

О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ЧЕРЕЗ ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ПОРИСТЫЕ ОБЪЕКТЫ С ИСТОЧНИКАМИ ГЕТЕРОГЕННОГО ГОРЕНИЯ ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

К.Г. Боровик^{1,2}, Н.А. Луценко^{1,2}

¹*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
690041, Владивосток, Россия*

²*Дальневосточный федеральный университет, 690091, Владивосток, Россия*

Гетерогенное горение пористых сред встречается во многих природных и технологических процессах [1], например, при горении торфяников, завалов разрушенных зданий и сооружений, полигонов твердых бытовых отходов, а также при сжигании твердых топлив. В настоящей работе рассматривается гетерогенное горение пористого осесимметричного объекта в условиях принудительной фильтрации. Математическая модель процесса основана на идее двух взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [2] и включает в себя уравнения притока тепла для твердой среды и газа, уравнение движения, уравнение неразрывности, уравнение состояния совершенного газа. В уравнении притока тепла для твердой среды учитывается межфазный теплообмен, интенсивность которого полагается пропорциональной разности температур твердой и газообразной сред, а также теплопроводность и тепловыделение, пропорциональное скорости химической реакции. В уравнении притока тепла для газа учитывается теплопроводность газа и межфазный теплообмен. Уравнение движения газа имеет вид уравнения сохранения импульса для пористых сред. Уравнение движения для твердой среды вырождается, так как она неподвижна. В работе [3] показано, что учет температурной зависимости динамической вязкости может влиять на решение задачи нестационарного течения газа через пористые тепловыделяющие среды не только количественно, но и качественно, поэтому в настоящей работе динамическая вязкость газа зависит от температуры по формуле Сазерленда.

На открытых границах пористого объекта, через которые газ входит в объект, известны давление газа, температура газа и массовая концентрация окислителя. На остальных открытых границах известны давление газа и условия для температуры газа и концентрации окислителя. Известны также условия теплообмена на всех границах объекта. Расход и скорость фильтрации газа неизвестны и должны определяться в ходе решения задачи.

Для решения задачи используется численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных уравнений. Этот метод является результатом развития численного метода, применяемого при исследовании одномерных и плоских течений газа при гетерогенном горении пористых сред [4-6]. Уравнения притока тепла, движения и концентрации преобразуются в явные конечно-разностные уравнения, из которых определяются температуры газа и твердой фазы, скорость газа и массовая концентрация окислителя. Уравнение неразрывности преобразуется в неявное конечно-разностное уравнение, из которого методом прогонки с учетом уравнения состояния совершенного газа находится давление газа.

В работе численно исследовано гетерогенное горение осесимметричного пористого объекта, через который движется газ в условиях принудительной фильтрации, когда зона зажигания расположена в различных областях объекта. На рисунках 1 и 2 показаны температура твердой среды и поле скоростей газа через определенное время после

инициации горения в случае, когда зона зажигания находится в центре нижнего основания и по бокам у нижнего основания, соответственно, при параметрах задачи, используемых в работе [6].

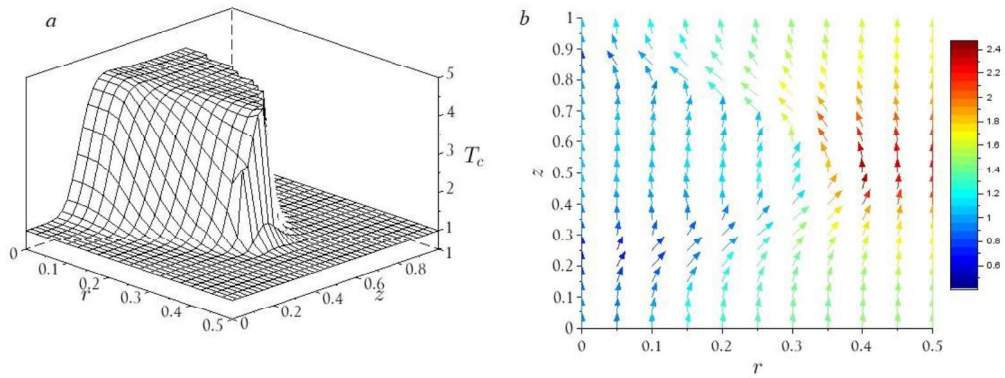


Рис. 1. Температура твердой среды (а) и поле скоростей газа (б) через 7 часов после инициации горения при расположении зоны зажигания в центре нижнего основания.

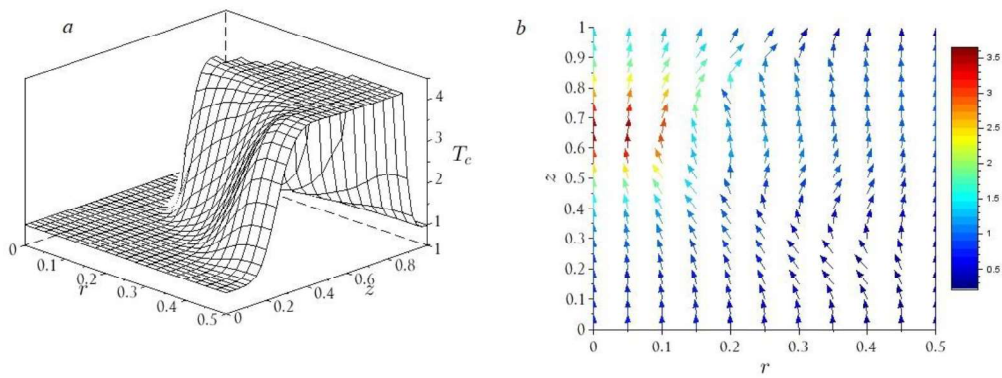


Рис. 2. Температура твердой среды (а) и поле скоростей газа (б) через 7 часов после инициации горения при расположении зоны зажигания по бокам у нижнего основания.

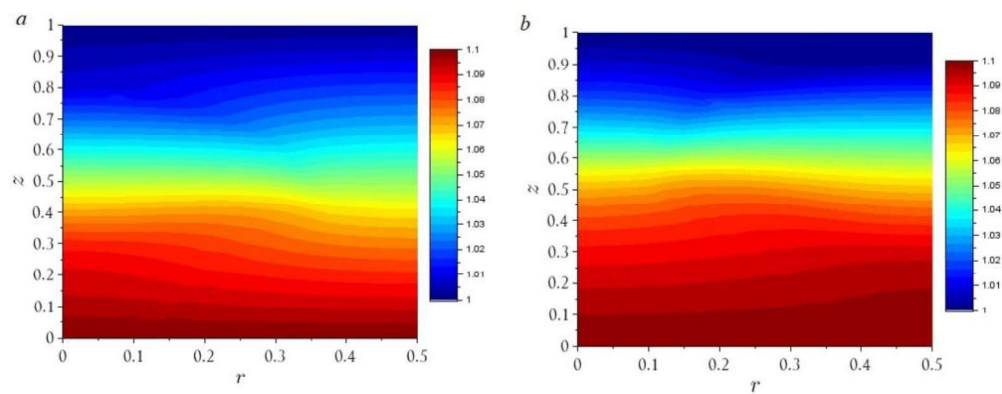


Рис. 3. Давление газа через 7 часов после инициации горения при расположении зоны горения в центре нижнего основания (а) и по бокам у нижнего основания (б).

Так же, как и в плоском случае, при гетерогенном горении пористого осесимметричного объекта газ стремится огибать нагретые зоны и стремится течь по более холодным областям.

На рисунке 3 показано давление газа для аналогичных случаев расположения зоны зажигания. Из рисунка видно, что, зависимость давления от радиуса пористого объекта немонотонная. Из-за этого при движении газа снизу вверх по объекту поток может отклоняться от вертикальной оси в разные стороны.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы Президиума РАН № 2 «Механизмы обеспечения отказоустойчивости современных высокопроизводительных и высоконадежных вычислений» и программы Президиума РАН № 25 «Приоритетные научные исследования в интересах комплексного развития Дальневосточного отделения РАН». Вычисления проводились на оборудовании ЦКП "Дальневосточный вычислительный ресурс" ИАПУ ДВО РАН.

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. **Нигматулин Р.И.** Основы механики гетерогенных сред, Москва: Наука, 1978.
3. **Левин В.А., Луценко Н.А.** Течение газа через пористую тепловыделяющую среду при учете температурной зависимости вязкости газа // Инженерно-физический журнал. 2006. Т.79 (1). С. 35-40.
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.** Modeling of heterogeneous combustion in porous media under free convection // Proceedings of the Combustion Institute. 2013. Vol. 34, No. 2. P. 2289-2294.
6. **Lutsenko N.A.** Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // Combustion Theory and Modeling. 2018. V. 22. No. 2. P. 359-377.