

РАСЧЕТ ЭНТАЛЬПИИ И ЭНТРОПИИ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО РЕАКТОРА

Аннотация. В статье рассматривается задача расчета энтальпии и энтропии веществ в колонном струйно-эмульсионном реакторе для определения минимальных энергетических затрат в результате протекания химических реакций при получении готового продукта – металла. В качестве метода выбрано имитационное моделирование, в основу которого положены схемы взаимодействия между частицами и процессы, происходящие в них. Для наглядности представления процесса выбран язык объектно-ориентированного программирования ActionScript 3.0. Расчет энтальпии и энтропии нагрева осуществлялся на основе данных по термодинамическим функциям веществ. Термодинамические эффекты химических реакций рассчитывались с учетом механизмов встреч частиц и наличия кислорода в слое колонного реактора. В результате реализации алгоритма на имитационной модели построены и проанализированы термодинамические функции веществ в зависимости от динамических процессов, протекающих в колонном струйно-эмульсионном реакторе.

Ключевые слова: имитационная модель, струйно-эмульсионный реактор, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.

Abstract. The article deals with the problem of calculating the enthalpy and entropy of substances in a column jet-emulsion reactor to determine the minimum energy costs as a result of chemical reactions during the production of a finished product – metal. As a method, simulation modeling was chosen, which is based on the schemes of interaction between particles and the processes occurring in them. For clarity of the studied process, the object-oriented programming language ActionScript 3.0 was chosen. The thermodynamic functions of substances are taken to calculate the enthalpy and entropy of heating. The thermodynamic effects of chemical reactions were calculated taking into account the mechanisms of particle collisions and the presence of oxygen in the column reactor layer. As a result of the implementation of the algorithm on the simulation model, the thermodynamic functions of substances are constructed and analyzed depending on the dynamic processes occurring in the column jet-emulsion reactor.

Key words: simulation model, jet-emulsion reactor, enthalpy, entropy, Gibbs energy.

Струйно-эмульсионный реактор – это агрегат прямого восстановления металлов. Технологическая схема и принцип действия металлургического агрегата подробно рассмотрены в работе [1].

В статье решена задача расчета процесса восстановления железа из железной руды в агрегате СЭР. В состав входных потоков агрегата входят железная руда, угольное топливо, известь и кислород. Конечными продуктами являются металл, шлак, газ.

Для реализации восстановительных процессов железа из руды необходимо поддерживать определенную температуру системы, достижение которой возможно в результате горения угольного топлива. Для расчета изменения

термодинамических функций (энтальпии, энтропии, энергии Гиббса) частиц материалов и протекающих в них химических реакций, необходимо определить термодинамические функции веществ, из которых состоят частицы, как функцию температуры. Энтальпии и энтропии веществ при стандартной температуре и коэффициенты аппроксимационных уравнений для приведенной энергии Гиббса приняты в соответствии со справочником В. П. Глушко [2, 3]). С использованием этих данных с учетом фазовых переходов веществ получены значения энтальпий и энтропий веществ при заданной температуре.

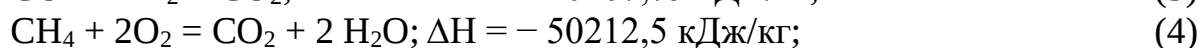
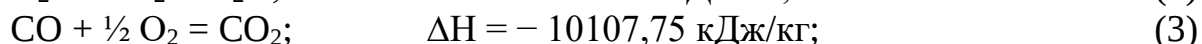
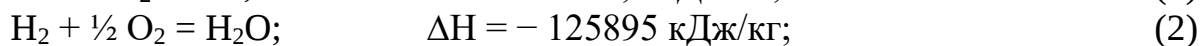
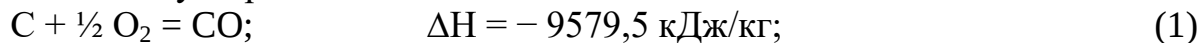
В качестве языка программирования был выбран язык ActionScript 3.0 и среда программирования Adobe Animate 2021. К основным достоинствам данной среды можно отнести наглядность отображаемого процесса [4] и возможность одновременного отображения большого количества объектов [5].

Имитационная модель колонного струйно-эмульсионного реактора отражает процесс витания и взаимодействия частиц шихты и продуктов реакций в вертикальном потоке высокотемпературного несущего газа и включает в себя следующие модели нижнего уровня: плавления частицы, изменения состава шлака, взаимодействия дисперсных частиц, диффузионного перехода на границе шлак-металл. Все эти модели работают одновременно и отображаются в режиме реального времени. Дополнительно создана модель термодинамических функций веществ, реализованная в двух классах: энтальпии и энтропии. Классы состоят из функций инициализации веществ при фиксированных температурах и расчета изменения энтальпии и энтропии при нагреве веществ в интервале температур. В эти классы также включены числовые значения изменения энтальпии и энтропии основных химических реакций, происходящих в частицах.

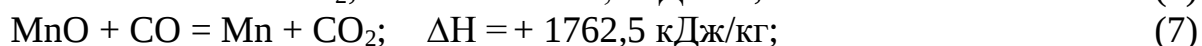
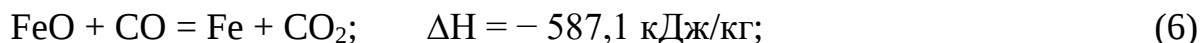
С учетом допущений можно утверждать, что состав газовой фазы в агрегате представлен следующими веществами: O_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 , H_2 , H_2O . Конденсированная фаза состоит из Fe_2O_3 , FeO , MnO , SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , S , а также Fe , Mn , полученными в результате восстановления железной руды.

Так как материалы попадают в колонный реактор из реактора-осциллятора нагретыми, то для всех веществ получены значения изменений энтальпии и энтропии при нагреве от 1698 К до 1873 К.

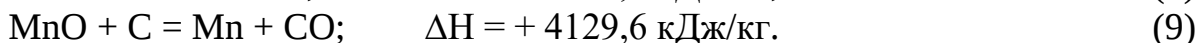
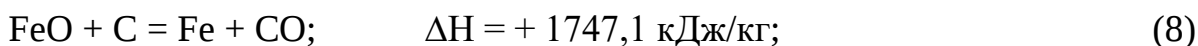
Изменение энтальпии химических реакций горения летучих и органического углерода топлива:



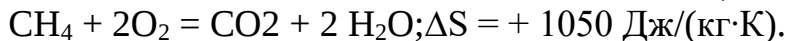
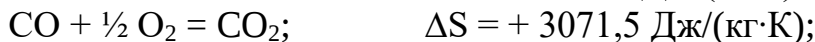
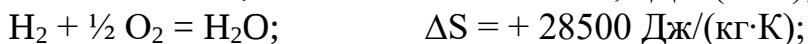
Изменение энтальпии реакций восстановления железа в частице железной руды:



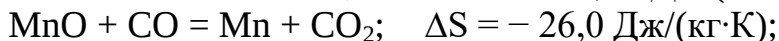
Изменение энтальпии реакций восстановления в объединенной частице железной руды с углеродным топливом:



Изменение энтропии химических реакций горения летучих и углерода топлива:



Изменение энтропии реакций восстановления железа в частице железной руды:



Изменение энтропии реакций восстановления в объединенной частице железной руды с углеродным топливом:



В струйно-эмульсионном реакторе в качестве частиц, выделяющих тепло, выступают частицы угольного топлива, а в качестве нагреваемых частиц выступают частицы железной руды. Так как процессы горения углеродного топлива и плавления железной руды происходят непрерывно, то в каждый момент времени рассчитывается изменение энтальпии и энтропии.

Реакции горения топлива представлены формулами (1) – (5). Эти реакции протекают при достаточном количестве O_2 в слое газа. Рассмотрены три варианта горения углерода в слое газа: 1) кислорода хватает только на горение летучих; 2) кислорода хватает на горение летучих и выгорание углерода до CO ; 3) кислорода хватает на летучие и выгорание углерода до CO_2 .

Для частицы железной руды также учитываются нагрев и протекание эндотермических реакций восстановления оксидов FeO , MnO в железной руде (6) и (7). Для объединенной частицы железной руды с углеродным топливом реакции протекают по формулам (8) и (9). Термодинамические функции всех веществ по высоте колонного реактора представлены на рисунках 1–3.

Вычислительный эксперимент на имитационной модели (рисунок 1) струйно-эмульсионного реактора показал: 1) больше всего тепла выделяется в частицах железной руды с углеродом, которые располагаются в нижней части колонного реактора; 2) на высоте, превышающей 1 м от уровня металла, большее количество теплоты выделяют частицы угольного топлива (частицы железной руды на этой высоте отсутствуют из-за большой плотности). Стоит также отметить, что в частице железной руды без углерода преобладают процессы выделения тепла. Это связано с тем, что реакция восстановления $\text{FeO} + \text{CO}$ (6) – экзотермическая, процентное содержание FeO составляет 63 %, поэтому при такой реакции выделяется больше тепла, чем поглощается. Таким образом, только на нагрев углеродного топлива затрачивается энергия в интервале температур 1698 – 1873 К.

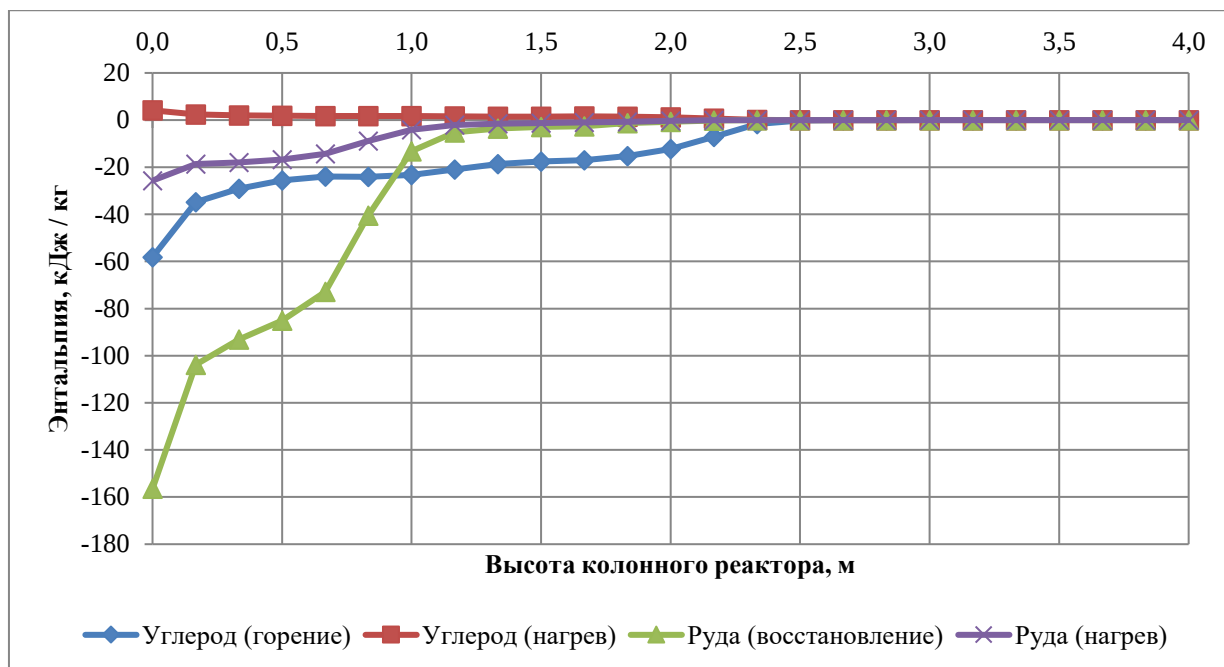


Рис. 1. Изменение энтальпии углеродного топлива и железной руды по высоте колонного реактора

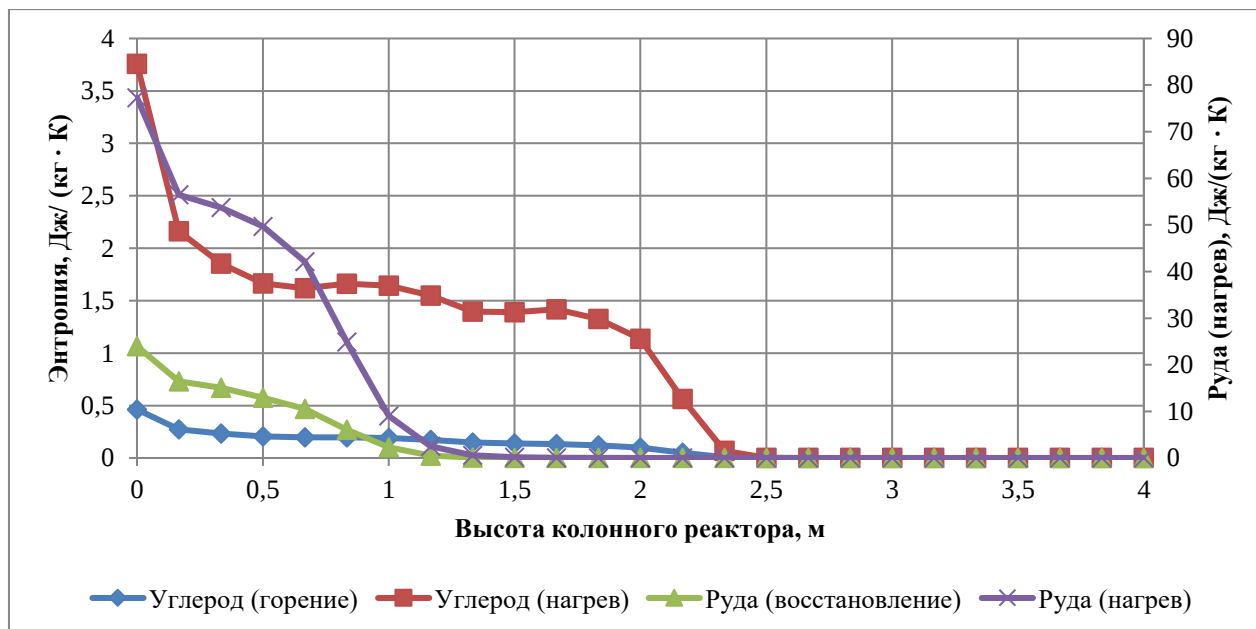


Рис. 2. Изменение энтропии углеродного топлива и железной руды по высоте колонного реактора

Из рисунка 2 видно, что наибольшее изменение энтропии происходит при нагреве железной руды.

Энергия Гиббса при нагреве железной руды также принимает наибольшее значение (рис. 3). Так как энергия Гиббса во всех случаях меньше нуля, то самопроизвольное протекание реакции возможно.

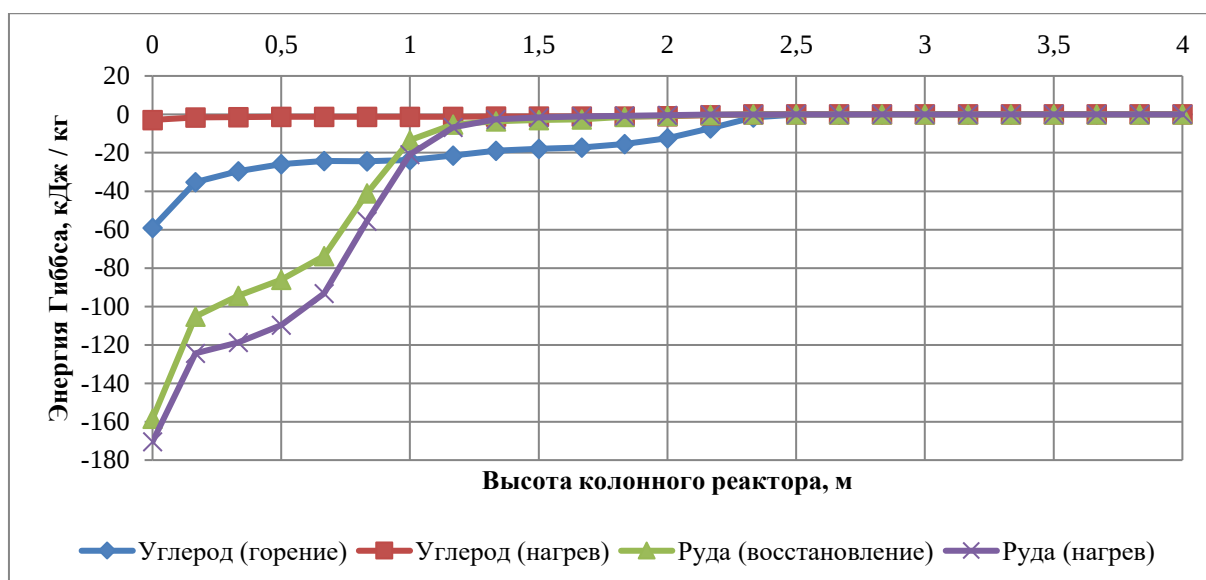


Рис. 3. Изменение энергии Гиббса углеродного топлива и железной руды по высоте колонного реактора

Заключение. Реализованы классы расчетов изменения энтальпии и энтропии в имитационной модели колонного струйно-эмульсионного реактора. В зависимости от схем взаимодействия частиц и наличия или отсутствия кислорода на той же высоте, где и располагается рассматриваемая частица, произведены расчеты термодинамических характеристик. Больше всего тепла получено в частицах с углеродным топливом: до 1 метра по высоте колонного реактора изменение энтальпии получили объединенные частицы железной руды и углеродного топлива, после 1 метра по высоте колонного реактора наблюдается уменьшение объединенных частиц и на первое место по изменению энтропии выходят отдельные частицы угольного топлива.

Список использованных источников

1. Сеченов П.А. Имитационное моделирование гравитационного сепаратора в колонном струйно-эмульсионном реакторе / П.А. Сеченов, В.П. Цымбал // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 4. – С. 278-283.
2. Глушко В.П. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. – Т. I. Кн. 1. – М.: Наука, 1978. – 496 с.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chem.msu.ru/Zn/welcome.html> – (04.02.2021).
4. Птицын В.А. Программирование интерактивной графики в среде a.flash: повышение эффективности обучения программированию и позитивное воспитательное воздействие / В.А. Птицын // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2010. №1. – С. 82-88.

5. Сеченов П.А. Постановка задачи исследования диффузионного перехода через границу шлак-металл в колонном реакторе и алгоритм ее решения / П.А. Сеченов, В.П. Цымбал, А.А. Оленников // Программные продукты и системы. – 2016. № 4. – С. 156-164.

УДК 669

А. С. Сивков, С. И. Чибизова

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС»», г. Москва, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗВЕСТИ ИЗ МЕЛА. ЭКОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. Работа выполнена с целью совершенствования тепловой работы вращающейся печи для реализации технологии производства металлургической извести из мела. Проведены эксперименты на лабораторных печах с целью выявления оптимальной температуры подогрева сырья перед обжигом. Определены оптимальные значения температуры, а также подобран подогреватель для внедрения технологии в производство. Данная технология позволяет использовать запасы мела АО «ЛГОК» и сократить операционные затраты при производстве стали на АО «ОЭМК». Рассмотрен вопрос газоочистки отходящих газов вращающейся печи.

Ключевые слова: известь, известняк, мел, подогреватель, вращающаяся печь, обжиг, окатыши, сталь, ОЭМК, ЛГОК.

Abstract. The work was carried out with the aim of improving the thermal operation of the rotary kiln for the implementation of the technology for the production of metallurgical lime from chalk. Experiments were carried out on laboratory furnaces in order to identify the optimal temperature for heating the raw material before firing. Optimal temperature values have been determined, and a heater has been selected for introducing the technology into production. This technology makes it possible to use the chalk reserves of JSC LGOK and reduce operating costs in steel production at JSC OEMK. The issue of gas cleaning of rotary kiln off-gases is considered.

Key words: lime, limestone, chalk, preheater, rotary kiln, roasting, pellets, steel, OEMK, LGOK.

Известь – материал, применяемый в большинстве существующих отраслей, будь то промышленность или пищевая сфера. В качестве сырья для производства извести используются горные породы, такие как известняк, мел или доломиты. В металлургии известь используется при производстве окатышей, в качестве добавки для увеличения прочностных свойств окатышей, а также в качестве флюса, удаляющий лишнюю влагу и ненужные вещества из сплава, при производстве стали в электропечах.

Для производства извести используют обжиговые печи высокотемпературной обработки.

Обжиг известняка происходит в шахтных или вращающихся печах. Мел является мягкой породой и при обжиге его в шахтных печах, куски сырья