

## **О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОДНОМЕРНЫХ ВОЛН ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ СРЕД**

Н.А. Луценко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,  
690041, Владивосток, Россия*

<sup>2</sup>*Дальневосточный федеральный университет, 690091, Владивосток, Россия*

Редкие и ценные металлы активно используются в различных современных технологиях, при этом их потребности с каждым годом увеличиваются. Постоянное расширение сферы применения ценных металлов не только повышает качество продукции, но и снижает энергетические и материальные затраты, что в свою очередь ведет к экономии природных ресурсов. Рост потребности в редких и ценных металлах приводит к их дефициту, что становится мировой проблемой. В то же время, значительное количество различных ценных металлов может содержаться в тяжелых нефтях и углях, при этом в настоящее время они, как правило, не используются, а остаются в отходах нефтепереработки и углеотходах.

Извлечение металлов из минерального и техногенного сырья в настоящее время проводится в основном следующими способами: механическим (измельчение материала с извлечением компонентов в соответствии с их плотностью, магнитными и прочими свойствами); пирометаллургическим (обжиг материала с разделением компонентов по температурам кипения с последующей их химической или металлургической переработкой); гидromеталлургическим (обработка материала растворами кислот или щелочей и перевод извлекаемых компонентов в раствор с последующим извлечением целевых компонентов экстракцией или ионным обменом); комбинированном (комбинация указанных выше способов). Настоящая работа посвящена применению фильтрационного горения для извлечения стратегически важных металлов из отходов нефтепереработки, углеотходов и бедных руд. В режиме фильтрационного горения за счет эффекта сверхадиабатического разогрева [1] можно сжигать низкокалорийное топливо, которое не горит в обычных топках. Поэтому сжигая в режиме фильтрационного горения отходы переработки нефти и угля можно достичь нескольких целей: утилизация этих отходов, получение энергии, извлечение содержащихся в них редких и ценных металлов.

В работе для описания распространения нестационарных одномерных волн гетерогенного горения металлосодержащих смесей с учетом фазовых переходов металла предложены математическая модель и численный метод. Математическая модель основана на классических подходах механики сплошных гетерогенных сред [2] и теории фильтрационного горения [1]; она является комбинацией и модификацией разработанных ранее двух моделей: модели гетерогенного горения пористых сред при принудительной и естественной фильтрации [3-5] и модели процессов в гранулированных теплоаккумулирующих материалах с фазовым переходом [6, 7]. Численный метод основан на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем.

Проведенные расчеты на примере кадмийсодержащей смеси показали, что при распространении спутной волны горения во фронте этой волны происходит расплавление и испарение содержащегося в смеси металла, после чего испарившийся металл сносится газом вперед по потоку, где газовая фаза охлаждается. В результате этого перед волной реакции, где температура газа падает, происходит конденсация принесенного из волны

горения испарившегося металла. Этот процесс происходит в течение всего процесса движения волны горения по объекту, в результате чего перед фронтом волны реакции происходит значительное накопление металла (повышение его концентрации).

Таким образом, показано, что посредством фильтрационного горения можно эффективно обогащать металлосодержащие среды, повышая в них концентрацию редких металлов в десятки раз и этим многократно увеличивая рентабельность дальнейшего извлечения данных металлов традиционными способами.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 18-29-24029-МК).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояния исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988.
2. Нигматуллин Р.И. Основы механики гетерогенных сред, Москва: Наука, 1978.
3. Lutsenko N.A. Modeling of heterogeneous combustion in porous media under free convection // Proceedings of the Combustion Institute. 2013. Vol. 34, No. 2. P. 2289-2294.
4. Левин В.А., Луценко Н.А. Двумерные течения газа при гетерогенном горении твердых пористых сред // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476, №1. С. 30-34.
5. Lutsenko N.A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // Combustion Theory and Modeling. 2018. Vol. 22. No. 2. P. 359-377.
6. Левин В.А., Луценко Н.А., Фецов С.С. Моделирование движения газа через слой гранулированного теплоаккумулирующего материала с фазовым переходом // Доклады Академии наук. 2018. Т. 479, № 4. С. 386-389.
7. Lutsenko N.A., Fetsov S.S. Influence of gas compressibility on gas flow through bed of granular phase change material // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 130. P. 693-699.