

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ КОТЕЛЬНЫХ

ENVIRONMENTAL AND THERMAL EFFECTS OF MODERNIZATION OF WATER BOILERS IN INDUSTRIAL BOILER ROOMS

УДК 621.1

**А.А. Котов¹*, С.М. Кузьменков¹, В.Ю. Мовсесян²,
В.В. Дрюков¹**

¹ Витебский государственный технологический университет

² Котельная «Южная» ОАО «Витязь»

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2021-1-124-131>

**A. Kotow¹*, S. Kuzmenkov¹, U. Mausesian²,
V. Dryukov¹**

¹ Vitebsk State Technological University

² Boiler center "South" of Vityaz Company

РЕФЕРАТ

ЭКОЛОГИЯ, ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ, ВОДОГРЕЙНЫЕ КОТЛЫ, ПРОМЫШЛЕННЫЕ КОТЕЛЬНЫЕ

Объектом исследований является тепловая изоляция водогрейных котлов на промышленных котельных.

Целью работы является теоретическое обоснование выбора теплоизоляционного материала, обеспечивающего максимальный экологический и ресурсосберегающий эффект при эксплуатации водогрейных котлов КВГМ-100.

В результате выполненных расчетов по предложенной методике показано, что наибольший эффект будет достигнут при использовании в качестве материала теплоизоляционного слоя современных материалов типа «Изобокс Экстралайт» или «Изорок Изовент». Температура наружной поверхности стенки котла КВГМ-100 при этом будет соответствовать требованиям ТКП 053-2007 (02300). Применение таких материалов для теплоизоляции котла обеспечивает экономию энергетических ресурсов в размере 120 тонн условного топлива в год. Эта экономия обеспечивается за счет сокращения сжигания мазута или природного газа, что дает экологический эффект снижения выбросов в атмосферу.

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL AND THERMAL EFFECTS, WATER BOILERS, INDUSTRIAL BOILER ROOMS

The research objective is the thermal insulation of water boilers in industrial boiler rooms.

The purpose of the work is theoretical substantiation of the choice of a heat-insulating material, providing the maximum environmental and resource-saving effects during the operation of hot water boilers KVGM-100.

The results obtained show that the greatest effect will be achieved when using modern materials such as "Isobox Extralight" or "Izorok Isovent" as a material for a heat-insulating layer. The temperature of the outer surface of the wall of the boiler KVGM-100 will comply with the requirements of TKP 053-2007 (02300). The use of such materials for the thermal insulation of the boiler provides energy savings in the amount of 120 tons of standard fuel per year. These savings are achieved by reducing the combustion of fuel oil or natural gas, which has the environmental effect of reducing air emissions.

Традиционные способы выработки тепло- и электроэнергии в котельных и на ТЭС из первичных источников энергии, использование топлива в топливопотребляющих технологических уста-

новках сопряжены с разносторонним локальным и глобальным воздействием на окружающую среду. Выброс теплоты и влаги вызывает снижение солнечной освещенности, образова-

* E-mail: tiomp.vstu@mail.ru (A. Kotow)

ние низкой облачности и туманов, морозящих дождей, инея, гололеда, обледенения дорог и конструкций. Газопылевые выбросы загрязняют атмосферу углекислотой, золой, оксидами азота, сернистой и серной кислотой, что вызывает коррозию сооружений и оборудования, уменьшает солнечное облучение территории.

В Республике Беларусь в настоящее время большую актуальность имеет проблема модернизации водогрейных котлов на промышленных котельных. Снижение тепловых потерь, топливных ресурсов и, как следствие, уменьшение вредных выбросов является важнейшим направлением этой модернизации.

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование выбора теплоизоляционного материала, обеспечивающего максимальный энергосберегающий и экологический эффект

при эксплуатации водогрейных котлов на промышленных котельных.

Водогрейные стационарные котлы КВГМ-100 теплопроизводительностью 116,3 **МВт** предназначены для получения горячей воды с номинальной температурой 150 °С. Для оценки эффективности существующей тепловой изоляции котлов КВГМ-100-150 на котельной «Южная» проведен термографический анализ состояния ограждающих конструкций. Исследование проводилось с помощью тепловизионной камеры Testo 875-1. Характеристики прибора приведены в таблице 1.

Результаты тепловизионного исследования представлены на рисунках 1–4. Значения температуры в измеренных точках приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики тепловизионной камеры Testo 875-1

Показатель	Значение показателя
Разрешение, пикселей	160 x 120
Температурная чувствительность, мК	< 80
Частота обновления кадра, Гц	9
Диапазон температур, °C	-80 ... +280
Минимальное фокусное расстояние, м	0,1
Погрешность измерений, °C	+/-2

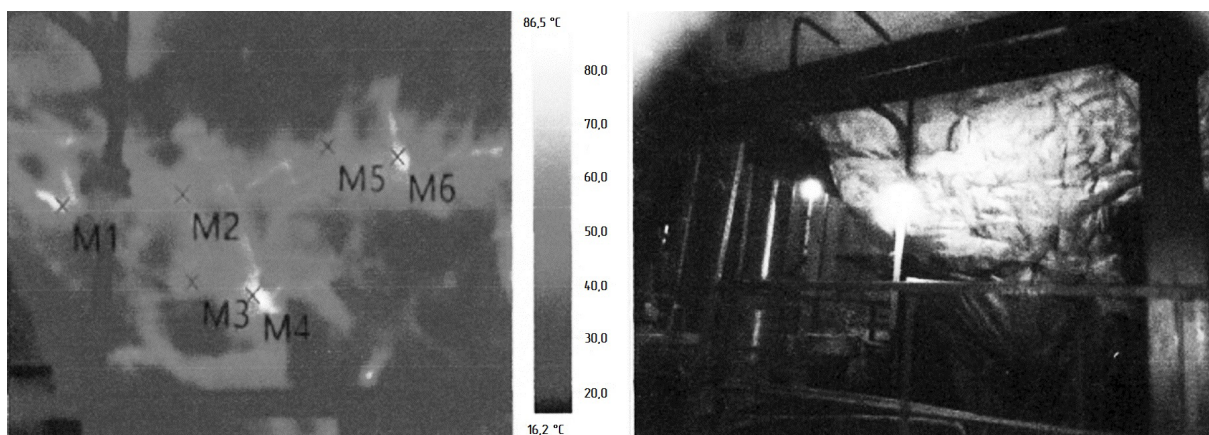


Рисунок 1 – Термограмма ограждающих конструкций газохода котла КВГМ-100-150

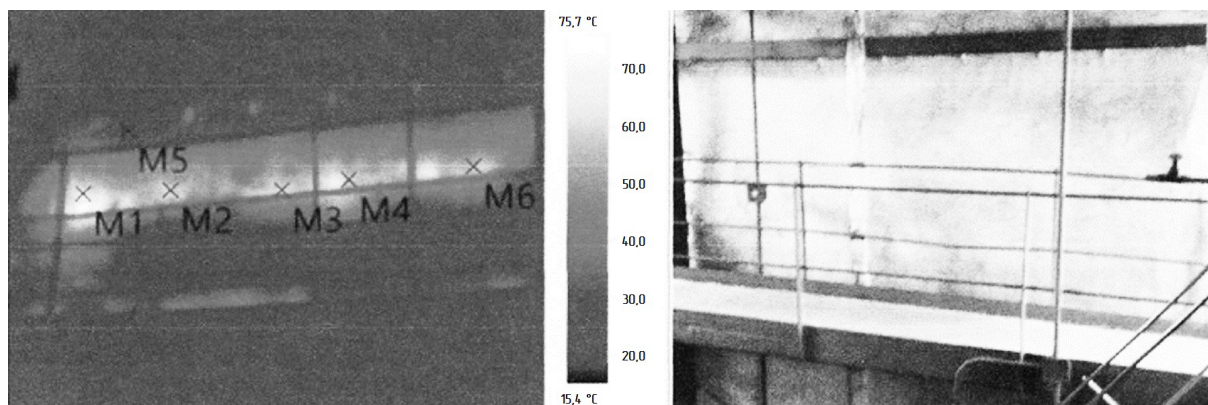


Рисунок 2 – Термограмма ограждающих конструкций левого бокового экрана котла КВГМ–100-150

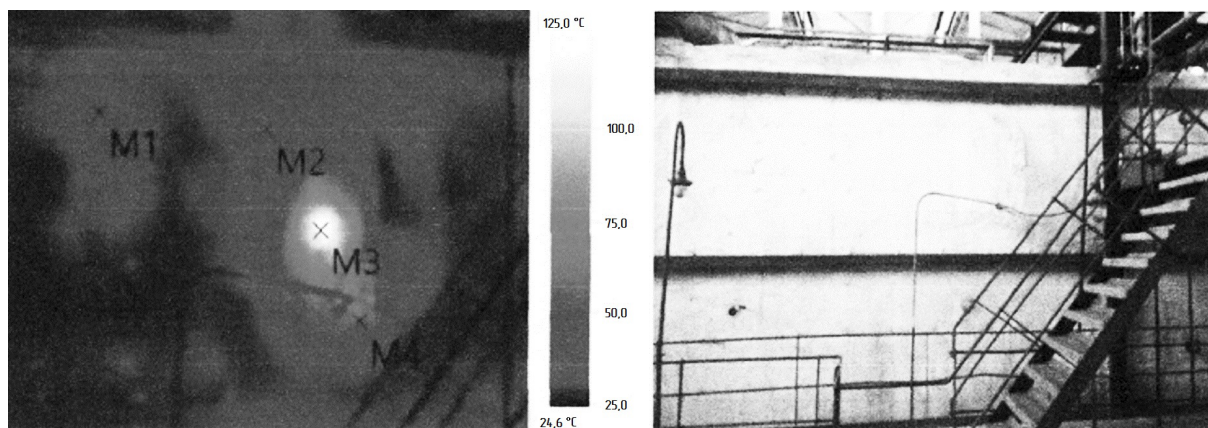


Рисунок 3 – Термограмма ограждающих конструкций правого бокового экрана котла КВГМ–100-150

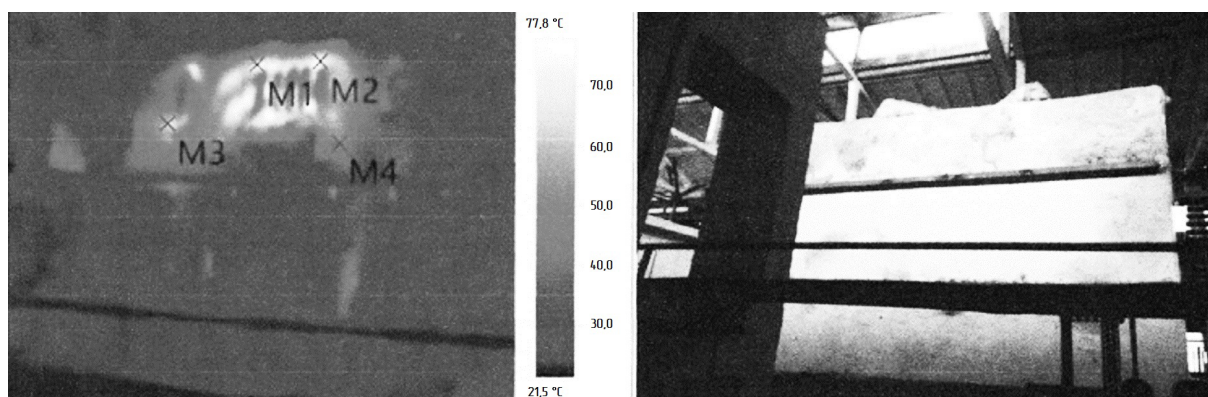


Рисунок 4 – Термограмма ограждающих конструкций фронтального экрана котла КВГМ–100-150

Таблица 2 – Значения температуры в точках замера

Зона измерения	Температура, °C в точках замера					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Ограждающие конструкции газохода	62,6	53,6	50,8	66,6	43,9	70,3
Ограждающие конструкции левого бокового экрана	65,0	60,4	60,2	57,9	31,3	55,4
Ограждающие конструкции правого бокового экрана	31,9	52,4	120,7	57,1	–	–
Ограждающие конструкции фронтального экрана	70,6	71,9	62,2	48,0	–	–

Из представленных данных видно, что состояние ограждающих конструкций котла КВГМ–100-150 оценивается как неудовлетворяющее нормативным требованиям ТКП 053-2007 (05300) [4]. В соответствии с ТНПА, участки элементов котлов и трубопроводов с повышенной температурой, с которыми возможно непосредственное соприкосновение обслуживающего персонала, должны иметь тепловую изоляцию, обеспечивающую температуру наружной поверхности не более 45 °C при температуре окружающей среды не более 25 °C.

Для обеспечения эффективной тепловой изоляции предлагается применение современных теплоизолирующих материалов для термоизоляции котла. Основные физические параметры материалов, которые могут быть использованы

для обмуровки и тепловой изоляции котельных установок [2], приведены в таблице 3.

Расчет тепловых потерь проводится на примере газомазутного водогрейного котельного агрегата КВГМ-100, широко используемого на теплоэлектростанциях и в котельных, отапливающих жилые микрорайоны на всем постсоветском пространстве. Традиционно используемая до настоящего времени обмуровка котлов такого типа состоит из трёх слоёв: огнеупорного слоя, теплоизоляционного слоя, уплотнительного и защитного слоя. Огнеупорный слой выполняется из шамотобетона на глинозёмистом цементе и наносится на экраны котла по металлической сетке. Толщина слоя – 30 мм. Теплоизоляционный слой состоит из минераловатных матов, устанавливаемых поверх огнеупорного слоя.

Таблица 3 – Физические свойства материалов для обмуровки и тепловой изоляции котельных агрегатов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м · град	Максимальная рабочая температура, °C
Шамот	1800–1900	1,16–1,4	1730
Бетон огнеупорный	1500–1800	0,89–1,14	1800
Пенобетон жаростойкий	450–650	0,15–0,24	1400
Перлитобетон	250–300	0,07–0,12	600
Минеральная вата	85–140	0,044–0,065	500
Базальтовая вата	35–110	0,032–0,046	1200
«Изобокс Экстралайт»	30–38	0,036–0,037	900
«Изорок Изовент»	90	0,034–0,041	700
Магнезит	2600–2800	1,0–1,5	1200

Толщина слоя – 80 **мм**. Защитный слой выполняется из уплотнительной магнезиальной обмазки (штукатурки), которая также наносится по металлической сетке и оклеивается снаружи тканью. Толщина слоя – 12 **мм**.

Интенсивность переноса тепла через стенку котельного агрегата [1] может быть определена согласно уравнению теплопередачи:

$$q = k \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}), \text{Вт/м}^2, \quad (1)$$

где $t_{ж1}, t_{ж2}$ – температура соответственно горячей и холодной среды, °C; k – коэффициент теплопередачи, **Вт/м² · град**:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}; \quad (2)$$

α_1, α_2 – в общем случае суммарные коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной стороны стенки, **Вт/м² · град**; δ_i – толщина каждого из слоев, составляющих стенку, **мм**; λ_i – коэффициент теплопроводности материала данного слоя, **Вт/м · град**.

В процессе теплопереноса от дымовых газов к стенке котла и от ее наружной поверхности к окружающей среде основную роль играет конвективный теплообмен, однако при этом необходимо учитывать также и интенсивность теплообмена излучением. В этом случае суммарный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l. \quad (3)$$

Температура на внутренней поверхности стенки котельного агрегата и интенсивность теплоотдачи от топочных газов к ней от конструкции стенки практически не зависят и могут считаться постоянными. Величина коэффициента теплоотдачи α_l определяется согласно уравнению (3), при этом, согласно номограммам [3], $\alpha_{ж1} = 103 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, $\alpha_{ж1} = 14,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$. Тогда $\alpha_l = 103 + 14,3 = 117,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$. Наибольшая

температура дымовых газов $t_{ж1} = 840 \text{ °C}$.

Для нахождения значения коэффициента теплоотдачи конвекцией с наружной поверхности котельного агрегата $\alpha_{ж2}$ необходимо использовать критериальные уравнения. При свободной конвекции критериальное уравнение в общем случае имеет вид:

$$Nu = A \cdot (Gr \cdot Pr)^n. \quad (4)$$

В этом уравнении: Nu – число Нуссельта,

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda_{ж}}; \quad (5)$$

Gr – критерий Грасгофа,

$$Gr = \frac{l^3}{\nu_{ж}^2} \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta t; \quad (6)$$

Pr – критерий Прандтля. Здесь l – определяющий размер тела, $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности среды, $\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости среды, β – коэффициент объемного температурного расширения среды $\beta = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, Δt – температурный напор между поверхностью тела и окружающей средой. Значения физических параметров среды ($\lambda_{ж}, \nu_{ж}, Pr$) определяются по таблице параметров воздуха [3] в зависимости от определяющей температуры, значение коэффициента объемного температурного расширения для газообразных веществ

$$\beta = \frac{1}{T_{ж}}. \quad (7)$$

В нашем случае, поскольку наиболее интенсивно теплообмен будет протекать через стенку котла, определяющим размером будет являться высота котельного агрегата $h = 14,365 \text{ м}$, а определяющей температурой является средняя температура окружающего воздуха, принимаемая равной $t_{ж2} = 20 \text{ °C}$.

При расчете конвективного теплообмена от горизонтальной поверхности для случая турбулентного режима движения, что будет иметь место при $(Gr \cdot Pr) > 6 \cdot 10^{10}$, уравнение (4) принимает вид [3]

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33}. \quad (8)$$

Плотность теплового потока, отдаваемого излучением q_l , рассчитываются в соответствии с законом Стефана-Больцмана [2]:

$$q_l = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right), \quad (9)$$

где ε – степень черноты поверхности; $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_{cm} и $T_{жс}$ – средние абсолютные температуры поверхности тела и окружающей среды соответственно. Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_l = \frac{q_l}{t_{cm} - t_{жс}}. \quad (10)$$

Поскольку интенсивность теплоотдачи с наружной поверхности котельного агрегата зависит от температуры этой поверхности, определить которую заранее невозможно, расчет проводится методом последовательного приближения до максимального совпадения принимаемой предварительно температуры t_{cm2} с получаемой в результате вычислений. Температура наружной поверхности при этом определяется по формуле

$$t_{cm2} = t_{жс2} + q \cdot \frac{1}{\alpha_2}. \quad (11)$$

Значения физических параметров воздуха при температуре 20°C [3]: коэффициент теплопроводности $\lambda_{жс2} = 2,593 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$, коэффициент кинематической вязкости $\nu_{жс2} =$

$= 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, критерий Прандтля $Pr_2 = 0,703$. Степень черноты наружной поверхности котельного агрегата $\varepsilon = 0,91$.

Для уменьшения тепловых потерь котельного агрегата и, как следствие, снижения массы сжигаемого топлива и уменьшения количества вредных выбросов предлагаются несколько вариантов модернизации его тепловой изоляции котельного агрегата:

1. При неизменной конструкции обмуровки в качестве материала теплоизоляционного слоя вместо минераловатных матов использовать современные материалы типа «Изобокс Экстра-лайт» или «Изорок Изовент» с более низким коэффициентом теплопроводности.

2. В качестве огнеупорного слоя использовать жаростойкий пенобетон, в качестве теплоизоляционного слоя – перлитобетон.

3. Использовать монолитную однослойную конструкцию из жаростойкого пенобетона в качестве одновременно и огнеупорного и теплоизоляционного слоя, что значительно упростит технологию обмуровки котла.

Согласно проведенным расчетам для обеспечения допустимой температуры наружной поверхности котельного агрегата требуется увеличить толщину стенки. Для обеспечения температуры t_{cm2} не выше 45°C , что соответствует требованиям, ТКП 053-2007 (02300) [4], необходимо увеличить толщину слоя теплоизоляции из материала «Изорок Изовент» до 110 мм (для варианта 1), толщину слоя перлитобетона до 200 мм на слое жаростойкого пенобетона толщиной 30 мм (для варианта 2), а однослойной стенки из жаростойкого пенобетона – до 480 мм (для варианта 3).

Результаты расчета для исходного и предлагаемых вариантов исполнения тепловой изоляции котельного агрегата КВГМ-100 приведены в таблице 4.

Расчеты показывают, что первый из рассмотренных вариантов исполнения тепловой изоляции обеспечивает наибольшую энергоэффективность, снижение тепловых потерь котельного агрегата, количества сжигаемого топлива и, как следствие, уменьшения количества вредных выбросов. При площади поверхности изоляции котла 392 м^2 тепловой поток для этого варианта уменьшится с 562 ГДж до 258 ГДж в месяц,

Таблица 4 – Сравнительные результаты расчетов исходного и предлагаемых вариантов исполнения тепловой изоляции котельного агрегата КВГМ-100

Параметры	Исходный вариант исполнения	Предлагаемые варианты исполнения		
		1	2	3
Коэффициент теплоотдачи α_2 , Вт/м² · град	12,316	10,603	10,689	10,708
Коэффициент теплопередачи k , Вт/м² · град	0,663	0,304	0,318	0,322
Плотность теплового потока q , Вт/м²	543,65	249,62	260,59	264,35
Температура наружной поверхности стенки котла t_{cm2} , °C	64,1	43,5	44,4	44,7

а количество вредных выбросов – в 2,17 раза. Обеспечивает экономию условного топлива 120 тонн в год. На крупных промышленных котельных обычно устанавливается несколько котлов. Например, на котельной «Южная» (г. Витебск) установлено 5 котлов КВГМ–100-150. Для этой котельной расчетная годовая экономия условного топлива составит 600 тонн.

ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты показывают, что наибольший эффект будет достигнут при использовании в качестве материала теплоизоля-

ционного слоя современных материалов типа «Изобокс Экстралайт» или «Изорок Изовент». Температура наружной поверхности стенки котла КВГМ-100 при этом будет соответствовать требованиям ТКП 053-2007 (02300).

2. Применение таких материалов для теплоизоляции котла обеспечивает экономию энергетических ресурсов в размере 120 тонн условного топлива в год. Эта экономия обеспечивается за счет сокращения сжигания мазута или природного газа, что дает экологический эффект снижения выбросов в атмосферу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нияковский, А. М., Гончаров, Э. И., Мишута, О. И. (2017), К выбору плотности теплового потока при проектировании тепловой изоляции, *Вестник Полоцкого государственного университета*, 2017, № 8, С. 147.
2. Кинжибекова, А. К. (2018), Современные теплоизоляционные материалы для обмуровки тепловых установок в теплоэнергетике, *Вестник инновационного евразийского университета*, 2018, № 4, С. 118–122.
3. Исаченко, В. П., Осипова, В. А., Сукомел, А. С. (2019), *Теплопередача*, Москва, 440 с.

REFERENCES

1. Niyakovsky, A. M., Goncharov, E. I., Mishuto, O. I. (2017), To the choice of heat flux density in the design of thermal insulation [K vyboru plotnosti teplovogo potoka pri proyektirovanii teplovoy izolyatsii], *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta – Vestnik of Polotsk State University*, 2017, № 8, P. 147.
2. Kinzhibekova, A. K. (2018), Modern heat-insulating materials for lining thermal installations in heat power engineering [Sovremennyye teploizolyatsionnyye materialy dlya obmurovki teplovykh ustanovok v teploenergetike], *Vestnik innovatsionnogo yevraziyskogo universiteta – Vestnik of Innovative Eurasian University*, 2018, №

4. ТКП 053-2007 (02300). *Котлы паровые водотрубные промышленной энергетики с рабочим давлением свыше 0,07 МПа до 4,0 МПа и производительностью свыше 2,5 т/ч. Порядок проведения технического диагностирования.* Введ. 01.05.2007, Минск, 2007, 22 с.
- 4, С. 118–122.
3. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., SukomeI, A. S. (2019), *Teploperedacha* [Heat transfer], Moscow, 440 p.
4. ТКП 053-2007 (02300). *Water-tube steam boilers for industrial power engineering with a working pressure of over 0.07 MPa to 4.0 MPa and a capacity of over 2.5 t/h. The procedure for conducting technical diagnostics*, Vved. 01.05.2007, Minsk, 22 p.

Статья поступила в редакцию 25. 03. 2021 г.