



Мных А. С.,  
Пазюк М. Ю.,  
Мных И. Н.

## АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ

*В работе проведен анализ текущего состояния вопроса моделирования агломерационного процесса и представлены результаты моделирования процесса спекания шихты на разработанной авторами конечно-элементной тепловой модели.*

*Проанализированы результаты моделирования и натурного эксперимента, подтверждена адекватность представленной модели. Погрешность моделирования свидетельствует о возможности использования модели для проведения численных экспериментов.*

**Ключевые слова:** сегрегация, имитационная модель, адекватность модели, тепловой режим, горизонт слоя, шихта.

### 1. Введение

В настоящее время все участки агло-доменного передела сталкиваются с проблемой постоянного подорожания энергоресурсов на фоне необходимости снижения либо сохранения на текущем уровне себестоимости производимой продукции. Основным энергоносителем для агломерационного процесса выступает коксовая мелочь, сокращение объемов потребления которой является крайне актуальным вопросом, с учетом сохранения качества агломерата по физико-химическим показателям.

Для повышения энергоэффективности агломерационного процесса необходимы дальнейшие исследования вопросов загрузки материала, распределения химкомпонентов и топлива по высоте паллеты, а также тепловых процессов, протекающих в слое спекаемого агломерата.

При исследовании процессов, протекающих в ходе осуществления данных операций, широко используется математическое моделирование, однако далеко не все известные модели являются достаточно точными, адекватными и удобными для проведения исследований, направленных на оптимизацию теплового режима рассматриваемого процесса.

Таким образом, разработка адекватной тепловой модели процесса агломерации для решения задач оптимизации режима спекания, является актуальной научной и практической задачей.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопросам исследования и моделирования тепловых процессов посвящены работы Е. Ф. Вегмана [1], А. А. Сигова [2] и др., в которых при разработке модели использовался метод зональных тепловых балансов.

Применение данного метода предусматривает составление для каждого элементарного слоя системы уравнений с последующим их решением, однако тенденция к увеличению высоты спекаемого материала обуславливает наличие большого числа элементарных

слоев, что приводит к необходимости расчета десятков систем уравнений, тем самым затрудняя практическое применение метода.

В работе [3] представлен развернутый анализ современных подходов к моделированию, базирующихся на применении специального программного обеспечения для реализации численных и имитационных моделей агломерационного процесса.

Так, в работе [4] математическая модель представляет собой зависимость:

$$Y = f(U, V, Z),$$

где  $U$  — вектор управляющих воздействий;  $V$  — вектор контролируемых возмущений;  $Z$  — вектор не контролируемых возмущений;  $Y$  — выходной вектор объекта.

Вид данной функции при описании процесса спекания зависит от времени и имеет существенные ограничения на переменные. При описании функционирования системы со сложной внутренней структурой, аналитическое описание, предложенное Цаплиным А. И., становится практически невозможным при обеспечении достаточной точности модели.

Модель, предложенная Калашниковым С. Н. [5], базируется на методах формально-математического описания физико-химических явлений и реализации вычислительного эксперимента. Автором указана необходимость создания гибких и универсальных технологий математического моделирования, позволяющих решать различные научные и практические задачи.

В работе [6] представлена комплексная математическая модель, отвечающая требованиям адекватности реальным теплофизическим и физико-химическим процессам, протекающим в слое при обжиге железорудных окатышей. Разработанная модель рассматривает обжиговый агрегат в целом и затрагивает лишь некоторые особенности процесса спекания. Использование данной модели целесообразно лишь для решения технологических задач.

Математические модели в работах [7, 8] построены по блочному принципу. Все рассматриваемые процессы

сгруппированы в подсистемы и базируются на методах статической термодинамики. Предложенная структурная схема процесса спекания построена на основе общей схемы технологического объекта исследования и является наиболее полной из всех существующих. Приведенная блочная схема модели не позволяет совместить результаты расчетов подмоделей, тем самым затрудняя проверку ее адекватности.

Стоит добавить, что к существенному недостатку приведенных моделей относится отсутствие анализа сегрегационных процессов, протекающих в загружаемом материале, что обуславливает закономерности распределения топлива и химкомпонентов по высоте слоя шихты.

В работах [9, 10] представлена модель, базирующаяся на методе конечных элементов, позволяющая определить оптимальное распределение компонентов шихты и твердого топлива по высоте и ширине паллеты агломашины, тем самым стабилизировать тепловой режим процесса.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — тепловой режим процесса агломерации.

Целью данной работы является подтверждение адекватности тепловой модели процесса агломерации, реализованной в среде имитационного моделирования Ansys. Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести моделирование процесса спекания слоя шихты для условий агломашины № 1 МК «Запорожсталь»;
- провести проверку адекватности модели;
- провести промышленный эксперимент на установке для спекания шихты;
- проанализировать результаты моделирования и натурного эксперимента.

### 4. Анализ и результаты проверки тепловой модели процесса спекания агломерата на адекватность

Приведенная в [10] модель разработана для условий агломашины № 1 аглофабрики МК «Запорожсталь»: высота слоя 500 мм, ширина паллеты 2500 мм, температура зажигания 1180–1240 °С, разрежение в вакуумкамерах 850–950 мм вод. ст., расход топлива на спекание 3,6–3,8 %. Она достаточно просто может быть модифицирована для условий спекания на аглоленте с иными техническими характеристиками и технологическими особенностями.

Известно, что температура в зоне горения для получения мелкопористого, легковосстановимого офлюсованного агломерата должна находиться в диапазоне 1270–1320 °С. Исследования теплового режима аглопроцесса осуществлялось наложением на расчетную область соответствующих граничных условий и заданием мощности внутренних источников энергии [9]. В результате был установлен неравномерный характер распределения задаваемой мощности, выделяемой в единичном объеме, как по ширине, так и по высоте пирога, имеющий существенное увеличение в прибортовых зонах и постепенное снижение от верхних к нижним горизонтам спека. Последнее свидетельствует о значительных потерях тепла через стенки паллеты и с уходящими

газами через неплотности и повышенную порозность слоя шихты в первом случае, и о существенном уровне аккумуляции тепловой энергии во втором.

Расчетная температура зоны горения по горизонтам слоя, полученная в результате моделирования, представлена на рис. 1. Из полученных результатов видно, что по горизонтам слоя удалось достичь постоянства максимальной температуры в диапазоне 1270–1340 °С, что позволит исключить переоплавление нижних и недопек верхних слоев спекаемой шихты, и тем самым повысить выход годного.

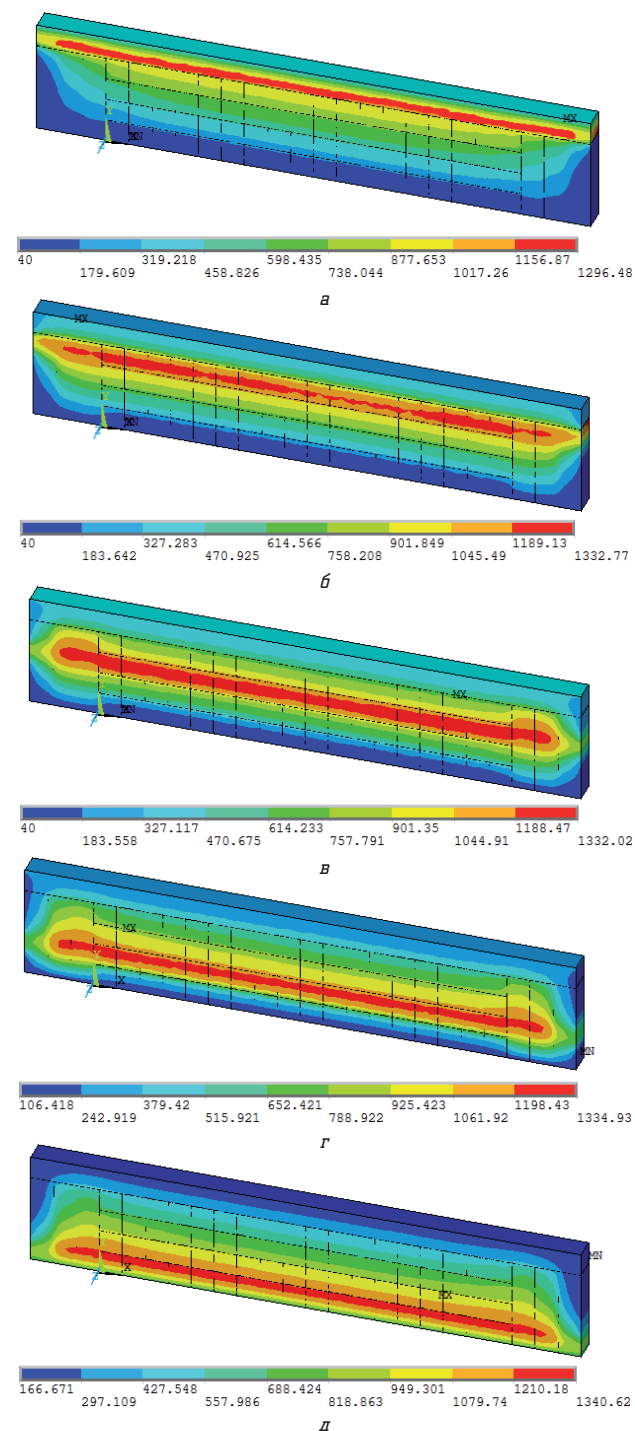


Рис. 1. Расчетное значение максимальной температуры зоны горения по горизонтам: а — горизонт 1; б — горизонт 2; в — горизонт 3; г — горизонт 4; д — горизонт 5

Проверку адекватности имитационной модели натурному эксперименту реализуем на основе сопоставления дисперсии воспроизводимости среднего значения функции отклика и дисперсии адекватности.

В статистике разработан критерий для проверки гипотезы об адекватности модели, который называется *F*-критерием Фишера, последний определяется следующей формулой:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \leq F_{кр},$$

где  $\sigma_1^2$  — остаточная дисперсия или дисперсия адекватности;  $\sigma_2^2$  — дисперсия воспроизводимости.

$$\nu_1 = N(m + 1), \quad \nu_2 = N(v + 1),$$

где  $\nu_1, \nu_2$  — число степеней свободы; *N* — общее число экспериментов; *m* — число оцениваемых параметров; *v* — число параллельных измерений в экспериментальных точках.

Дисперсию воспроизводимости найдем из:

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma_2}{\nu_2}, \quad \sigma_2 = \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \bar{y}_i),$$

в случае  $\nu_2 = n - 1$  получим:

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_{j=1}^n y_{ij},$$

где *n* — число параллельных измерений в любой точке вне плана (при отсутствии возможности проведения *v* параллельных измерений в каждой точке плана).

Оценка дисперсий адекватности при точках плана эксперимента *N* > *m* характеризует отклонение между результатами наблюдений и значениями, формируемыми по функции отклика:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{N - m - 1} (\bar{y}_i - y'_i), \quad N > m,$$

где  $\bar{y}_i$  — среднее значение результатов наблюдений в *i*-й точке плана;  $y'_i$  — значение отклика в той же точке, рассчитанное на модели.

Количество степеней свободы дисперсий адекватности  $\nu_1 = N - m$ . При насыщенном планировании нет степеней свободы и сумма отклонений равна нулю.

Проверка адекватности сводится к проверке гипотезы об однородности оценки дисперсии воспроизводимости со своим числом степеней свободы и оценки дисперсии адекватности. Проверка осуществляется по критерию Фишера, при условии, что вычисленное значение критерия меньше критического  $F_{кр}$ , то нет основания для сомнения в адекватности модели.

Проведение натурального эксперимента, с целью подтверждения адекватности разработанной модели, было реализовано на «Опытной установке аглоцефа для спекания агломерата» МК «Запорожсталь», схема которой представлена на рис. 2, а внешний вид на рис. 3.

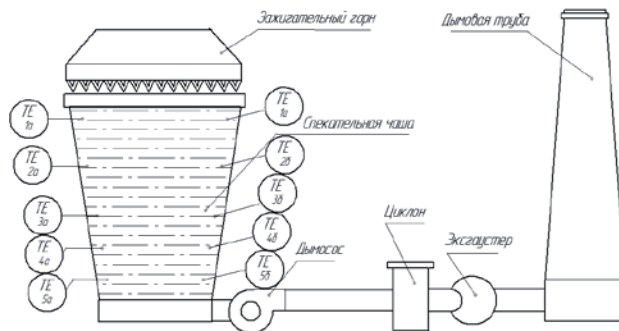


Рис. 2. Схема опытной установки для спекания агломерата: 1а, 1б; 2а, 2б; 3а, 3б; 4а, 4б; 5а, 5б — пары термометры для измерения температуры зоны спекания по горизонтам

Спекание проводилось для слоя шихты высотой 500 мм. Содержание топлива в загружаемой шихте колебалось в диапазоне 3,6–3,4 %. Температура зажигания 1200–1240 °С.



Рис. 3. Внешний вид спекательной установки

Натурный эксперимент состоял из серии трех опытных спеканий, температура зоны горения определялась по пяти горизонтам, путем установки десяти термометров, как показано на рис. 2. Результаты экспериментов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Температура зоны горения по горизонтам спекаемой шихты

Номер горизонта	Температура зоны горения, °С			
	Моделирование	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3
1	1271	1256	1262	1249
2	1296	1291	1280	1302
3	1332	1320	1316	1321
4	1334	1330	1364	1344
5	1340	1376	1342	1350

В результате анализа данных имитационного моделирования, полученных с применением пакета Ansys, и данных экспериментальных спеканий, установлено, что модель является адекватной и погрешность моделирования не превышает 2,61 %.

## 5. Выводы

В работе проведено проверку адекватности, тепловой модели процесса агломерации, разработанной на базе

метода конечных элементов [9, 10], путем сравнения данных промышленного эксперимента проведенного на «Опытной установке аглоцеха для спекания агломерата», с результатами имитационного моделирования. Проверка подтвердила адекватность модели. По результатам эксперимента получены акт и протокол проверки адекватности модели на МК «Запорожсталь».

Анализ данных имитационного моделирования и результатов натурального эксперимента показали, что погрешность моделирования составляет 2,61 %, последнее свидетельствует о возможности использования указанной модели для проведения численных экспериментов с целью оптимизации теплового режима процесса спекания.

#### Литература

1. Вегман, Е. Ф. Процесс агломерации [Текст] / Е. Ф. Вегман. — М.: Металлургия, 1963. — 153 с.
2. Сигов, А. А. Агломерационный процесс [Текст] / А. А. Сигов, В. А. Шурхал. — Киев: Техника, 1969. — 232 с.
3. Савельев, С. Г. Математическое моделирование в исследовании процессов производства окискованного сырья [Текст]: сб. науч. пр. / С. Г. Савельев, Я. А. Стойкова // Вісник КрНУ. — 2012. — № 34. — С. 44–47.
4. Цаплин, А. И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии [Текст] / А. И. Цаплин, И. Л. Никулин. — Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. — 203 с.
5. Калашников, С. Н. Математическое моделирование тепло-массообменных процессов в металлургических агрегатах на основе объектно-ориентированной технологии [Текст]: дис. ... д. т. н. / С. Н. Калашников. — Новокузнецк, 2002. — 278 с.
6. Боковиков, Б. А. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата [Текст] / Б. А. Боковиков, В. В. Брагин, В. М. Малкин и др. // Сталь. — 2010. — № 9. — С. 84–87.
7. Фролов, Ю. А. Теплотехническое исследование процесса агломерации и совершенствование технологии и техники для производства агломерата [Текст]: автореф. дис. ... д. т. н. / Ю. А. Фролов. — Екатеринбург, 2005. — 49 с.
8. Елисеев, А. А. Исследование тепло-массообменных процессов при агломерации шихты [Текст]: дис. канд. техн. наук / А. А. Елисеев. — Череповец, 2006. — 165 с.
9. Мных, А. С. Решение задачи распределения температуры в единичном объеме агломерационного слоя методом конечных элементов с учетом внутреннего источника теп-

ла [Текст] / А. С. Мных // Збірник наукових праць ДДТУ. — 2014. — № 2(25). — С. 47–51.

10. Мных, А. С. Синтез трехмерной модели теплового режима процесса спекания агломерационной шихты [Текст] / А. С. Мных // Вісник КрНУ. — 2014. — № 38. — С. 44–47.

#### АНАЛІЗ АДЕКВАТНОСТІ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ АГЛОМЕРАЦІЇ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ШИХТИ

В роботі проведено аналіз поточного стану питання моделювання агломераційного процесу та наведені результати моделювання процесу спікання шихти на розробленій авторами кінцево-елементній тепловій моделі.

Проаналізовані результати моделювання й натурального експерименту, підтверджено адекватність представленої моделі. Похибка моделювання свідчить про можливість використання моделі для проведення чисельних експериментів.

**Ключові слова:** сегрегація, імітаційна модель, адекватність моделі, тепловий режим, горизонт шару, шихта.

*Мных Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра электротехники и энергетического менеджмента, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: mnikh.a@yandex.ua.*

*Пазюк Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия, Украина.*

*Мных Ирина Николаевна, кандидат технических наук, кафедра теплоэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: irinamnih@yandex.ua.*

*Мных Антон Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки та енергетичного менеджменту, Запорізька державна інженерна академія, Україна.*

*Пазюк Михайло Юрійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами, Запорізька державна інженерна академія, Україна.*

*Мных Ирина Миколаївна, кандидат технічних наук, кафедра теплоенергетики, Запорізька державна інженерна академія, Україна.*

*Mnych Anton, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: mnikh.a@yandex.ua.*

*Pazuk Mikhail, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine. Mnych Irina, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: irinamnih@yandex.ua*

УДК 620.92:644.62

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.36786

**Кравченко В. П.,  
Кравченко Е. В.**

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛОЩАДИ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*С увеличением площади солнечных коллекторов доля полезной энергии, обеспечиваемой за год солнечной установкой (СУ), и ее стоимость растут. Недостающая энергия покрывается за счет органического топлива либо электроэнергии. В работе проведена оптимизация площади солнечных коллекторов относительно минимума приведенных годовых затрат для СУ, работающих в течение теплой половины или весь год.*

**Ключевые слова:** площадь солнечных коллекторов, приведенные годовые затраты, длительность работы.

### 1. Введение

Возобновляемые источники энергии находят все более широкое применение [1]. Наиболее популярным

является использование солнечных установок (СУ) для горячего водоснабжения [2]. Количество вводимых в действие установок постоянно кастет, особенно на юге Украины. При проектировании таких установок