

УДК 620.178:620.22-419.8

В.И. Иванов <sup>(1)</sup>, ст. научный сотрудник

Т.Н. Нестеренко <sup>(1)</sup>, доцент, к.т.н.

В.Ю. Зинченко <sup>(1)</sup>, доцент, к.т.н.

Л.В. Судоплатов <sup>(2)</sup>, зам. зав. лабораторией, к.т.н.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОМОГРАММ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОГНЕУПОРОВ

<sup>(1)</sup> Запорожская государственная инженерная академия,

<sup>(2)</sup> ПАО «ЕВРАЗ-ДМЗ им. Г.И. Петровского», г. Днепропетровск

Запропоновано номограмний метод подання процесів перенесення енергії та маси речовини на головних ділянках виробництва вогнетривів шляхом об'єднання енергетичних (температурних) і масоконцентраційних діаграм зазначених процесів, а також діаграм цільових функцій у єдині комплекси, які синхронно відображають складні процеси перенесення з урахуванням перетворень, що відбуваються у вогнетривких системах. Такі номограми характеризують розвиток реальних технологічних процесів за часом та їх можна застосовувати під час розробки комп'ютерних моделей для управління режимами формування напівфабрикату та його випалення з метою удосконалення технологій виробництва вогнетривів.

Ключові слова: формування та випалення напівфабрикату, перенесення теплоти та маси, енергетичні, температурні й масоконцентраційні діаграми, діаграми цільових функцій, номограми

Предложен номограммный метод представления процессов переноса энергии и массы вещества на основных переделах производства огнеупоров путем объединения энергетических (температурных) и массоконцентрационных диаграмм указанных процессов, а также диаграмм целевых функций, в единые комплексы, синхронно отображающие сложные процессы переноса с учетом превращений, происходящих в огнеупорных системах. Такие номограммы характеризуют развитие реальных технологических процессов во времени и их можно применять при разработке компьютерных моделей для управления режимами формирования полуфабриката и его обжига для совершенствования технологий производства огнеупоров.

Ключевые слова: формирование и обжиг полуфабриката, перенос теплоты и массы, энергетические, температурные и массоконцентрационные диаграммы, диаграммы целевых функций, номограммы

It is offered the nomogram method of the exposition for transfer processes of energy and mass of substance on the basic redistributions of refractory's production by join of energy (temperature) and mass concentration diagrams of the indicated processes and also diagram of objective functions in single complexes, synchronously mapping the difficult transfer processes taking into account transformations, happening in refractory's systems. Such nomograms define development of the real technological processes in a time and can be used by working out computer models for the control of regimes for a half-finished product forming and its burning to perfect technologies of refractory materials production.

Keywords: forming and burning of half-finished product, of energy and mass transfer, temperature- and mass concentration diagrams, diagrams of objective functions,

potograms

*Введение.* Для совершенствования технологии производства огнеупоров необходимо иметь надежные методы прогнозирования конечных результатов на переделах формования полуфабриката и его последующего обжига, в частности распределения концентрации порошкообразной массы по сечению уплотняемого полуфабриката и концентрации компонентов (минералов) по сечению готовой продукции.

Данные методы должны устанавливать зависимости между изменением полей удельного давления по сечению полуфабриката при формовании огнеупоров и полей температуры по сечению полуфабриката при его обжиге, с одной стороны, и изменением полей концентрации по сечению уплотняемого полуфабриката и полей концентрации различных компонентов по сечению полуфабриката при его обжиге, с другой стороны. Такие зависимости могут служить косвенными показателями завершенности вышеуказанных переделов.

*Постановка задачи.* Процессы формования порошкообразной огнеупорной массы и последующего обжига полуфабриката характеризуются наличием действия потоков энергии и массы и их взаимным влиянием, а также возникновением источников и движущихся сил перераспределения энергии и массы минералов. В этой связи аналитическое решение задачи о распределении полей концентрации порошкообразной массы при формовании и обжиге полуфабриката огнеупоров не представляется возможным, и практический интерес представляет применение инженерных методов расчета.

*Основная часть исследований.* С позиции термодинамики необратимых процессов и теории тепло- и массопереноса разработаны физико-аналитические методы, позволяющие описывать закономерности, происходящие при формировании огнеупоров [1-5].

*Процесс формования порошкообразной огнеупорной массы.* В работе [6] на основе анализа движущих сил переноса энергии и массы в уплотняемых порошкообразных системах при обработке их давлением предложена диффузионная модель, которая рассматривает указанный процесс как диффузионный перенос энергии и массы порошка в пространственную область с заданной формой, размерами и конечной (средней по сечению) плотностью полуфабриката.

В связи с тем, что процессы переноса в уплотняемом полуфабрикате являются нестационарными и необратимыми локальные изменения удельного давления ( $P$ ) и плотности ( $\rho$ ) по сечению полуфабриката во времени ( $\tau$ ) описываются дифференциальными уравнениями Умова:

$$\frac{dP}{d\tau} = -\operatorname{div} \vec{J}_p ; \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{d\tau} = -\operatorname{div} \vec{J}_m , \quad (2)$$

где  $\vec{J}_p$ ,  $\vec{J}_m$  – потоки энергии и массы при формовании порошкообразной огнеупорной массы соответственно.

Описание процессов переноса при формовании огнеупорной массы предусматривает изучение полей усредненных значений удельного давления по сечению ( $z$ ) полуфабриката во времени ( $\tau$ ) и последующее определение полей плотности данной

массы в нем  $\rho = \psi(z, \tau)$  при помощи известных эмпирических «уравнений прессования»  $\rho = \varphi(D)$  [7-10] либо путем проведения дополнительных экспериментов.

При выполнении экспериментов прессовое оборудование оснащают механо-электрическими преобразователями давления, индуктивными датчиками линейных перемещений подвижных пуансонов, а также регистрирующими приборами [11].

С целью комплексного и синхронного отображения процессов переноса энергии и массы, происходящих на стадии формирования полуфабриката, энергетическую  $P = \varphi(z, \tau)$  и массоконцентрационную  $\rho = \psi(z, \tau)$  диаграммы объединяют в единую номограммную систему. В качестве примера рассматривали процесс формирования полуфабриката в форме пластины бесконечной длины при граничных условиях второго рода: линейном изменении скорости энергетического потока на поверхности уплотняемой порошковой массы  $C_q = \text{const}$  (рис. 1).

В секторе А номограммы представлена экспериментально-аналитическая зависимость  $\rho = \varphi(D)$ , которая отвечает «уравнению прессования» (рис. 1, кривая 4) для «тонкой» пластины [12]. Для ее построения с достаточной степенью приближения может быть использовано уравнение Верниковского [9].

В секторе В расположена энергетическая диаграмма процесса, при помощи которой исследуют поведение удельного давления на поверхности  $P_i = f_1(\tau)$  и в центре  $P_o = f_2(\tau)$  уплотняемого полуфабриката («массивной пластины»).

С использованием секторов А и В в секторе С номограммы выполняют построение массоконцентрационной диаграммы процесса формирования полуфабриката, описывающей распределение плотности на его поверхности  $\rho_i = \vartheta_1(\tau)$  и в центре  $\rho_o = \vartheta_2(\tau)$ .

В секторах D и E представлены кривые ожидаемого распределения удельного давления и плотности по сечению «массивной пластины» во времени.

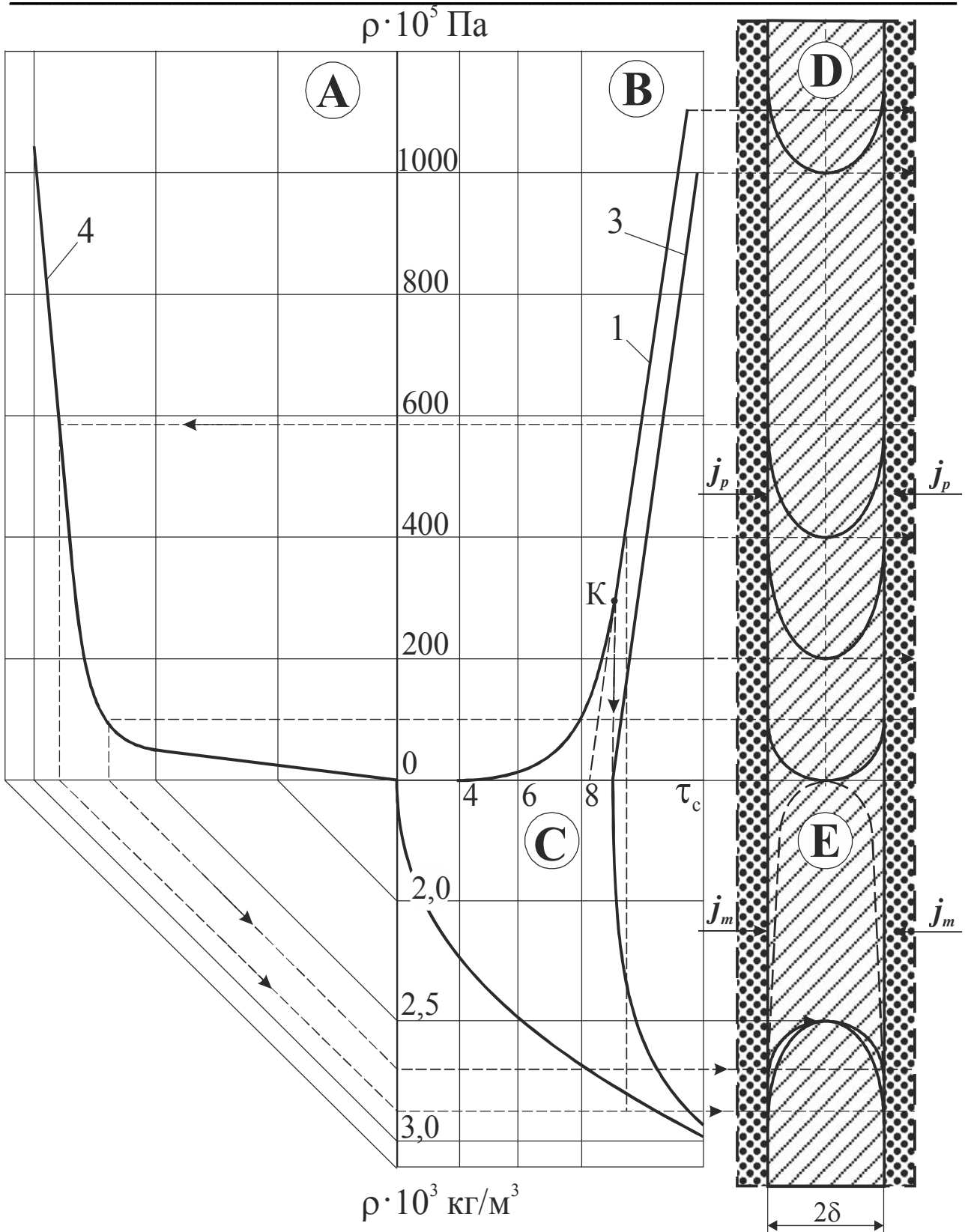
*Процесс обжига полуфабриката.* При обжиге молекулярный перенос огнеупорной массы происходит под действием градиентов химического потенциала  $\Delta\mu$  и температуры  $\Delta T$ . О сложности указанных процессов свидетельствует рассмотрение задачи диффузии  $k$ -го компонента многокомпонентной системы.

В случае стационарного процесса переноса уравнение для диффузионного потока  $k$ -го компонента многокомпонентной системы имеет вид:

$$\vec{J}_k = -D_k \cdot \rho \cdot \left[ \Delta\rho_{k_0} + \frac{K_T}{T} \cdot \Delta T + \frac{K_P}{P} \cdot \Delta P \right], \quad (3)$$

где  $\vec{J}_k$ ,  $D_k$  – диффузный поток и коэффициент диффузии массы  $k$ -го компонента многокомпонентной системы соответственно;  $\Delta\rho_{k_0}$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta P$  – градиенты безразмерной концентрации, температуры и давления соответственно;  $K_T$ ,  $K_P$  – термо- и бародиффузионный коэффициенты соответственно;  $K_1$ ,  $K_2$  – постоянные коэффициенты;  $T$ ,  $P$  – температура и давление процесса переноса соответственно.

Процесс переноса теплоты  $\vec{J}_0$  в  $k$ -ом компоненте многокомпонентной системы описывается уравнением



1 - давление на поверхности полуфабриката;  
 3 - давление в центре полуфабриката

**Рисунок 1** – Энерго-массокоцентрационная номограмма динамики процесса прессования порошкообразной огнеупорной массы

$$\vec{J}_\theta = -\lambda_k \cdot \Delta T - Q \cdot D_k \cdot \rho \cdot \Delta \rho_{k_0} + \sum h_k \cdot \vec{J}_k, \quad (4)$$

где  $Q$  – изотермическая теплота переноса;  $\lambda_k$ ,  $h_k$  – теплопроводность и удельная энтальпия  $k$ -го компонента многокомпонентной системы соответственно.

Для нестационарного процесса переноса теплоты и массы при формировании огнеупоров можно записать систему уравнений:

$$\frac{\partial \rho_{k_0}}{\partial \tau} = -\text{div}(\vec{J}_k) + I_{k_0}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -\text{div}(\vec{J}_\theta) + I_\theta; \quad (6)$$

где  $\partial \rho_{k_0} / \partial \tau$ ,  $\partial \theta / \partial \tau$  – локальные скорости изменения безразмерной концентрации  $k$ -го компонента многокомпонентной системы и концентрации теплоты соответственно;  $I_{k_0}$ ,  $I_\theta$  – движущая сила изменения концентрации массы  $k$ -го компонента многокомпонентной системы за счет химических реакций взаимодействия отдельных компонентов огнеупора и теплоты в локальной области за счет протекания эндо- или экзотермических реакций соответственно;  $\vec{J}_\theta$ ,  $\vec{J}_k$  – потоки теплоты и массы для  $k$ -го компонента многокомпонентной системы соответственно.

В теории нагрева для решения задач производственного характера известна графоаналитическая модель процесса нагрева металла на базе построения его температурных и тепловых диаграмм [13,14]. Диаграммы могут быть разработаны как на основе зависимостей  $T = f(x, y, z, \tau)$ , полученных экспериментальным путем, так и на базе решения дифференциальных уравнений теплопроводности при различных начальных и граничных условиях процесса.

При использовании известной методики [14] и выполнении анализа процесса переноса массы при обжиге  $\rho_k = f(x, y, z, \tau)$ , то есть процесса формирования минералогического состава огнеупоров, можно расширить ее задачи.

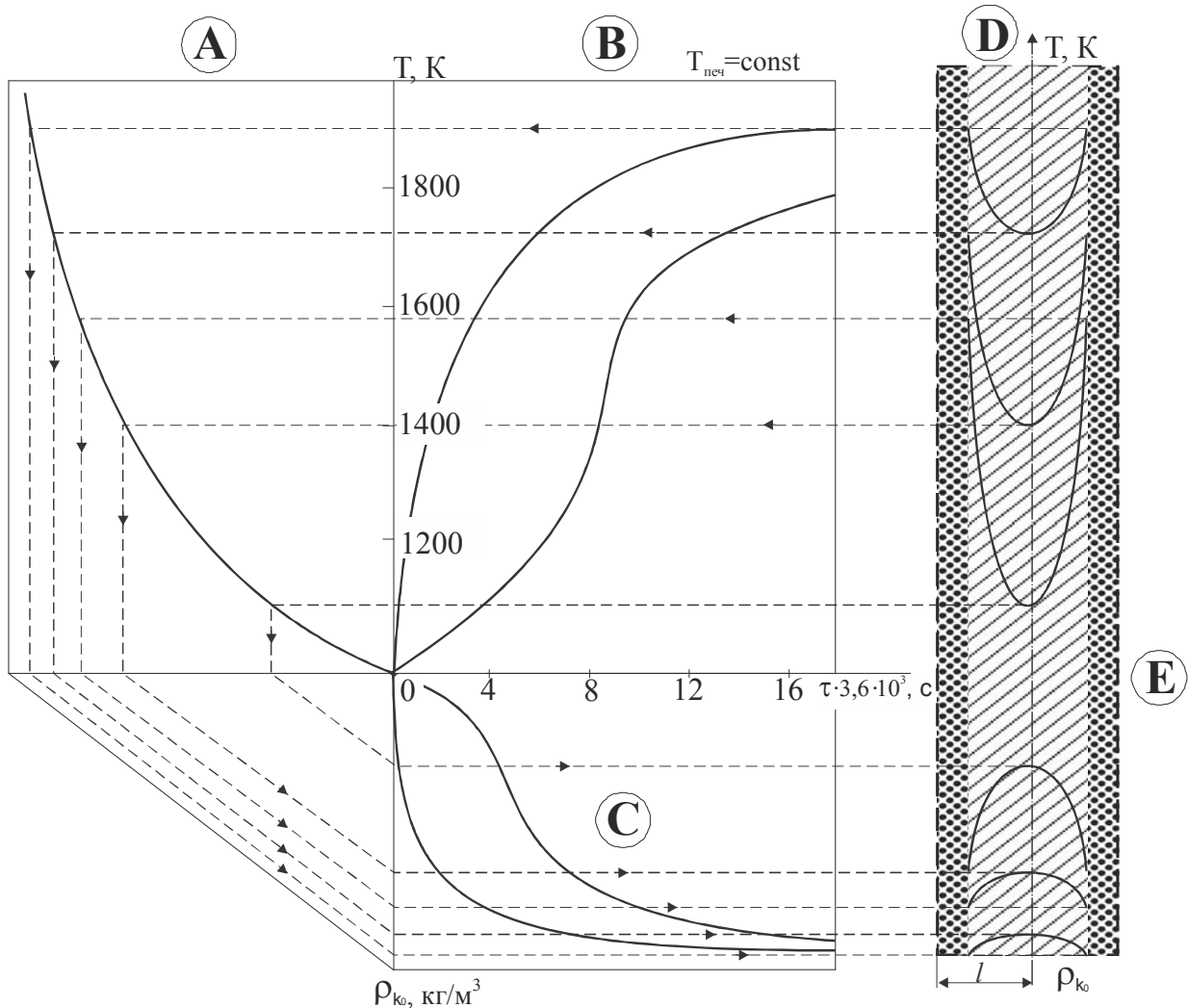
Процессы переноса теплоты и массы при формировании огнеупоров в загрузке на печной вагонетке, моделируемой в виде пластины бесконечной длины, можно представить в виде комплекса температурных массоконцентрационных диаграмм. В качестве примера рассматривали задачу переноса теплоты и массы в процессе формирования «массивной огнеупорной пластины» при граничных условиях третьего рода  $T_{i \dot{a} z} = \text{const}$  (рис. 2).

В секторе А номограммы представлена массоконцентрационная диаграмма  $\rho_{k_0} = f(T)$  образования  $k$ -го минерала многокомпонентной системы, которая служит одной из целевых функций процесса его формирования (например, концентрация муллита, корунда или шпинели). В качестве целевых функций также могут быть представлены любые другие технические параметры огнеупорных изделий в безразмерном виде [15].

В секторе В расположена температурная диаграмма процесса нагрева «массивной огнеупорной пластины» бесконечной длины при симметричном переносе теплоты для режима  $T_{неч} = \text{const}$ . Зависимости вида  $T_n = \varphi_1(\tau)$  и  $T_o = \varphi_2(\tau)$  характеризуют из-

менение температуры на поверхности и оси пластины во времени.

В секторе D номограммы представлено распределение температуры по сечению «массивной пластины»  $T = f(x)$  при вышеуказанных граничных условиях  $T_{печ} = \text{const}$ .



**Рисунок 2** – Энерго-массокоцентрационная номограмма динамики процесса обжига полуфабриката огнеупоров

**Заключение.** С позиции термодинамики необратимых процессов и процессов тепло- и массопереноса предложен подход, основанный на применении номограмм для представления в пространственно-временных координатах процессов, происходящих при формовании порошкообразной огнеупорной массы и последующем обжиге полуфабриката огнеупоров на различных переделах их производства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Де Гроот, С. Неравновесная термодинамика [Текст] / С. Де Грот, П. Мазур : пер. с англ. – М. : Мир, 1964. – 234 с. – Библиогр. : 230-233.
2. Хаазе, Р. Термодинамика необратимых процессов [Текст] / Р. Хаазе : пер. с немец. ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Мир, 1967. – 234 с. – Библиогр. : с. 230-233.
3. Кубо, Р. Термодинамика [Текст] : пер. с англ. ; под ред. Д. Н. Зубарева и Н. М. Плакиды. – М. : Мир, 1970. – 304 с. – Библиография в конце каждого раздела.

4. *Лыков, А. В.* Тепломассообмен [Текст] : справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 560 с. – Библиогр. : с. 554-556.
5. *Дьярмати, И.* Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы [Текст] / И. Дьярмати ; пер. с англ. ; под общ. ред. В. К. Семенченко. – М. : Мир, 1974. – 304 с. – Библиогр. : с. 298-301.
6. *Kharchenko, I. G.* Phenomenological theory of energy and mass transfer for pressure shaping of disperse materials / I. G. Kharchenko // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1975. – Vol. 18. – P. 953-959.
7. *Попильский, Р. Я.* Прессование керамических порошков [Текст] / Р. Я. Попильский, Ф. В. Кондрашев. – М. : Metallurgiya, 1968. – 272 с. – Библиогр. : с. 265-272.
8. *Перельман, В. Е.* Формование порошковых материалов [Текст] / В. Е. Перельман. – М. : Metallurgiya, 1979. – 232 с. – Библиогр. : с. 231-232.
9. Производство огнеупоров полусухим способом [Текст] / А. К. Карклит, А. П. Ларин, С. А. Лосев, В. Е. Верниковский. – 2-е изд. – М. : Metallurgiya, 1981. – 367 с. – Библиогр. : с. 304-308.
10. *Попильский, Р. Я.* Прессование порошковых керамических масс [Текст] / Р. Я. Попильский, Ю. Е. Пивинский. – М. : Metallurgiya, 1983. – 176 с. – Библиогр. : с. 171-175.
11. Некоторые вопросы динамики процесса прессования на гидравлическом прессе П 907 [Текст] / И. Г. Харченко, В. И. Иванов, В. Р. Старун и др. // Огнеупоры. – 1983. – № 12. – С. 34-38.
12. Исследование термодинамики необратимых процессов в дисперсных системах [Текст] / И. Г. Харченко, И. И. Кобеза, В. И. Иванов и др. // Тепломассообмен в дисперсных системах : материалы III междунар. форума. 20-24.05.1996 г. – Минск : ИТМО НАН РБ, 1996. – Т. V. – С. 208-214.
13. *Семикин, И. Д.* Теоретические основы расчета нагревательных печей и колодцев [Текст] / И. Д. Семикин // Сталь. – 1937. – № 12. – С. 29-42.
14. *Гольдфарб, Э. М.* Теплотехника металлургических процессов [Текст] / Э. М. Гольдфарб. – М. : Metallurgiya, 1967. – 239 с. – Библиогр. : с. 236-238.
15. *Иванов, В. І.* Графоаналітика перенесення теплоти та маси під час випалення вогнетривів [Текст] / В. І. Иванов, Т. М. Нестеренко, В. Ю. Зінченко // Эффективные инструменты современных наук-2014 : материалы XIX междунар. науч.-практ. конф. 27.04-05.05.2014 г. – Днепропетровск : Наука и образование, 2014. – Т. 32. – С. 48-50.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2014 р.  
Рецензент, проф. В.М. Голубцов

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>