

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 2 (2024)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и информационных
систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/ZSHT7059>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.,

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора
Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*
Сағындық Ә. Б. *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцен;</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А.Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 44.31.35

<https://doi.org/10.48081/DMBX3648>

**Е. В. Приходько, А. С. Никифоров, Н. М. Арипова,
А. К. Кинжибекова, *А. Е. Карманов**

Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОГНЕУПОРОВ

В данной статье проводится анализ способов определения теплофизических коэффициентов огнеупорных материалов в зависимости от температуры и условий эксплуатации. Анализ показывает, что несмотря на значительное количество способов и устройств для определения коэффициента теплопроводности, получение данных для рассматриваемого вида огнеупора возможно только лабораторным путём.

Авторами был разработан и создан стенд для определения теплофизических свойств огнеупорных материалов, который позволяет одновременно определять предел прочности на сжатие и коэффициент теплопроводности огнеупорного материала при повышенных температурах.

В рамках разработанного метода были вычислены коэффициенты теплопроводности для образцов огнеупорного материала, используемого в футеровке разливочных ковшей на производстве ферросплавов, а именно – материала ШКУ-32. Повышение температуры сопровождается увеличением коэффициента теплопроводности, и при увеличении температуры от 100 до 1200 °С его значение увеличивается на 16 %. Для анализа зависимости теплоемкости шамотного огнеупора ШКУ-32 от температуры, были использованы справочные данные.

Проведенные исследования показывают, что средние скорости изменения коэффициента теплопроводности и теплоемкости при увеличении температуры для шамота ШКУ-32 не сильно

отличаются, не превышая 4 %. Исходя из этого, можно заключить, что при использовании коэффициента температуропроводности в теплотехнических расчетах нет необходимости учитывать влияние температуры. Увеличение коэффициента теплопроводности компенсируется ростом теплоемкости огнеупорного материала.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, теплоёмкость, высокотемпературные агрегаты, коэффициент температуропроводности, футеровка, зависимость от температуры.

Введение

Коэффициент теплопроводности материала – одна из важнейших теплофизических характеристик, используемых в теплотехнических расчётах. Значение коэффициента теплопроводности используется непосредственно в расчётах, например, при определении плотности теплового потока, или в качестве составляющей других коэффициентов (коэффициента температуропроводности) [1].

Теплопроводность огнеупорных материалов футеровки может изменяться в широких пределах в процессе эксплуатации. Причинами этого являются: изменение температуры материала, изменение химического состава материалов вследствие действия температур и рабочих сред, снижение плотности материала в процессе эксплуатации и др. [2].

Таким образом, для оценки тепловой работы футеровок высокотемпературных агрегатов необходимы данные о коэффициенте теплопроводности футеровочных материалов в момент проведения исследований с учётом условий эксплуатации.

Зависимости коэффициента теплопроводности от температуры приведены в литературе [3; 4; 5]. Но широкий спектр применяемых огнеупорных материалов и разнообразие составов, применяемых в огнеупорах, часто приводят к тому, что получение данных для рассматриваемого вида огнеупора возможно только лабораторным путём.

Расчёт термонапряжённого состояния футеровки [6] предполагает использование значения коэффициента теплопроводности как

непосредственно, так и в виде составляющей коэффициента теплопроводности. Произведём оценку влияния изменения температуры на эти коэффициенты.

Материалы и методы

Для оценки коэффициента теплопроводности огнеупорных материалов наиболее точным и простым является метод измерений коэффициента в лабораторных условиях. Разработано достаточно много способов и устройств для измерения коэффициента теплопроводности [7; 8; 9]. При этом, не все способы подходят для определения коэффициента теплопроводности огнеупоров при повышенных температурах и с пропиткой. Одним из наиболее простых и надёжных приборов для измерения теплопроводности являются приборы, работа которых основана на методе теплового зонда. Так, использование метода цилиндрического зонда, реализуется в измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 «Зонд». С помощью прибора можно получить локальные коэффициенты теплопроводности для небольших зон, но температура измеряемого материала ограничивается 40 градусами. Поэтому, при его использовании, нет возможности получать зависимости коэффициента теплопроводности от температуры.

Авторами был разработан и создан стенд для определения теплофизических свойств огнеупорных материалов (рисунок 1), который позволяет одновременно определять предел прочности на сжатие и коэффициент теплопроводности огнеупорного материала при повышенных температурах [10].

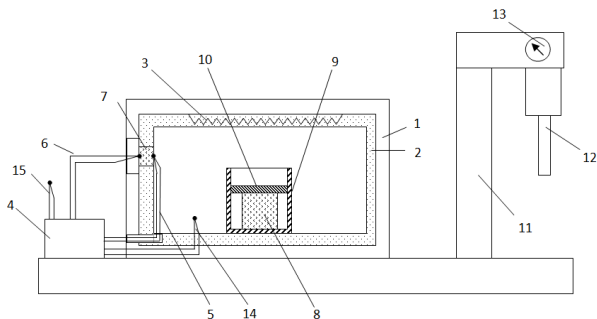


Рисунок 1 – Устройство для термомеханических испытаний материалов

Предлагаемый способ заключается в одновременном определении:

- коэффициента теплопроводности образца исследуемого огнеупорного материала, размещённого в окне огнеупорного слоя муфельной печи;

- предела прочности исследуемого материала, который выдерживается при заданной температуре и нагружается до разрушения.

Устройство включает в себя муфельную печь 1, имеющую огнеупорный слой 2 и электрический нагреватель 3. Для измерения температур используется вторичный прибор 4. К вторичному прибору 4 подключены термопары 5 и 6, которые расположены на внутренней и наружной поверхности исследуемого образца соответственно.

Из исследуемого материала изготавливают два образца. В огнеупорном слое выполнено окно для размещения первого образца 7. Металлический толстостенный стакан 9 устанавливается в рабочее пространство муфельной печи. Второй образец 8 располагается внутри стакана и накрывается металлической пластиной 10 по размеру отверстия стакана. Для создания нагрузки используется пресс 11, который посредством силовой тяги 12 воздействует на пластину. Измерение создаваемой нагрузки производится по силоизмерительному устройству 13.

Термопара 14 размещается внутри жарового пространства печи и предназначена для измерения температуры внутри муфельной печи. Термопара 15 находится снаружи печи и предназначена для измерения температуры окружающей среды.

Первый образец – это образец для измерения коэффициента теплопроводности в форме прямоугольного параллелепипеда. Данный образец по размерам равен размерам окна в муфельной печи. Толщина этого образца должна быть меньше длины ребра лицевой грани не менее чем в пять раз. Второй образец необходим для определения предела прочности на сжатие и выполняется в форме цилиндра или прямоугольного параллелепипеда.

Образец 7 размещается в окне огнеупорного слоя. Образец 8 помещают в муфельную печь и начинают нагрев металлического толстостенного стакана. После достижения требуемого значения температуры стакан с испытуемым образцом вынимают из муфеля и сразу

подвергают одноосному нагружению прессом до разрушения огнеупорного материала.

Для определения коэффициента теплопроводности в качестве температуры испытания $t_{\text{тепл}}$ принимается среднеарифметическое значение температур, фиксируемых термодарами 5 (t_5) и 6 (t_6):

$$t_{\text{менл}} = (t_5 + t_6) / 2.$$

Плотность теплового потока q ($\text{Вт}/\text{м}^2$), проходящего через образец исследуемого огнеупорного материала определяется по формуле:

$$q = \alpha \cdot (t_6 - t_{\text{о.с.}}),$$

где $t_{\text{о.с.}}$ – температура окружающей среды, измеряемая термопарой 15, °C;

α – коэффициент теплоотдачи с поверхности исследуемого огнеупорного материала $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; определяется по любой известной формуле, например [11]:

$$\alpha = 4,8 \cdot (t_6 - t_{\text{о.с.}})^{0,25},$$

Коэффициент теплопроводности λ определяется по известной формуле в случае плоского слоя:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{t_5 - t_6},$$

где δ – толщина образца исследуемого огнеупорного материала, м.

Результаты и обсуждения

В соответствии с разработанным способом были определены коэффициенты теплопроводности для образцов огнеупорного материала футеровки разливочных ковшей ферросплавного производства – ШКУ-32.

Измерение теплоёмкости огнеупорных материалов требует дорогостоящего оборудования и имеет значительные сложности. Поэтому, для анализа зависимости теплоёмкости шамотного огнеупора ШКУ-32 от температуры воспользуемся справочными данными [12].

Результаты проведённых экспериментов по определению коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры представлены на рисунке 2.

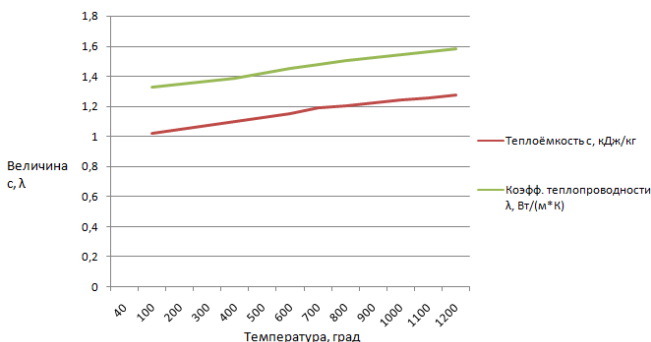


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопроводности и теплоёмкости шамотного огнеупора (марки ШКУ) от температуры

Анализ полученных данных показывает, что коэффициент теплопроводности в значительной мере зависит от температуры. Увеличение температуры сопровождается ростом коэффициента теплопроводности. Значение коэффициента теплопроводности увеличивается на 16 % при возрастании температуры от 100 до 1200 °С.

Известно, что коэффициент температуропроводности a определяется соотношением:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho},$$

где c – теплоёмкость огнеупорного материала, кДж/кг;

ρ – плотность огнеупорного материала, кг/м³.

С учётом того, что плотность шамотного кирпича в рассматриваемом диапазоне температур можно принять постоянной величиной, коэффициент температуропроводности будет определяться отношением λ/c .

Анализ теплоёмкости шамотного огнеупора ШКУ-32 (рисунок 2), показал, что она также увеличивается с ростом температуры. В рассматриваемом диапазоне температур от 100 до 1200 °С изменение значения теплоёмкости составляет 19,9 %. Таким образом, разница в росте коэффициента теплопроводности и теплоёмкости материала не значительна и составляет не более 4 %.

Выводы

Анализ полученных данных показывает, что изменение коэффициента теплопроводности при изменении температуры значительно, и данная зависимость должна учитываться при теплотехнических расчётах.

Увеличение теплоёмкости при росте температуры также достигает относительно высоких значений. Зависимость теплоёмкости от температуры имеет аналогичный характер с зависимостью теплопроводности от температуры. С учётом того, что коэффициент температуропроводности определяется отношением λ/c , одновременное увеличение коэффициента теплопроводности и теплоёмкости при повышении температуры оказывает незначительное влияние на коэффициент температуропроводности.

Проведённые исследования показали, что средние скорости изменения коэффициента теплопроводности и теплоёмкости при увеличении температуры для шамота ШКУ-32 не сильно отличаются (не более 4 %). На основании вышесказанного можно сделать вывод, что при использовании коэффициента температуропроводности в теплотехнических расчётах нет необходимости учитывать влияние на него температуры. Увеличение коэффициента теплопроводности компенсируется увеличением теплоёмкости огнеупорного материала.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP19675777)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Ботян, С. С.** Оценка огнестойкости каркасно-обшивных перегородок с использованием теплофизических характеристик, полученных экспериментально-расчетным способом в камерной электропечи [Текст] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. –2020. –№2.

2 **Соколов, А. К.** Метод определения температуропроводности и коэффициента теплопроводности по температурам поверхности пластины как полуограниченного тела. Известия высших учебных заведений [Текст] // Черная Металлургия. –2022. –65 (1). – Р .57-65. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-57-65>.

3 **Кашеев, И. Д.** Огнеупоры : материалы, изделия, свойства и применение [Текст]. – М. : Теплоэнергетик, 2003.

4 **Ененко, Г. М., Степанов, Е.М., Филимонов, Ю.П.** Промышленные печи [Текст]. – Москва : Машиностроение, 1964. - 359 с.

5 **Стрелов, К. К., Кашеев, И. Д., Мамыкин, П. С.** Технология огнеупоров [Текст]. –М. : Металлургия 1988. – 528с.

6 **Prikhod'ko, E. V.** Analysis of methods for heating the lining of high-temperature units. Refractories and Industrial Ceramics. Vol. 62, No. 4, P. 463-466. November, 2021. [10.1007/s11148-021-00625-1](https://doi.org/10.1007/s11148-021-00625-1).

7 **Гусейнов, Г. Г.** Устройство для измерения теплопроводности [Текст] // Вестник Казанского технологического университета. –2014. – №23. – С. 299-304.

8 **Чиркин, В. С.** Теплопроводность промышленных материалов [Текст]. – М. : Изд-во маш. Литры. 1962. –247с.

9 **Просветов, Н. И.** Методы идентификации теплофизических параметров композитных материалов / Н. И. Просветов, В. В. Черновверская, Д. В. Басов. [Текст] // Молодой ученый. – 2023. – № 26 (473). – С. 20-24.

10 **Приходько, Е. В., Кинжибекова, А. К., Арипова, Н. М.** Способ определения теплофизических свойств огнеупорных материалов. Патент на полезную модель № 8261 Республика Казахстан, G01N 3/00, бюл. №28 от 14.07.2023.

11 **Стариков, В. С., Темлянец М. В., Стариков В. В.** Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии [Текст]. – М. : МИСИС, 2003. – 328с.

12 Справочник Конструктора. Осевые моменты инерции, моменты сопротивления и радиусы инерции плоских фигур [Электронный ресурс] – <https://katalim.ru/shamot.htm>.

REFERENCES

1 **Botyan, S. S.** Ocenka ognestojkosti karkasno-obshivnyh peregorodok s ispol'zovaniem teplofizicheskikh karakteristik, poluchennyh eksperimental'no-raschetnym sposobom v kamernoj elektropechi [Evaluation of the fire resistance of frame-sheathing partitions using thermophysical characteristics obtained by experimental calculation in a chamber electric furnace] [Text]. // Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MChS Belarusi. – 2020. – № 2.

2 **Sokolov, A. K.** Metod opredeleniya temperaturoprovodnosti i koefficienta teploprovodnosti po temperaturam poverhnosti plastiny kak poluogranichennogo tela [A method for determining the thermal conductivity and thermal conductivity coefficient from the temperatures of the plate surface as a semi-bounded body] [Text]. // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya Metallurgiya. – 2022. – 65(1). – P.57-65. – <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-57-65>.

3 **Kashcheev, I. D.** Ogneupory : materialy, izdeliya, svoystva i primenenie [Refractories: materials, products, properties and applications] [Text].– Moscow : Teploenergetik, 2003.

4 **Enenko, G. M., Stepanov, E. M., Filimonov, Yu. P.** Promyshlennye pechi [Industrial furnaces] [Text]. – Moscow : Mashinostroenie. 1964. –359 p.

5 **Strelov, K. K., Kashcheev, I. D., Mamykin, P. S.** Tekhnologiya ogneuporov [Refractory technology] [Text] – Moscow : Metallurgiya. 1988. – 528p.

6 **Prihod'ko, E. V.** Analysis of methods for heating the lining of high-temperature units. Refractories and Industrial Ceramics. Vol. 62, No. 4, Pp. 463-466. November, 2021. [10.1007/s11148-021-00625-1](https://doi.org/10.1007/s11148-021-00625-1).

7 **Gusejnov, G. G.** Ustrojstvo dlya izmereniya teploprovodnosti [Device for measuring thermal conductivity] [Text]. // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. –2014. –№23. – P. 299–304.

8 **Chirkin, V. S.** Teploprovodnost' promyshlennykh materialov [Thermal conductivity of industrial materials]. – М.: Izd-vo mash. Litry. –1962. –247p.

9 **Prosvetov, N. I.** Metody identifikatsii teplofizicheskikh parametrov kompozitnykh materialov [Methods of identification of thermophysical parameters of composite materials] [Text] / N. I. Prosvetov, V. V. Chernoverskaya, D. V. Basov. Molodoj uchenyj. – 2023. – № 26 (473). – P. 20-24.

10 **Prihod'ko, E. V., Kinzhibekova, A. K., Aripova, N. M.** Sposob opredeleniya teplofizicheskikh svoystv ognepurnykh materialov [A method for determining the thermophysical properties of refractory materials]. Patent na poleznuyu model' № 8261 Respublika Kazahstan, G01N 3/00, byul. №28 ot 14.07.2023.

11 **Starikov, V. S., Temlyancev, M. V., Starikov, V. V.** Ogneupory i futerovki v kovshevoj metallurgii [Refractories and linings in bucket metallurgy] [Text]. – Moscow : MISIS. 2003. – 328p.

12 Spravochnik Konstruktora. Osevy`e momenty` inercii, momenty` soprotivleniya i radiusy` inercii ploskix figur [Designer's Handbook. Axial moments of inertia, moments of resistance and radii of inertia of plane figures] [Electronic resource] <https://katalim.ru/shamot.htm>.

Поступило в редакцию 25.01.24.

Поступило с исправлениями 06.02.24.

Принято в печать 01.03.24.

*Е. В. Приходько, А. С. Никифоров, Н. М. Арипова,
А. К. Кинжибекова, *А. Е. Карманов*

Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

25.01.24 ж. баспаға түсті.

06.02.24 ж. түзетулерімен түсті.

01.03.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТЕМПЕРАТУРАНЫҢ ӨЗГЕРУІНІҢ ОТҚА ТӨЗІМДІ ЗАТТАРДЫҢ ЖЫЛУ-ФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Бұл мақалада температура мен пайдалану жағдайларына байланысты отқа төзімді материалдардың жылу-физикалық коэффициенттерін анықтау әдістеріне талдау жасалды. Талдау көрсеткендей, жылу өткізгіштік коэффициентін анықтауға арналған әдістер мен құрылыстардың едәуір санына қарамастан, отқа төзімділікті қарастырылып отырған түрі үшін деректерді алу тек зертханалық жолмен мүмкін болады.

Авторлар жоғары температурада отқа төзімді материалдың қысу беріктігі мен жылу өткізгіштік коэффициентін бір уақытта анықтауға мүмкіндік беретін отқа төзімді материалдардың жылу-физикалық қасиеттерін анықтауға арналған стенд әзірледі және жасады.

Әзірленген әдіс аясында ферроқорытпа өндірісінде құю шелектерін төсеуде қолданылатын отқа төзімді материал үлгілері үшін жылу өткізгіштік коэффициенттері есептелді, атап айтқанда – ШКУ-32 материалы. Температураның жоғарылауы жылу өткізгіштік коэффициентінің жоғарылауымен бірге жүреді, ал температура 100-ден 1200 °С-қа дейін көтерілгенде оның мәні 16 %-ға артады. Отқа төзімді шамот ШКУ-32 жылу сыйымдылығының температураға тәуелділігін талдау үшін анықтамалық мәліметтер қолданылды.

Жүргізілген зерттеулер шамот ШКУ-32 үшін температураның жоғарылауымен жылу өткізгіштік коэффициенті мен жылу сыйымдылығының өзгеруінің орташа жылдамдығы 4 % - дан аспайтын айтарлықтай ерекшеленбейтінін

көрсетеді. Осыған сүйене отырып, жылу есептеулерінде температура өткізгіштік коэффициентін қолданған кезде температураның әсерін ескерудің қажеті жоқ деп қорытынды жасауға болады. Жылу өткізгіштік коэффициентінің артуы отқа төзімді материалдың жылу сыйымдылығының осуімен өтеледі.

Кілтті сөздер: жылу өткізгіштік коэффициенті, жылу сыйымдылығы, жоғары температуралық қондырғылар, температура өткізгіштік коэффициенті, төсеу, температураға тәуелділік.

E. V. Prikhodko, A. S. Nikiforov, N. M. Aripova, A. K. Kinzhibekova,

**A. E. Karmanov*

Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 25.01.24

Received in revised form 06.02.24.

Accepted for publication 01.03.24.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE CHANGES ON THE THERMAL-PHYSICAL PROPERTIES OF REFRACTORIES

This article analyzes the methods for determining the thermophysical coefficients of refractory materials depending on temperature and operating conditions. The analysis shows that despite a significant number of methods and devices for determining the coefficient of thermal conductivity, obtaining data for the type of refractory in question is possible only in the laboratory.

The authors have developed and created a stand for determining the thermophysical properties of refractory materials, which allows simultaneously determining the compressive strength and thermal conductivity coefficient of a refractory material at elevated temperatures.

Within the framework of the developed method, thermal conductivity coefficients were calculated for samples of refractory material used in lining ladles in the production of ferroalloys, namely – the SHKU-32 material. An increase in temperature is accompanied by an increase in

the thermal conductivity coefficient, and with an increase in temperature from 100 to 1200 °C, its value increases by 16 %. To analyze the dependence of the heat capacity of the fireclay refractory SHKU-32 on temperature, reference data were used.

The conducted studies show that the average rates of change in the coefficient of thermal conductivity and heat capacity with increasing temperature for SHKU-32 chamotte do not differ much, not exceeding 4 %. Based on this, it can be concluded that when using the coefficient of thermal conductivity in thermal engineering calculations, there is no need to take into account the influence of temperature. The increase in the thermal conductivity coefficient is compensated by an increase in the heat capacity of the refractory material.

Keywords: thermal conductivity coefficient, heat capacity, high-temperature aggregates, thermal conductivity coefficient, lining, temperature dependence.

Теруге 03.06.2024 ж. жіберілді. Басуға 28.06.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректоры: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Тапсырыс №4248

Сдано в набор 03.06.2024 г. Подписано в печать 28.06.2024 г.

Электронное издание

29.9 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректорлар: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Заказ № 4248

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz