

УДК 536.46

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА НАГРЕТЫМ УЧАСТКОМ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Е. В. Манжос¹, Н. А. Какуткина¹, А. А. Коржавин¹, А. Д. Рычков²,
П. К. Сеначин³

¹Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск
eugen.manzhos@kinetics.nsc.ru

²Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090 Новосибирск

³Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 656038 Барнаул

Проведено численное моделирование формирования волны фильтрационного горения газа нагретым участком инертной пористой среды. Описан механизм формирования волны горения. Получены зависимости времени формирования волны от скорости подачи газовой смеси, температуры нагретого участка пористой среды и его длины. Установлено наличие пределов зажигания волны фильтрационного горения.

Ключевые слова: фильтрационное горение, горение газа, зажигание.

DOI 10.15372/FGV20190604

ВВЕДЕНИЕ

Фильтрационное горение газа (ФГГ) широко используется в технических устройствах и технологических схемах различных производств, таких как химические реакторы, печи рекуперативного типа, процессы газификации горючих ископаемых, сжигание бедных смесей горючих газов и др. [1–3]. Управление работой устройств и применение в производстве требуют понимания закономерностей ФГГ.

В настоящее время достаточно хорошо изучены стационарные процессы ФГГ. Построены модели, позволяющие интерпретировать экспериментально наблюдаемые явления и закономерности [2, 4, 5]. Проведена классификация режимов ФГГ [2, 4, 6]. Изучены определяющие параметры и параметрические зависимости скорости распространения и температуры волн горения, позволяющие прогнозировать поведение системы при изменении параметров. Установлены пределы распространения волн горения [2, 4, 7] и их параметрические зависимости. Исследованы особенности химических превращений в процессах ФГГ [8].

Работа любого устройства на основе ФГГ включает в себя нестационарные процессы, такие как формирование волн ФГГ, гашение волн, распространение в нестационарных параметрических условиях.

Штатный режим работы устройств реверс-процесса на основе ФГГ является принципиально нестационарным. В [9, 10] экспериментально и численно изучались оптимальные условия работы таких устройств.

В [11, 12] экспериментально и численно исследованы закономерности и механизмы изменения структуры волн ФГГ, скорости ее распространения при переходе через границу сред с различными термодинамическими характеристиками.

Формирование волн ФГГ является начальной стадией работы любого устройства на основе ФГГ. В [13] изучалось формирование волн ФГГ при их иницировании открытым пламенем. Целью настоящей работы является исследование формирования (зажигания) волны ФГГ при ее иницировании нагретым участком пористой среды.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Наиболее удобным и информативным методом исследования механизмов и закономерностей нестационарных процессов ФГГ, позволяющим оперативно отслеживать изменение характеристик и структуры волн ФГГ, является метод численного моделирования [13, 14].

Использованная при моделировании математическая модель включает в себя уравнения переноса тепла по газу, пористой среде, переноса массы недостающего компонента газовой

смеси, сохранения полного количества вещества в потоке и уравнение состояния:

$$\begin{aligned} \varepsilon_g \rho_g c_g \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_g \lambda_g \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ &+ \alpha_0 S_c (\theta - T) + Q \varepsilon_g \rho_g \eta W, \\ \rho_s (1 - \varepsilon_g) c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left((1 - \varepsilon_g) \lambda_s \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \\ &+ \alpha_0 S_c (T - \theta) + 2 \frac{\alpha_w}{R_w} (T_0 - \theta), \quad (1) \\ \varepsilon_g \rho_g \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + v \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_g \rho_g D \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \varepsilon_g \rho_g \eta W, \\ \frac{\partial \varepsilon_g \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g v)}{\partial x} &= 0, \\ \rho_g T &= \text{const.} \end{aligned}$$

Здесь T и θ — температуры газа и инертной пористой среды, η — относительная массовая концентрация недостающего компонента газа, v — скорость газа, ρ_g и ρ_s — плотности газа и материала пористой среды, c_g и c_s — удельные теплоемкости, λ_g и λ_s — коэффициенты теплопроводности, ε_g — пористость, α_0 — коэффициент межфазного теплообмена, S_c — удельная поверхность пористой среды, D — коэффициент диффузии недостающего компонента газовой смеси, $Q = c_g(T_b - T_0)$ — тепловой эффект реакции, T_b — адиабатическая температура горения газовой смеси, $W = k_0 \exp(-E/(RT))$ — скорость обобщенной одностадийной химической реакции, где k_0 — предэкспоненциальный множитель, E — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, α_w — коэффициент внешней теплоотдачи.

Граничные условия для системы (1) задаются в следующем виде. На левой границе трубы: $v = v_{in,p}(t)$, $T = T_{in,p}$, $\eta = \eta_{in,p}$, где индексом in,p обозначены входные значения скорости, температуры газа и концентрации недостающего реагирующего компонента в газовой смеси. На правой границе задаются «мягкие» краевые условия: $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$. Начальные условия ($t = 0$): $v = v_0(x)$, $T = T_0(x)$, $\theta = \theta_0(x)$, $\eta = \eta_0$. Зажигание моделируется заданием в начальный момент времени ступенчатого профиля температуры пористой среды.

Для численного решения системы (1) использовалась конечно-разностная схема, основанная на лагранжевой аппроксимации конвективных членов. Система уравнений (1) записывалась в векторном виде и решалась с помощью векторной прогонки. Поскольку протяженность зоны горения очень мала, то для достаточно точного расчета параметров течения в ней использовалась неравномерная адаптивная разностная сетка, максимальное сгущение которой имело место в окрестности максимума функции тепловыделения. По мере перемещения этого максимума разностная сетка перестраивалась. Для переинтерполяции параметров течения использовались локальные B -сплайны.

Верификация программы проводилась путем ее тестирования на нескольких задачах с заведомо известными решениями. В частности, были проведены тестовые расчеты по параметрическим зависимостям и абсолютным значениям нормальной скорости ламинарного пламени [15] (случай $\varepsilon_g = 1$, $v = 0$), по параметрическим зависимостям и значениям скорости распространения стационарных волн ФГГ, которые сопоставлялись со значениями, рассчитанными в рамках стационарной аналитической модели ФГГ [2]. Из нестационарных задач тестировалась кондуктивно-конвективная трансформация во времени первоначально ступенчатого температурного профиля пористой среды при отсутствии химической реакции ($Q = 0$).

На рис. 1 представлена схема моделируемой системы. В трубе диаметром D_t и длиной L , заполненной пористой средой, посередине располагается нагретый участок той же пористой среды длиной l . Газ подается слева со скоростью v , проходит через пористую сре-

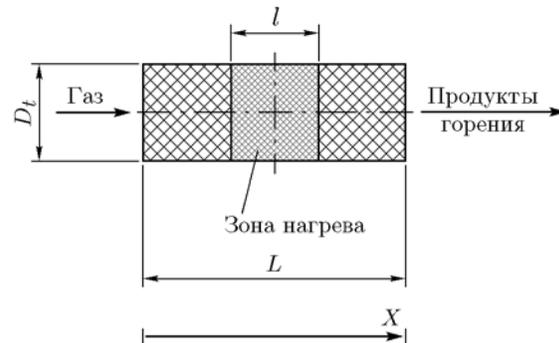


Рис. 1. Схема моделируемой системы

ду и зажигается нагретым участком, формируя волну ФГГ. В реальных условиях температурный профиль участка зависит от способов его создания и может иметь любую форму, описываемую множеством параметров. В данной работе для упрощения анализа задан прямоугольный профиль температуры пористой среды, характеризуемый двумя параметрами: температурой θ_{ign} и длиной l .

Моделирование проводилось для стехиометрической метановоздушной смеси со следующими параметрами [13, 16]: удельная теплоемкость $c_g = 1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности $\lambda_g = 0.1$ Вт/(м·К), адиабатическая температура горения газа $T_b = 2320$ К. Значения параметров скорости эффективной химической реакции оценивались из результатов лабораторных экспериментов по фильтрационному горению метановоздушных смесей [17] и приняты равными $k_0 = 1 \cdot 10^{11}$ с⁻¹, $E = 2.26 \cdot 10^5$ Дж/моль. Теплотерями от пористой среды пренебрегали ($\alpha_w = 0$). Программа рассчитывает для каждого момента времени профили температуры газа, температуры пористой среды, концентрации недостающего компонента газовой смеси и определяет координату пламени как точку максимума температуры газа.

В качестве пористой среды принят электрокорунд со следующими характеристиками [13, 18]: удельная теплоемкость $c_s = 800$ Дж/(кг·К), плотность $\rho_s = 3900$ кг/м³, пористость $\varepsilon_s = 0.5$; диаметр зерна $d_s = 3.7$ мм. Теплопроводность пористой среды в общем случае связана с теплопроводностью газовой и твердой фаз и с взаимодействием между ними, в том числе с радиационным теплообменом [4, 5], но для упрощения исследования механизма формирования волны ФГГ коэффициент теплопроводности пористой среды в данной работе принят постоянным и равным 2 Вт/(м·К) [13, 17, 19]. Длина участка с пористой средой $L = 200$ мм. Диаметр трубы $D_t = 50$ мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Типичные результаты моделирования процесса формирования волны ФГГ приведены на рис. 2. Температурные профили газовой смеси представлены сплошными линиями, профили пористой среды — штриховыми линиями в осях X , T и θ . Источником воспламенения газовой смеси служит участок пористой среды

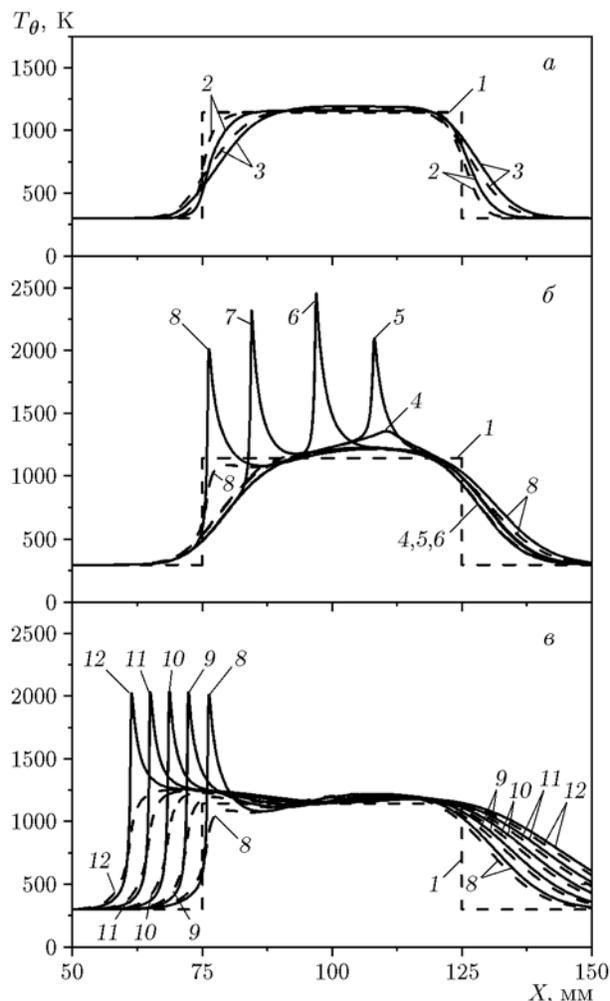


Рис. 2. Температурные профили газовой смеси (сплошные линии) и пористой среды (штриховые линии) в процессе формирования волны ФГГ:

время от начала подачи газовой смеси: 1 — 0, 2 — 3 с, 3 — 20 с, 4 — 33.2 с, 5 — 33.4 с, 6 — 34 с, 7 — 35 с, 8 — 50 с, 9 — 75 с, 10 — 100 с, 11 — 125 с, 12 — 150 с; $l = 50$ мм, $v = 17.3$ см/с, $\theta_{ign} = 1145$ К

с температурой θ_{ign} (линия 1 на рис. 2,а).

Согласно рис. 2 процесс формирования волны ФГГ может быть разделен на несколько стадий. Сначала газ прогревается от нагретого участка пористой среды и в нем активируются химические реакции (кривые 2, 3 на рис. 2,а). Температура газа на переднем фронте нагретого участка (по ходу движения газа) ниже температуры пористой среды, но в середине и на заднем фронте участка она превышает температуру пористой среды. Это указывает на активацию химических реакций. На второй стадии происходит вспышка газа (кри-

вые 4, 5 на рис. 2,б), о чем свидетельствует появление пика температуры газовой фазы. В данном примере вспышка происходит вблизи заднего фронта температурного профиля нагретого участка пористой среды. Затем пламя перемещается со скоростью около 1 см/с по нагретому участку пористой среды (кривые 6–8 на рис. 2,б) с последующей стабилизацией на переднем фронте нагретого участка (кривые 8). Перемещение пламени по нагретому участку пористой среды обусловлено тем, что нормальная скорость пламени в условиях повышенной температуры газа на прогретом участке превышает скорость набегающего потока. По мере распространения пламени в более холодные области пористой среды снижается нормальная скорость его распространения. В результате наблюдается стабилизация пламени на участке пористой среды, где обеспечивается уравнивание скорости горения и скорости встречного потока газа. На третьей стадии происходят прогрев пористой среды от стабилизированного пламени и квазистационарное распространение сформировавшейся волны ФГГ (кривые 9–12 на рис. 2,в) по пористой среде навстречу потоку газовой смеси. При этом температурные профили пористой среды некоторое время имеют двугорбую форму (кривые 8–11 на рис. 2,в), обусловленную тем, что на переднем фронте идет прогрев пористой среды сместившимся пламенем газа, а на заднем фронте еще не успело произойти ее охлаждение вследствие кондуктивного отвода тепла в пористую среду.

Описанные фазы формирования волны ФГГ также можно проследить на рис. 3, на котором приведены изменения максимальных температур газа и пористой среды и изменение координат, соответствующих максимумам температур газа и пористой среды в процессе формирования волны ФГГ.

Участок *ab* на рис. 3 соответствует первой стадии формирования волны ФГГ. За счет теплообмена с пористой средой газовая смесь постепенно прогревается и активируются химические реакции в газе. При этом растут температура газовой смеси (рис. 3,а) и температура пористой среды (рис. 3,б). Координаты максимума температур газа (рис. 3,в) и пористой среды (рис. 3,г) смещаются в сторону заднего фронта первоначально нагретого участка.

На участке *bc* (см. рис. 3,а) происходит вспышка газовой смеси. Пламя достигает мак-

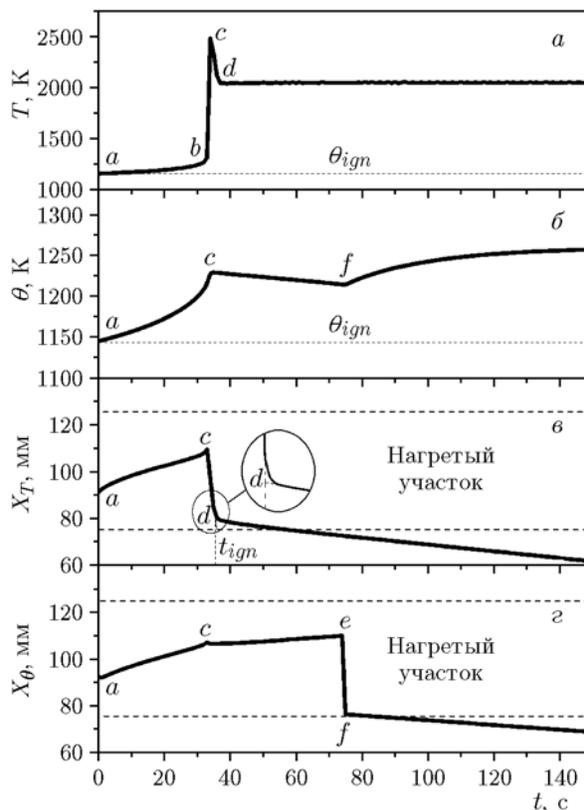


Рис. 3. Изменение максимальных температур газа (а), пористой среды (б), координат максимумов температур газа (в) и пористой среды (г) в процессе формирования волны ФГГ:

$l = 50$ мм, $v = 17.3$ см/с, $\theta_{ign} = 1145$ К, время зажигания $t_{ign} = 38$ с

симальной температуры (момент времени *c* на рис. 3,а) и распространяется по нагретому участку пористой среды к более холодным областям (участок *cd* на рис. 3,в), что сопровождается снижением его температуры (см. рис. 3,а). После смещения пламени возникает двугорбость температурных профилей пористой среды. Координата максимума температуры пористой среды продолжает некоторое время смещаться по ходу движения газа (участок *ce* на рис. 3,г), находясь в области заднего фронта температурного профиля пористой среды. Ее резкое изменение (участок *ef* на рис. 3,г) обусловлено тем, что сместившееся пламя прогрело холодную пористую среду в области переднего фронта и температура первого максимума температурного профиля пористой среды становится больше, чем температура второго. После перемещения пламени к переднему фронту начинается формирование квази-

стационарной волны ФГГ и ее дальнейшее квазистационарное распространение, на что указывает линейный участок (начиная от точки d и далее) перемещения максимума температуры газовой смеси по времени (см. рис. 3,б).

Количественной характеристикой процесса формирования (зажигания) волны ФГГ выбрано время t_{ign} — от начала процесса зажигания до момента возникновения квазистационарной волны ФГГ.

При проведении эксперимента появление квазистационарной волны ФГГ можно отследить по зависимости координаты переднего фронта свечения (при регистрации по свечению) или координаты максимума температуры (при термометрической регистрации) от времени.

При численном моделировании момент появления квазистационарной волны ФГГ и время t_{ign} определены по пересечению (точка d на рис. 3,б) прямой, аппроксимирующей участок формирования волны горения (участок cd), и прямой, аппроксимирующей участок ее линейного распространения (см. врезку на рис. 3,б).

На рис. 4–6 показаны типичные зависимости времени зажигания волны ФГГ t_{ign} от параметров газовой смеси и пористой среды.

Зависимость t_{ign} от скорости подачи газа v носит U-образный характер (рис. 4). Со стороны низкой и высокой скоростей подачи газа наблюдаются два предельных значения v_1^* и v_2^* , ниже и выше которых зажигания волны ФГГ не происходит.

Предположительно нижний предел зажи-

гания по скорости подачи газа обусловлен конкуренцией между скоростью поступления тепла за счет химической реакции и скоростью его отвода из зоны горения за счет теплопроводности пористой среды. При $v < v_1^*$ начиная с некоторого момента времени скорость отвода тепла превышает скорость его поступления. Верхний предел по скорости подачи, вероятно, связан с необходимостью прогрева газа до температуры вспышки. При $v > v_2^*$ газ проходит через нагретый участок, не успевая нагреться.

Зависимость t_{ign} от температуры иницирующего участка пористой среды θ_{ign} имеет вид ниспадающей кривой (рис. 5). Значение $\theta_{ign} = \theta^*$ является предельным. При $\theta_{ign} < \theta^*$ зажигание волны ФГГ не происходит. При $\theta_{ign} > \theta^*$ время зажигания изменяется слабо, стремясь к некоторому значению. Предположительно предел зажигания по температуре нагретого участка обусловлен тем, что при $\theta_{ign} < \theta^*$ газ не успевает нагреться до необходимой для вспышки температуры.

Зависимость t_{ign} от длины нагретого участка пористой среды l (рис. 6) также имеет вид ниспадающей кривой. Ниже определенного значения l^* зажигание волны ФГГ не происходит, что позволяет говорить о пределе зажигания по длине нагретого участка. При увеличении l время зажигания волны ФГГ стремится к некоторому значению. Предел зажигания по длине нагретого участка, вероятно, также обу-

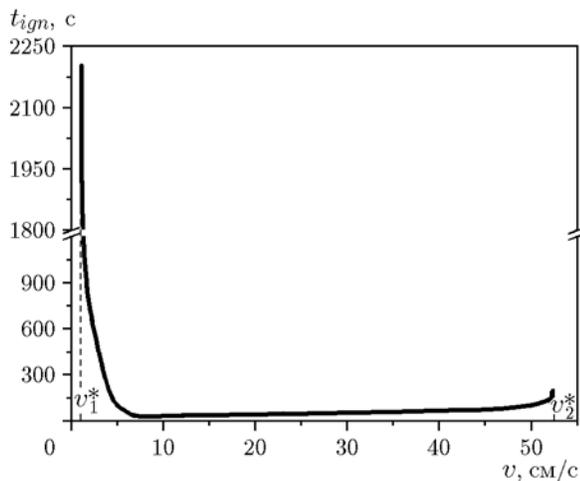


Рис. 4. Типичная зависимость времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газа при $\theta_{ign} = 1145$ К, $l = 50$ мм

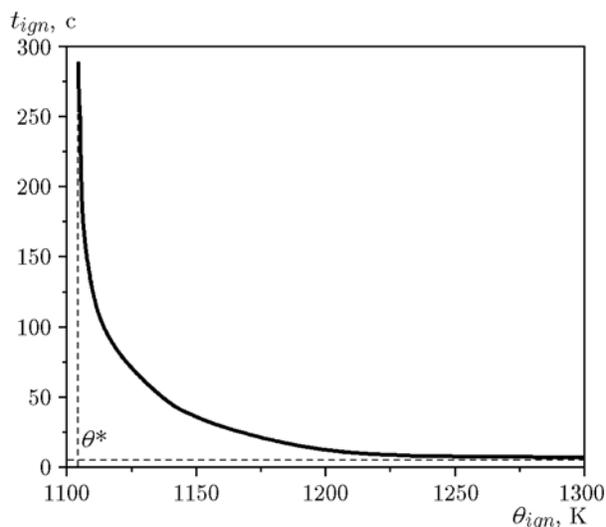


Рис. 5. Типичная зависимость времени зажигания волны ФГГ от температуры иницирующего участка пористой среды при $v = 17.3$ см/с, $l = 50$ мм

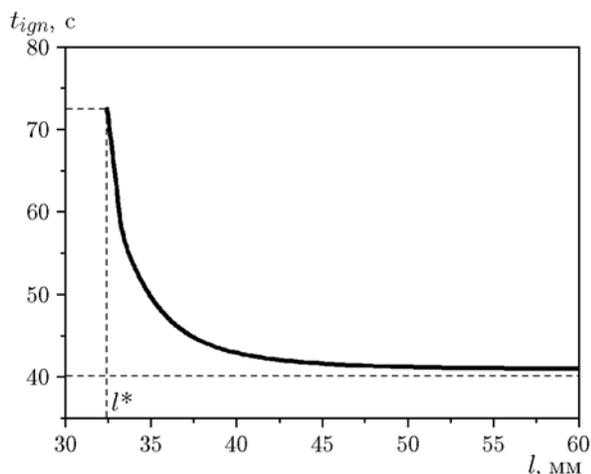


Рис. 6. Типичная зависимость времени зажигания волны ФГГ от длины нагретого участка пористой среды при $v = 17.3$ см/с, $\theta_{ign} = 1145$ К

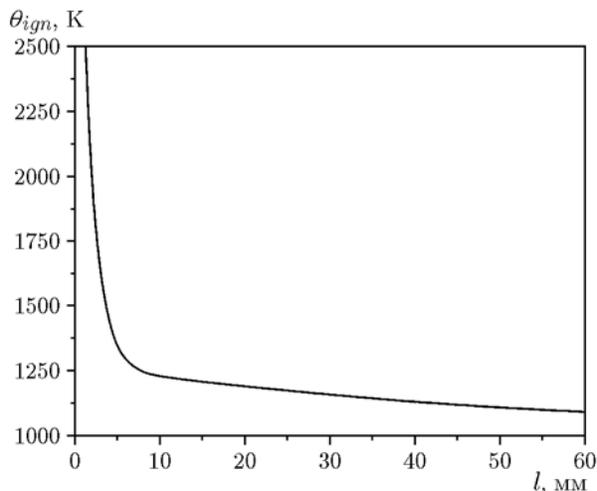


Рис. 8. Зависимость минимальной температуры нагретого участка пористой среды от длины нагретого участка при $v = 17.3$ см/с

словлен необходимостью нагрева газа до температуры вспышки.

Из обнаруженных пределов наибольший интерес представляет предел по температуре иницирующего нагретого участка и его зависимости от параметров системы. Зависимости минимальной температуры нагретого участка θ_{ign} , обеспечивающей зажигание, от скорости подачи газа v и от длины нагретого участка пористой среды l приведены соответственно на рис. 7 и 8. Температура θ_{ign} слабо растет с ростом v . Такое поведение объяснимо в рам-

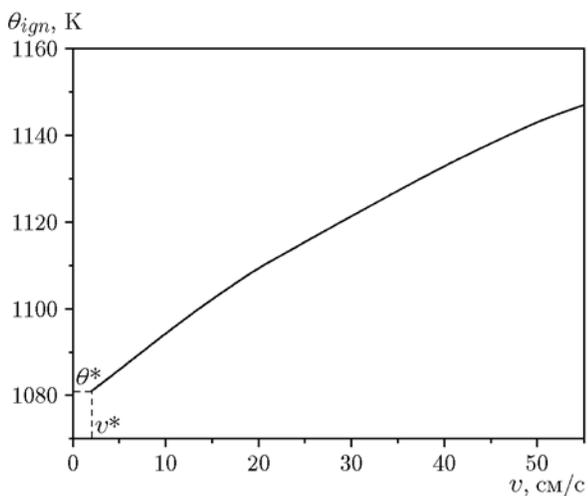


Рис. 7. Зависимость минимальной температуры нагретого участка пористой среды от скорости подачи газа при $l = 50$ мм

ках предположенной выше природы предела. С увеличением скорости течения газа уменьшается время его пребывания в области нагретого участка. Поэтому температура нагретого участка должна увеличиться, чтобы обеспечить протекание химических реакций. Но так как зависимость степени превращения от температуры экспоненциальная, а от времени линейная, то значительное, в несколько раз, увеличение скорости течения газа требует весьма малого увеличения температуры нагретого участка. Это объясняет слабую зависимость $\theta_{ign}(v)$.

Эти же рассуждения объясняют слабое увеличение θ_{ign} с уменьшением длины нагретого участка l при $l > 10$ мм (см. рис. 8). Однако дальнейшее уменьшение l приводит к резкому росту температуры зажигания. Согласно рис. 8 при $l < 10$ мм температура θ_{ign} возрастает примерно во столько же раз, во сколько уменьшается длина нагретого участка. Это обстоятельство указывает на то, что при малых значениях l процесс лимитирует не протекание химических реакций, а прогрев газа от пористой среды до температуры активации химических реакций. Тепло, получаемое газом при течении по прогретому участку пористой среды, пропорционально разнице температур газа и пористой среды и времени нахождения газа в области нагретого участка. При уменьшении длины нагретого участка пропорционально падает время теплообмена. Поэтому, для того чтобы обеспечить нагрев газа до темпера-

туры химических реакций, требуется пропорциональное увеличение температуры нагретого участка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование формирования (зажигания) волны фильтрационного горения газа при ее иницировании нагретым участком пористой среды.

Выделены три стадии формирования волны горения. На первой стадии происходит прогрев поступающего газа нагретым участком пористой среды. На второй стадии газ воспламеняется, пламя распространяется по нагретому участку против потока и стабилизируется на переднем фронте нагретого участка. На третьей стадии стабилизированное пламя прогревает пористую среду, постепенно формируя стационарную волну фильтрационного горения газа.

Установлено наличие нижнего предела зажигания волн фильтрационного горения газа по температуре и длине нагретого участка. По скорости течения газа обнаружены нижний и верхний пределы зажигания. Показано, что нижний предел по температуре нагретого участка падает с увеличением длины участка и растет с увеличением скорости течения газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алдушин А. П., Мержанов А. Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. — Новосибирск: Наука, 1988.
2. Лаевский Ю. М., Бабкин В. С. Фильтрационное горение газа // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. — Новосибирск: Наука, 1988.
3. Abdul Mujeebu M., Abdullah M. Z., Abu Bakar M. Z., Mohamad A. A., Abdullah M. K. Applications of porous media combustion technology — A review // Appl. Energy. — 2009. — V. 86. — P. 1365–1375.
4. Доброго К. В., Жданок С. А. Физика фильтрационного горения газов. — Минск: НАН Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, 2002.
5. Палесский Ф. С., Фурсенко Р. В., Минаев С. С. Моделирование фильтрационного горения газов в цилиндрической пористой горелке с учетом радиационного теплообмена // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 3–10.
6. Лямин Г. А., Пинаев А. В. О режимах сгорания газов в инертной пористой среде // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 5 — С. 64–70.
7. Пинаев А. В. О режимах сгорания и критерии распространения пламени в загроможденном пространстве // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 4. — С. 52–60.
8. Футько С. И., Жданок С. А. Химия фильтрационного горения газов. — Минск: Бел. наука, 2004.
9. Hoffman J. G., Echigo R., Yoshida H., Tada S. Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system // Combust. Flame. — 1997. — V. 111. — P. 32–46.
10. Bubnovich V., Henriquez L., Diaz C., Avila E. Stabilization operation region and operational variables effect on a reciprocal flow burner // WSEAS Trans. Heat and Mass Transfer. — 2010. — V. 5, N 1. — P. 1–10.
11. Какуткина Н. А., Мбарава М. Переходные процессы при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 62–73.
12. Какуткина Н. А., Рычков Д. А. Закономерности фильтрационного горения газа в неоднородной пористой среде // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 13–24.
13. Какуткина Н. А., Коржавин А. А., Манжос Е. В., Рычков А. Д. Зажигание волн фильтрационного горения газа пламенем фильтрующегося газа // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 43–50.
14. Какуткина Н. А., Рычков А. Д. Моделирование нестационарных процессов фильтрационного горения газа // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 44–51.
15. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения. — М.: Наука, 1980.
16. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972.
17. Какуткина Н. А., Коржавин А. А., Мбарава М. Особенности фильтрационного горения водородо-, пропано- и метановоздушных смесей в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 8–20.
18. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов: справочник. — М.: Физматгиз, 1959.
19. Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы. — Л.: Химия, 1979.

Поступила в редакцию 02.07.2018.
После доработки 28.01.2019.
Принята к публикации 20.02.2019.