УДК 669.041. 454:563.33

А.А. Ансимов, Э.Э. Меркер, Д.А. Харламов, А.И. Кочетов, В.О. Казарцев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ФАКЕЛА И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ОБЖИГА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

В статье рассмотрены условия влияния длины и температуры факела и других параметров на его теплоотдачу над поверхностью обжигаемого материала в рабочей зоне вращающейся печи для производства извести. Разработана модель и алгоритм расчета теплотехнических характеристик процесса обжига известняка во вращающейся печи и установлены оптимальные условия обжига известняка с целью получения требуемых показателей качества извести.

Вращающаяся печь, газовая горелка, топливный факел, зона обжига.

The conditions of influence of the length and temperature of the torch and other parameters on the heat transfer on the surface of the material in the working area of the revolver for the production of lime are considered in the article. We developed the model and the algorithm of calculation of heat engineering characteristics of the process of lime burning in the revolver and defined the optimum conditions of limestone burning to obtain the required quality of lime.

Revolver, gas burner, fuel torch, zone of roasting.

Прикладные вопросы теории горения [6], [9] связаны с определением пространства, необходимого для завершения процесса факельного сжигания топлива в печи [3]. Для этого важно знать длину факела ($L_ф$, м), определяющую полноту сгорания топлива [8], размеры технологической зоны обжига материала в печи и интенсивность теплоотдачи [2] в системе «факел – футеровка – обжигаемый материал (известняк)».

Диффузионный факел образуется при раздельной подаче природного газа в печь через горелку и нагретого воздуха из холодильника [7] агрегата так, что горение зависит от условий [1] их смешения, давления подачи газа и коэффициента расхода воздуха [6], [8]. Исследование процессов диффузионного горения и теплоотдачи факела [1], [3] осуществляли методами математического моделирования [2], [9] на основе модели, состоящей из систем уравнений переноса вещества, количества движения и энергии, что позволяет программе, реализующей на ЭВМ математическую модель тепловой работы [1], [2] вращающейся обжиговой печи, осуществлять постановку численного эксперимента [9] и достаточно полно учитывать реальные условия при решении [7], [8] инженерных задач.

В данной работе использовали математическую модель [2], [9] тепловой работы вращающейся печи обжига известняка для расчета параметров топливного факела [3] без учета теплообмена с футеровкой печи с оценкой радиационной теплоотдачи в зону обжига известняка [7]. Согласно экспериментальным данным [1], [8], длина факела газовой горелки главным образом зависит от выходного диаметра ($d_г$, м) горелки, внутреннего диаметра печи ($D_{в.п.}$, м), действительного расхода воздуха на горение ($V^д_в$, кг/с), расхода топлива на горение ($B_г$, м^3/с) и других факторов:

$$L_Ф = \begin{cases} \varphi_ф \cdot D_{в.п} \cdot \left[\left(\frac{d_{г.}}{D_{в.п.}} \right) \cdot \left(\frac{V^д_в}{B_Г} \right) \right]^{1,5} \\ \text{при} \quad V^д_в = V_{в.в} - \Delta V_{в(асп)} + \Delta V_{в(подс)} \end{cases}, \quad (1)$$

где $\varphi_ф$ – коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем; $V_{в.в}$, $\Delta V_{в(асп)}$, $\Delta V_{в(подс)}$ – расход вентиляторного воздуха, потери воздуха в системе аспирации и подсоса воздуха в головке печи, м^3/с;

$$D_{в.п} = D_к - 2(d_ф + \delta_{г.с}),$$

где $D_к$ – диаметр корпуса печи, м; $d_ф$ и $\delta_{г.с}$ – толщина футеровки и гарнисажного слоя (обмазки) печи, м.

Длина факела ($L_ф$, м) определяет размеры зоны обжига известняка в печи [7], [9], локальную теплонапряженность [2], [6] футеровки и условия образования обмазки на ней, что фиксируется, например, температурой корпуса агрегата (рис. 1), измеряемой тепловизором или оптическим пирометром.

Из анализа приведенных данных (рис. 1) характерным является заметное снижение температуры корпуса ($t_к$, °С) до 18÷25 м расстояния от торца горелки, что вызвано непосредственным влиянием теплового излучения факела. Полагая, что точка падения температуры (рис. 1, точка 3) есть конечная длина факела, определяли значение $\varphi_{ф.}= f(D_{в.п}, B_г, V^д_в)$ в виде корреляционной зависимости:

$$\varphi_ф = 34,6 - 9,69 \cdot D_{в.п} - 0,0022 \cdot B_Г + 0,033 \cdot V^д_в, \quad R^2 = 0,95. \quad (2)$$

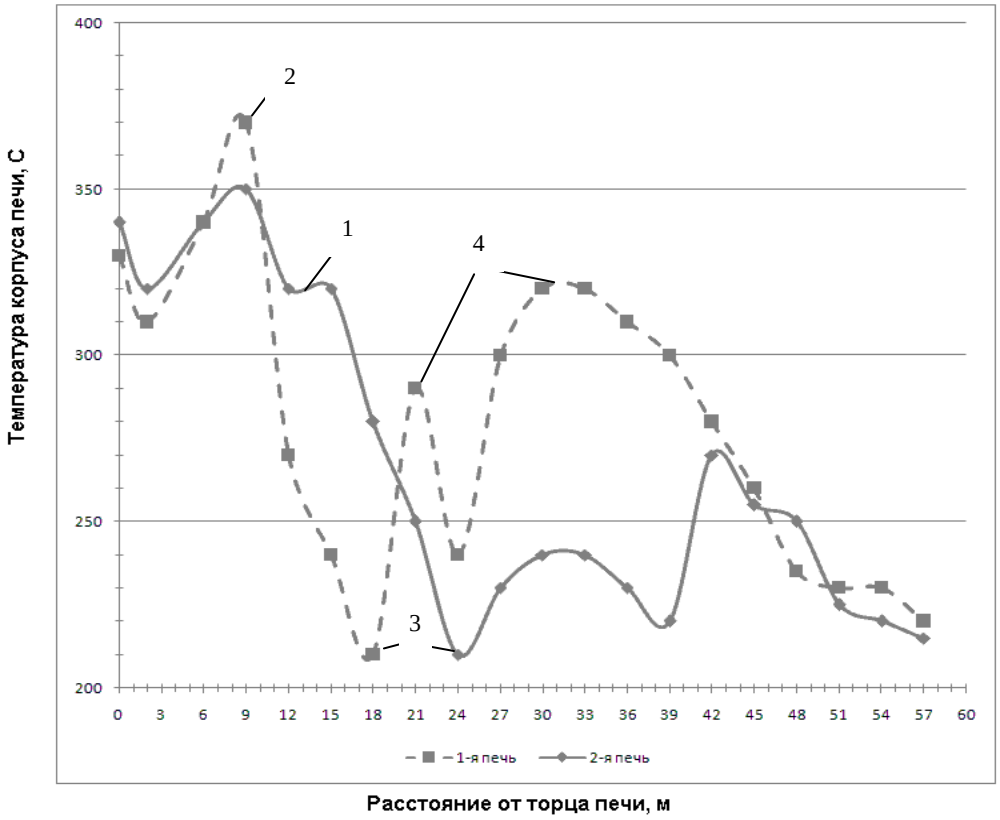


Рис. 1. Характер изменения температуры корпуса печи в условиях ЦОИ ОАО «ОЭМК» (кривая 1 – для стабильно работающей печи после ремонта; 2 – кривая изменения температуры печи с изношенной футеровкой до ремонта; 3 – низшие точки температуры корпуса печи, указывающие на окончание факела; 4 – точки, указывающие на износ и сколы в футеровке печей)

Таким образом, осуществляя периодическое температурное сканирование корпуса печи (рис. 1) находим фактическую длину факела и по данным параметрам, приведенным в выражении (1), производим периодическую корректировку величины $\varphi_ф$ для фиксирования текущей $L_ф$ и длины зоны обжига в печи.

При обеспечении оптимальных характеристик факела (длины, температуры, теплоотдачи и др.) с учетом соблюдения требуемой температуры обжигаемого материала в зоне обжига печи ($T_{о.м.}$, °С) устраняется локальный перегрев (износ) футеровки печи, достигается максимальная светимость факела ($\varepsilon_ф \rightarrow 1$) и равномерный нагрев известняка [7], [8], повышается производительность агрегата [6], [9], снижается удельный расход тепла [1], [2] и улучшаются показатели качества извести [4], [5].

Для определения температуры поверхности обжигаемого материала ($T_{о.м.}$, °С) под факелом печи использовали выражения, позволяющие найти среднюю действительную (эффективную) температуру ($T_{ф.}$, °С) газового потока, контактирующего с поверхностью движущегося слоя известняка в зоне обжига:

$$T_{эф} = \left(\left(\eta_{КПД} \cdot T_{К.Ф}^2 + T_М^2\right) \cdot \left(T_{ух}^2 - T_М^2\right)\right)^{0,25}, \quad (3)$$

где $\eta_{КПД}$ – тепловой коэффициент полезного действия печи; $T_{ух}$ – температура уходящих газов; $T_м$ – температура извести на выходе из печи; калориметрическая температура ($T_{к.ф}$, °С) горения топлива в факеле при этом равна: $T_{к.ф} = \left(Q_т + q_ф^в\right) / \left(V_{с.г} \cdot C_0^t\right)$, где $V_{с.г}$ – количество сухих продуктов сгорания, определяется расчетом горения [6], [9], C_0^t – средняя теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м^3·К); $q_ф^в = V_{в.в} \cdot t_в \cdot C_в^t$, где $q_ф^в$ – тепло воздуха, идущего на горение; $t_в$ – температура воздуха °С; $C_в^t$ – теплоемкость нагретого воздуха, кДж/(м^3·К).

При установившихся условиях тепловой работы вращающейся печи [2], [7] в зоне контакта газообразной среды факела с поверхностью материала (известняка) с большой вероятностью можно принять, что значение температур $T_{о.м}$ и $T_{эф}$ примерно равны. Вследствие этого представляется возможным, задавшись требуемой температурой ($T_{о.м} \le T_{эф}$), определение текущего результирующего теплового потока [9] в печи по выражению:

$$Q_ф = Q_т + \varepsilon_{пр} \cdot \sigma \cdot \left(\frac{\varepsilon_ф \left(T_{к.ф} + 273\right)^4}{a_ф} - \left(T_{о.м} + 273\right)^4 \right) \cdot \frac{F_{у.ф}}{1000}, \quad (4)$$

где $Q_т$ – низшая теплота сгорания топлива кДж/кг; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м^2·К^4); $F_{у.ф} = 2\pi \cdot R_ф \cdot d_г$ – расчетная поверхность

участка факела, м^2; $R_ф$ – радиус турбулентной струи, м; $ε_ф$ – степень черноты факела.

Поглощательная способность ($a_ф$) факела и приведенная степень черноты ($ε_{пр}$) равны:

$$a_ф = 1 - e^{-K_г \cdot δ_{i.c}}, \quad (5)$$

$$ε_{пр} = \frac{1}{\left(\frac{1}{a_ф} + \frac{1}{ε_{ст}} - 1\right)} \cdot \frac{F_{у.ф}}{F_п}, \quad (6)$$

где $K_г$ – коэффициент поглощения при температуре стенки, 1/м; $δ_{i.c.} = 1{,}8 \cdot R_ф$ – эффективная толщина излучающего слоя, м; $ε_{ст}$ – степень черноты внутренней поверхности стенки печи с поверхностью $F_п$, м^2.

С учетом вышеизложенного и приведенных выражений (4) – (6) алгоритм расчета величины $Q_ф$ в обобщенном виде имеет вид:

$$Q_ф = \begin{cases} Q_т + ε_{пр} \cdot σ \cdot \left(\dfrac{ε_ф \left(T_{К.Ф} + 273\right)^4}{a_ф} - \left(T_{о.м.} + 273\right)^4 \right) \cdot \dfrac{F_{у.ф}}{1000}; \\ a_ф = 1 - e^{-K_г \cdot δ_{i.c}}; \quad ε_{пр} = \dfrac{1}{\left(\dfrac{1}{a_ф} + \dfrac{1}{ε_{ст}} - 1\right)} \cdot \dfrac{F_{у.ф}}{F_п}; \\ T_{к.ф} = \left(Q_т + q_ф^в\right) / \left(V_{сг} C_0^t\right); \quad q_ф^в = V_{в.в} \cdot t_в \cdot C_в^t. \end{cases} \quad (7)$$

Результаты расчетов по установлению характера влияния различных теплотехнических факторов работы вращающихся печей в условиях ЦОИ ОАО «ОЭМК» на результирующий тепловой поток приведены на рис. 2. Из этих данных следует, что существенное влияние на теплоотдачу факела [7], [8], [9] оказывают коэффициент расхода воздуха ($α_в$), температура нагрева воздуха ($T_в$, °С), степень черноты стенки ($ε_{ст}$) и $Q_т$ – низшая теплота сгорания и другие факторы. Более существенно на $Q_ф$ влияют $T_в$ (рис. 2, д) и $ε_{ст}$ (рис. 2, а), а толщина футеровки при этом (рис. 2, в) влияет незначительно.

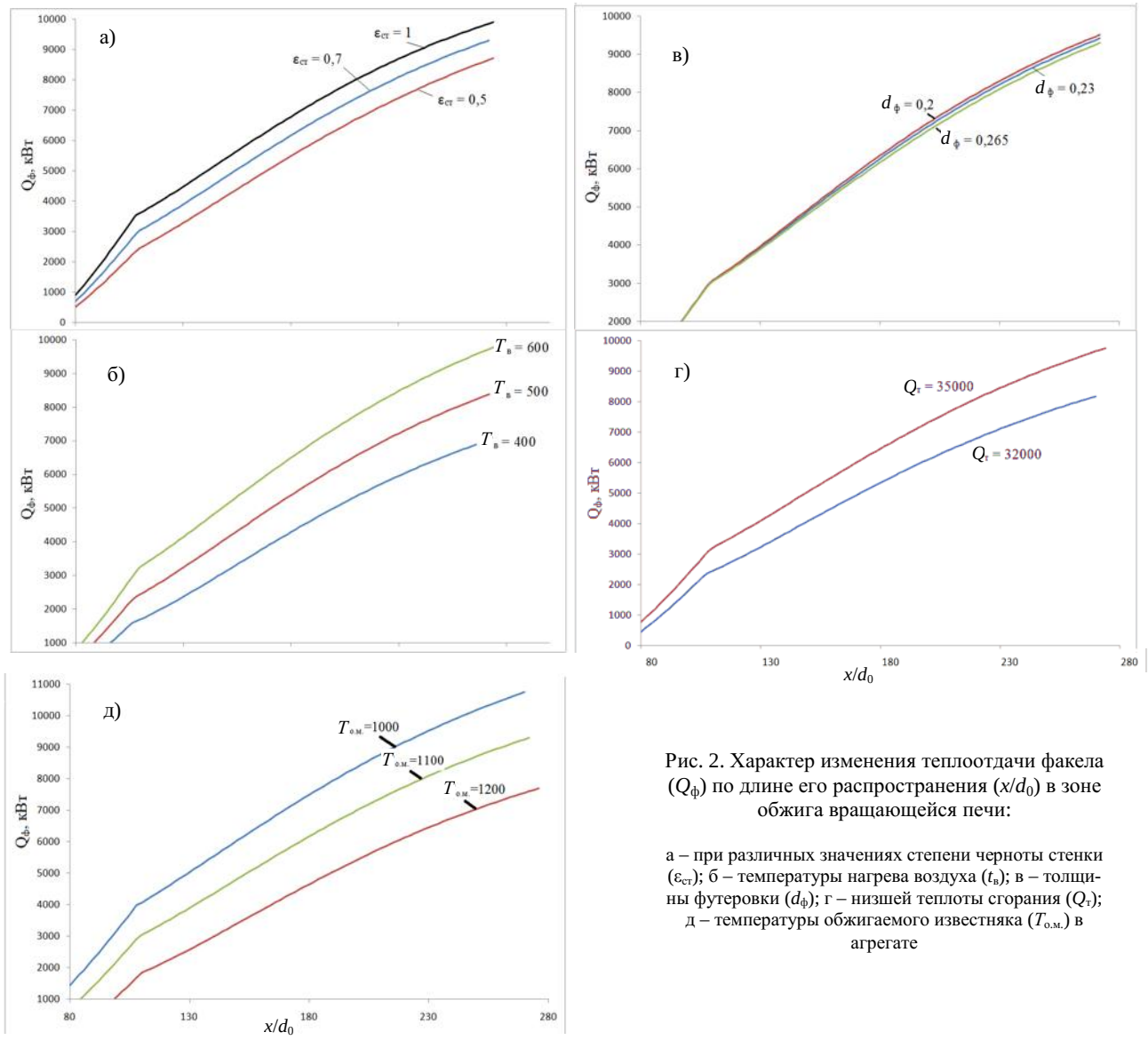


Рис. 2. Характер изменения теплоотдачи факела ($Q_ф$) по длине его распространения (x/d_0) в зоне обжига вращающейся печи:

а – при различных значениях степени черноты стенки ($ε_{ст}$); б – температуры нагрева воздуха ($t_в$); в – толщины футеровки ($d_ф$); г – низшей теплоты сгорания ($Q_т$); д – температуры обжигаемого известняка ($T_{о.м.}$) в агрегате

При установившемся тепловом режиме работы печи [5], [7], задаваясь оптимальной температурой обжигаемого материала (1100 °С < $T_{о.м.}$< 1200 °С), которая обеспечивает хорошие показатели [1], [4] качества извести (CaO ≧ 92÷94% и др.) при требуемых значениях длины факела (1) (рис. 1) и его температуры, не влияющей на перегрев футеровки [3], [9], производится расчет (рис. 3) величины $Q_ф$ (4) с корректировкой этого параметра по алгоритму программы путем изменения значений расхода топлива ($B_т$), коэффициента расхода воздуха ($\alpha_в \approx 1{,}0$) и температуры его нагрева ($T_в \rightarrow \max$), а также изменением (1) скоростных и излучательных (5 и 6) характеристик факела с учетом показателей (рис. 1) других теплотехнологических параметров работы печи.

Таким образом, методом математического моделирования параметров факела и теплообмена установлены факторы, влияющие на результирующий тепловой поток в зону обжига известняка в печи. Разработана методика расчета усредненной температуры обжигаемого материала в агрегате, что позволяет оптимизировать режим обжига под факелом и улучшить технологические показатели работы во вращающейся печи. Предложен алгоритм расчета эффективной температуры в зоне контакта поверхностей известняка и факела, что позволяет оптимизировать теплообмен в агрегате с обеспечением требуемых показателей качества извести.

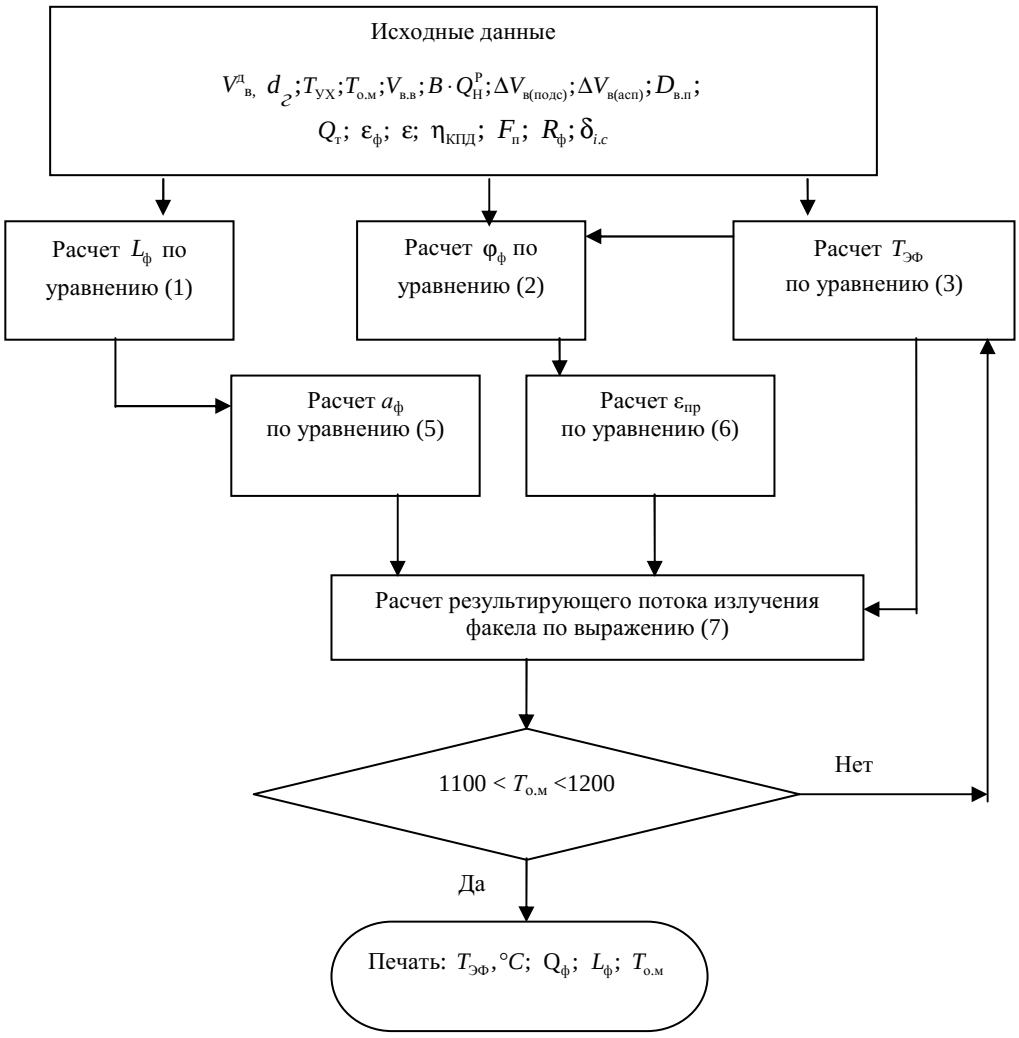


Рис. 3. Структура блок-схемы алгоритма расчета результирующего теплового потока факела в зону технологического обжига известняка во вращающейся печи

Литература

1. *Агаркова, Т.В.* Исследование аэродинамики диффузионного коксиального факела / Т.В. Агаркова, Э.Э. Меркер, А.С. Тимофеева // Известия вузов «Черная металлургия». – 2000. – № 1. – С. 44 – 47.

2. *Арутюнов, В.А.* Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М., 1990.

3. *Вулис, Л.А.* Аэродинамика факела / Л.А. Вулис, Л.П. Ярин. – Л., 1978.

4. *Дидковский, В.К.* Снижение расхода топлива при производстве извести во вращающихся печах / В.К. Дид-

ковский, В.И. Зуев, Н.И. Роговцев // Сталь. – 1983. – № 10. – С. 85 – 87.

5. *Ивановский, В.И.* Эффективность работы обжиговых печей при производстве извести / [В.И. Ивановский и др.] // Сталь. –1986. – № 8. – С. 37 – 38.

6. *Лисиенко, В.Г.* Усовершенствование методов сжигания газа / В.Г. Лисиенко, Б.Н. Китаев, Н.И. Кокарев. – М., 1978.

7. *Меркер, Э.Э.* Повышение эффективности сжигания топлива во вращающихся печах обжига извести / [Э.Э. Меркер и др.] // Бюллетень НТИ «Черная металлургия». – 1995. – № 5. – С. 28 – 30.

8. *Меркер, Э.Э.* Совершенствование методики контроля параметров режима сжигания топлива во вращающихся обжиговых печах / Э.Э. Меркер, Д.А. Харламов, А.А. Ансимов // ОАО «Черметинформация». Бюл. «Черная металлургия». – 2011. – № 7. – С. 78 – 81.

9. *Трубаев, П.А.* Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах / П.А. Трубаев, В.А. Кузнецов, П.В. Беседин. – Белгород, 2008.

УДК 691.327.123/.125

А.Г. Гатылюк, В.С. Грызлов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ШЛАКОБЕТОНА НА ОТХОДАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Природное сырье, применяемое в строительстве, относится к категории невозобновляемых ресурсов, и его добыча сопровождается нанесением невосполнимого ущерба окружающей среде. Это обусловливает актуальность поиска и принятия альтернативных решений, связанных с возможностью использования техногенных отходов взамен природного сырья. Предлагается использование отходов металлургической промышленности в качестве заполнителей и замены части цемента в мелкозернистых шлакобетонах. Для этого были применены гранулированный доменный шлак и отсев доменного щебня ОАО «Северсталь».

Мелкозернистый шлакобетон, доменные шлаки, математическое планирование эксперимента, оптимальный состав.

Natural raw material, used in construction, belongs to the category of non-renewable resources; its production is harmful to the environment. It causes the relevance of search and making alternative solutions, connected with the possibility of using anthropogenic waste instead of natural raw material. The use of waste of metallurgical industry as aggregates and replacement of one part of cement in the fine-grained slag stone is proposed in the paper. As a result, granulated blast-furnace slag and screening of broken stone were used for this purpose at JSC «Severstal».

Fine-grained slag stone, blast-furnace slag, mathematical planning of the experiment, optimum composition.

В районах с развитой металлургической промышленностью для изготовления бетонов экономически выгодно использовать доменные шлаки – быстроохлажденные (гранулированные) и медленноохлажденные (отвальные, слитые в траншеи). Успешное развитие научных исследований в области бетона и железобетона позволяет решать проблему рационального применения шлаков с точки зрения не только их максимальной утилизации, но и создания материалов с заранее заданными свойствами, при изготовлении которых в полной мере используются специфические свойства шлаков.

Мелкозернистый бетон наряду с тяжелым бетоном широко используется в строительном производстве и строительной практике для изготовления сборных и монолитных конструкций разного назначения. Благоприятными условиями для его применения являются: повсеместное наличие природных песков, возможность использования техногенных отходов (зол, шлаков, отсевов от дробления горных пород, хвостов флотации и обогащения полезных ископаемых); доступность транспортирования бетонной смеси по трубопроводам на большую высоту, что очень важно для высотного монолитного строительства; высокая однородность свойств, экологичность, повышенная трещиностойкость [2].

Мелкозернистый шлакобетон обладает рядом достоинств по сравнению с обычным песчаным бетоном: повышенной прочностью, пониженными усадкой и ползучестью, высокой морозостойкостью, водонепроницаемостью, коррозионной стойкостью в агрессивных средах, сопротивлением истиранию и термической стойкостью при нагревании до 700 ºС.

Мелкозернистые шлакобетоны позволяют создавать различные эффективные конструкции, в частности, – тонкостенные и армоцементные: большепролетные покрытия зданий, балконные плиты, резервуары, облицовку каналов, панели-скорлупы, напорные трубы, лотки, плиты для покрытия дорог и тротуаров, бортовые камни и т.д.

На сегодняшний день, когда цена цемента постоянно растет, повышаясь на 20 – 30 % ежегодно, а объемы строительства в стране увеличиваются, экономия цементного вяжущего вновь становится актуальной, как и прежде.

Одним из самых эффективных материалов в час-