

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-169-180>

УДК 658.26:662.76:005.216.1

Оценка энергоэффективности промышленных печей на основе моделирования режимов потребления топлива

Е. Л. Шенец¹⁾

¹⁾ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Ряд промышленных производств, изготавливающих современную продукцию, применяют в технологии промышленные печи. При их эксплуатации необходимо соблюдать не только действующее законодательство, но и нормы потребления топливно-энергетических ресурсов. Рост тарифов на энергоресурсы привел к значительному увеличению энергетической составляющей затрат в структуре себестоимости выпускаемой продукции. В результате даже небольшое (в несколько процентов) ее изменение может вывести любое, в том числе самое современное, производящее газовое технологическое оборудование, в разряд нерентабельных. В статье со ссылками на технические нормативные правовые акты предложен показатель энергоэффективности, позволяющий вести ее мониторинг на действующих производствах с промышленными печами. Рассмотрен мировой опыт эксплуатации печей стекольной промышленности, представлены существующие подходы к определению энергоэффективности данной технологии. Предложены методы оценки темпов снижения энергоэффективности линии по производству листового стекла и прогнозирования общих и удельных расходов топливно-энергетических ресурсов промышленных печей (на примере стекловаренной печи непрерывного действия), основанные на анализе суточных показателей режимов работы технологической линии. Представленные методы и полученные численные расчеты снижения энергоэффективности стекловаренной печи позволяют прогнозировать потребление топлива и формировать корректную годовую заявку на его необходимый объем в газоснабжающую организацию, а также оценивать энергоэффективность производства, эксплуатирующего промышленную печь, рассчитывать норму расхода энергии на выпуск единицы продукции, что, в конечном итоге, позволяет более точно определять себестоимость продукции конкретного производства.

Ключевые слова: энергоэффективность промышленных печей, методы оценки энергоэффективности, моделирование режимов потребления топлива стекловаренной печью

Для цитирования: Шенец, Е. Л. Оценка энергоэффективности промышленных печей на основе моделирования режимов потребления топлива / Е. Л. Шенец // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 2. С. 169–180. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-169-180>

Evaluation of the Energy Efficiency of Industrial Furnaces Based on the Modeling of Fuel Consumption Modes

Ya. L. Shenets¹⁾

¹⁾JSC “Gazprom transgaz Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A number of industrial plants that manufacture modern products use industrial furnaces in their technology. During their operation, it is necessary to comply not only with the current

Адрес для переписки
Шенец Евгений Леонидович
ОАО «Газпром трансгаз Беларусь»
ул. Некрасова, 9,
220040, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 219-14-82
shenets@mail.ru

Address for correspondence
Shenets Yauhen L.
JSC “Gazprom transgaz Belarus”
9, Nekrasova str.,
220040, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 219-14-82
shenets@mail.ru

legislation, but also with the norms of consumption of fuel and energy resources. The growth of tariffs for energy resources has led to a significant increase in the energy component of costs price in the structure of the cost of production. As a result, even a small (several percent) change in the cost price can bring any industrial enterprise, including the most modern ones that use gas processing equipment, into the category of unprofitable. Having referred to technical regulatory legal acts, the present article proposes an energy efficiency indicator that allows monitoring energy efficiency at existing industrial plants with industrial furnaces. The world experience of operating glass industry furnaces is considered, existing approaches to determining the energy efficiency of this technology are presented. Based on the analysis of daily indicators of the operating modes of the technological line, methods have been proposed for estimating the rate of reduction in energy efficiency of a flat glass production line and forecasting the total and specific consumption of fuel and energy resources of industrial furnaces (in terms of a continuous glass furnace). The presented methods and the numerical calculations obtained for reducing the energy efficiency of a glass furnace make it possible to predict fuel consumption and form a correct annual application for its required volume to a gas supply organization, as well as evaluate the energy efficiency of production operating an industrial furnace and calculate the energy consumption rate for the output of a unit of production. Ultimately, more accurate determining of the cost of production of a particular industrial enterprise is achieved.

Keywords: energy efficiency of industrial furnaces, methods for assessing energy efficiency, modeling of modes of fuel consumption by a glass furnace

For citation: Shenets Ya. L. (2022) Evaluation of the Energy Efficiency of Industrial Furnaces Based on the Modeling of Fuel Consumption Modes. *Energetika. Proc. CIS Higer Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (2), 169–180. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-169-180> (in Russian)

Введение

В процессе эксплуатации промышленных печей (например, при производстве стекла, цемента, керамики, металла и др.) происходят выгорание футеровки и износ ограждающих конструкций тела печи, вследствие чего увеличиваются теплопотери и требуется больше энергии для поддержания технологических параметров печи [1–3]. Крупнотоннажные пламенные стекловаренные печи могут функционировать в течение 5–8 лет до холодного ремонта, электрические – 3–6 лет, горшковые – 10–20 лет при замене горшка каждые 3–12 месяцев. Холодный ремонт электрической печи при производстве хрусталя (30 т стекломассы в сутки) обойдется в сумму около 2 млн евро (стоимость новой печи около 8 млн евро), пламенной печи для натрий-кальций-силикатного стекла (130 т в сутки), использующей газ или жидкое топливо, составит приблизительно 4 млн евро (новой – 12 млн евро).

По данным ведущих мировых производителей стекольной продукции, срок службы стекловаренных печей составляет 8–10 лет [4, 5]. Применение современных изоляционных материалов и футеровки, оптимизация технологического процесса при номинальной загрузке стекловаренных печей позволяют продлить срок службы печи до 15 лет [6] и более с приемлемым снижением энергоэффективности [7].

В процессе проектирования и строительства основными показателями эффективности стекловаренной печи считают удельный съём стекломассы с варочной площади печи, среднее удельное теплопотребление на тонну стекломассы [8], экологическим показателем – допустимую концентрацию выбросов загрязняющих веществ в атмосферу [9]. При эксплуатации для

определения себестоимости продукции используется такой показатель энергоэффективности, как удельный расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на выпуск единицы продукции [10–12]. Вместе с тем при эксплуатации печей возникает проблема оценки и прогнозирования изменения ее энергоэффективности, конструктивного состояния, что усложняет расчет и соблюдение удельных норм расхода ТЭР [13] в соответствии с [14, 15].

Помимо изменения производственной загрузки, на расход топлива оказывают влияние ряд внешних и внутренних факторов: выгорание огнеупоров печи в ее активных зонах, мероприятия по энергосбережению, качество проводимых горячих ремонтов футеровки, организация процесса горения топлива, условия работы вентиляционных установок и охлаждения футеровки [16–18]. Все это позволяет идентифицировать стекловаренное производство как промышленного потребителя со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией.

В ходе анализа литературных источников выявлено, что на текущий момент отсутствуют работы, посвященные моделированию изменения энергоэффективности на определенный период эксплуатации стекловаренной печи. Специалисты отрасли, как правило, используют упрощенные подходы в обосновании снижения энергоэффективности в пределах от 0,9 до 3,0 % за один год эксплуатации [7, 19, 20]. Таким образом, технологическая особенность промышленной печи, связанная с износом ее огнеупоров, влияет на потребление ТЭР, себестоимость продукции, энергоэффективность, требует усиленного контроля за конструктивным состоянием печи и корректировки норм расхода ТЭР. В связи с этим приобретает актуальность разработка научно обоснованных методов оценки энергоэффективности стекловарочного производства, которые помогали бы формировать корректную годовую заявку на объем необходимого природного газа в газоснабжающую организацию, особенно в условиях создания общего электроэнергетического рынка Евразийского экономического союза и перспективы покупки энергоресурсов через товарно-сырьевые биржи [21, 22].

Основная часть

Настоящие исследования основаны на изучении производства по выпуску листового стекла с использованием стекловаренной газовой печи регенеративного типа. Предложен ряд методов оценки энергетической эффективности, снижающейся за счет старения оборудования (износ/выгорание ограждающих конструкций).

Построение многофакторной суточной модели расхода природного газа

Для выявления и учета факторов, влияющих на режим потребления газа, сформирована информационная база, включающая данные более чем за шесть лет эксплуатации производства и содержащая сведения по 14 технологическим показателям, таким как: суточный расход природного газа $V_{сут}$, м³/сут. (кг у. т./сут.); среднесуточная калорийность природного

газа, ккал/м³; суточный расход электроэнергии, кВт·ч/сут.; среднесуточная производительность печи P , т/сут.; толщина стекла, мм; плотность стекла ρ , т/м³; среднесуточная температура наружного воздуха, К; содержание FeO в стекле, о. е.; содержание Fe₂O₃ в стекле, песке, доломите, о. е.; содержание шихты и стеклобоя, о. е.; влажность шихты, о. е.; количество суток эксплуатации печи N .

При анализе эффективности конкретной печи учитывались следующие факторы: производительность технологической линии, температура наружного воздуха, содержание оксида железа FeO в стекле и количество суток эксплуатации печи (табл. 1). Результаты расчета коэффициентов корреляции Пирсона между факторами позволили обоснованно утверждать об отсутствии сильной взаимосвязи (мультиколлинеарности).

Для получения численного значения снижения энергоэффективности за определенный период времени впервые предложено использовать математическую модель, описывающую топливопотребление и включающую динамическую составляющую – фактор «количество суток эксплуатации печи».

Проверка t -статистики Стьюдента позволила исключить статистически незначимые факторы, в результате чего итоговая многофакторная модель суточного расхода газа (за всю рабочую кампанию печи) описывается зависимостью, кг у. т./сут.:

$$B_{\text{сут}} = f(P, T_n, F, N) = 137,8P + 122,8T_n + 2,5 \cdot 10^7 F + 12,1N, \quad (1)$$

где P – суточная производительность, т/сут.; T_n – температура наружного воздуха, К; F – содержание оксида железа в стекле, о. е.; N – количество суток эксплуатации печи.

Таблица 1

**Регрессионный анализ параметров модели суточного потребления топлива
стекловаренной печью**

**Regression analysis of the parameters of the model of daily fuel consumption
by a glass furnace**

Технологический параметр (фактор модели)	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	t -статистика
Производительность P , т/сут.	137,8 кг у. т./т	1,9 кг у. т./т	69,9
Температура наружного воздуха T_n , К	122,8 кг у. т./((К·сут.))	5,2 кг у. т./((К·сут.))	23,4
Содержание FeO в стекле F , о. е.	$2,5 \cdot 10^7$ кг у. т./сут.	$3,7 \cdot 10^6$ кг у. т./сут.	6,8
Количество суток эксплуатации печи N , сут.	12,1 кг у. т./сут. ²	0,2 кг у. т./сут. ²	53,2

Анализ динамики статистически значимых факторов модели

С учетом того что после первой производственной кампании активная зона печи подлежит капитальному ремонту с восстановлением первичных технико-экономических показателей, разработанная модель может применяться с момента накопления информационной базы данных до следующей рабочей кампании печи [23–25].

На основе тенденций изменения коэффициентов регрессии (табл. 2) факторов модели (1) исследовано изменение величины «суточный расход топлива $B_{\text{сут}}$ ».

Таблица 2

**Результаты регрессионного анализа режимов потребления топлива
стекловаренной печию**
**Results of regression analysis of fuel consumption modes
by a glass furnace**

Период	Технологический параметр (фактор модели)											
	Производительность, т/сут.			Температура наружного воздуха, К			Содержание FeO в стекле, о. е.			Количество суток эксплуатации печи		
	коэффициент регрессии, кг у. т./т	стандартная ошибка, кг у. т./т	t-статистика	коэффициент регрессии, кг у. т./К·сут.	стандартная ошибка, кг у. т./К·сут.	t-статистика	коэффициент регрессии, кг у. т./сут.	стандартная ошибка, кг у. т./сут.	t-статистика	коэффициент регрессии, кг у. т./сут. ²	стандартная ошибка, кг у. т./сут. ²	t-статистика
1	113,1	5,5	20,6	173,9	21,6	8,1	$6,8 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^6$	4,60	1,8	6	0,3
1–2	111,7	3,5	31,9	212,2	12,3	17,3	$2,7 \cdot 10^7$	$9,8 \cdot 10^6$	2,80	–3,1	1,2	–2,6
2*	116,2	2,7	41,8	150,1	10,6	14,1	$1,5 \cdot 10^7$	$7,9 \cdot 10^6$	1,90	36,4	1,6	23,4
2*–3	117,2	2,7	42,8	149,2	8,4	17,6	$4,0 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^6$	7,01	18,3	0,7	27,8
2*–4	126,3	2,2	56,5	106,6	5,6	18,8	$6,1 \cdot 10^7$	$4,2 \cdot 10^6$	14,70	17,1	0,5	37,7
2*–5	123,0	2,8	44,0	141,0	6,7	21,6	$4,2 \cdot 10^7$	$4,9 \cdot 10^6$	8,60	13,7	0,4	33,9
2*–6	127,4	2,1	60,8	140,7	5,6	24,9	$3,3 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^6$	8,80	12,8	0,3	51,0
2*–7	137,8	1,9	69,9	122,8	5,2	23,4	$2,5 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^6$	6,80	12,1	0,2	53,2

Примечания: 1–2 – период запуска линии по производству листового стекла в эксплуатацию (период, который целесообразно исключить из базы данных);
2* – период завершения наладки/обкатки технологии, запуск технологии на полную проектную мощность.

**Метод оценки темпов снижения энергоэффективности
линии по производству листового стекла**

Использование показателя «количество суток эксплуатации печи» [26] в качестве фактора предложенной модели (1) позволило разработать метод оценки темпов снижения энергоэффективности линии по производству листового стекла за счет износа огнеупоров. Метод основан на построении многофакторной модели топливопотребления от статистически значимых факторов и отличается учетом коэффициента регрессии фактора «количество суток эксплуатации печи» в условно-постоянной составляющей однофакторной модели топливопотребления от объема выпуска продукции.

Метод представлен следующим алгоритмом:

– отбор и первичная обработка факторов, влияющих на энергоэффективность (в базу данных включается параметр «количество суток эксплуатации печи»);

– проверка значимости линейной модели по критерию Фишера;

- построение полной модели;
- определение коэффициентов регрессии;
- снижение размерности модели (модель с одним фактором «производственная загрузка» и условно-постоянной составляющей);
- построение моделей удельных расходов топлива, учитывающих в условно-постоянной составляющей [27] коэффициент регрессии фактора «количество суток эксплуатации печи» с заданным шагом прогнозирования, например шесть месяцев.

Факторы «содержание оксида железа в стекле» и «температура наружного воздуха» имеют низкую вариативность в разрезе годового или полугодового прогнозирования, что позволяет снизить размерность модели до однофакторной без потери качества. Предложенный метод представлен в виде номограммы удельного расхода топлива, учитывающей отработанное печью время (рис. 1). Задав плановую среднесуточную производительность и плановое время работы печи, можно определить значение удельного расхода условного топлива на производство листового стекла.

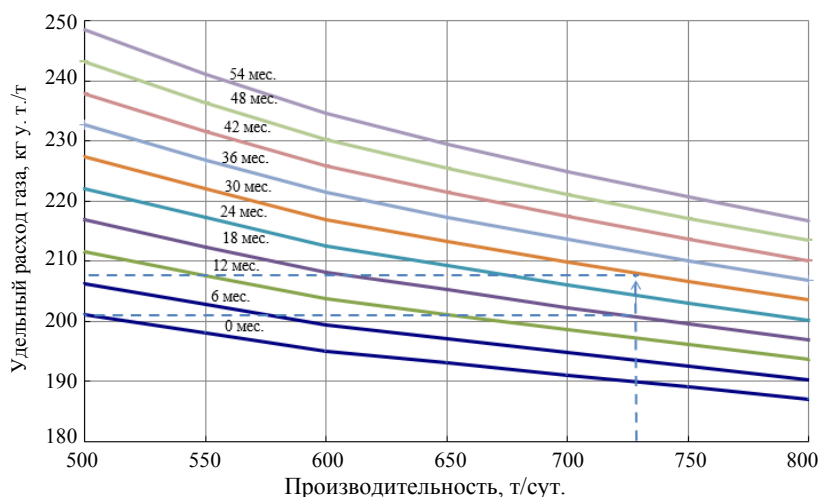


Рис. 1. Номограмма для определения удельного топливопотребления при производстве листового стекла (без учета мероприятий по энергоэффективности и эксплуатационных последствий)

Fig. 1. Nomogram for determining specific fuel consumption in the production of flat glass (excluding energy efficiency measures and operational consequences)

Упрощенный метод оценки темпов снижения энергоэффективности линии по производству листового стекла

Упрощенный способ основан на регрессионном анализе базы данных и построении однофакторных моделей суточного топливопотребления в зависимости от объема выпуска продукции, которые преобразуются в модели удельных расходов топлива. Путем сравнения удельных расходов топлива на производство листового стекла при одинаковых объемах выпуска продукции фиксируется снижение либо увеличение энергоэффективности.

Очевидно, что модель, построенная на годовом интервале, будет учитывать эффекты как от выгорания огнеупоров, так и от внедренных мероприятий по энергосбережению, выполненных ремонтов, влияющих на топливопотребление. В табл. 3 представлены результаты регрессионного анализа. Для каждого года эксплуатации печи, начиная со второго, получена однофакторная модель топливопотребления, т у. т./сут.:

$$B_{\text{газ}} = b_{\text{уд.техн}} P + B_{\text{усл.-пост}}, \quad (2)$$

где $b_{\text{уд.техн}}$ – технологическая составляющая расхода топлива, т у. т./т;
 $B_{\text{усл.-пост}}$ – условно-постоянная составляющая расхода топлива, т у. т./сут.

Каждая модель топливопотребления переведена в модель удельных расходов топлива и представлена в виде, т у. т./т:

$$b_{\text{уд.газ}} = b_{\text{уд.техн}} + B_{\text{усл.-пост}}/P. \quad (3)$$

Таблица 3

Модели общих и удельных расходов газа технологической линии
Models of total and specific gas consumption of the technological line

Год эксплуатации	Вид модели	Технологическая составляющая расхода топлива $b_{\text{уд.техн}}$, т у. т./т	Условно-постоянная составляющая расхода топлива $B_{\text{усл.-пост}}$, т у. т./сут.
2-й	$B_{\text{газ}} = 0,11P + 69,11$	0,11	69,11
	$b_{\text{уд.газ}} = 0,11 + 69,11/P$		
3-й	$B_{\text{газ}} = 0,07P + 101,8$	0,07	101,83
	$b_{\text{уд.газ}} = 0,07 + 101,8/P$		
4-й	$B_{\text{газ}} = 0,09P + 85,95$	0,09	85,95
	$b_{\text{уд.газ}} = 0,09 + 85,95/P$		
5-й	$B_{\text{газ}} = 0,04P + 130$	0,04	130,00
	$b_{\text{уд.газ}} = 0,04 + 130/P$		
6-й	$B_{\text{газ}} = 0,08P + 103,1$	0,08	103,10
	$b_{\text{уд.газ}} = 0,08 + 103,1/P$		

За счет наличия условно-постоянной составляющей модель удельных расходов топлива ($b_{\text{уд.газ}}$) приобретает гиперболический вид. Графическая интерпретация моделей удельных расходов топлива приведена на рис. 2.

Представленные величины удельного расхода топлива дают возможность получить численное значение изменения энергоэффективности исследуемого стекольного производства для любого показателя суточной производительности, в диапазоне которого построена модель. Расчет энергоэффективности по упрощенному методу для конкретной технологии по производству листового стекла с эксплуатируемой печью регенеративного типа непрерывного действия и преобладающей суточной производительностью 750 т показал его ежегодное снижение в 1,2 %, что коррелирует с данными других авторов [7, 19, 20].

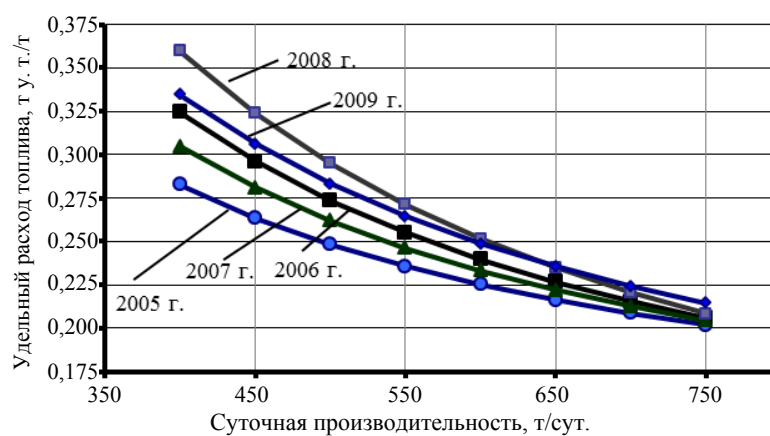


Рис. 2. Динамика удельных расходов топлива линией по производству листового стекла со второго по шестой год эксплуатации

Fig. 2. Dynamics of specific fuel consumption by the sheet glass production line from the second to the sixth year of operation

В то же время многофакторные модели общего расхода природного газа позволяют прогнозировать объем его потребления для каждого климатического периода эксплуатации [28], а также с помощью современных технологий [29] принимать оптимальные управленческие решения.

ВЫВОДЫ

1. Проблема разработки научно обоснованных методов оценки и контроля энергоэффективности стекловарочного и аналогичных производств, эксплуатирующих промышленные печи, не теряет актуальности. В настоящее время их значимость будет расти ввиду появления необходимости формирования годовой заявки на природный газ в условиях создания общего электроэнергетического рынка Евразийского экономического союза и перспективы покупки энергоресурсов через товарно-сырьевые биржи.

2. На примере регрессионного анализа базы данных стекловарочного производства с пламенной стекловаренной печью с проектной мощностью до 750 т/сут. показано, что данная технология имеет сложную взаимосвязь между энергетикой и технологией.

3. Для исследуемой линии по производству листового стекла получена аддитивная многофакторная модель расхода природного газа, учитывающая такие факторы, как производительность технологической линии, температура наружного воздуха, содержание оксида железа в стекле и количество суток эксплуатации печи. Модель позволяет определить общее суточное потребление топлива с погрешностью до 4 %, является адекватной для всего диапазона данных, в которых она построена, и может быть рекомендована для прогнозирования топливопотребления.

4. Предложены методы оценки снижения энергоэффективности производства листового стекла за счет старения оборудования (износа огражда-

ющих конструкций), основанные на построении и использовании много- и однофакторных моделей топливопотребления.

5. Для оценки снижения энергоэффективности стекловаренного производства, выраженного в увеличении удельного потребления топлива на выпуск продукции, необходимо учитывать сроки эксплуатации печи. С помощью коэффициента регрессии фактора «количество суток эксплуатации печи» разработанной многофакторной модели определено численное снижение энергоэффективности печного оборудования. В среднем за сутки эксплуатации печи удельное топливопотребление увеличивается на 12,1 кг у. т./сут.

6. Для упрощенной оценки изменения энергоэффективности и прогнозирования топливопотребления стекловаренным производством на квартальном/годовом интервале предложено применять однофакторную модель суточного топливопотребления от объема выпуска продукции. Для исследуемого производства однофакторная модель имеет погрешность до 6 % при прогнозировании топливопотребления и является адекватной для всего диапазона данных, в которых построена. После преобразования в модель удельного топливопотребления на выпуск единицы продукции она позволяет оценить изменение энергоэффективности за исследуемый период через итоговое изменение удельного топливопотребления для соответствующей (вариативной) суточной загрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heat Balance [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.staraglass.it/products-and-services/detection-and-analysis-services/heat-balance>. Date of access: 17.01.2022.
2. Яицкий, С. Н. Особенности разрушения огнеупорной футеровки стекловаренных печей при производстве листового стекла / С. Н. Яицкий, Л. Л. Брагина, Н. С. Яицкий // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Химия, химическая технология и экология. Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. № 32. С. 72–76.
3. Дзюзер, В. Я. Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий; под общ. ред. В. Я. Дзюзера. М.: Теплотехник, 2009. 339 с.
4. Земляной, К. Г. Служба огнеупоров / К. Г. Земляной. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 172 с.
5. Макаров, Р. И. Управление качеством листового стекла (флоат-способ) / Р. И. Макаров, В. В. Тарбеев, Е. Р. Хорошева. М.: Ассоциации строительных вузов, 2004. 152 с.
6. Папко, Л. Ф. Огнеупоры для стекловаренных печей / Л. Ф. Папко, Ю. Г. Павлюкевич. Минск: БГТУ, 2008. 100 с.
7. Справочник по наилучшим доступным методам в стекольной промышленности: Производство сортового и тарного стекла [Электронный ресурс]. ООО «Эколайн», 2005. Режим доступа: http://old.eipc.center/wp-content/uploads/docs/rus_british/sprav_ndt_proizv_stekla.pdf. Дата доступа: 18.01.2022.
8. Ильяшенко, И. С. Основные направления повышения энергоэффективности стекольных заводов РФ и СНГ в настоящее время [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://glas.sinfo.ru/articles/2016_01_Osnovnye_napravleniya_povysheniya_energojeffektivnosti_stekolnyh_zavodov.pdf. Дата доступа: 18.01.2022.
9. Сорока, Б. С. Промышленные печи в проблеме снижения выбросов оксидов азота / Б. С. Сорока // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2004. № 4. С. 51–66.
10. Энергосбережение. Энергопотребляющее оборудование. Классификация. Показатели энергоэффективности.: СТБ 1771–2010. Введ. 01.07.2010. Утвержден и введен в дей-

- ствие пост. Госстандарта Респ. Беларусь от 15 февр. 2010 г. № 3. Минск: Госстандарт, 2010 г. 22 с.
11. Энергосбережение. Классификация показателей. Общие положения: СТБ 1775–2010. Введ. 01.07.2010. Утвержден и введен в действие пост. Госстандарта Респ. Беларусь от 15 февр. 2010 г. № 3. Минск: Госстандарт, 2010. 9 с.
 12. Показатели энергоэффективности: основы статистики [Электронный ресурс] / International Energy Agency. France, 2014. Режим доступа: http://portal-energo.ru/files/articles/portal-energo_ru_i_statistika.pdf. Дата доступа: 13.12.2021.
 13. О проблемах управления энергоэффективностью производства листового стекла / Р. В. Петухова [и др.] // Энергоэффективность. 2014. № 3. С. 24–27.
 14. Об энергосбережении: Закон Респ. Беларусь от 8 янв. 2015 г. № 239–З. Минск, 2015. 14 с.
 15. Вопросы Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь [Электронный ресурс]: пост. Совета Министров Респ. Беларусь от 31 июля 2006 г. № 981. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C20600981>.
 16. Семенов, Б. А. Методика и результаты оптимизации параметров системы обдува ограждений варочного бассейна стекловаренных печей / Б. А. Семенов, Н. А. Озеров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4 (59), Вып. 1. С. 210–217.
 17. Дзюзер, В. Я. Обобщенный анализ тепловой работы стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. 2017. № 2. С. 15–18.
 18. Корнеев, С. В. Влияние тепловой работы футеровки электродуговых печей на энергопотребление / С. В. Корнеев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 3. С. 66–74.
 19. Hartley, A. A Study of the Balance between Furnace Operating Parameters and Recycled Glass in Melting Furnaces [Electronic Resource] / A. Hartley. Glass Technology Services Ltd. September 2004. Mode of access: https://www.glass-ts.com/site/assets/files/1015/2004_-_a_study_of_the_balance_between_furnace_operating_parameters_and_recycled_glass_in_glass_melting_furnaces.pdf. Date of access: 16.12.2021.
 20. Beerkens, G. C. Ruud. Energy Efficiency Benchmarking of Glass Furnaces / G. C. Ruud Beerkens, J. van Limpt // 62 Conference on Glass Problem. 2001. Vol. 23, Iss. 1. P. 93–105. <https://doi.org/10.1002/9780470294727.ch7>.
 21. О Концепции формирования общего электроэнергетического рынка Евразийского экономического союза [Электронный ресурс]: Решение Высшего Евразийского экономического совета от 8 мая 2015 г. № 12. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420273253>.
 22. О формировании общего рынка газа Евразийского экономического союза [Электронный ресурс]: Решение Высшего Евразийского экономического союза от 6 декабря 2018 г. № 18. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/551866201>.
 23. Роль оксидов железа в производстве листового стекла / И. М. Терещенко [и др.] // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тезисы докладов IX Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 20–21 октября 2011 г. Гродно: ГрГУ, 2011. С. 123–124.
 24. Ван дер Варден, Б. Л. Математическая статистика / Б. Л. Ван дер Варден; пер. Л. Н. Большева; под ред. Н. В. Смирнова. М.: Изд-во иностранной литературы. 1960. 434 с.
 25. Храмов, В. П. Материалы для производства и обработки стекла и стеклоизделий / В. П. Храмов, Е. А. Чугунов. М.: Высш. школа, 1987. 99 с.
 26. Using Models of Energy Consumption from Influencing Factors to Assess the Current State and Energy Efficiency Forecasting / D. Moroz [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 220. P. 01024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022001024>.
 27. Conditional-Constant Component in the Total Consumption of an Energy Resource and Its Influence on the Energy Efficiency of Industrial Consumers / N. Hruntovich [et al.] // International Conference Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Springer, 2020. P. 459–470. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_48.
 28. Мороз, Д. Р. Региональная система газоснабжения с позиций системного анализа и закономерности ее функционирования / Д. Р. Мороз, Н. В. Грунтович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 359–371. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-359-371>.

29. Фурсанов, М. И. Специализированные мобильные приложения как средство оптимизации системы энергоснабжения Республики Беларусь / М. И. Фурсанов, П. А. Сазонов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 129–137. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-129-137>.

Поступила 25.08.2021 Подписана в печать 26.10.2021 Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCES

1. *Heat Balance*. Available at: <https://www.staraglass.it/products-and-services/detection-and-analysis-services/heat-balance>. (Accessed 17 January 2022).
2. Yaitskii S. N., Bragina L. L., Yaitsky N. S. (2012) Features of the Destruction of the Refractory Lining of Glass Furnaces in the Production of Flat Glass. *Vestnik Nats. Tekhn. Un-ta «KhPI»: Sb. Nauch. Tr. Khimiya, Khimicheskaya Tekhnologiya i Ekologiya* [Bulletin of the National Technical University “KhPI”: Collected Papers. Chemistry, Chemical Technology and Ecology]. Kharkiv, NTU “KhPI”, (32), 72–76 (in Russian).
3. Dzyuzer V. Ya., Dzyuzer V. S., Shvydkii V. S. (2009) *Design of Energy-Efficient Glass Furnaces*. Moscow, Teplotekhnika Publ. 339 (in Russian).
4. Zemlyanoi K. G. (2018) *Refractory Service*. Yekaterinburg, Ural University Publ. 172 (in Russian).
5. Makarov R. I., Tarbeev V. V., Khorosheva E. R. (2004) *Quality Management of Flat Glass (Float Method)*. Moscow, Associations of Construction Universities. 152 (in Russian).
6. Papko L. F., Pavlyukevich Yu. G. (2008) *Refractories for Glassmaking Furnaces*. Minsk, BSTU. 100 (in Russian).
7. *Directory of the Best Available Technical Methods for the Use of Energy Resources in the Glass Industry: Production of Varietal and Container Glass*. “Ecoline” RPO, 2005. Available at: http://old.eipc.center/wp-content/uploads/docs/rus_british/sprav_ndt_proizv_stekla.pdf. (Accessed 18 January 2022) (in Russian).
8. Il'yashenko I. S. (2010) The Main Directions of Improving the Energy Efficiency of Glass Factories of the Russian Federation and the CIS at the Present Time. Available at: https://glassinfo.ru/articles/2016_01_Osnovnye_napravleniya_povysheniya_jenergojefektivnos_tj_stekolnyh_zavodov.pdf. (Accessed 18 January 2022) (in Russian).
9. Soroka B. S. (2004) Industrial Furnaces in Problem of Nitrogen Oxide Emission Reduction. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 51–66 (in Russian).
10. STB 1771–2010. *Energy Saving. Energy-Consuming Equipment. Classification. Energy Efficiency Indicators*. Minsk, Gosstandart, 2010. 22 (in Russian).
11. STB 1771–2010. *Energy Saving. Classification of Indicators. General Provisions*. Minsk, Gosstandart, 2010. 9 (in Russian).
12. International Energy Agency (2014). *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals of Statistics*. Available at: http://portal-energo.ru/files/articles/portal-energo_ru_i_statistika.pdf. (Accessed 13 December 2021) (in Russian).
13. Petukhova R. V., Gruntovich N. V., Shenets Ya. L. (2014) On the Problems of Energy Efficiency Management of Sheet Glass Production. *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], (3), 24–27 (in Russian).
14. *On Energy Saving: The Law of Republic of Belarus No 239–3 of January 8, 2015*. Minsk, 2015. 14 (in Russian).
15. *Issues of the State Committee for Standardization of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus. Belarus No 981 of July 31, 2006*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C20600981> (in Russian).
16. Semyonov B. A., Ozerov N. A. (2011) Parameter Optimization Methods and Results for the Air Cooling System Protection of Melter Zone of Glassmaking Furnaces. *Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [SGTU Herald], (4), Iss. 1, 210–217 (in Russian).

17. Dzyuzer V. Ya. (2017) Generalized Analysis of the Glass-Melting Furnaces Thermal Performance. *Novye Ogneupory = New Refractories*, (2), 15–18. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-2-15-18> (in Russian).
18. Korneev S. V. (2014) Influence of Lining Thermal Performance in Electric-Arc Furnaces on Power Consumption. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 66–74 (in Russian).
19. Hartley A. (2004) *A Study of the Balance between Furnace Operating Parameters and Recycled Glass in Melting Furnaces*. Glass Technology Services Ltd. Available at: https://www.glass-ts.com/site/assets/files/1015/2004_-_a_study_of_the_balance_between_furnace_operating_parameters_and_recycled_glass_in_glass_melting_furnaces.pdf. (Accessed 16 December 2021).
20. Beerkens G. C. Ruud, Limpt van J. (2001) Energy Efficiency Benchmarking of Glass Furnaces. *62 Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 23 (1), 93–105. <https://doi.org/10.1002/9780470294727.ch7>.
21. *On the Concept of Forming a Common Electric Power Market of the Eurasian Economic Union*: Decision of the Supreme Eurasian Economic Council No 12 of May 8, 2015. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420273253> (in Russian).
22. *On the Formation of the Common Gas Market of the Eurasian Economic Union*: Decision of the Supreme Eurasian Economic Union No 18 of December 6, 2018. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/551866201> (in Russian).
23. Tereshchenko I. M., Petukhova R. V., Kravchuk A. P., Volkov E. V. (2011) The Role of Iron Oxides in the Production of Sheet Glass. *Energo- i Materialosberegayushchie Ekologicheskii Chistyye Tekhnologii: Tezisy Dokladov IX Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii, Grodno, 20–21 Oktyabrya 2011 g.* [Energy and Material-Saving Environmentally Friendly Technologies: Abstracts of the IX International Scientific and Technical Conference, Grodno, October 20–21, 2011]. Grodno, GrSU. 123–124 (in Russian).
24. Van der Waerden B. L. (1969) *Mathematical Statistics*. Springer, Berlin. 371. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-22137-2>.
25. Khramkov V. P., Chugunov Ye. A. (1987) *Materials for the Production and Processing of Glass and Glass Products*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 99 (in Russian).
26. Moroz D., Hruntovich N., Kapansky A., Shenets Ya., Malashanka M., Gracheva E. (2020) Using Models of Energy Consumption from Influencing Factors to Assess the Current State and Energy Efficiency Forecasting. *E3S Web of Conferences*, 220, 01024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022001024>.
27. Hruntovich N., Kapansky A., Jhukovets S., Shenets Y., Malashanka M., Gracheva E. (2020) Conditional-Constant Component in the Total Consumption of an Energy Resource and Its Influence on the Energy Efficiency of Industrial Consumers. *International Conference Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives*. Springer, 459–470. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_48.
28. Moroz D. R., Hruntovich N. V. (2018) Regional Gas Supply System Considered from the Standpoint of System Analysis and Regularities of its Functioning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 359–371. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-359-371> (in Russian).
29. Fursanov M. I., Sazonov P. A. (2020) Specialized Mobile Applications as Means of Optimizing the Power Supply System of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (2), 129–137. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-129-137> (in Russian).