

УДК 51-74:669.162-669.181.4

И.Г. Тригуб, С.С. Федоров, С.Н. Форись, В.И. Головко
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ
ИЗВЕСТНЯКА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ШАХТНОЙ ПЕЧИ**

Аннотация. Рассматривается взаимосвязь тепло-технологических параметров работы шахтной известково-обжигательной печи на основе математической модели, учитывающей тепло-массообменные процессы в объеме печи, и каркасной модели засыпи материалов в шахте. Предложено определение показателей обжига известняка в зависимости от изменения конфигурации поверхности засыпи (высоты и углов откоса). Показана возможность использования моделей для определения оптимального уровня загрузки шахты и конфигурации верха печи с целью совершенствования режимов загрузки.

Ключевые слова: шахтные печи, конфигурация поверхности, процесс обжига, математическая модель печи, взаимосвязь тепло-технологических параметров

Постановка проблемы

Исследованию тепловой работы шахтных известково-обжигательных печей посвящено множество фундаментальных работ [1-3]. Каждое из физических явлений, протекающих в печном агрегате, а именно движение газов в плотном слое, конвективный и диффузионный перенос тепла, горение топлива, процессы внешнего и внутреннего теплообмена, достаточно хорошо изучено. Вместе с тем важным с точки зрения управления технологическим процессом является комплексное представление о работе шахтных печей, учитывающее взаимодействие вышеуказанных явлений [4], а также влияние конфигурации поверхности в печи (высоты и углов откоса засыпи материалов) на характер протекания процессов обжига.

Задача повышения качества готовой извести, а также реализация энергоэффективных режимов работы шахтных печей на газообразном топливе, при наличии в шахте свободного незаполненного материалом печного пространства, может быть решена путем своевременной обоснованной работы АСУ загрузки-выгрузки. В этом смысле интересен и актуален системный подход, основанный на комплексном математическом моделировании

© Тригуб И.Г., Федоров С.С., Форись С.Н., Головко В.И., 2010

шахтных печей с учетом известных особенностей теплообмена и газодинамики [5], а также информации о высоте и форме засыпи загружаемых в печь кусковых материалов [6].

Анализ публикаций по теме исследования

Многочисленные работы в области механики движения материала и газов в шахтных печах [1-2], известные математические модели обжига [4-5, 7-8], созданные на основе закономерностей кинетики диссоциации известняка и рассматривающие теплообменные процессы, протекающие внутри столба обжигаемого материала, направлены на изучение теплофизических процессов с целью прогнозирования показателей обжига и разработку рациональных режимов работы печных агрегатов. Вместе с тем недостаточно изучен вопрос влияния высоты и формы поверхности засыпи материалов в шахте на показатели обжига.

Для исследования влияния конфигурации поверхности засыпи на процессы, протекающие в шахте печи и, как следствие на качество производимой извести были использованы математическая модель печи, отапливаемой газообразным топливом [4], и каркасная модель засыпи материалов в шахтной известково-обжигательной печи [6] применительно к условиям ОАО «ДМЗ им. Петровского».

В модели [4] рассмотрен и совместно решен ряд отдельных сопряженных задач: движение газов в плотном слое, конвективный и диффузионный перенос вещества, горение топлива, внешний и внутренний теплообмен. Учтены подводы газов в горелки и основание печи, а также потери через изоляцию. Принятым в модели допущением являлась работа печи в установившемся режиме, а именно постоянство во времени параметров газов и материала в каждой точке печного пространства. Система дифференциальных уравнений, описывающих работу печи, решена интегро-интерполяционным методом.

В модели [6] рассмотрен процесс формирования поверхности засыпи по мере загрузки с учетом особенностей геометрии рабочего пространства печи и траекторий падения материала в шахту, определены форма и углы откоса образующейся поверхности засыпи на различной высоте.

Формулирование целей статьи

Целью данной работы явилось: определение взаимосвязи тепло-технологических параметров работы шахтной печи на основе анализа ее тепловой работы с учетом конфигурации поверхности засыпи (высоты и углов откоса кусковых материалов); проведение адаптации используемой математической модели к экспериментальным данным.

Основная часть

Одним из основных факторов, повлиявших на выбор математической модели [4] для анализа тепловой работы шахтной печи, явилась реализация в ней последовательной проверки достоверности математического описания протекающих в печи теплофизических процессов. Так, адаптация газодинамики плотного слоя и анализ результатов исследований показали хорошее совпадение расчетных данных при шаге по высоте печи Δh и радиусу $\Delta r \leq 0,25$ м. Также показано [4], что модель адекватно описывает процессы диффузионного переноса вещества: расхождение расчетных значений концентраций с аналитическим решением не превышает 10%. Хорошо согласуются между собой результаты численного и аналитического решений задачи внешнего теплообмена. При шаге по высоте $\Delta h \leq 0,25$ м отклонение численного результата не превышает 3%. В ходе тестирования математической модели нагрева и термического разложения куска известняка [4] были определены интервалы допустимого изменения шага по времени $\Delta \tau \leq 120$ с и по радиусу куска $\Delta r_k \leq 0,01$ м, в пределах которых достигается максимальная точность.

Адаптация математической модели тепловой работы шахтной печи [4] к условиям участка обжига известняка ОАО «ДМЗ им. Петровского» выполнена с учетом задания параметров неровной конусообразной поверхности засыпи материалов – углов откоса и высоты столба шихты [6].

Схема шахтной известково-обжигательной печи применительно к ОАО «ДМЗ им. Петровского» с необходимыми условными обозначениями приведена на рис. 1.

Система уравнений, описывающих работу шахтной известково-обжигательной печи, приведена в работе [4] и включает следующие сопряженные задачи:

- движение газа в слое,

- перенос вещества и горение топлива в слое,
- внешний теплообмен в слое,
- внутренний тепломассобмен в куске материала.

В качестве критерия сходимости и завершенности последовательных вычислений конечно-разностных уравнений при решении каждой из сопряженных задач с последующими многократными итерациями был принят модуль невязки материального и теплового баланса печи. В соответствии со схемой (см. рис. 1) приходная часть теплового баланса включает теплоту, полученную в результате сгорания топлива, а также физическую теплоту, вносимую потоками массы вещества.

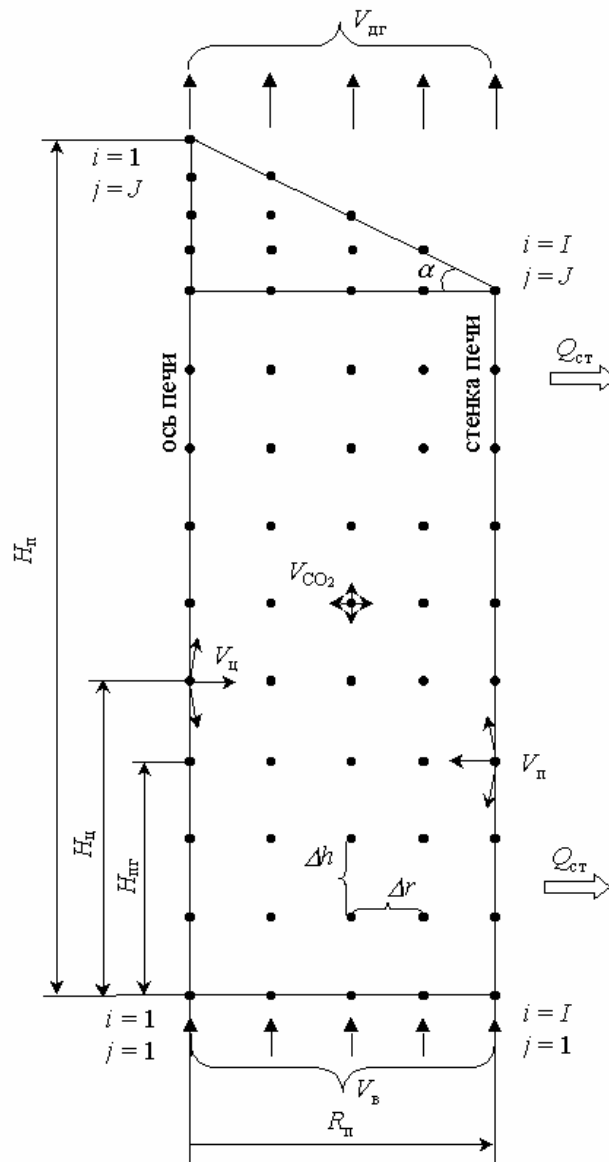


Рисунок 1 - Схема внешнего тепломассообмена в шахтной известково-обжигательной печи

На рисунке 1, $H_{п}$ – высота печи; $R_{п}$ – радиус печи; $H_{ц}$ – уровень расположения центральной балочной горелки; $H_{пг}$ – уровень яруса периферийных горелок; $V_{в}$ – расход воздуха в основание печи; $V_{ц}$ – расход газа на центральную горелку (топливо + воздух); $V_{п}$ – расход газа на ярус периферийных горелок (топливо + воздух); V_{CO_2} – выход диоксида углерода CO_2 в результате диссоциации известняка; $V_{дг}$ – расход дымовых газов на выходе из печи; $Q_{ст}$ – потери теплоты через стенки печи; Δr – расчетный шаг по радиусу печи; Δh – расчетный шаг по высоте печи; i, j – индексы узловых точек по радиусу и высоте печи; I, J – количество узловых точек по радиусу и высоте печи.

Задача считалась решенной при достижении значений модуля невязки $\leq 0,5 \%$.

Базовый режим работы исследуемой шахтной печи представлен следующими показателями, полученными в ходе экспериментальных замеров на участке обжига завода:

- расход известняка $G_{изв-к} = 72$ т/сут,
- расход топлива на горелки $V_{пг} = 290$ м³/ч (пропорционально на балочную и периферийные горелки по 145 м³/ч),
- расход воздуха на печь $V_{в} = 3512$ м³/ч,
- высота конуса засыпи $H_{п} = 6,9$ м,
- угол откоса поверхности засыпи $\alpha = 32^\circ$,
- температура загружаемого известняка $20^\circ C$,
- содержание $(CaO + MgO)_{изв-к}^{общ} = 53,9\%$,
- содержание $(CaO + MgO)_{изв}^{общ} = 73,8 \%$,
- состав дымовых газов в соответствии с показаниями газоанализатора.

Анализ технологических показателей работы шахтной печи выполнялся в соответствии с методикой расчета [9]: степени обжига известняка, содержания в извести активного оксида кальция и магния, производительности печи по извести, КПД печи по обратному и прямому тепловому балансу, удельного расхода условного топлива.

Так, степень обжига известняка определялась по формуле

$$\sigma = \frac{1 - \frac{(\text{CaO} + \text{MgO})_{\text{из-к}}^{\text{общ}}}{(\text{CaO} + \text{MgO})_{\text{изв}}^{\text{общ}}}}{1 - 0,01 \cdot \text{RO}_{2\text{из-к}} - 0,01 \cdot (\text{CaO} + \text{MgO})_{\text{из-к}}^{\text{общ}}} \cdot 100, \% . \quad (1)$$

КПД печи по обратному тепловому балансу

$$q_{\text{пол}} = 100 - (q_{\text{хим}}^{\text{ух}} + q_{\text{физ}}^{\text{ух}} + q_{\text{физ}}^{\text{гп}} + q_{\text{охл}}), \% . \quad (2)$$

КПД печи по прямому тепловому балансу

$$\eta = \frac{G_{\text{из-к}} \cdot \sigma \cdot q_{\text{дис}}}{Q_{\text{нпг}}^{\text{р}} \cdot V_{\text{см}}} \cdot 100, \% , \quad (3)$$

где $G_{\text{из-к}}$ – производительность печи по известняку, т/сут;
 $q_{\text{дис}}$ – теплота диссоциации, Вт; $Q_{\text{нпг}}^{\text{р}}$ – теплота сгорания природного газа, Дж/м³; $V_{\text{см}}$ – суммарный расход природного газа и выделившегося в результате диссоциации диоксида углерода, м³/ч.

Моделирование тепловой работы шахтной печи проводилось для следующих входных данных: расхода известняка 72 т/сут, размера фракции $r = 0,06$ м, углов откоса конуса засыпи $\alpha = 32^\circ$ и $\alpha = 0^\circ$ (ровная поверхность). Высота конуса засыпи при $\alpha = 32^\circ$ устанавливалась в соответствии с базовым режимом $H_{\text{п-к}} = 6,9$ м, исходя из чего уровень кусковых материалов изменялся от центра печи к периферии. Высота ровной поверхности устанавливалась исходя из соответствия объемов материала, ограниченных образующими конуса и ровной поверхностью, а именно $H_{\text{п-р}} = 6,3$ м.

Первый этап исследований заключался в определении температуры газа t_r по радиусу печи (узлы $i = 1 \dots I$) на различных горизонтах (высотах) обжигаемого материала (узлы $j = 1 \dots J$) $H_{(i,j)}$ (см. рис. 1). Изменение этого параметра процесса термической диссоциации оказывает существенное влияние на качество производимой извести – степень обжига известняка σ . В результате установлено, что средняя температура в зоне нагрева материала выше при наличии конуса засыпи (кривая 2, рис. 2), чем в случае ровной поверхности (кривая 1, см. рис. 2).

Подобная динамика температур по высоте столба кусковых материалов связана с характером газораспределения по сечениям печи и плотностью слоя. Область высоких температур над балочной горелкой значительно выше, чем над периферийными. Поэтому центр

печи прогревается интенсивнее, несмотря на присутствие конуса. Нагрев известняка на периферии происходит менее активно в случае ровной поверхности засыпи ($t_r = 352^\circ\text{C}$), так как уровень материала в пристенной области выше по сравнению с уровнем известняка у основания конуса (при одной и той же протяженности зоны высоких температур) (см. рис. 2, а и 2, б). Температура газа на периферии у поверхности конуса засыпи достигает 543°C .

Анализ качества извести выполнен по величине степени обжига σ , а также по содержанию в извести активного оксида кальция и магния.

По результатам моделирования можно судить: о характере изменения степени обжига материала в объеме печи от ее центра к периферии (см. рис. 3, а и б), КПД печи $q_{\text{пол}}$, потерях теплоты с уходящими газами $q_{\text{физ}}^{\text{yx}}$ и от химического недожога топлива $q_{\text{хим}}^{\text{yx}}$ в зависимости от конфигурации поверхности (с учетом конуса засыпи и для ровной поверхности). Так, при наличии конуса засыпи, КПД печи по обратному тепловому балансу составляет $q_{\text{пол}}=44,0\%$, несмотря на потери теплоты $q_{\text{физ}}^{\text{yx}}=30,3\%$ и $q_{\text{хим}}^{\text{yx}}=15,6\%$. Ровная поверхность материала в шахте обеспечивает незначительное снижение потерь теплоты с уходящими газами $q_{\text{физ}}^{\text{yx}}=28,7\%$ при увеличении потерь теплоты от химического недожога топлива $q_{\text{хим}}^{\text{yx}}=19,6\%$ и общем снижении КПД печи $q_{\text{пол}}=41,4\%$.

Следует отметить, что размер зоны диссоциации над балочной горелкой на уровне 5,7 м в 2 раза шире при наличии конуса. Усреднение степени диссоциации по радиусу дает представление о динамике этого показателя по высоте печи (см. рис. 3).

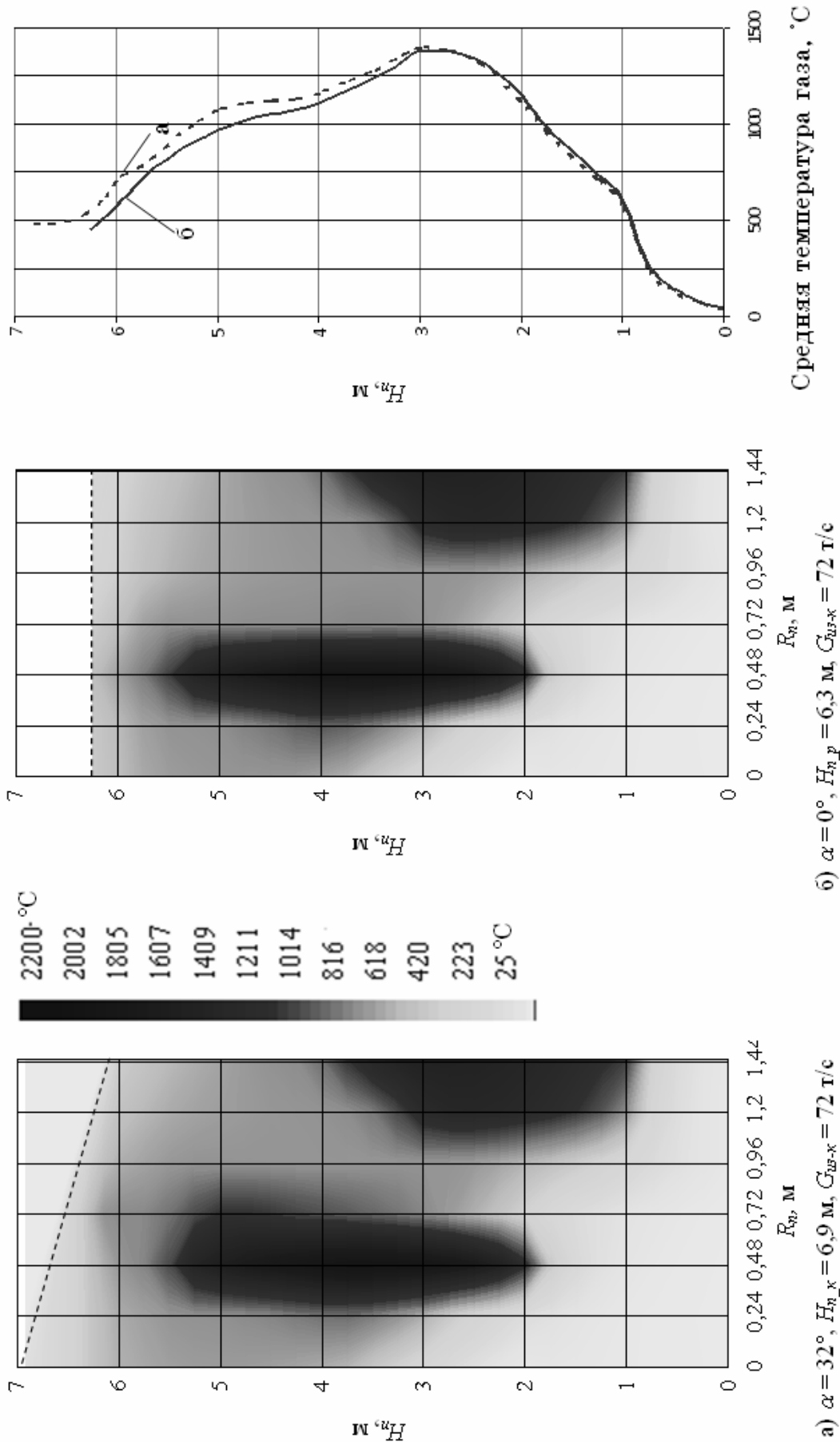


Рис. 2. Распределение температур газа в объеме печи (режим №1)

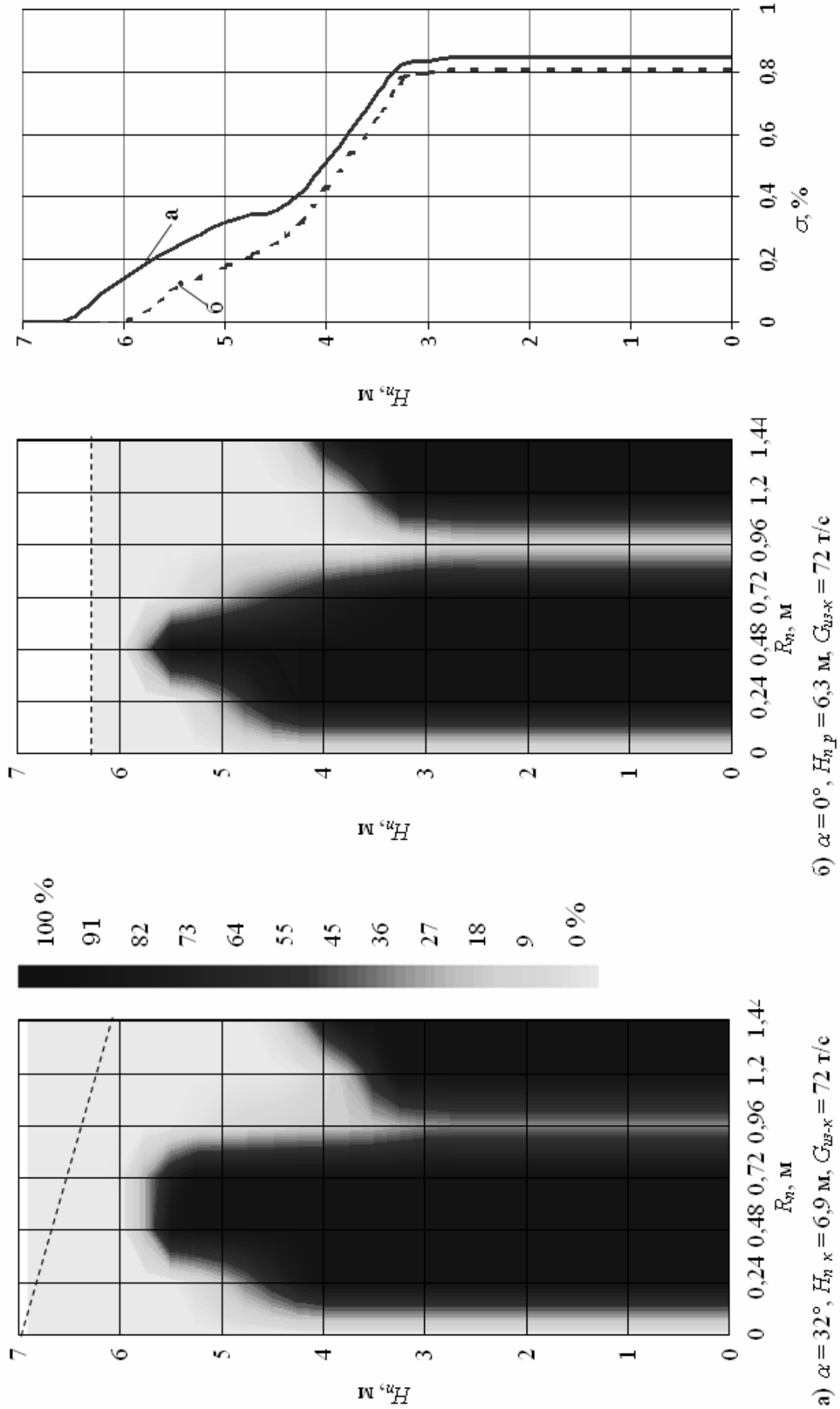


Рис. 3. Распределение степени обжига по высоте печи (режим №1)

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Проведенные исследования на модели позволили установить качественное влияние конфигурации поверхности засыпи на показатели работы шахтной печи. Начало декарбонизации известняка происходит на более ранних горизонтах печи в случае поверхности засыпи, имеющей форму конуса (угол откоса $\alpha = 32^\circ$). Это объясняется более рациональным распределением температур в зоне обжига. Вместе с тем КПД печи снижают значительные потери теплоты с уходящими газами ($t_r = 543^\circ\text{C}$), что связано с перепадом высоты от центра к периферии, который определяется величиной угла откоса засыпи. В случае ровной поверхности зона разложения смещена ниже на 0,5 м (кривые а и б на рис. 3).

В результате получены следующие значения степени обжига известняка: $\sigma = 84,5\%$ при наличии конуса засыпи, $\sigma = 80,9\%$ в случае ровной поверхности материалов в печи.

Дальнейшие исследования тепловой работы шахтной известково-обжигательной печи необходимо выполнить для различных вариантов конфигурации верха печи – изменения как углов откоса засыпи, так и высоты загрузки, что с учетом технологических требований и представленных в данной работе результатов, позволит определить оптимальный уровень заполнения шахты при наиболее рациональной конфигурации верха печи. Перспектива использования результатов исследований состоит в разработке эффективных режимов загрузки шахты печи и алгоритмов управления процессом обжига известняка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляшенко Ю.П. Разработка и внедрение эффективных газодинамических и тепловых режимов шахтных печей для обжига известняка: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» / Ю.П. Ляшенко – Днепропетровск, 1985. – 22 с.
2. Гордон Я.М. Механика движения материала и газов в шахтных печах / Гордон Я.М., Максимов Е.В., Швыдкий В.С. – Алма-Ата, 1989. – 144 с.
3. Монастырев А.В. Печи для производства извести / А.В. Монастырев, А.В. Александров – М.: Металлургия, 1979. – 232 с.

4. Форись С.Н. Математическое моделирование шахтных известково-обжиговых печей / С.Н. Форись, С.С. Федоров, М.В. Губинский // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (56). – Том 2. – Дніпропетровськ, 2008. – С.98-104.
5. Мойкин В. Разработка технологии и техники обжига известняка в шахтных печах / В. Мойкин // Оборудование. Технический альманах. – 2008. – № 2. – С. 12 – 15.
6. Моделирование поверхности засыпи в шахтной печи / И.Г. Тригуб, О.Н. Кукушкин, В.П. Радченко [и др.] // Сборник научных трудов НГУ №19, том 2. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – С.169-177.
7. Пархоменко Т.Ю. Прогнозирование качества металлургической извести на основе математической модели кинетики диссоциации известняка: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.02 «Металлургия черных металлов» / Т.Ю. Пархоменко. – Днепропетровск, 1989. – 17 с.
8. Голубев В.О. Оптимизация режима работы и конструкции шахтной печи известкового производства черной металлургии: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / В.О. Голубев. – Санкт-Петербург, 2007. – 20 с.
9. Федоров О.Г. Методика определения тепло-технологических показателей работы шахтных известково-обжиговых печей по результатам химического анализа дымовых газов / О.Г. Федоров, В.М. Бойко, С.И. Сазонов, С.Н. Форись // Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: НМетАУ.– 2008. – Т.9. – С.10-15.

Получено 29.01.2010г.