

УДК 532.546

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОГО ГОРЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОРИСТЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

К. Г. Боровик<sup>1,2</sup>, Н. А. Луценко<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 690041 Владивосток<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, 690922 Владивосток, ksushareno@mail.ru

Для моделирования гетерогенного горения осесимметричных пористых объектов предложена численная модель, которая позволяет изучать процессы как при принудительной фильтрации, так и в условиях естественной конвекции. Исследовано влияние расположения зоны зажигания на горение в цилиндрическом пористом реакторе. Показано, что при принудительной фильтрации процесс аналогичен плоскому случаю: волна горения движется вверх и вбок от очага зажигания, полностью выжигая твердое горючее вещество, при этом газ стремится обогнуть горячие зоны и течь по более холодным областям. В условиях естественной конвекции, как и в плоском случае, в начальный момент времени в окрестности очага горения возникают вихревые течения газа, которые существенно влияют на приток окислителя в зону реакции. При этом направление распространения волн горения в осесимметричном случае может существенно отличаться от таковых в плоском случае.

Ключевые слова: пористые среды, фильтрация газа, гетерогенное горение, численное моделирование, метод конечных разностей.

DOI 10.15372/FGV20220304

## ВВЕДЕНИЕ

Фильтрационное горение, или горение в пористых средах, широко распространено в природе и различных технологических процессах [1]. Частным случаем фильтрационного горения является гетерогенное горение пористых сред, при котором окислитель и топливо находятся в разных фазах: в этом случае окислителем обычно выступает кислород, и реакция между ним и твердым топливом происходит на поверхности пор. Торфяные пожары, горение угольных отвалов, самовозгорание полигонов твердых бытовых отходов могут моделироваться как горение твердых пористых сред. Тление торфяников приносит большой урон экологии и экономике, значительно увеличивает глобальную эмиссию парниковых газов [2–5]. Для предотвращения, ликвидации, уменьшения последствий таких пожаров необходимо исследовать процессы течения газа в пористых средах с очагами гетерогенного горения.

Горение в пористых средах может протекать как при естественной конвекции, так и при принудительной фильтрации. В первом

случае течение газа через пористую среду происходит естественным путем, во втором случае продув газа обеспечивается действием внешнего нагнетательного устройства [1]. Множество работ посвящено экспериментальному [4, 6–10] и численному [11, 12] исследованию горения твердых пористых сред. В [11] проведено численное исследование устойчивости двумерной встречной волны фильтрационного горения твердого топлива в прикладном пакете OpenFOAM. Показано, что при определенных условиях волна горения становится неустойчивой, и определен диапазон ключевых параметров, которые соответствуют стабильному плоскому фронту горения. Для исследования фундаментальных характеристик медленного беспламенного гетерогенного горения — тления — часто используют пенополиуретан из-за его широкой распространенности. Экспериментальное исследование спутного и встречного тления пенополиуретана выполнено в работах [7, 8]. В [9] предложена вычислительная модель для описания тлеющего горения и предсказания направления его распространения. Во многих работах по гетерогенному горению пористых сред в качестве объекта исследования используется торф, так как до сих пор торфя-

ные пожары представляют большую опасность для человека и окружающей среды. Серия экспериментов с бореальным торфом была выполнена в [4], определено содержание влаги в сухом веществе, при котором происходит воспламенение торфа. Экспериментальному исследованию загорания образцов торфа при различной начальной температуре инициирования при естественной конвекции посвящена работа [6]. В [10] проведено экспериментальное исследование горения гранулированной шихты, в частности влияния размера гранул на этот процесс. В работах [13, 14] предложены модели и численно изучены двумерные (плоские) нестационарные течения газа при гетерогенном горении пористых сред в условиях естественной конвекции и принудительной фильтрации. Показано, что в таких процессах могут возникать сложные течения газа: при принудительной фильтрации газ стремится обтекать разогретые области, а при естественной конвекции наблюдаются вихревые течения вблизи зоны реакции.

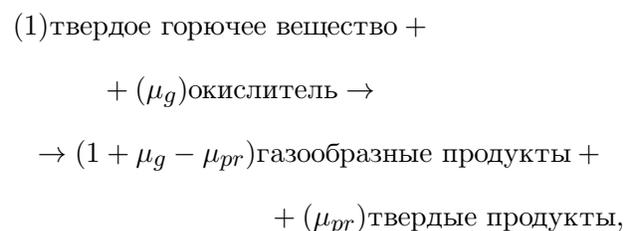
Заметим, что в настоящее время продолжают появляться новые применения фильтрационного горения в технологических процессах. В [15] предложена математическая модель для описания нестационарного горения пористых металлосодержащих смесей с учетом фазовых переходов, а в [16, 17] показана возможность концентрации металла в узкой части пористого реактора при движении волны горения, что может использоваться в новых технологиях извлечения редких и ценных металлов из отходов угле- и нефтедобычи методом фильтрационного горения. В [12] выполнены термодинамические расчеты для определения равновесного состава продуктов, образующихся при фильтрационном горении металлосодержащих сред. В режиме фильтрационного горения осуществляют синтез моносилана [18], который требуется для получения высокочистого кремния. Фильтрационное горение может использоваться для газификации углеродных материалов [19]. Математическое моделирование процесса газификации пылевидного топлива в реакторе фильтрационного горения и оценка характеристик этого процесса проведены в [20]. Гетерогенное горение в фильтрационном режиме может использоваться как экологически чистый способ получения энергии из отходов, особенно с большим содержанием влаги, таких как осадки сточных вод [21, 22], а также применяться для уменьшения объема свалок [23].

Глеющее горение также используется для восстановления загрязненной почвы [24]. Следует заметить, что с точки зрения моделирования близкими к процессам фильтрационного горения твердых пористых сред являются процессы фильтрационного горения газа в инертной пористой среде [25].

В настоящей работе рассматривается нестационарное осесимметричное течение газа при гетерогенном горении пористых сред в условиях естественной конвекции и принудительной фильтрации. Описано развитие разработанных ранее [13, 14] математической модели и численного метода на осесимметричный случай. Исследованы процессы горения при различном расположении зоны загорания, проведено сравнение полученных результатов расчетов с расчетами в плоской постановке.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Рассмотрим пористый объект цилиндрической формы высотой  $H$  и радиусом  $R_1$ , который имеет как проницаемые, так и непроницаемые границы. В настоящей работе ограничимся случаем, когда боковые стенки объекта непроницаемы, а нижнее и верхнее основания открыты. В результате свободной или вынужденной конвекции в объект через открытые границы может втекать и вытекать газ. Будем полагать, что твердая среда состоит из горючего компонента, инертного компонента и твердых продуктов реакции. В объекте в результате инициирования загорания возникает химическая реакция между твердой средой и газом, которая описывается следующим образом:



где  $\mu_g$  и  $\mu_{pr}$  — массовые стехиометрические коэффициенты для окислителя и твердых продуктов реакции соответственно.

Математическая модель рассматриваемого процесса основывается на предположении о двух взаимодействующих взаимопроникающих континуумах [26]. Она включает в себя уравнения энергии газа и энергии твердой среды,

уравнение движения газа, уравнение неразрывности, уравнение состояния совершенного газа и уравнение концентрации окислителя. В уравнении энергии твердой среды учитываются межфазный теплообмен с газом, тепловыделение, которое полагается пропорциональным скорости химической реакции, и теплопроводность твердой фазы:

$$\begin{aligned} & (\rho_{cf}c_{cf} + \rho_{ci}c_{ci} + \rho_{cpr}c_{cpr})\frac{\partial T_c}{\partial t} = \\ & = -\alpha(T_c - T_g) + Q\rho_{cf}W + \\ & + (1 - a_g)\lambda_c \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение энергии газа включает в себя межфазный теплообмен с твердой средой и теплопроводность газа:

$$\begin{aligned} \rho_g c_g \left( \frac{\partial T_g}{\partial t} + v_r \frac{\partial T_g}{\partial r} + v_z \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) = \alpha(T_c - T_g) + \\ + a_g \lambda_g \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Для описания движения газа используется уравнение сохранения импульса для пористых сред, которое является обобщением классического уравнения Дарси и может применяться в большем диапазоне чисел Рейнольдса:

$$\begin{aligned} \rho_g [1 + \chi(1 - a_g)] \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \\ = -a_g \frac{\partial p}{\partial r} - a_g^2 \frac{\mu}{k_1} v_r - (1 - \mu_{pr})\rho_{cf}W v_r, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho_g [1 + \chi(1 - a_g)] \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \\ = -a_g \frac{\partial p}{\partial z} - \rho_g g - a_g^2 \frac{\mu}{k_1} v_z - \\ - (1 - \mu_{pr})\rho_{cf}W v_z. \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнении неразрывности учитывается приток массы в результате химической реакции. Газ полагается совершенным:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_r)}{\partial r} + \frac{\rho_g v_r}{r} + \frac{\partial(\rho_g v_z)}{\partial z} = \\ = (1 - \mu_{pr})\rho_{cf}W, \quad p = \frac{\rho_g R T_g}{a_g M}. \end{aligned} \quad (5)$$

В уравнении концентрации окислителя учитываются его отток в результате химической реакции и диффузия:

$$\begin{aligned} \rho_g \left( \frac{\partial C}{\partial t} + v_r \frac{\partial C}{\partial r} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \\ = \frac{\partial(\rho_g D_g)}{\partial r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_g D_g)}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z} + \\ + \rho_g D_g \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - \\ - \mu_{pr} \rho_{cf} W - (1 - \mu_{pr})\rho_{cf} W C. \end{aligned} \quad (6)$$

Процесс горения описывается одностадийной химической реакцией первого порядка по отношению к каждому компоненту (твердому и газообразному). В модели учитывается изменение массы твердого горючего компонента и продуктов реакции:

$$\begin{aligned} W = (1 - \eta) C k \exp \left( - \frac{E}{R T_c} \right), \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = W, \\ \rho_{cf} = (1 - \eta)\rho_{cf}0, \quad \rho_{cpr} = \mu_{pr} \rho_{cf}0 \eta. \end{aligned} \quad (7)$$

В модели также учитывается изменение пористости среды и коэффициента диффузии газа. Динамическая вязкость газа полагается зависящей от температуры по формуле Сазерленда, так как в [27] было показано, что такой учет температурной зависимости вязкости газа влияет на решение как количественно, так и качественно:

$$\begin{aligned} a_g = a_{g0} + (a_{cf}0 - a_{cpr}End)\eta, \\ D_g = D_{g0} \left( \frac{T_g}{273} \right)^b, \quad \mu = c_{s1} \frac{T_g^{1.5}}{c_{s2} + T_g}. \end{aligned} \quad (8)$$

Заметим, что все характеристики рассматриваемого процесса полагается симметричными относительно центральной оси пористого объекта. В уравнениях приняты следующие обозначения:  $a$  — объемная концентрация,  $b$  — показатель степени в выражении для коэффициента диффузии,  $C$  — массовая концентрация окислителя,  $c$  — теплоемкость,  $c_{s1}$  и  $c_{s2}$  — константы в формуле Сазерленда,  $D_g$  — коэффициент диффузии газа,  $E$  — энергия активации,  $g$  — ускорение свободного падения,  $k$  — предэкспоненциальный множитель в выражении для скорости химической реакции,  $p$  — давление газа,  $Q$  — тепловыделение реакции,

$r$  — радиальная координата,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $t$  — время,  $T$  — температура,  $v_g$  — скорость газа,  $W$  — скорость химической реакции,  $z$  — аксиальная координата,  $\alpha$  — константа, определяющая интенсивность межфазного теплообмена,  $\eta$  — степень превращения твердого горючего компонента,  $\lambda$  — теплопроводность,  $\mu$  — динамическая вязкость газа,  $\rho$  — эффективная плотность (произведение истинной плотности и объемной концентрации),  $\chi$  — коэффициент, учитывающий инерционное взаимодействие фаз при их ускоренном относительном движении [26]. Нижние индексы означают: 0 — начальный момент времени,  $c$  — твердая фаза,  $End$  — конечный момент времени,  $i$  — инертный компонент,  $f$  — топливо,  $g$  — газ,  $pr$  — продукты реакции.

Граничные условия для данной системы уравнений имеют следующий вид. На боковых границах пористого объекта отсутствуют тепловые потоки. На открытой границе, через которую газ входит в объект, задаются давление, температура газа, массовая концентрация окислителя и условие теплоотдачи твердой среды в виде закона Ньютона — Рихмана. На выходе из объекта задается давление, так как газ выходит в атмосферу, нулевой тепловой поток в газовой фазе и условие теплоотдачи твердой среды в виде закона Ньютона — Рихмана. На оси симметрии вводятся дополнительные условия равенства нулю нормальной компоненты скорости газа, а также равенства нулю первых производных по нормали температур газа и твердой среды и массовой концентрации окислителя. Скорость и расход газа на входе и выходе из объекта неизвестны и должны определяться в ходе решения задачи. Таким образом, граничные условия принимают вид:

$$p|_{x \in G_1} = p_0;$$

$$\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial n} \Big|_{x \in G_1} = \beta(T_g|_{x \in G_1} - T_c|_{x \in G_1});$$

$$T_g|_{x \in G_1} = T_{g0} \text{ и } C|_{x \in G_1} = C_0,$$

$$\text{если } \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} \leq 0;$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial n} \Big|_{x \in G_1} = 0 \text{ и } \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{x \in G_1} = 0, \quad (9)$$

$$\text{если } \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} > 0;$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial n} \Big|_{x \in G_2} = 0 \text{ и } \frac{\partial T_g}{\partial n} \Big|_{x \in G_2} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{x \in G_2} = 0, \quad \mathbf{v}_g|_{x \in G_2} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_2} = 0;$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial n} \Big|_{r=0} = 0, \quad \frac{\partial T_g}{\partial n} \Big|_{r=0} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{r=0} = 0, \quad \mathbf{v}_g|_{r=0} \cdot \mathbf{n}|_{r=0} = 0,$$

где  $G_1$  — границы, открытые в атмосферу,  $G_2$  — непроницаемые границы объекта;  $n$  — внешний вектор нормали к границам  $G_1$  или  $G_2$ ;  $C_0, p_0, T_{g0}$  — массовая концентрация окислителя, давление и температура газа на входе в объект;  $\beta$  — коэффициент теплоотдачи.

Для решения системы (1)–(8) с граничными условиями (9) предложен численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных уравнений, который является развитием метода для моделирования плоских течений газа при гетерогенном горении пористых сред [13, 14]. Суть метода состоит в следующем: уравнения энергии для твердой среды и газа, уравнение движения и уравнение концентрации окислителя заменяются явными конечно-разностными уравнениями, а уравнение неразрывности заменяется неявным конечно-разностным уравнением. Получающаяся система конечно-разностных уравнений аппроксимирует исходную систему (1)–(8) со вторым порядком точности по пространству и первым порядком по времени. Краевые условия для сеточных функций получаются из (9) при использовании конечных разностей второго порядка для аппроксимации производных по координатам. Из конечно-разностных уравнений энергии газа, энергии твердой среды, движения и концентрации окислителя находятся соответственно температуры газа и твердой среды, скорость газа и массовая концентрация окислителя. После этого из конечно-разностного уравнения неразрывности методом прогонки с учетом уравнения состояния совершенного газа находятся плотность и давление газа. Остальные неизвестные определяются тривиально.

Данная задача была решена на последовательности сгущающихся сеток с шагом по пространству  $h = 0.025, 0.01$  и  $0.005$ . Обнаружено, что для всех сеток направления распространения фронта горения не отличаются, а с

уменьшением шага сетки количественные различия между соответствующими параметрами уменьшаются. Для анализа сходимости решения рассматривались максимумы температуры твердой среды на различных сетках. Расчеты показали, что при уменьшении шага  $h$  в два раза разница двух решений также уменьшается примерно в два раза. Таким образом, реальный порядок сходимости численного метода близок к 1. В дальнейшем в данной работе все результаты приведены для расчетов на сетке с шагом  $h = 0.01$ .

### ГЕТЕРОГЕННОЕ ГОРЕНИЕ ПОРИСТЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Вначале рассмотрим случай принудительной фильтрации, когда воздух нагнетается через нижнюю поверхность объекта. Пусть до начального момента времени в объекте отсутствует движение воздуха, а в начальный момент одновременно начинается нагнетание воздуха через нижнее основание и инициируется горение посредством резкого увеличения температуры твердой среды в области зажигания до значения  $T_{c01}$ . Здесь и далее будем полагать, что зона зажигания имеет форму цилиндра радиусом  $L$  или кольца шириной  $L$ , высота зоны равна также  $L$ . Будем рассматривать несколько вариантов расположения зоны зажигания: в центре нижнего основания, в центре объекта, в центре верхнего основания, а также по бокам у нижнего основания объекта. В данной работе для демонстрации основных особенностей гетерогенного горения пористых сред будем по аналогии с [14] использовать следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} a_{g0} &= 0.3, \quad a_{cf0} = 0.1, \quad a_{cprEnd} = 0, \quad b = 1.724, \\ H &= 10 \text{ м}, \quad R_1 = 5 \text{ м}, \quad L = 1 \text{ м}, \\ \rho_{cf0} &= 1.1 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3, \quad \rho_{ci} = 6.6 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3, \\ c_{cf} &= 1.84 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \\ c_{ci} &= 1.84 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \\ c_g &= 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad \alpha = 10^3 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \\ \beta &= 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad \chi = 0.5, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\lambda_c = 1.2 \text{ Дж/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \quad \lambda_g = 0.034 \text{ Дж/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{с)},$$

$$g = 9.81 \text{ м/с}^2, \quad k_1 = 10^{-8} \text{ м}^2,$$

$$c_{s1} = 1.458 \cdot 10^{-6} \text{ кг/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{0.5}), \quad c_{s2} = 110.4 \text{ К},$$

$$k = 1.374 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad E = 110 \cdot 10^3 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)},$$

$$M = 2.993 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}, \quad \mu_g = 2.667, \quad \mu_{pr} = 0,$$

$$D_{g0} = 1.82 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Граничные условия получим из (9) при значениях параметров

$$T_{g0} = 300 \text{ К}, \quad C_0 = 0.23, \quad p_0 = 1.1 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$p_h = 10^5 \text{ Па}, \quad T_{c01} = 600 \text{ К}.$$

На рис. 1 показаны степень превращения твердого горючего компонента, температура твердой среды и поле скоростей газа в различные моменты времени, когда зона зажигания располагается в центре нижнего основания. Как и в плоском случае [13, 14], волна горения движется одновременно вверх и вбок, полностью выжигая твердое горючее вещество, при этом часть пористого объекта, расположенная ниже определенной линии, остается невыгоревшей, так как через нее не проходила волна горения. В рассматриваемом случае процесс горения заканчивается через  $t = 13$  ч, поэтому рис. 1,б,г,е соответствуют моменту времени, при котором горение уже закончилось и происходит медленное остывание объекта. Из рис. 1,в,г видно, что направление течения газа совпадает с направлением распространения волны горения, поэтому наблюдаемая волна горения является спутной. Газ стремится обогнуть горячую зону в центральной части и течь по более холодным боковым областям пористого объекта. Такое поведение газа связано с температурной зависимостью вязкости: с повышением температуры газа его вязкость увеличивается, из-за чего повышается сила сопротивления и газу труднее двигаться в разогретой области. Наибольшей скорости газ достигает в окрестности той области волны горения, которая наиболее всего удалена от центральной оси объекта, так как в этой зоне сходятся потоки газа, обтекающего горячую зону. На рис. 1,г для температуры твердой среды наблюдаются «прогибы» линии, отделяющей

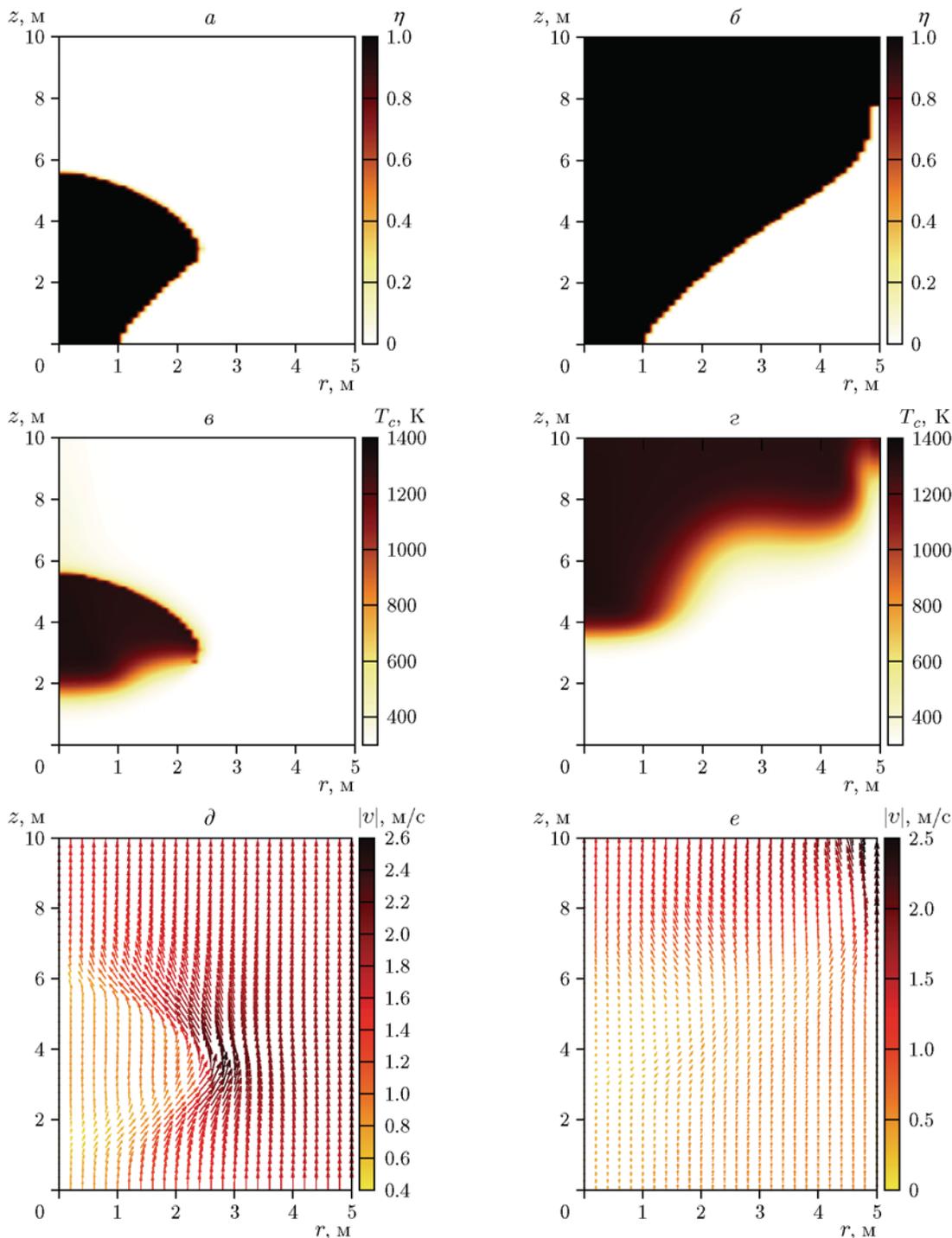


Рис. 1. Степень превращения твердого горючего вещества (*a*, *б*), температура твердой среды (*в*, *г*) и поле скоростей газа (*д*, *е*) через  $t = 5$  (*a*, *в*, *д*) и 13 ч (*б*, *г*, *е*) после зажигания при расположении зоны зажигания в центре нижнего основания объекта

горячую область от холодной, которые могут быть связаны с особенностями динамики газа. В более ранние моменты времени скорость газа в окрестности данной линии различна, а так

как в областях с более высокой скоростью газа охлаждение идет быстрее, то остывание выгоревшей области объекта происходит неравномерно, что приводит к упомянутым «проги-

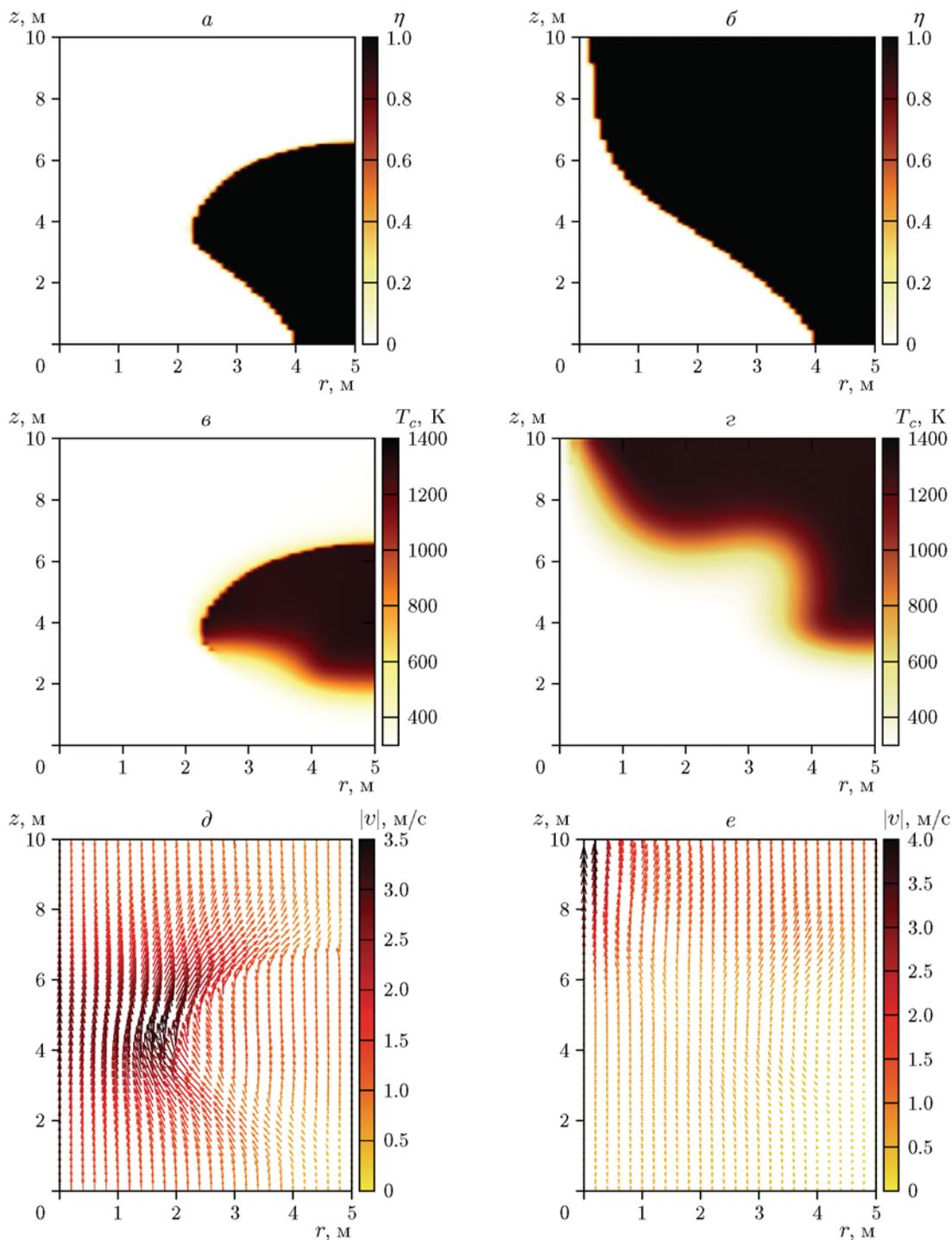


Рис. 2. Степень превращения твердого горючего вещества (*a, б*), температура твердой среды (*в, г*) и поле скоростей газа (*д, е*) через  $t = 5$  (*a, в, д*) и 12 ч (*б, г, е*) после зажигания при расположении зоны зажигания по бокам у нижнего основания объекта

бам». Температура газа довольно близка к температуре твердой среды, поэтому аналогичная картина наблюдается и для температуры газа. Давление газа убывает с высотой, а плотность

газа значительно уменьшается в горячей области объекта, при этом в зоне реакции появляются участки локально пониженных давления и плотности газа.

Случай, когда зона зажигания располагается в центре объекта, совпадает с плоским случаем: спутная волна движется вверх и вбок, при этом по бокам от зоны зажигания и под ней находится невыгоревшая область пористого объекта. Принудительно нагнетаемый газ при прохождении через объект стремится течь по более холодным областям, огибая горячие. При этом наибольшая скорость газа наблюдается в том месте, где сходятся потоки газа, огибающего горячую зону. Давление газа также убывает с высотой, а плотность газа резко уменьшается в разогретой области объекта.

Рис. 2 отображает степень превращения твердого горючего компонента, температуру твердой среды и поле скоростей газа в разные моменты времени, когда зона зажигания располагается по бокам у нижнего основания объекта. Как видно из рисунка, движение волны горения очень похоже на описанный выше случай расположения зоны зажигания в центре нижнего основания: волна горения спутная, она движется вверх и одновременно вбок, достигая верхнего основания. Отличие здесь в том, что движение волны горения вбок происходит по направлению к оси объекта, а не к боковым стенкам, так как у боковых стенок в данном случае находилась зона инициирования зажигания. Все остальные характеристики процесса — температура твердой среды и газа, давление, плотность и скорость газа — имеют те же особенности, что и в описанном выше случае.

В случае, когда зона зажигания находится в центре верхнего основания, реакция локализуется только в окрестности зоны воспламенения, горение быстро заканчивается. Спутная волна горения выжигает область воспламенения, а также может распространяться вбок, причем интенсивность движения волны к боковым стенкам тем меньше, чем сильнее газ нагнетается на входе в объект. Так как горение быстро заканчивается, основная часть объекта остается невыгоревшей, кроме небольшой зоны в окрестности зоны зажигания у верхнего основания. После окончания процесса объект быстро остывает. Температура, давление и плотность газа ведут себя аналогично случаю расположения зоны зажигания в центре нижнего основания: наибольшая температура и наименьшие давление и плотность газа наблюдаются в зоне реакции.

Далее исследуем влияние давления входящего в объект газа на размер области пол-

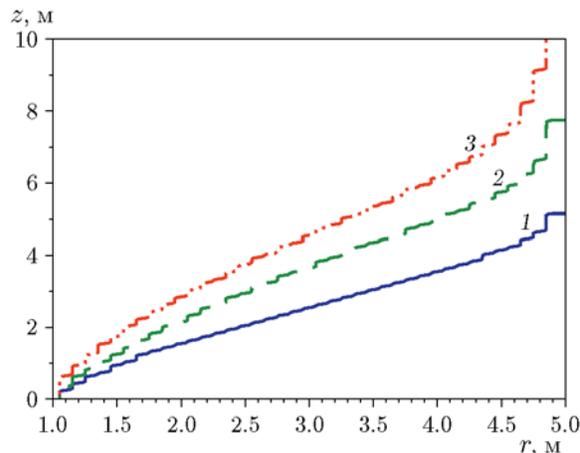


Рис. 3. Контур, ограничивающий зону выгорания твердого горючего компонента после окончания горения, при расположении зоны зажигания в центре нижнего основания объекта при давлении на входе 105 (1), 110 (2) и 120 кПа (3)

ного выгорания твердого горючего компонента в условиях принудительной фильтрации. Рассмотрим описанную выше задачу, когда зона зажигания расположена в центре нижнего основания, при разных значениях давления газа на входе в объект. На рис. 3 показаны контуры, ограничивающие выгоревший твердый горючий компонент после того, как горение в пористом объекте закончилось, при давлении на входе 105, 110 и 120 кПа. При принудительной фильтрации твердое горючее вещество выгорает полностью после прохождения через него волны горения. Но так как волна горения движется одновременно вверх и вбок, то часть пористого объекта, расположенная ниже определенной линии, остается невыгоревшей, потому что волна горения не может достичь этой части. Как видно из рисунка, чем выше давление на входе в объект, тем больше зона, через которую не проходила волна горения. Кроме этого, с увеличением давления уменьшается время процесса горения. Чем ниже давление газа на входе в объект, тем больше волна горения продвигается в сторону боковых стенок объекта. Наблюдаемая зависимость размера области полного выгорания твердого горючего компонента от давления нагнетаемого на входе в объект газа не зависит от места расположения зоны зажигания.

Таким образом, при гетерогенном горе-

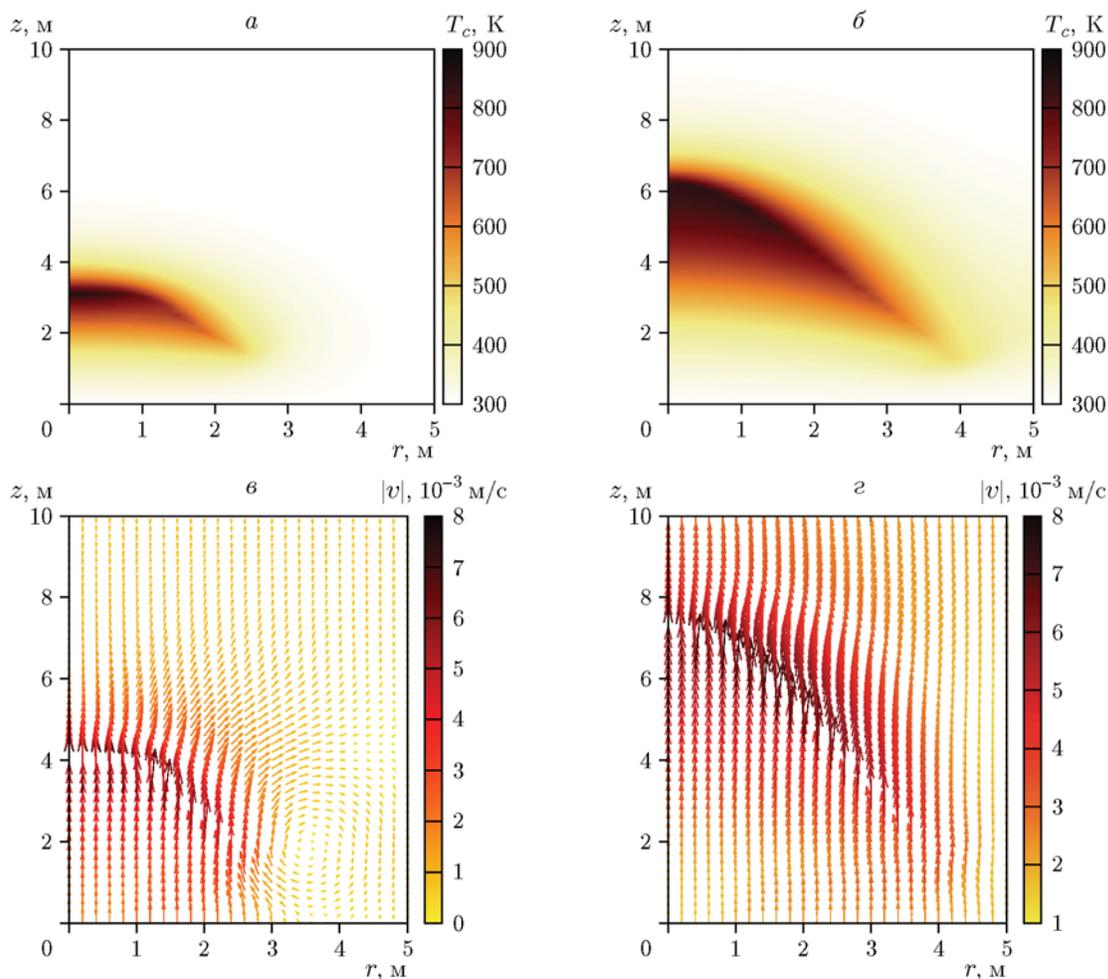


Рис. 4. Температура твердой среды (*а*, *б*) и поле скоростей газа (*в*, *г*) через  $t = 800$  (*а*, *в*) и  $1500$  ч (*б*, *г*) после зажигания, а также степень выгорания твердого горючего компонента через  $t = 800$  (*д*),  $1500$  (*е*),  $1800$  (*ж*) и  $2300$  ч (*з*) после зажигания в случае расположения зоны зажигания в центре нижнего основания объекта (начало рисунка)

нии пористых сред в условиях принудительной фильтрации основные закономерности процесса в осесимметричном и плоском случаях совпадают. Вне зависимости от расположения зоны зажигания спутная волна горения движется вверх и одновременно вбок, полностью выжигая твердое горючее вещество. Газ стремится обогнуть горячую зону и течь по более холодным областям. Давление газа убывает с высотой, а его плотность резко уменьшается в разогретой области объекта. Чем выше давление газа на входе в объект, тем меньше область, через которую проходит волна горения.

### ГЕТЕРОГЕННОЕ ГОРЕНИЕ ПОРИСТЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Далее рассмотрим случай естественной конвекции, когда отсутствует принудительное нагнетание воздуха в пористый объект, а давление газа на верхней и нижней проницаемых поверхностях объекта соответствует атмосферному давлению на заданных высотах. Пусть до начального момента времени в объекте отсутствует движение воздуха. В начальный момент инициируется горение посредством резкого увеличения температуры твер-

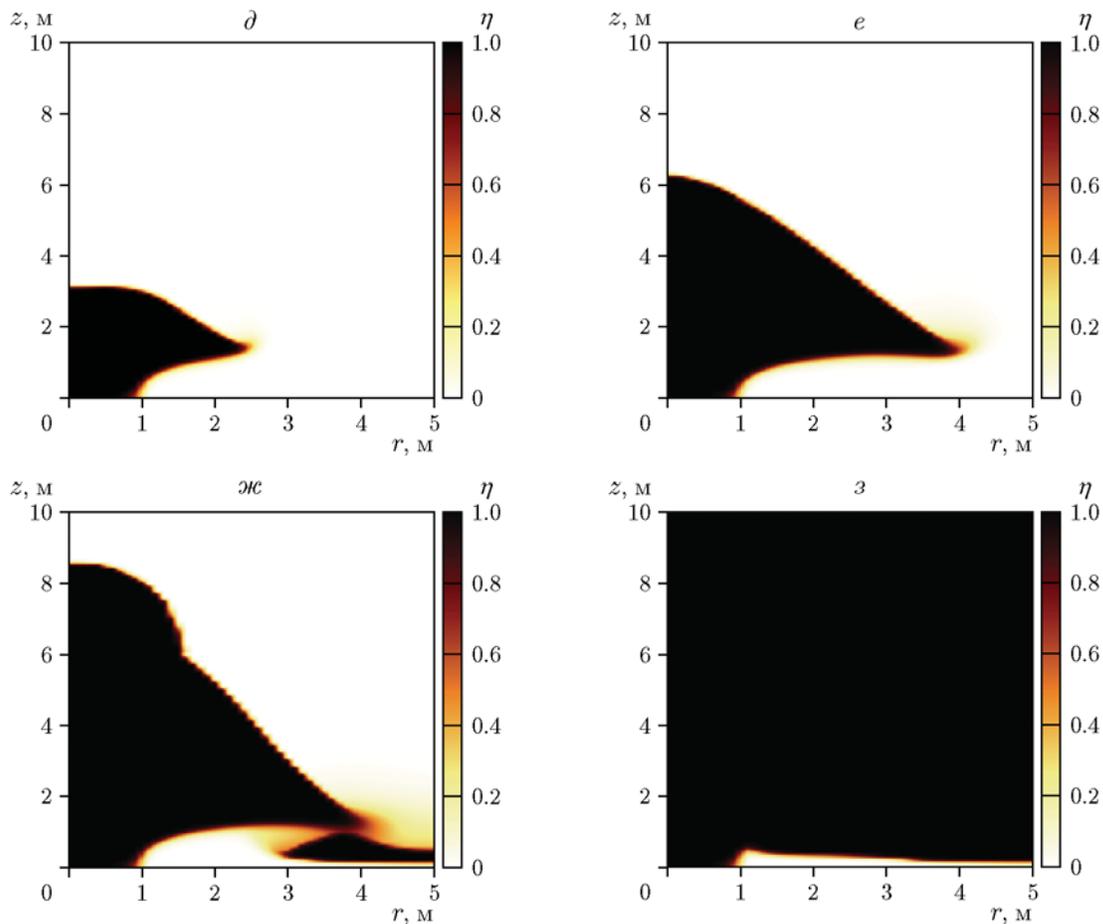


Рис. 4. Температура твердой среды (*а, б*) и поле скоростей газа (*е, з*) через  $t = 800$  (*а, е*) и  $1500$  ч (*б, з*) после зажигания, а также степень выгорания твердого горючего компонента через  $t = 800$  (*д*),  $1500$  (*е*),  $1800$  (*ж*) и  $2300$  ч (*з*) после зажигания в случае расположения зоны зажигания в центре нижнего основания объекта (окончание рисунка)

дой среды в области зажигания цилиндрической формы. Возникающие градиенты температур приводят к возникновению потоков газа. Будем рассматривать несколько вариантов расположения зоны зажигания: в центре нижнего основания, в центре объекта, а также в центре верхнего основания. Будем использовать значения параметров (10). Граничные условия получим из (9) при значениях параметров

$$T_{g0} = 300 \text{ К}, C_0 = 0.23, p_0 = 1.00118 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$p_h = 10^5, T_{c01} = 600 \text{ К}.$$

На рис. 4 изображены поля температуры твердой среды, скоростей газа и степени выгорания твердого горючего компонента в различные моменты времени в случае, когда зона

зажигания располагается в центре нижнего основания пористого объекта. Как видно из рисунка, в начальный момент времени в окрестности зоны реакции возникают вихревые течения газа, которые перемещаются вместе с потоком газа и со временем исчезают. Такие вихри влияют на приток окислителя в зону реакции, так как они приводят к тому, что через нижнюю границу газ не только втекает в объект, но и вытекает из него. В отличие от случая принудительной фильтрации, при естественной конвекции волна горения имеет сложную структуру. В начале процесса горения направление распространения волны реакции совпадает с направлением движения газа, т. е. наблюдается спутная волна горения, которая похожа на аналогичную в случае принудительной фильтрации. Волна горения распространяется одновременно вверх и вбок, полностью выжи-

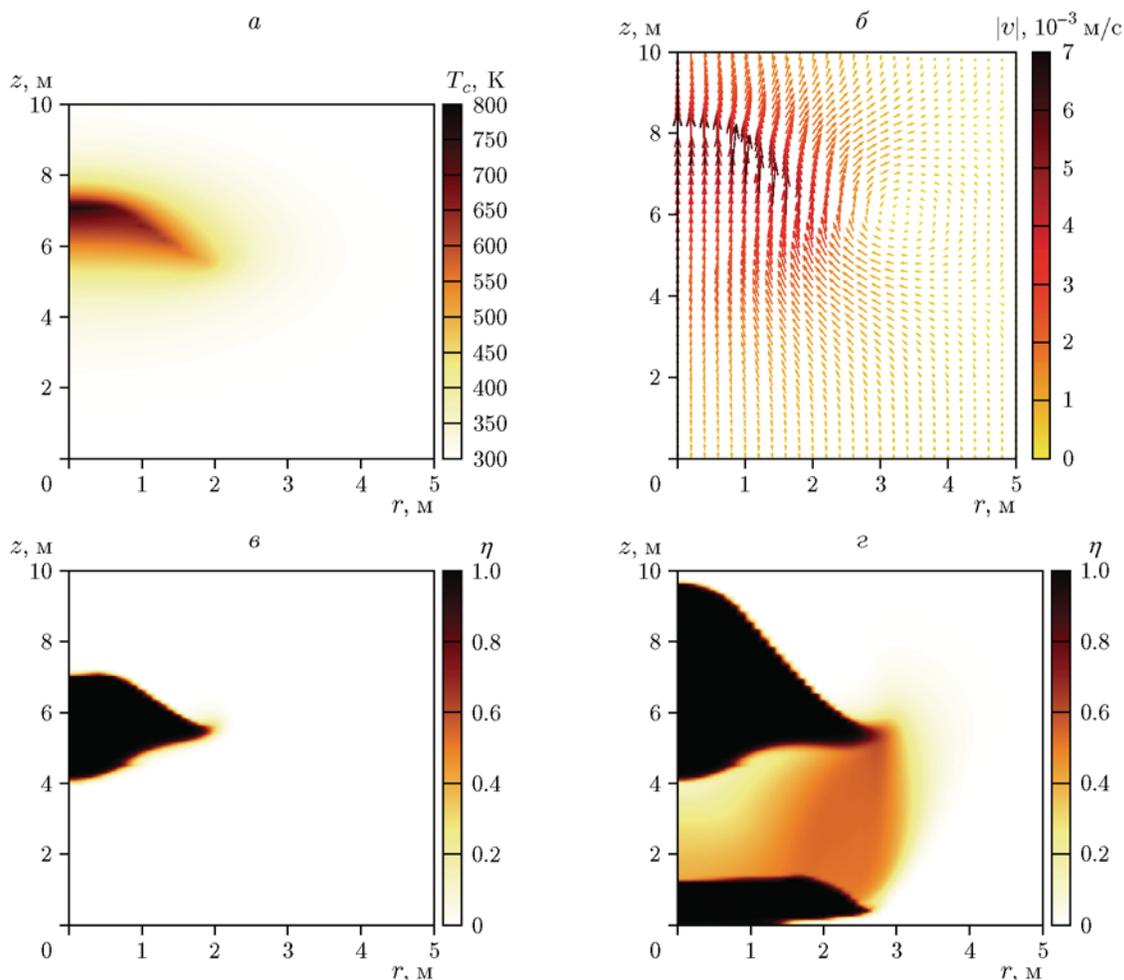


Рис. 5. Температура твердой среды (*a*) и поле скоростей газа (*б*) через  $t = 800$  ч после зажигания, а также степень выгорания твердого горючего компонента через  $t = 800$  (*в*) и  $2000$  ч (*г*) после зажигания в случае расположения зоны зажигания в центре объекта

гая твердое горючее вещество. Однако через некоторое время после зажигания в нижней части волны реакции возникает еще одна волна горения, которая движется к нижнему основанию, т. е. является встречной (рис. 4, *ж*). Эта встречная волна выжигает твердое горючее вещество не полностью, отражается от нижнего основания, переходит в спутную волну и движется в сторону верхнего основания, выжигая всё оставшееся горючее вещество. Небольшая область у нижнего основания остается невыгоревшей из-за охлаждения окружающим воздухом. При распространении спутной волны горения температура в зоне реакции и скорость волны могут возрастать, при этом, когда температура в спутной волне горения достаточно велика, в этой зоне может стать заметной колебательная неустойчивость, возникновение ко-

торой характерно для кинетически контролируемых процессов [1]. Наибольшие температуры твердой среды и газа наблюдаются к концу процесса у верхнего основания объекта. В разогретых областях объекта плотность газа существенно понижается, давление же убывает с высотой достаточно плавно. К моменту, когда твердое горючее вещество полностью выгорит, нижняя часть объекта успевает остыть.

На рис. 5 изображены температура твердой среды, поле скоростей газа и степень выгорания твердого горючего компонента в случае, когда зона зажигания располагается в центре объекта. Как видно из рисунка, в отличие от плоского случая [13, 14] сначала возникает спутная волна горения, которая движется к верхнему основанию и боковым стенкам объекта, полностью выжигая твердое горючее

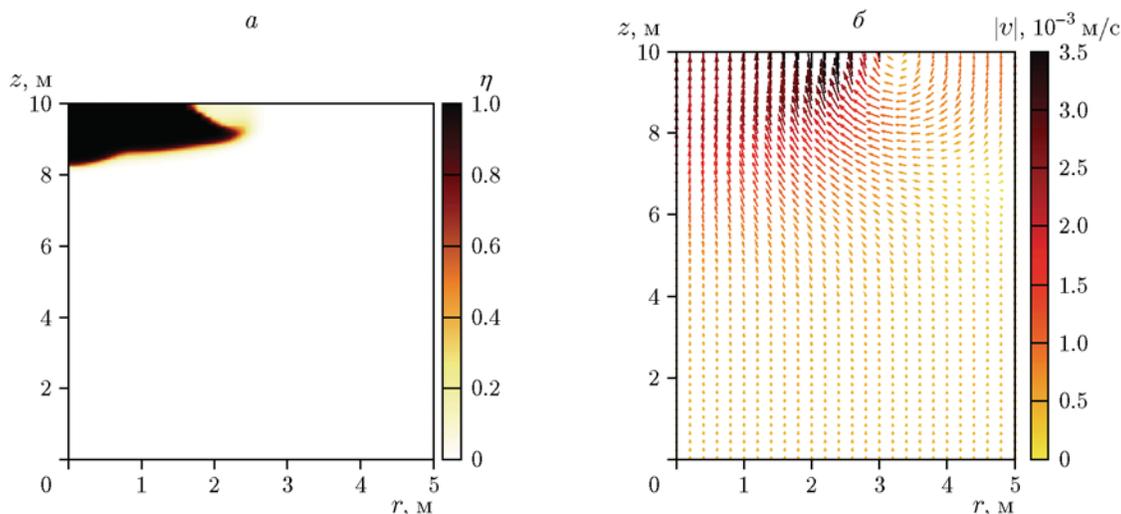


Рис. 6. Степень выгорания твердого горючего компонента (а) и поле скоростей газа (б) через  $t = 800$  ч после зажигания в случае расположения зоны зажигания в центре верхнего основания объекта

вещество. При приближении спутной волны к верхнему основанию в средней части объекта возникает вторая волна горения, которая является встречной и движется к нижнему основанию объекта, выжигая твердое горючее вещество не полностью. Достигая нижней границы объекта, встречная волна отражается от нее и переходит в спутную волну, которая движется в сторону верхнего основания, полностью выжигая всё оставшееся горючее вещество. Аналогично предыдущему случаю невыгоревшей остается только небольшая область у нижнего основания объекта. По рис. 5,б также видно наличие вихревых течений газа в окрестности зоны реакции в начальный период процесса, которые со временем исчезают. Как и в предыдущем случае, ближе к концу процесса у верхнего основания наблюдаются области с самыми высокими температурами газа и твердой среды. И также при росте максимальной температуры в зоне реакции при распространении спутной волны горения в ней становится заметна колебательная неустойчивость, характерная для кинетически контролируемых процессов. В разогретых областях объекта плотность газа заметно падает. К концу процесса практически весь объект успевает остыть, кроме зоны у верхнего основания.

При инициировании зажигания в центре верхнего основания объекта волна горения сначала полностью выжигает всю область зажигания, немного движется вбок, а потом она ста-

новится встречной волной и распространяется к нижнему основанию объекта, выжигая твердое горючее вещество не полностью (рис. 6). Достигая нижней границы объекта, волна горения отражается от нее и снова переходит в спутную волну, которая движется вверх и полностью выжигает всё оставшееся горючее вещество. Как и в предыдущих случаях, волна горения проходит практически через весь объект, не достигая только малой части приграничной зоны у нижнего основания. Также в начальный момент времени в окрестности зоны реакции возникают вихревые течения газа, которые со временем исчезают. Но в начальный период процесса такие вихри существенно влияют на приток окислителя в зону реакции, так как приводят к поступлению газа в объект через его верхнее основание (рис. 6,б). Однако, в отличие от предыдущих случаев, наибольшие температуры наблюдаются при отражении встречной волны от нижнего основания объекта. В разогретых областях объекта плотность газа заметно падает.

Таким образом, как и в случае плоских течений [13, 14], при осесимметричных течениях газа через пористые среды с очагами гетерогенного горения в условиях естественной конвекции характерно возникновение вихревых течений газа в окрестности зоны реакции в начальный период процесса. Эти вихри с течением времени исчезают, но во время своего существования сильно влияют на приток окислителя

ля в зону реакции, так как могут изменять направления газовых потоков на открытых границах объекта. Вне зависимости от расположения зоны зажигания весь объект полностью выгорает после окончания рассматриваемого процесса, и только малая часть приграничной зоны у нижнего основания может остаться невыгоревшей. В разогретых областях объекта плотность газа существенно понижается, давление же убывает с высотой достаточно плавно. Однако не все основные закономерности процесса при естественной конвекции совпадают в осесимметричном и плоском случаях: направления распространения волн горения могут существенно различаться. Волна горения имеет сложную структуру, может возникать одновременно несколько волн горения, которые движутся в разные стороны.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для моделирования двумерного осесимметричного течения газа через пористые среды с очагами гетерогенного горения в условиях принудительной фильтрации и естественной конвекции предложены математическая модель и численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем. Исследовано горение при различном расположении зоны зажигания. Показано, что для принудительной фильтрации процесс аналогичен плоскому случаю: волна горения движется вверх и вбок, полностью выжигая твердое горючее вещество, при этом остается невыгоревшей часть пористого объекта, расположенная ниже определенной линии и недостижимая для волны горения. Чем выше давление газа на входе в объект, тем меньше область, через которую проходит волна горения, и тем больше остается невыгоревшего твердого горючего компонента. Газ стремится течь по более холодным областям, огибая горячие зоны, при этом в разогретых областях объекта плотность газа резко уменьшается.

Расчеты гетерогенного горения пористой среды в условиях естественной фильтрации показали, что, как и в плоском случае, в начальный момент времени в окрестности очага горения возникают вихревые течения газа. Эти вихри существенно влияют на приток окислителя в зону реакции, так как могут изменять направление газовых потоков на открытых границах объекта. Так же, как и в плоском случае, волна горения проходит через весь

объект вне зависимости от расположения зоны зажигания. В разогретых областях объекта наблюдается существенное понижение плотности газа. Однако направление распространения волн горения в осесимметричном случае может существенно отличаться от таковых в плоском случае. Могут возникать одновременно несколько волн горения, которые движутся в разные стороны.

Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алдушин А. П., Мержанов А. Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследования // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах: сб. науч. тр. — Новосибирск: Наука, 1988. — С. 9–52.
2. Гришин А. М., Якимов А. С., Рейн Г., Симеони А. О физическом и математическом моделировании возникновения и распространения торфяных пожаров // Инж.-физ. журн. — 2009. — Т. 82, № 6. — С. 1210–1217.
3. Page S. E., Siegert F., Rieley J. O., Boehm H-D. V., Jaya A., Limin S. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997 // Nature. — 2002. — V. 420. — P. 61–65. — DOI: 10.1038/nature01131.
4. Rein G., Cohen S., Simeoni A. Carbon emissions from smouldering peat in shallow and strong fronts // Proc. Combust. Inst. — 2009. — V. 32, N 2. — P. 2489–2496. — DOI: 10.1016/j.proci.2008.07.008.
5. Rein G., Cleaver N., Ashton C., Pironi P., Torero J. L. The severity of smouldering peat fires and damage to the forest soil // Catena. — 2008. — V. 74, N 3. — P. 304–309. — DOI: 10.1016/j.catena.2008.05.008.
6. Зайченко А. Ю., Подлесный Д. Н., Салганская М. В., Цветков М. В., Салганский Е. А., Малиновский А. И. Зависимость времени воспламенения торфа от условий зажигания при естественной конвекции окислителя // Горение и взрыв. — 2018. — Т. 11, № 3. — С. 74–78.
7. Torero J. L., Fernandez-Pello A. C., Kitanoto M. Opposed forced flow smoldering of polyurethane foam // Combust. Sci. Technol. — 1993. — V. 91, N 1-3. — P. 95–117. — DOI: 10.1080/00102209308907635.
8. Torero J. L., Fernandez-Pello A. C. Forward smolder of polyurethane foam in a forced air flow // Combust. Flame. — 1996. — V. 106, N 1-2. — P. 89–109. — DOI: 10.1016/0010-2180(95)00245-6.

9. **Guillermo R., Fernandez-Pello A. C., Urban D. L.** Computational model of forward and opposed smoldering combustion in microgravity // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31, N 2. — P. 2677–2684. — DOI: 10.1016/j.proci.2006.08.047.
10. **Сеплярский Б. С., Кочетков Р. А., Лисина Т. Г., Абзалов Н. И.** Влияние размеров гранул  $Ti + C$  на закономерности горения в потоке азота // *Физика горения и взрыва.* — 2021. — Т. 57, № 1. — С. 65–71. — DOI: 10.15372/FGV20210107.
11. **Rabinovich O. S., Malinouski A. I., Kislov V. M., Salgansky E. A.** Effect of thermohydrodynamic instability on structure and characteristics of filtration combustion wave of solid fuel // *Combust. Theory Model.* — 2016. — V. 20, N 5. — P. 877–893. — DOI: 10.1080/13647830.2016.1190034.
12. **Салганский Е. А., Подлесный Д. Н., Цветков М. В., Зайченко А. Ю.** Термодинамическая оценка массопереноса соединений редких металлов в условиях волны фильтрационного горения // *Журн. прикл. химии.* — 2020. — Т. 93, № 7. — С. 1058–1064.
13. **Левин В. А., Луценко Н. А.** Двумерные течения газа при гетерогенном горении твердых пористых сред // *Докл. АН.* — 2017. — Т. 476, № 1. — С. 30–34.
14. **Lutsenko N. A.** Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // *Combust. Theory Model.* — 2018. — V. 22, N 2. — P. 359–377. — DOI: 10.1080/13647830.2017.1406617.
15. **Луценко Н. А.** Моделирование процесса извлечения ценных металлов из металлосодержащих сред методом фильтрационного горения // *Докл. АН. Физика, техн. науки.* — 2020. — Т. 491, № 1. — С. 85–89.
16. **Salgansky E. A., Lutsenko N. A., Toledo M.** The model of the extraction process of rare metals under condition of filtration combustion wave // *Front. Chem.* — 2020. — V. 8, Article 511502. — DOI: 10.3389/fchem.2020.511502.
17. **Salgansky E. A., Lutsenko N. A.** Numerical modeling of heterogeneous combustion with phase transitions in porous metal-containing media // *Int. J. Multiphase Flow.* — 2021. — V. 140. — 103670. — DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103670.
18. **Лашков А. Ю., Буланов А. Д., Трошин О. Ю.** Процесс фильтрационного горения тетрафторида кремния и гидрида кальция для получения моносилана // *Неорган. материалы.* — 2016. — Т. 52, № 9. — С. 981–984.
19. **Кислов В. М., Глазов С. В., Салганский Е. А., Колесникова Ю. Ю., Салганская М. В.** Газификация угля смесью воздуха и углекислого газа в режиме фильтрационного горения // *Физика горения и взрыва.* — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 72–78. — DOI: 10.15372/FGV20160310.
20. **Глазов С. В.** Оценка процесса газификации пылевидного топлива в реакторе фильтрационного горения со встречным потоком теплоносителя // *Физика горения и взрыва.* — 2021. — Т. 51, № 5. — С. 31–41. — DOI: 10.15372/FGV20210503.
21. **Rashwan T. L., Fournie T., Torero J. L., Grant G. P., Gerhard J. I.** Scaling up self-sustained smoldering of sewage sludge for waste-to-energy // *Waste Manag.* — 2021. — V. 135. — P. 298–308. — DOI: 10.1016/j.wasman.2021.09.004.
22. **Донской И. Г.** Математическое моделирование совместной конверсии угля и шлама сточных вод в обращенном слоевом газогенераторе // *Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов.* — 2019. — Т. 330, № 2. — С. 7–18.
23. **Jafari N. H., Stark T. D., Thalhamer T.** Spatial and temporal characteristics of elevated temperatures in municipal solid waste landfills // *Waste Management.* — 2017. — V. 59. — P. 286–301. — DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.052.
24. **Kinsman L., Torero J. L., Gerhard J. I.** Organic liquid mobility induced by smoldering remediation // *J. Hazard. Mater.* — 2017. — V. 325. — P. 101–112. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.049.
25. **Манжос Е. В., Какуткина Н. А., Коржавин А. А., Рычков А. Д., Сеначин П. К.** Формирование волны фильтрационного горения газа нагретым участком пористой среды // *Физика горения и взрыва.* — 2019. — Т. 55, № 6. — С. 25–31. — DOI: 10.15372/FGV20190604.
26. **Нигматулин Р. И.** Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978.
27. **Левин В. А., Луценко Н. А.** Течение газа через пористую тепловыделяющую среду при учете температурной зависимости вязкости газа // *Инж.-физ. журн.* — 2006. — Т. 79, № 1. — С. 35–40.

*Поступила в редакцию 01.12.2021.  
Принята к публикации 12.01.2022.*