

ТЕПЛООБМЕН ГАЗА ПРИ ГЕТЕРОГЕННОМ ГОРЕНИИ ТВЕРДЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД

Е.В. Амосова, К.С. Кузнецов

*Институт прикладной математики ДВО РАН
690041, Владивосток, Россия
Дальневосточный федеральный университет
690091, Владивосток, Россия,*

Проведен численно-аналитический анализ двухтемпературной модели горения газа в твердой пористой среде с очагами гетерогенного горения при вынужденной фильтрации. В модели учтены теплообмен между твердым каркасом и газом, изменения объема и массы фаз при взаимодействии, наличие диффузии окислителя. Процессы горения описываются одностадийной химической реакцией первого порядка. Рассматривается неподвижный пористый объект, имеющий непроницаемые нетеплопроводные боковые стенки и открытый снизу и сверху. Холодный газ может втекать в пористый объект и вытекать из него через открытые границы. Твердое пористое вещество состоит из горючего компонента, инертного компонента и твердых продуктов реакции, при этом твердый горючий материал превращается в газовые и твердые продукты реакции в результате взаимодействия с газообразным окислителем.

При исследовании фильтрационного горения газа возможно использование объемно-усредненной модели [1], то есть используются эффективные (усредненные по объему) теплофизические характеристики пористого каркаса и газа, а межсредовое взаимодействие описывается коэффициентом теплообмена.

Математическая модель строится на уравнениях баланса тепла в твердой и газовой фазах, переноса массы газовых компонентов, уравнениях непрерывности, фильтрационной гидродинамики и состояния газа [2]. Для формирования источниковых членов уравнений баланса тепла и массы записываются уравнения химической кинетики рассматриваемых газовых компонентов [3], [1], формулируются граничные условия.

Система дифференциальных уравнений, описывающая динамику теплопроводного газа в пористой среде, является нелинейной смешанной гипербола-параболической системой уравнений. Кроме того, для замыкания системы используются уравнения в обыкновенных производных.

В общем случае данная задача не может быть решена аналитически. Для ее решения предлагается использовать численно-аналитический метод конечных элементов, реализуемый в программной среде FreeFem++.

При моделировании системы с непрерывным временем системой с дискретным временем в уравнениях энергии, концентрации окислителя и в уравнении неразрывности используется обратный метод Эйлера первого порядка [4], а уравнение концентрации, после замены переменной, преобразуется с помощью прямого метода Эйлера [4].

В данном случае тепловые характеристики среды зависят от температуры, в этом смысле все уравнения входящие в систему являются нелинейными, причем нелинейность носит немонотонный характер.

Мы будем исследовать линеаризованную модель, которая характеризуется тем, что решение на новом временном слое находится из решения линейной разностной задачи, коэффициенты при производных берутся с прошлого временного слоя, а для линеаризации нелинейного слагаемого, стоящего в правой части уравнения описывающего окисле-

ние реакции применяется модифицированный метод Ньютона [4]. Кроме того, уравнение неразрывности заменяется более регулярным уравнением при помощи добавления эллиптического слагаемого с параметром регуляризации.

Отметим, что двумерные движения газа при гетерогенном горении твердых пористых сред были численно исследованы [5], [6], где разработан численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем. Преимуществом данного метода является то, что выбор неявных схем позволяет моделировать достаточно большое время горения при минимальных временных затратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нигматулин Р.И.** Основы механики гетерогенных сред. Москва: Наука, 1978.
2. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа, Москва: Дрофа, 2003.
3. **Гремячкин В.М.** Гетерогенное горение частиц твердых топлив, Москва:Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2015.
4. **Калиткин Н.Н., Корякин П.В.** Численные методы в двух книгах. Методы математической физики, Москва: Издательский центр «Академия», 2013.
5. **Левин В.А., Луценко Н.А.** Двумерные течения газа при гетерогенном горении твердых пористых пород // Доклады академии наук. 2018. Т. 476, № 1. С. 30–34.
6. **Lutsenko N. A.** Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // Combustion Theory and Modelling. 2018. V. 22, Issue 2. P. 359–377.