следующим образом:

$$G_{к,вых}^{регл} = G_k \left( 1 - \frac{\varphi_k^{регл}}{100} \right) = 48,25 \text{ т/ч}; \quad (10)$$

$$G_{к,вых}^{нараб} = G_k \left( 1 - \frac{\varphi_k^{нараб}}{100} \right) = 46,31 \text{ т/ч}; \quad (11)$$

$$G_{к,вых}^{предл} = G_k \left( 1 - \frac{\varphi_k^{рассм}}{100} \right) = 49,8 \text{ т/ч}. \quad (12)$$

При внедрении технологии, вследствие снижения угара кокса, производительность усовершенствованной УСТК возрастет. При экономическом расчете не учитывается стоимость технического азота, так как он является побочным продуктом воздуходелительных установок и сбрасывается в окружающую среду. Учитывать затраты на компримирование не следует, так как необходимый азот уже подведен к УСТК и используется во время пуска и остановки. Затратами на передачу необходимого объема азота при расчетах пренебрегаем.

Экономическая выгода, возникшая в результате повышения выхода кокса, составляет:

$$\begin{aligned} \Delta C^{регл} &= (G_{к,вых}^{предл} - G_{к,вых}^{регл}) P_1 \cdot P \cdot 8760 = \\ &= 371,00 \text{ млн руб. в год}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta C^{предл} &= (G_{к,вых}^{предл} - G_{к,вых}^{нараб}) P_1 \cdot P \cdot 8760 = \\ &= 835,00 \text{ млн руб. в год}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $P_1$  – цена тонны металлургического кокса за январь 2024 г. ( $P_1 = 308,6$  \$/т;  $P$  – средний курс рубля к доллару США за январь 2024 года 88,5 руб/\$).

В связи со снижением паропроизводительности предлагаемой схемы УСТК необходимо произвести расчет упущенной выгоды. Количество теплоты, необходимое для восполнения потерь с сохранением параметров пара на выходе, составляет

$$Q_3 = (D_{пп}^{рассм} - D_{пп})(h_{пп} - h_{пв}) = 8,706 \cdot 10^3 \text{ кВт}. \quad (15)$$

В соответствии с приказом Департамента топливно-энергетического комплекса и тарифного регулирования Вологодской области «Об установлении тарифов на тепловую энергию ПАО «Северсталь»» № 100-р от 27.10.2023, стоимость Гкал пара на январь 2024 года составила  $P_2 = 938,00$  руб/Гкал.

Ежегодные затраты в денежном выражении на восполнение пара эквивалентных параметров составляют

$$3 = Q_3 P_2 \frac{3600}{4,18} 8760 = 63,42 \text{ млн руб. в год}. \quad (16)$$

Экономическая выгода от внедрения предложенной технологии составляет:

$$B^{регл} = \Delta C^{регл} - 3 = 307,58 \text{ млн руб. в год}; \quad (17)$$

$$B^{нараб} = \Delta C^{нараб} - 3 = 771,58 \text{ млн руб. в год}. \quad (18)$$

**Выводы.** Коксохимическое производство является одним из крупнейших потребителей энергоресурсов. Основной задачей является подготовка кокса для дальнейшего использования его в доменном производстве. Один из этапов технологического процесса КХП – тушение кокса, наиболее современным является

способ сухого тушения, однако и при таком способе охлаждения происходит частичное выгорание кокса, которое в установках с длительным сроком эксплуатации может достигать 8 %.

Оценка целесообразности применения азота показала возможность существенного снижения угара кокса при увеличении содержания азота в циркулирующем газе за счет снижения других составляющих.

Разработанная технология, при которой подача технического азота осуществляется непосредственно в камеру тушения, где при охлаждении азот не выступает в роли окислителя, тем самым исключая сгорание кокса в процессе тушения, позволяет повысить эффективность работы УСТК.

По результатам проведенного теплового расчета камеры тушения и котла-утилизатора выявлено снижение процента угара кокса на величину паропроизводительности котла. Расчет паропроизводительности усовершенствованной УСТК показал ее снижение с 35,6 до 24,4 т/ч.

Снижение паропроизводительности с точки зрения стоимости Гкал пара является затратами. Расчетная экономическая выгода по выработке пара в 35,6 т/ч должна составить 371 млн руб. в год для регламентированной УСТК и 835 млн руб. в год для УСТК с наработкой, что на порядок выше по сравнению с издержками 63,42 млн руб. в год. Таким образом, общая выгода при внедрении мероприятия составляет 307,58 и 771,58 млн руб. в год соответственно.

#### Список литературы

1. **Díez M.A., Alvarez R., Barriocanal C.** Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking // *International Journal of Coal Geology*. – 2002. – Vol. 50, № 1–4. – P. 389–412. DOI: 10.1016/S0166-5162(02)00123-4.
2. **Новиков Н.И.** Топливо-энергетическая составляющая черной металлургии: проблемы и тенденции // *Вестник Кемеровского государственного университета*. – 2013. – № 4-1(56). – С. 257–263.
3. **Liquid-phase** reduction reactor with a carbon-hydrogen mixture / K.V. Strogonov, D.D. Lvov, V.A. Murashov, et al. // *Proceedings of REEPE*, 2024. DOI: 10.1109/REEPE60449.2024.10479685.
4. **Continuous** degasser for steel melt treatment / V.A. Murashov, K.V. Strogonov, D.D. Lvov, A.K. Bastynets // *Proceedings of REEPE*, 2024. DOI: 10.1109/REEPE60449.2024.10479925.
5. **Calculation** of individual elements of enclosing structures of a continuous steelmaking unit / K.V. Strogonov, A.A. Borisov, V.A. Murashov, D.D. Lvov // *Proceedings of REEPE*, 2023. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086855.
6. **Continuous** steelmaking unit of bubbling type / K. Strogonov, L. Kornilova, A. Popov, A. Zdarov // *Proceedings of SUSE*, 2021. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-981-16-9376-2\_6.

7. **Babich A., Senk D.** Coke in the iron and steel industry // *New Trends in Coal Conversion*. – 2019. – P. 367–404. DOI: 10.1016/B978-0-08-102201-6.00013-3.

8. **Roger L., Pierre F., Boyer A.** *Coke Quality and Production*. – Cambridge: Great Britain, 1989. – 553 p.

9. **Духан В.Н.** *Мастер коксового производства*. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.

10. **Сухое** тушение кокса / М.Г. Теплитский, И.З. Гордон, Н.А. Кудрявая и др. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.

11. **Давидзон Р.И.** *Мастер установки сухого тушения кокса: учебник для вузов*. – М.: Металлургия, 1980. – 124 с.

12. **Бологова В.В.** Повышение энерготехнологической эффективности коксохимического производства на основе использования природного газа в установках сухого тушения кокса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 22 с.

13. **Пат. № 2448144 С2** Российская Федерация, МПК С10В 39/02. Установка сухого тушения кокса: опубл. 20.04.2012 / Н.Г. Колмаков, Б.Д. Зубицкий; патентообладатель ОАО «Кокс». – 7 с.

14. **Пат. №1323563 А1** СССР, МПК С10В 39/02. Установка сухого тушения кокса: опубл. 15.07.1987 / В.Ф. Гончаров, А.И. Грищенко, А.М. Шейхет, А.Г. Старовойт, О.С. Ересковский; заявитель Днепропетровский металлургический институт.

15. **Пат. WO9324595A1** USA. Coke having its pore surfaces coated with carbon. 1993.

16. **Пат. US3888742A** USA. Pollution-free coal-preheating with waste heat from dry coke-quenching. 1975.

17. **Пат. JPS5975981A** JP. Dry quenching of coke. 1984.

18. **Пат. CN210885939U** CN. Dry quenching circulating gas treatment device. 2020.

19. **Пат. CN206345823U** CN. Put out furnace accretion structure. 2017.

20. **Пат. CN116179226A** CN. Dry quenching method for reducing coke burning loss. 2023.

21. **Пат. CN114410318A** CN. Dry quenching device and method. 2022.

22. **Пат. CN113429986B** CN. Dry quenching circulating gas explosion-proof equipment. 2022.

23. **Пат. CA1245595A** CA. Method for dry cooling coke. 1988.

24. **Михно В.П.** *Труды Гипрококса*. – М.: Металлургия, 1968. – Вып. XXXIV. – С. 87–92.

25. **Пат. № 2830759** Российская Федерация. Способ сухого тушения кокса / К.В. Строгонов, А.Н. Роголев, А.В. Колотыгин, А.К. Бастынец: № 2023135010; заявл. 25.12.2023; опубл. 25.11.2024. – Бюл. № 33.

#### References

1. Diez, M.A., Alvarez, R., Barriocanal, C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *International Journal of Coal Geology*, 2002, vol. 50, issue 1–4, pp. 389–412. DOI: 10.1016/S0166-5162(02)00123-4.
2. Novikov, N.I. *Топливо-энергетическая составляющая черной металлургии: проблемы и тенденции* [Fuel-energy component of ferrous metallurgy: problems and trends]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 4-1(56), pp. 257–263.

3. Strogonov, K.V., Lvov, D.D., Murashov, V.A., Bastynets, A.K., Terekhova, A.Y., Petelin, A.L. Liquid-phase reduction reactor with a carbonhydrogen mixture. Proceedings of REEPE 2024. DOI: 10.1109/REEPE60449.2024.10479685.
4. Murashov, V.A., Strogonov, K.V., Lvov, D.D., Bastynets, A.K. Continuous degasser for steel melt treatment. Proceedings of REEPE 2024. DOI: 10.1109/REEPE60449.2024.10479925.
5. Strogonov, K.V., Borisov, A.A., Murashov, V.A., Lvov, D.D. Calculation of individual elements of enclosing structures of a continuous steelmaking unit. Proceedings of REEPE 2023. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086855.
6. Strogonov, K., Kornilova, L., Popov, A., Zdarov, A. Continuous steelmaking unit of bubbling type. Proceedings of SUSE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-981-16-9376-2\_6.
7. Babich, A., Senk, D. Coke in the iron and steel industry. *New Trends in Coal Conversion*, 2019, pp. 367–404. DOI: 10.1016/B978-0-08-102201-6.00013-3.
8. Roger, L., Pierre, F., Boyer, A. *Coke Quality and Production*. Cambridge: Great Britain, 1989. 553 p.
9. Dukhan, V.N. *Master koksovogo proizvodstva* [Master of coke production]. Moscow: Metallurgiya, 1970. 368 p.
10. Teplitskiy, M.G., Gordon, I.Z., Kruchinin, M.S., Kudryavaya, N.A., Volovich, Yu.M. *Sukhoie tushenie koksa* [Dry coke quenching]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 264 p.
11. Davidzon, R.I. *Master ustanovki sukhogo tusheniya koksa* [Master of dry coke quenching unit]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 124 p.
12. Bologova, V.V. *Povyshenie energotekhnologicheskoy effektivnosti koksohimicheskogo proizvodstva na osnove ispol'zovaniya prirodnogo gaza v ustanovkakh sukhogo tusheniya koksa*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving energy-technological efficiency of coke production based on natural gas usage in dry coke quenching units. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2016. 22 p.
13. Kolmakov, N.G., Zubitskiy, B.D. *Ustanovka sukhogo tusheniya koksa* [Dry coke quenching unit]. Patent RF, no. 2448144, 2012.
14. Goncharov, V.F., Grishchenko, A.I., Sheykhet, A.M., Starovoyt, A.G., Ereskovskiy, O.S. *Ustanovka sukhogo tusheniya koksa* [Dry coke quenching unit]. Patent USSR, no. 1323563, 1987.
15. Coke having its pore surfaces coated with carbon. Patent USA, WO9324595A1, 1993.
16. Pollution-free coal-preheating with waste heat from dry coke-quenching. Patent USA, US3888742A, 1975.
17. Dry quenching of coke. Patent JP, JPS5975981A, 1984.
18. Dry quenching circulating gas treatment device. Patent CN, CN210885939U, 2020.
19. Put out furnace accretion structure. Patent CN, CN206345823U, 2017.
20. Dry quenching method for reducing coke burning loss. Patent CN, CN116179226A, 2023.
21. Dry quenching device and method. Patent CN, CN114410318A, 2022.
22. Dry quenching circulating gas explosion-proof equipment. Patent CN, CN113429986B, 2022.
23. Method for dry cooling coke. Patent CA, CA1245595A, 1988.
24. Mikhno V.P. *Trudy GIPROKOKSA* [Proceedings of GIPROKOKS]. Moscow: Metallurgiya, 1968, issue XXXIV, pp. 87–92.
25. Strogonov, K.V., Rogalev, A.N., Kolotygin, A.V., Bastynets, A.K. *Sposob sukhogo tusheniya koksa* [Method of dry quenching of coke]. Patent RF, no. 2830759, 2024.