

A. С. АСКАРОВА, С. А. БОЛЕГЕНОВА, И. Э. БЕРЕЗОВСКАЯ, Ш. С. ОСПАНОВА,  
А. Б. ЕРГАЛИЕВА, Г. К. МУКАШЕВА, Н. Б. РАХИМБАЕВА

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ ПРИ ГОРЕНИИ

Проведено математическое моделирование процессов распыла воспламенения и горения жидкого топлива в камере сгорания. Получены влияние угла впрыска жидкого топлива (тетрадекан и гексадекан) на распределения максимальной температуры и концентрации углекислого газа.

Горение жидкого топлива отличается рядом специфических особенностей, обусловленных протеканием химических реакций в условиях динамического и теплового взаимодействия реагентов, интенсивного массопереноса при фазовых превращениях, а также зависимостью параметров процесса как от термодинамического состояния системы, так и от ее структурных характеристик. Многообразие и сложность указанных факторов создают известные трудности при разработке полноценной теории. Существенные результаты в этом направлении могут быть получены на основе последовательного приложения методов механики гетерогенных систем к описанию процессов горения двухфазных сред [1].

При распылении жидкого топлива в неподвижном или движущемся газе образуется двухфазная реагирующая струя – факел жидкого топлива. Механизм горения такого факела заключается в нагреве и испарении капель, смешении паров жидкости с газообразным окислителем, поступающим из окружающей среды, химическом взаимодействии газообразных компонентов и, наконец, в смешении продуктов сгорания с исходными реагентами.

В зависимости от способа образования горючей смеси могут реализоваться различные режимы горения струй распыленной жидкости, а также богатых (при избытке топлива), бедных (значение массы топлива мало) или стехиометрических газокапельных смесей. Во всех случаях характеристики факела зависят от интенсивности испарения, лимитирующей скорость протекания процесса. При высокой степени распыла закономерности распространения факела жидкого топлива во многом сходны с закономерностями распространения турбулентного газового пламени.

Для проведения вычислительных экспериментов по численному моделированию процессов тепломассопереноса при горении жидкого топлива в реальных камерах сгорания, модель цилиндрической камеры высотой  $H=15$  см, радиусом  $R=2$  см, в которой заданы следующие начальные условия: температура – 900 К, давление – 32 Бар. Жидкое топливо массой – 0,006 г впрыскивается в камеру сгорания через круглое сопло, расположенное в центре нижней части камеры, как показано на рис. 1 [2].

Уравнение неразрывности для компонента  $m$ :

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho_m \vec{u}) = \vec{\nabla} \left[ \rho D \vec{\nabla} \left( \frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho}_m^c + \dot{\rho}_m^s \delta_{ml}, \quad (1)$$

уравнение импульса:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\frac{1}{a^2} \vec{\nabla} p - A_0 \vec{\nabla} \left( \frac{2}{3} \rho k \right) + \vec{\nabla} \vec{\sigma} + \vec{F}^s + \rho \vec{g}, \quad (2)$$

уравнение энергии:

$$\frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} I) = -p \vec{\nabla} \vec{u} + (1 - A_0) \sigma \vec{\nabla} \vec{u} - \vec{\nabla} \vec{J} + A_0 \rho \varepsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s, \quad (3)$$

где  $\vec{J} = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla \left( \frac{\rho_m}{\rho} \right)$ ,

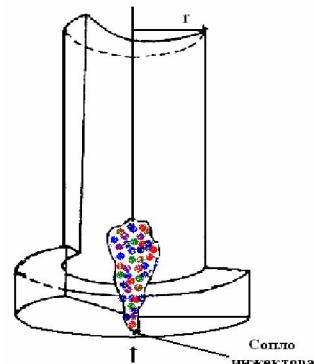


Рис. 1. Геометрия камеры сгорания

уравнения к- $\varepsilon$  модели турбулентности:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} k) = -\frac{2}{3} \rho k \vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\sigma} : \vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\nabla} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr_k} \right) \vec{\nabla} k \right] - \rho \varepsilon + \dot{W}^s, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} \varepsilon) = -\left( \frac{2}{3} c_{\varepsilon_1} - c_{\varepsilon_2} \right) \rho \varepsilon \vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\nabla} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \vec{\nabla} \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} [c_{\varepsilon_1} \vec{\sigma} : \vec{\nabla} \vec{u} - c_{\varepsilon_2} \rho \varepsilon + c_s \dot{W}^s] \quad (5)$$

где  $\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} - \frac{2}{3}\mu e_{kk} \delta_{ij}$ ,  $i, j, k = 1, 2, 3$ ,  $e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ,

$$\mu = (1.0 - A_0) \rho V_0 + \mu_{air} + A_0 \rho c_\mu k^2 / \varepsilon, \quad \mu_{air} = \frac{A_1 T^{3/2}}{(T + A_2)}, \quad K = \frac{\mu c_p}{Pr}, \quad D = \frac{\mu}{\rho Sc}.$$

В данной работе исследовалось 2 вида жидкого топлива: тетрадекан ( $C_{14}H_{30}$ ) и гексадекан  $C_{16}H_{34}$ .

В работе были проведены вычислительные эксперименты по численному моделированию процесса горения жидкого топлива и исследовано влияние угла распыла впрыскиваемого топлива на его самовоспламенение и сгорание в камере сгорания. Результаты численного моделирования приведены на рис. 2–6.

На рис. 2–6 представлены результаты 3D моделирования процессов самовоспламенения: поля температуры, концентраций паров углекислого газа, концентраций паров топлива и распределение капель по радиусам для двух видов жидкого топлива: тетрадекана  $C_{14}H_{30}$  и гексадекана  $C_{16}H_{34}$  при равенстве углов *cone* и *dcone*.

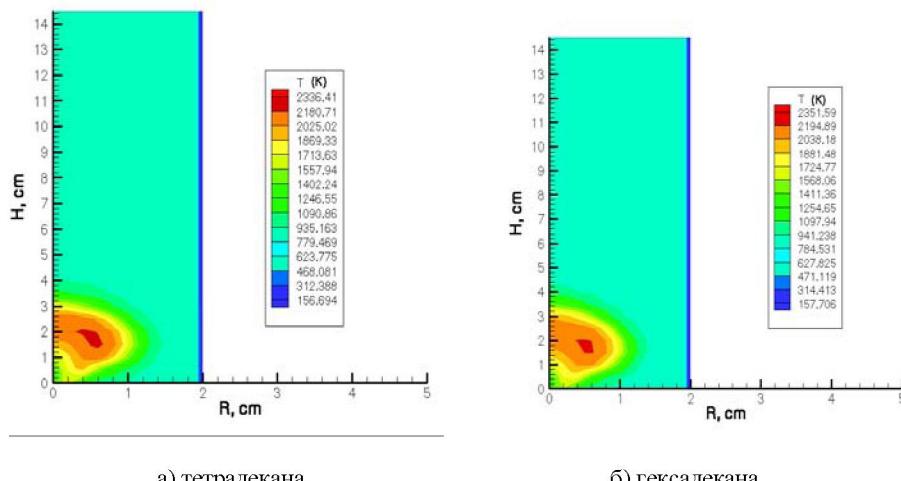
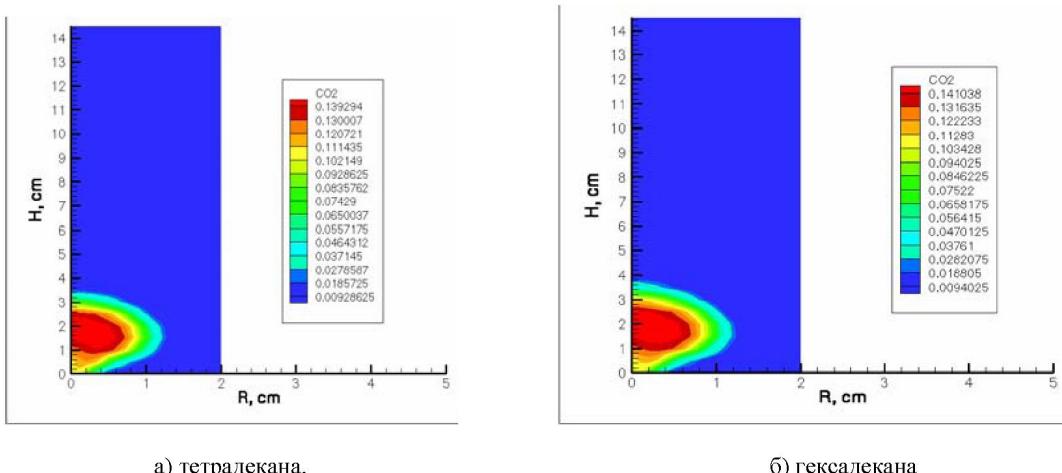


Рис. 2. Поля температуры в момент самовоспламенения  $t = 1.29 \cdot 10^{-3}$  с при горении

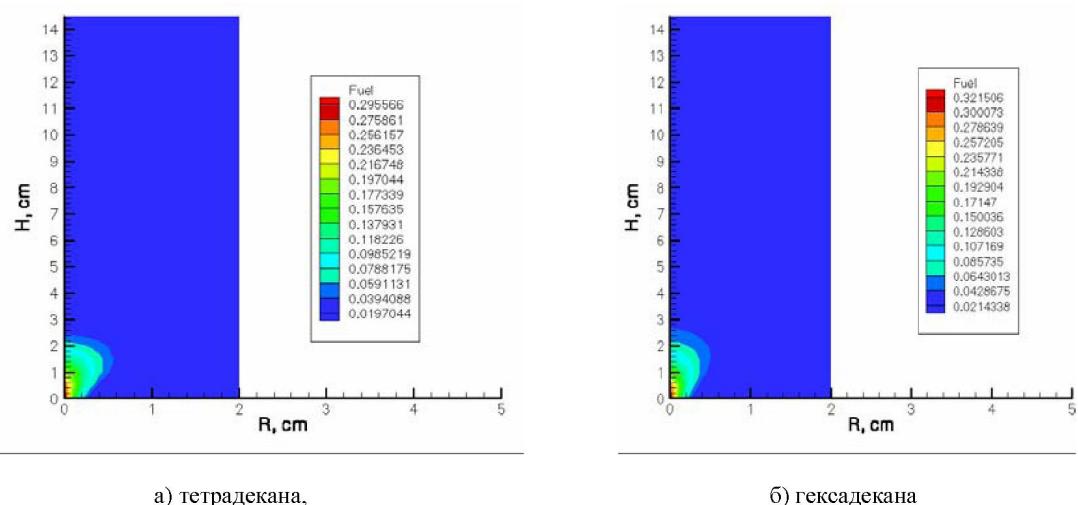
Сравнительный анализ рис. 2 показывает, что воспламенение возникает в одинаковый момент времени и на одной высоте относительно камеры для этих двух видов топлив, но очаг воспламенения для тетрадекана занимает больший объем по ширине камеры. Однако процесс горения гексадекана в камере сгорания проходил быстрее и с большим выделением тепла, чем для тетрадекана.

При детальном изучении рис. 3 видно, что при самовоспламенении пары углекислого газа для гексадекана занимают больший объем по ширине камеры и поднимаются на большую высоту, чем пары тетрадекана.

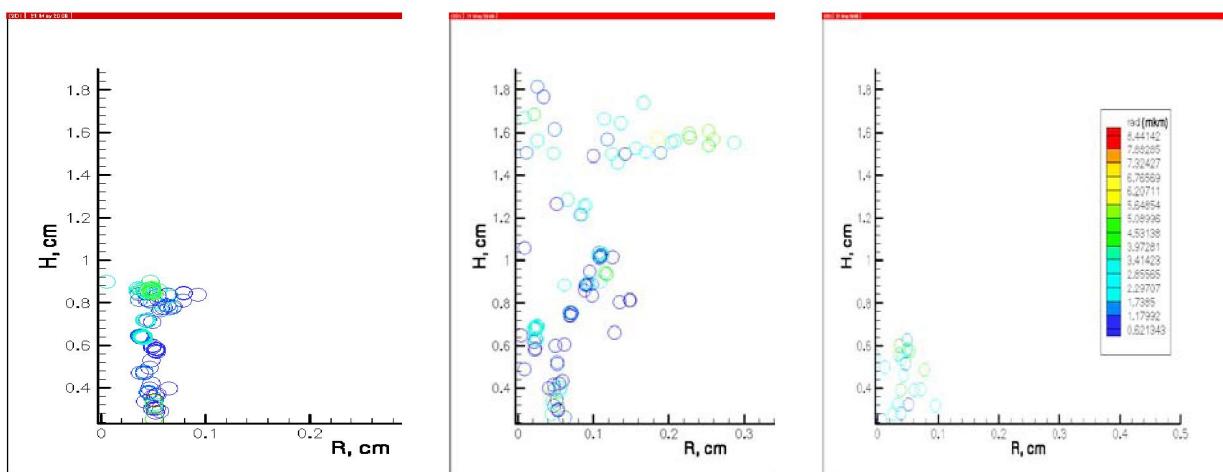
Как показано на рис. 4, в момент самовоспламенения пары гексадекана поднялись на большую высоту, но очаг горения тетрадекана и его пары распространились на больший объем. При горении двух топлив концентрация паров гексадекана выше (случай б), чем для тетрадекана (случай а).



**Рис. 3.** Распределения концентраций паров углекислого газа в момент самовоспламенения

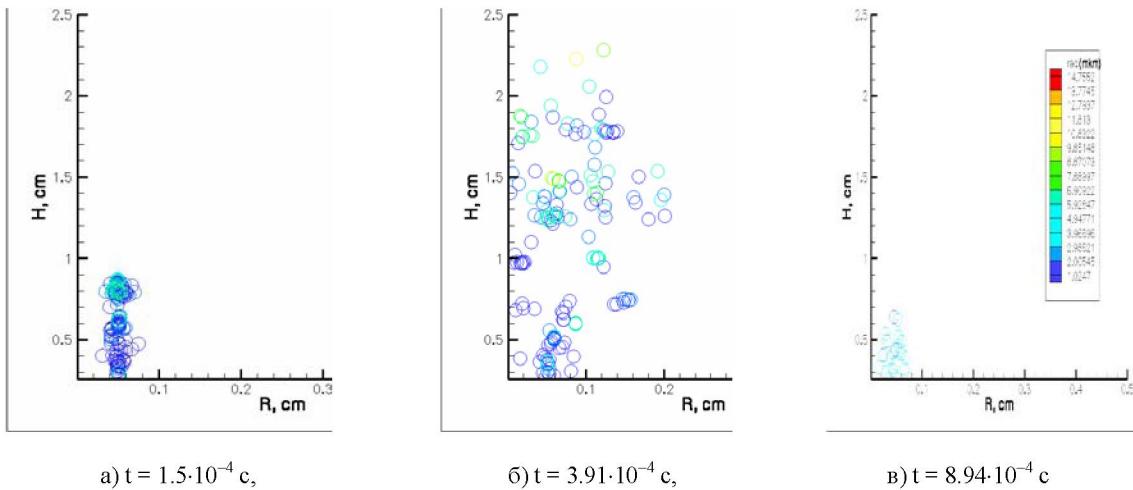


**Рис. 4.** Распределение концентраций паров топлива в момент самовоспламенения



**Рис. 5.** Распределение капель по радиусам для тетрадекана в моменты времени

На рис. 5 представлено распределение капель по радиусам при впрыскивании тетрадекана. Анализ рисунка показывает, что с увеличением времени распыла радиус капель увеличивается, что свидетельствует о соударении и слиянии частиц. При этом капли топлива распространяются на 1,8 см по длине и 0,3 см по ширине камеры сгорания (рис. 5, б). К моменту времени  $t = 8.94 \cdot 10^{-4}$  с (рис. 5, в) капли практически испарились и занимают только нижнюю часть камеры.



**Рис. 6.** Распределение капель по радиусам для гексадекана в моменты времени

Анализ рис. 6 показывает, что капли гексадекана ведут себя аналогично лишь с той разницей, что они распространяются на высоту 2,5 см и по ширине 0,2 см камеры сгорания (рис. 6, б). К моменту времени  $t = 8.94 \cdot 10^{-4}$  с (рис. 6, в) капли гексадекана испаряются и занимают только нижнюю часть камеры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Волошина И.Э., Рыспаева М.Ж. Влияние начальной концентрации топлива на горение ламинарных и турбулентных струй // Вестник КазНУ. Сер. физическая. – 2008. – № 3(27). – С. 177-180.

2 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Волошина И.Э., Рыспаева М.Ж. Влияние массы впрыска жидкого топлива на его самовоспламенение и горение. // Известия НАН РК. Сер. физ.-мат. – 2009. – № 2(264). – С. 3-11.

*A. С. Аскарова, С. А. Болегенова, И. Э. Березовская, Ш. С. Оспанова,  
А. Б. Ергалиева, Г. К. Мұқашева, Н. Б. Рахимбаева*

#### ЖАНУ КЕЗІНДЕГІ СҮЙЫҚ ОТЫНДАРДЫҢ ӨЗДІГІНЕН ТҮТАНУ ПРОЦЕСІН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Жану камерасындағы сүйық отынның тұтану және жану процесстерін математикалық модельдеу жүргізілді. Сүйық отындарды (тертрапекан мен гексадекан) бұрку бұрыштарының максимал температуралың таралуы мен көміркышқыл газының концентрациясына есепі алынды.

*A. S. Askarova, S. A. Bolegenova, I. E. Berezovskaya, Sh. S. Ospanova,  
A. B. Ergalieva, G. K. Mukasheva, N. B. Rahimbaeva*

#### NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF AUTOIGNITION OF LIQUID FUELS IN COMBUSTION

There were conducted mathematical modeling of spray ignition and combustion of liquid fuel in the combustion chamber. There were obtained the influence of the liquid fuels (tetradecane and hexadecane) injection angle on the distribution of the maximum temperature and the concentration of carbon dioxide.