

А. С. АСКАРОВА, М. А. ГОРОХОВСКИ, И. В. ЛОКТИОНОВА, М. Ж. РЫСПАЕВА

ГОРЕНИЕ ЖИДКИХ ТОПЛИВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Решена задача о горении различных жидких топлив (бензин, гептан, тетрадекан) в камере сгорания на основе нестационарных двумерных уравнений реагирующей двухфазной среды; получено распределение температуры и испаряющихся капель по размерам в различные моменты времени.

К жидким топливам относятся нефть, бензин, керосин, солярка, жидкий водород, гептил и др. Моделирование горения жидких топлив является актуальным в связи с их широким использованием в различных двигателях в качестве автомобильного, авиационного, дизельного и ракетного топлив. Данная работа посвящена исследованию горения трех различных топлив – бензина, гептана и тетрадекана.

Математическое моделирование горения жидких топлив является сложной задачей, так как требует учета большого количества сложных взаимосвязанных процессов и явлений [1], таких, как многоступенчатые цепные химические реак-

ции, перенос импульса, тепла и массы путем конвекции, молекулярного переноса, излучения, турбулентность, испарение жидких капель и т.д.

Математическая модель задачи о горении жидкого топлива [2] основывается на уравнениях движения для жидкой фазы, сопровождаемой капельным испарением, а также на уравнениях энергии и переноса массы с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\rho D \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \mathcal{E}_m + \mathcal{E}_{\sigma_m},$$

$$\frac{\partial (\rho l i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho l i \vec{u}) =$$

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{1}{a^2} \nabla p - A_0 \nabla \left(\frac{2}{3} \rho k \right) + \nabla \mathcal{F} + F^s + \rho g, \\
 &\quad \frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \nabla(\rho I u) = \\
 &= -p \nabla u + (1 - A_0) \sigma \nabla u - \nabla J + A_0 \rho \varepsilon + \mathcal{G}^e + \mathcal{G}^s, \\
 &\quad \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho k u) = \\
 &= -\frac{2}{3} \rho k \nabla u + \sigma \nabla u + \nabla \left[\left(\frac{\mu}{Pr_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon + W^e, \\
 &\quad \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\rho \varepsilon u) = -\left(\frac{2}{3} c_{\varepsilon_1} - c_{\varepsilon_3} \right) \rho \varepsilon \nabla u + \\
 &\quad + \nabla \left[\left(\frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left[c_{\varepsilon_1} \sigma \nabla u - c_{\varepsilon_2} \rho \varepsilon + c_s W^e \right].
 \end{aligned}$$

Здесь ρ_m – массовая плотность компоненты m , ρ – общая массовая плотность, u – скорость жидкости, \mathcal{F}_m^s – химический источниковый член, $\mathcal{F}_{\sigma_m}^s$ – источниковый член вследствие впрыска, l – это вещество, из которого состоят впрыскиваемые капли, δ – дельта-функция Дирака, p – давление в жидкости, a – безразмерная величина, I – удельная внутренняя энергия, k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

В работе была решена задача о горении жидких топлив в камере сгорания в зависимости от вида впрыскиваемого топлива. Рассмотрены три вида топлив: бензин (C_6H_6), гептан (C_7H_{16}) и тетрадекан ($C_{14}H_{30}$).

На рис. 1 представлены результаты компьютерного моделирования горения бензина в цилиндрической камере сгорания с размерами $R=2$ см,

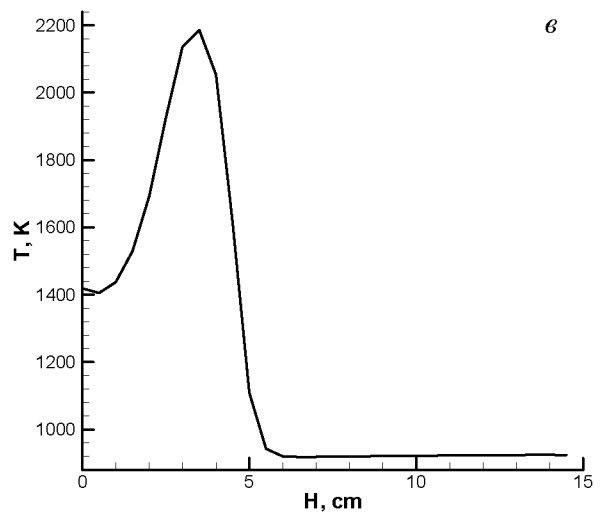
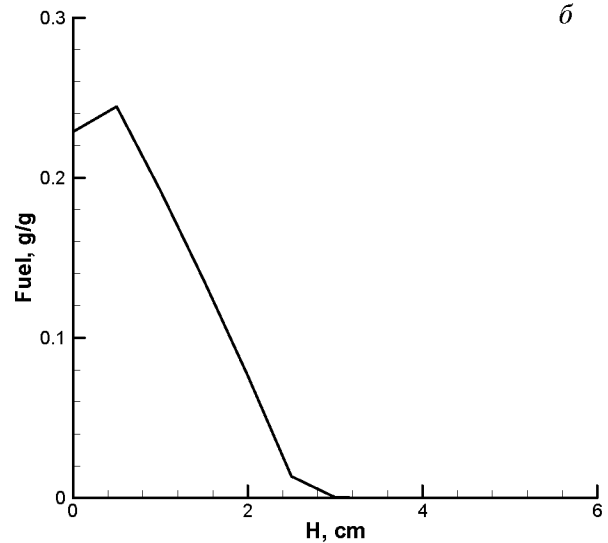
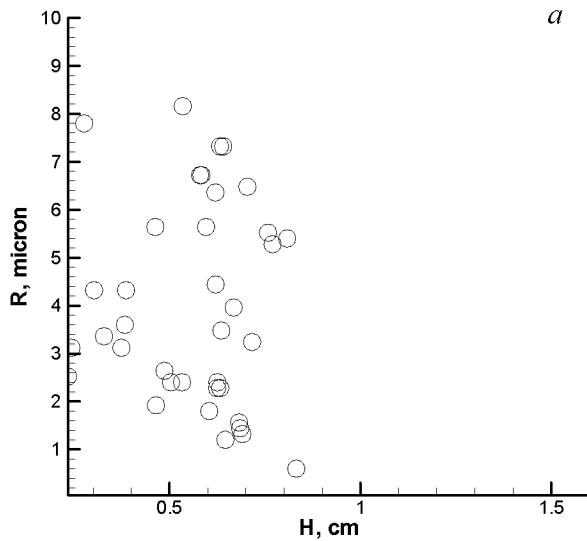


Рис. 1. Распределение капель по размерам (а), поле концентрации топлива (б) и поле температуры (в) при горении бензина в камере сгорания

$H=15$ см. Жидкое топливо впрыскивается в камеру сгорания через круглое сопло, расположенное в центре нижней части камеры. После впрыска происходит быстрое испарение топлива, и сгорание осуществляется в газовой фазе.

На рис. 1, *а* приведено распределение капель по размерам при $t = 9,847 \cdot 10^{-4}$ с. Этот момент времени предшествует полному испарению жидких капель. Видно, что максимальная высота, которой достигают капли, составляет 0,84 см, а размеры капель – 8,5 мкм.

Из рис. 1, *б*, на котором представлено распределение концентрации бензина в камере сгорания, видно, что пары бензина достигают высоты 2,4 см, что намного выше жидкой фазы. Максимальная концентрация бензина в рассматриваемый момент времени наблюдается на оси камеры и составляет 0,24 г/г.

Распределение температуры (см. рис. 1, *в*) свидетельствует о том, что область максимальной температуры находится на высоте от 2,6 до 4,2 см. Максимальная температура в области горения составляет 2084 К, а вся камера, исключая зону пламени, прогревается равномерно до 1200 К.

На рис. 2 и 3 распределение радиуса капель, температуры и концентрации топлива в камере сгорания представлено аналогично рис. 1.

Сравнение поведения бензина и гептана позволяет заключить, что капельки у обоих топлив поднимаются на одну и ту же высоту: 0,84 см в данный момент времени, и имеют размеры в одних и тех же пределах. По ширине камеры также происходит равномерное распределение капель.

Концентрация топлив в обоих случаях тоже одинакова, т.е. пары бензина и гептана достигают одной высоты, и их концентрация на оси

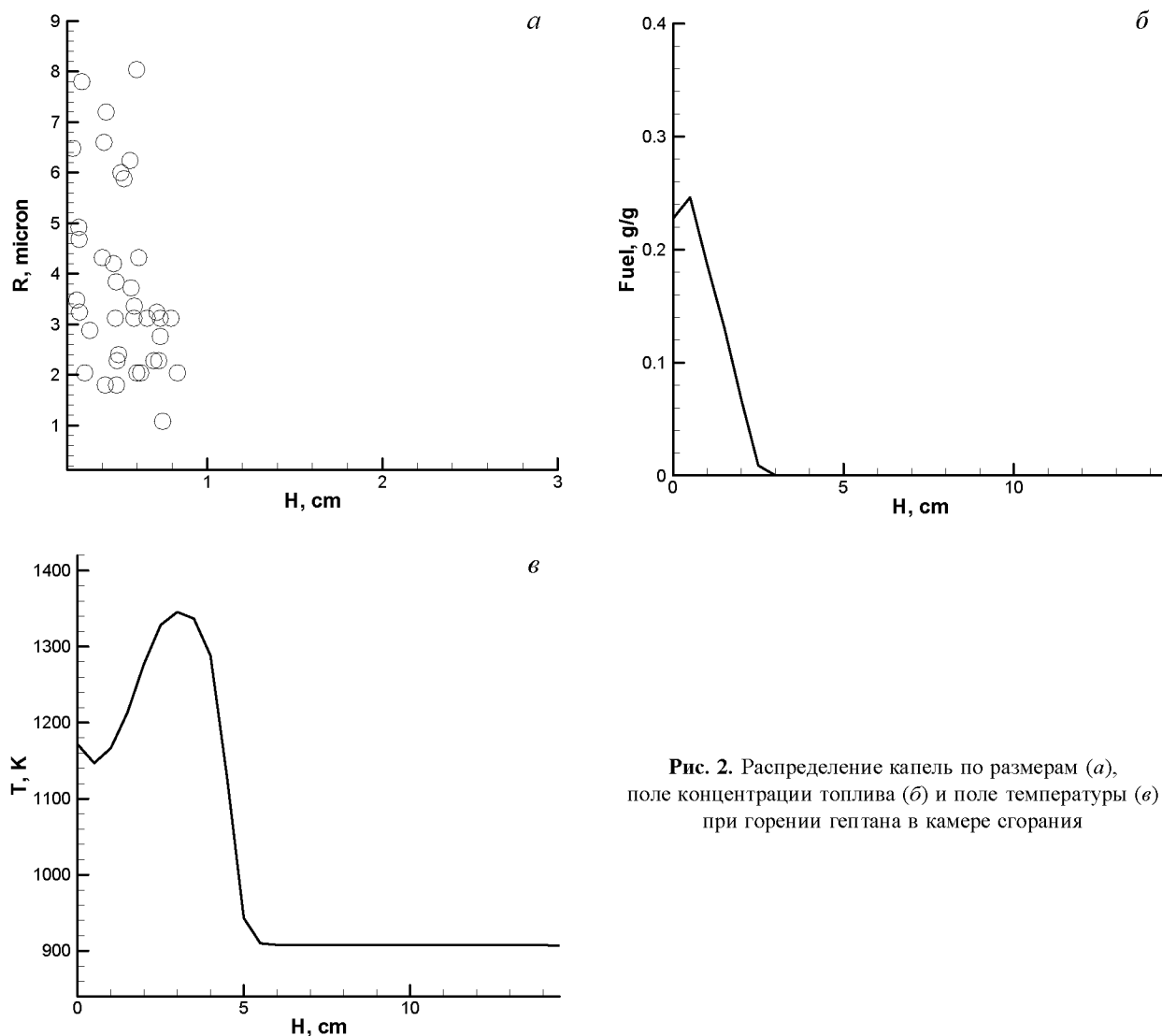


Рис. 2. Распределение капель по размерам (*а*), поле концентрации топлива (*б*) и поле температуры (*в*) при горении гептана в камере сгорания

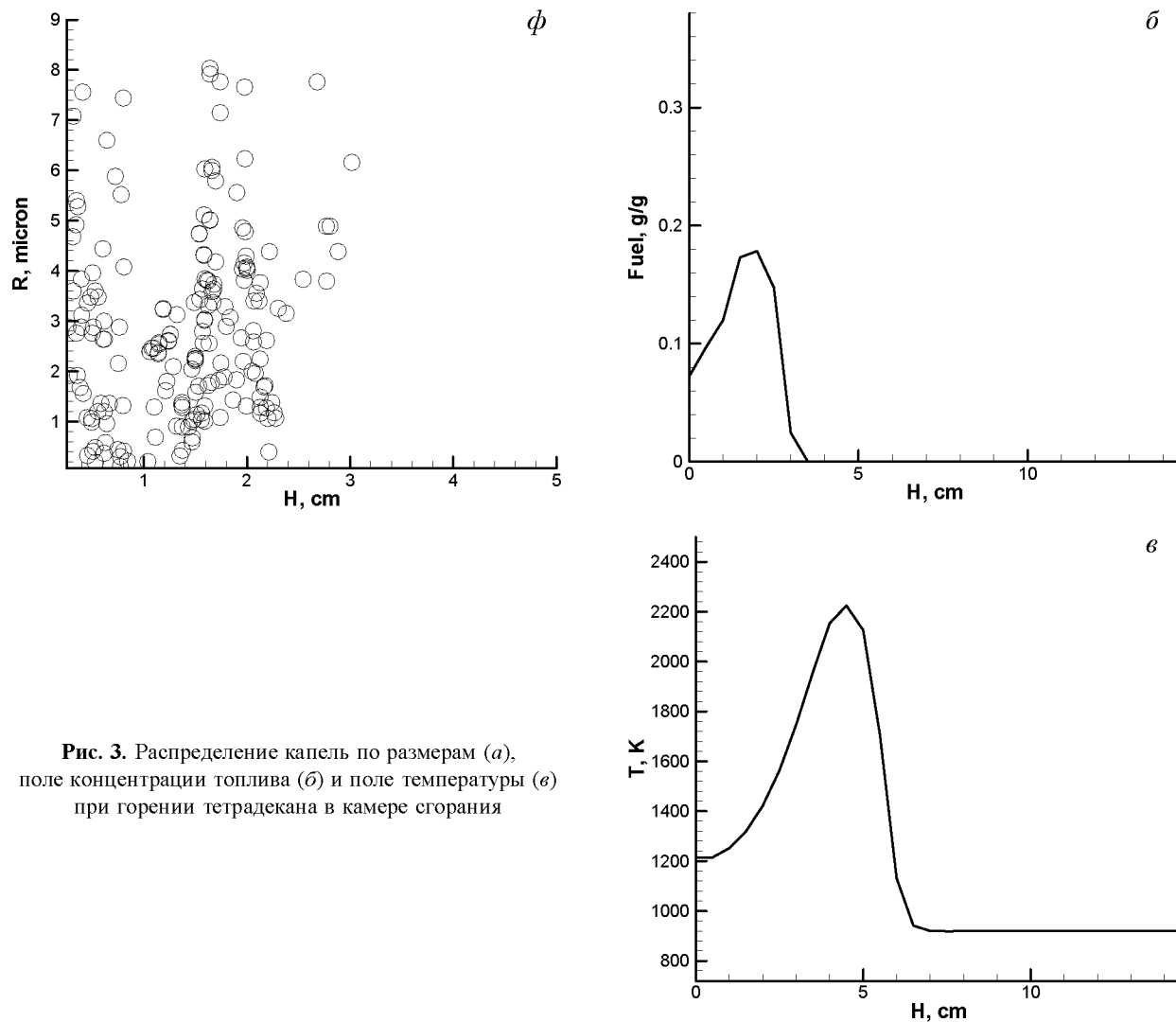


Рис. 3. Распределение капель по размерам (а), поле концентрации топлива (б) и поле температуры (в) при горении тетрадекана в камере сгорания

примерно совпадает. Однако распределение температур двух рассматриваемых топлив не дает похожей картины: при горении гептана вся камера, исключая зону пламени, прогревается значительно меньше – до 900 К, но захватываемая область максимальной температуры при горении гептана (1261 К) больше, чем у бензина. Более близкие картины имеют распределения температур бензина и тетрадекана, их максимальные температуры при горении совпадают, а общий прогрев камеры практически одинаков.

Следует обратить внимание на распределение тетрадекана по радиусам капель в камере сгорания. Во-первых, число капель в данный момент времени у тетрадекана гораздо превышает их число у двух других топлив, во-вторых, его капли поднимаются на высоту, равную 3 см, что значительно больше, чем у гептана и бензина. Так-

же видно, что у тетрадекана в рассматриваемый момент времени топливо при сгорании находится в жидкой фазе. Эти явления можно объяснить тем, что испарение капель топлива зависит от поверхностного натяжения, которое у тетрадекана как разновидности дизельного топлива гораздо больше, чем у гептана и бензина.

Полученные результаты показали, что сгорание жидкого топлива происходит после его испарения в газовой фазе; вся камера, исключая зону пламени, прогревается равномерно до температуры, примерно в 2 раза меньшей максимальной температуры.

На основе анализа полученных результатов по горению различных топлив можно сделать следующие выводы:

– капли у обоих топлив поднимаются на одну и ту же высоту и имеют размеры в одних и тех

же пределах; по ширине камеры также происходит равномерное распределение капель;

– концентрация топлив в обоих случаях тоже одинакова, т.е. пары бензина и гептана достигают одной высоты, и их концентрация на оси примерно совпадает;

– распределение температур двух рассматриваемых топлив не дает похожей картины: при горении гептана вся камера, исключая зону пламени, прогревается значительно меньше, но область максимальной температуры при горении гептана больше, чем у бензина;

– при горении тетрадекана число капель в данный момент времени гораздо превышает их число у двух других топлив; его капельки поднимаются на высоту, значительно большую, чем у гептана и бензина;

– вследствие большого поверхностного натяжения тетрадекана испарение его капель происходит очень медленно, поэтому горение осуществляется одновременно и в газовой, и в жидкой фазах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Amsden A.A., O'Rourke P.J., Butler T.D.* KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays, Los Alamos, 1989. 160 с.

2. *Аскарова А.С., Рыспаева М.Ж.* Расчет горения впрыска жидкого топлива в замкнутой камере // Вестник КазНУ. Сер. физ. 2006. № 1. С. 74-78.

Резюме

Екі фазалық ортада әсер ететін стационарлық емес екі өлшемді теңдеулер негізінде жану камерасында әртүрлі сұйық отынның жанулары есептелінді (бензин, гептан, тетрадекан). Өлшемдері әртүрлі уақыттағы буланған тамшылар мен температураның таралулары алынды.

Summary

The problem of combustion of different liquid fuels (benzine, heptane, tetradecane) in the chamber has been solved on the basis of nonstationary two-dimensional equations of the reactive two-phase medium; the distribution of temperature and of vaporizing droplets by sizes at various time moments has been obtained.

*КазНУ им. аль-Фараби,
г. Алматы*

Поступила 20.07.06 г.