

УДК 378.147.88

**А.С. Аскарова, С.А. Болегенова, С.А. Болегенова, И.Э. Березовская,  
М.Т. Бекетаева**

## **ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФИЗИКЕ ГОРЕНИЯ В ВЫСШЕМ УЧЕБНОМ ЗАВЕДЕНИИ**

*г. Алматы, Казахский национальный университет им. аль-Фараби*  
[Beketayeva.m@gmail.com](mailto:Beketayeva.m@gmail.com)

### **Аннотация**

Высшее учебное заведение – это учебное учреждение, где помимо подготовки высококвалифицированных кадров по специальностям, проводятся исследования в различных областях науки и техники. Ухудшение окружающей среды, в частности атмосферное загрязнение мегаполисов производственными и транспортными средствами, ставит перед собой цель детального изучения процессов горения в промышленных отраслях. В стенах университета во время учебного процесса и в качестве выпускных работ студентами проводятся исследования процессов горения различных топлив. Полученные результаты позволяют определить оптимальные параметры горения, предложить технологические и конструктивные решения, которые в свою очередь могут решить частично или полностью проблему минимизации вредных выбросов и эффективного сжигания углеводородного топлива.

**Ключевые слова:** горение, испарение, распределение, жидкое топливо, массоперенос.

### **Андатпа**

Жоғары оқу орны – бұл мамандықтар бойынша жоғары квалификациялы мамандар даярлап қана қоймай, ғылым мен техниканың түрлі салаларында зерттеулер жүргізетін білім беру ошағы болып табылады. Қоршаған ортаның күйінің нашарлауы, оның ішінде мегаполистердің өндірістік және транспорттық әсерден атмосфералық ластануы өз алдына өндірістік салалардағы жану процесін егдей-тегжейлі зерттеуді мақсат етеді. Университет қабырғасында оқу үдерісі кезінде, сонымен қоса студенттердің бітіру жұмыстары ретінде түрлі жанғыш отындардың жану процесіне қатысты зерттеулер орындалады. Алынған нәтижелер жанудың оптималды параметрлерін анықтауға және көмірсутекті отынды жағудың эффективті әдісін анықтауға, сол арқылы зиянды қалдықтарды кемітуге байланысты мәселелерді толықтай немесе ішінара шешуге жәрдемдесетін технологиялық және конструктивті шешімдерді ұсынуға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** жану, булану, таралу, сұйық отын, масса тасымалдану.

### **Abstract**

Institution of higher education - is an educational institution, where in addition to training highly qualified personnel in the field, carried out research in various fields of science and technology. The deterioration of the environment, particularly atmospheric pollution of cities by industrial and transport vehicles, aims to detailed study of combustion processes in the industrial sectors. Within the walls of the university, during the educational process and as final papers, students conduct research on the burning processes of various fuels. The obtained results allow determining the optimal parameters of combustion, to offer technological and constructive solutions, which in turn can solve partially or completely the problem of minimizing harmful emissions and efficient combustion of hydrocarbon fuel.

**Keywords:** combustion, evaporation, distribution, liquid fuel, mass transfer.

### **Введение**

В целях подготовки квалифицированных инженеров в области теплофизики

студенты изучают курс физики горения различных топлив. Численное моделирование горения топлива является сложной задачей, так как требует учета большого количества сложных взаимосвязанных процессов и явлений: многоступенчатые цепные химические реакции, перенос импульса, тепла и массы путем конвекции, молекулярный перенос, излучение, турбулентность, испарение жидких капель и т.д. [1-3].

Поэтому компьютерное моделирование становится все более важным элементом исследования процессов горения и проектирования различных устройств, использующих процесс горения. Однако говорить о полной замене экспериментальных исследований численными расчетами было бы неправильно, здесь речь идет о подходах к исследованию, которые должны взаимно дополнять друг друга.

### Методика исследования

В данной работе исследуется процесс гомогенного горения распыленного топлива. Капли жидкого топлива очень быстро испаряются, пары топлива смешиваются с окислителем (воздухом в камере сгорания), так данная смесь воспламеняется и очень быстро (4 мс) сгорает. Ввиду того, что лабораторный курс дисциплины сложно поставить в стенах университета, работы были разработаны для виртуального вычислительного эксперимента [4-6], который позволяет полностью описывать процесс горения, с учетом полей концентраций, температуры, летучих компонентов, также концентрации вредных выбросов [7-10].

Математическая модель задачи о горении впрыска топлива включает в себя уравнение неразрывности для компоненты  $m$  (1), уравнение импульса (2), уравнение энергии (3), уравнения  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности (4-5), Закон сохранения концентрации компоненты (6) [6-8]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot \left[ \rho D \vec{\nabla} \left( \frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho}_m^c + \dot{\rho}_m^s \delta_{m1}, \quad (1)$$

где  $\rho_m$  – это массовая плотность компоненты  $m$ ,  $\rho$  – полная массовая плотность,  $u$  – скорость жидкости.

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

где  $p$  – давление жидкости.

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

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

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \varepsilon) = -\left( \frac{2}{3} c_{\varepsilon 1} - c_{\varepsilon 2} \right) \rho \varepsilon \vec{\nabla} \cdot \vec{u} + \vec{\nabla} \cdot \left[ \left( \left( \frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \vec{\nabla} \varepsilon \right) \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left[ c_{\varepsilon 1} \vec{\sigma} \vec{\nabla} \vec{u} - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + c_s \dot{W}^s \right], \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho c_m)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho c_m u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho \cdot D_{c_m} \cdot \frac{\partial c_m}{\partial x_i} \right) + S_m. \quad (6)$$

Процессы сгорания углеводородных жидких топлив изучаются при проведении лабораторных работ с помощью вычислительных прикладных программ. В работах даются подробные описания алгоритма действий, а также методика проведения исследований. Для исследований можно проводить эксперименты с изменением начальных входных параметров.

В предложенной работе был проведен вычислительный эксперимент по горению различного жидкого топлива, определить поля температуры во время сгорания, а также концентрационные характеристики продуктов сгорания. Для данной цели в работе рассматривается камера сгорания, которая имеет форму цилиндра. Радиус  $R=2$  см и высота камеры  $H=15$  см. Объем заполнен воздухом с температурой  $T=900$  К и давлением  $P=32$  Бара. Жидкое топливо впрыскивается в камеру сгорания через круглое сопло, которое расположено в центре нижней части камеры. Угол впрыска также задается начальными условиями.

Известно, что жидкое топливо после впрыска быстро испаряется и пары топлива смешиваются с окислителем. Тем самым само сгорание осуществляется в газовой фазе. Процесс горения жидкого топлива является быстро протекающим, его длительность составляет в среднем 4 мс. Все данные после вычисления могут быть представлены в графическом виде, также в виде анимации. Все расчеты выполняются каждым студентом индивидуально, что минимизирует такие факты как использование чужих данных, также учит студентов к самостоятельному решению поставленной задачи.

### Результаты эксперимента

Распределение средней температуры в камере сгорания при горении трех видов топлива (бензена, гептана и тетрадекана) показывает, что максимальным значением температуры отличается процесс горения бензена: камера прогревается до 2600 К (рис. 1); для гептана и тетрадекана средние температуры в камере соответственно достигают 1700 и 1500 К. Остальная часть камеры сгорания прогревается до 1000 К в случае горения бензена и до 1200 К при сжигании гептана и тетрадекана.

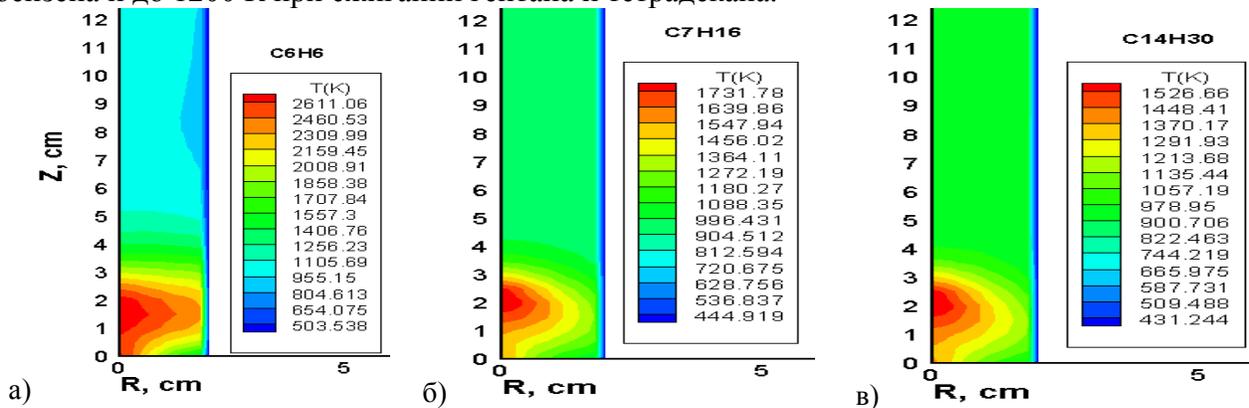


Рисунок 1. Средняя температура в камере сгорания при горении:  
а) бензена, б) гептана, в) тетрадекана

На рисунках 2-4 представлены результаты численного эксперимента по горению трех видов топлива с учетом образования и окисления сажи в развитой турбулентности: на графиках представлены средние поля концентрации компонентов реакции.

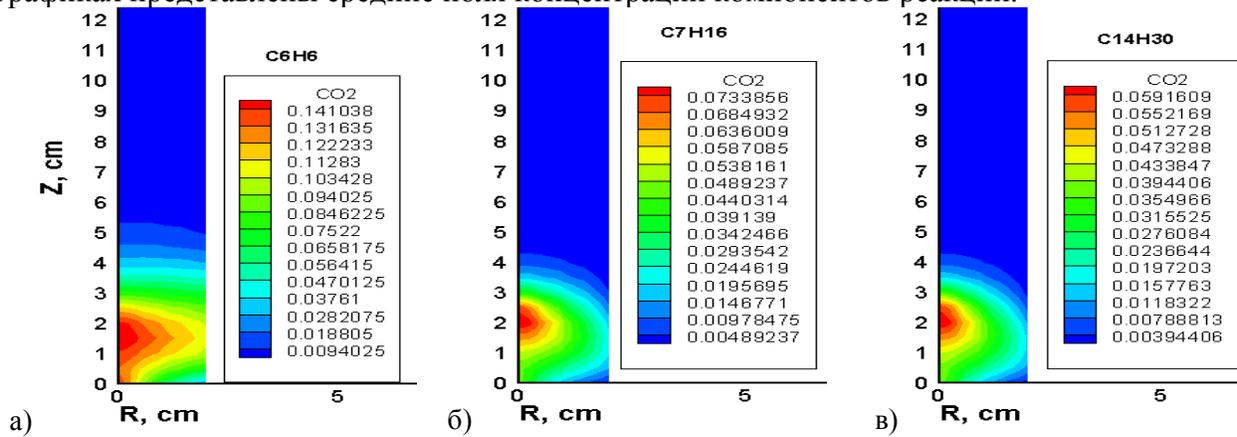


Рисунок 2. Средняя концентрация углекислого газа  $\text{CO}_2$  в камере сгорания при горении:

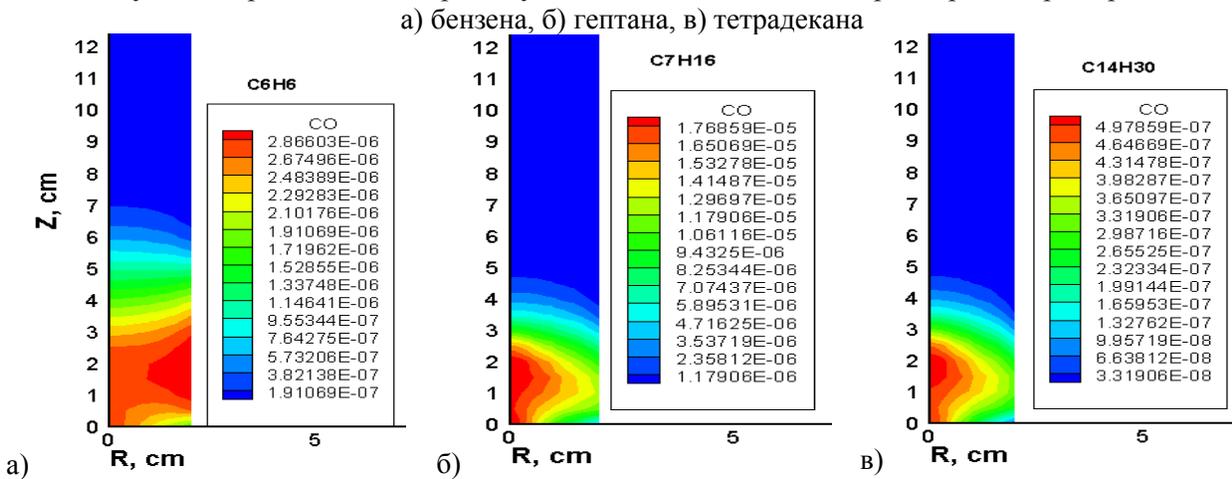


Рисунок 3. Средняя концентрация окиси углерода  $\text{CO}$  в камере сгорания при горении:

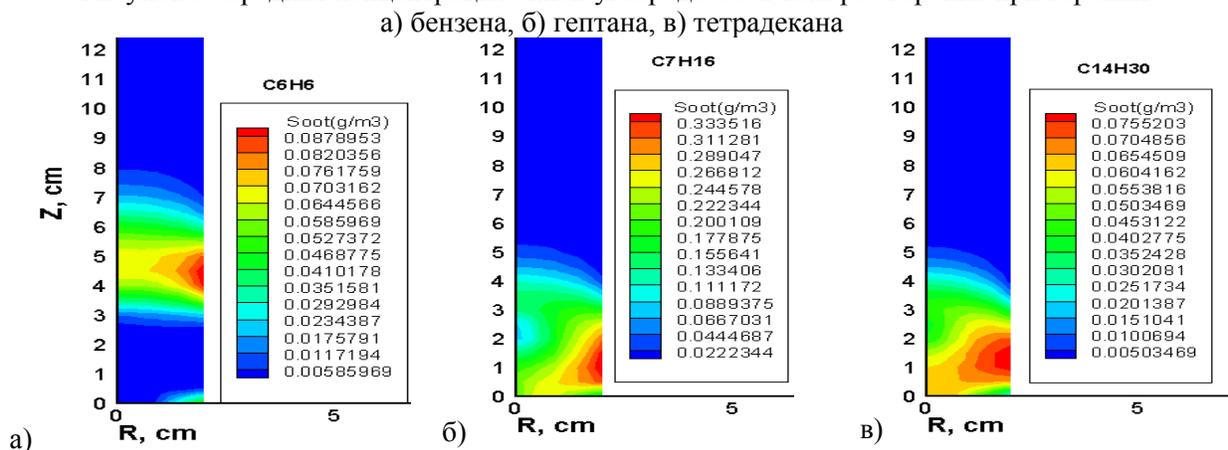


Рисунок 4. Средняя концентрация сажи в камере сгорания при горении:

а) бензена, б) гептана, в) тетрадекана

Рисунок 2 представляет среднюю концентрацию углекислого газа в камере сгорания для трех видов жидкого топлива (бензена, гептана, тетрадекана). Для трех исследуемых

видов топлива интенсивное образование углекислого газа происходит на оси камеры сгорания в области до 2 см по высоте камеры. Наибольшее значение образующегося в результате горения бензена равно 0,1410 г/г (рис. 2 а). При горении гептана концентрация углекислого газа принимает максимальное значение 0,0733 г/г (рис. 2 б). Соответственно, для тетрадекана концентрация углекислого газа в камере сгорания достигает максимального значения 0,0592 г/г (рис. 2 в).

На рисунке 3 представлена средняя концентрации окиси углерода для бензена, гептана, тетрадекана, соответственно. Концентрация образующегося угарного газа имеет небольшое значение из-за того, что масса впрыскиваемого в камеру сгорания жидкого топлива очень мала (18, 8 и 6 мг). Средняя концентрация угарного газа, образующегося при горении трех видов жидкого топлива не превышает значение  $1,8 \cdot 10^{-5}$  г/г. Большая часть окиси углерода затем догорает до углекислого газа  $\text{CO}_2$ .

Образование сажи при горении трех исследуемых видов жидкого топлива представлено на рисунке 4. Анализ рисунка 4 показывает, что наибольшая концентрация сажи образуется при горении гептана и равна 0,3335 г/м<sup>3</sup>. При горении тетрадекана значение концентрации образующейся сажи наименьшее (рис. 4 в).

В данной работе через численный эксперимент были определены средняя температура, средняя концентрация окиси углерода  $\text{CO}$  и углекислого газа  $\text{CO}_2$ , также средняя концентрация сажи в камере сгорания при горении углеводородных топлив (бензен, гептан и тетрадекан). Из вышеприведенных графиков можно сделать вывод о том, что чем больше молекулярный вес углеводородного топлива тем выше его температура горения, и тем больше выделяется при этом углекислого газа. В то время как для данных топлив оксид углерода и сажа больше всего выделяется при сжигании гептана. Это можно объяснить тем, что оксид углерода и сажа являются продуктами неполного сгорания и их формирование зависит прежде всего от теплофизических характеристик топлива, от скорости реакций и от механизма химических превращений.

### **Заключение**

Таким образом, по анализу проделанной работы в целом можно сделать заключение о протекающих процессах в камерах сгорания, использующие жидкое топливо, о параметрах веществ при горении, что трудно было бы узнать экспериментальным методом. Таким образом, вычислительный эксперимент является наиболее эффективным и малозатратным при изучении процессов горения. По данным, полученным в ходе эксперимента, можно сделать предложения по использованию того или иного топлива в заранее определенном случае, найти их оптимальные параметры.

### **Литература**

1. Gorokhovski M., Chtab-Desportes A., etc. Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure // AIP Conference Proceedings. – Xian, 2010. – V. 1207. – P. 66-73.
2. Chatwani A., Bracco F. Computation of dense spray jets // ICLASS-85. – 1985. – V. 1. – P.1-12.
3. Anderson J.D. Computational fluid dynamics: the basics with applications. Dep. Of Aerospace Engineering, University of Maryland, 1995. – 562 с.
4. Amsden A.A., O'Kourke P.J., Butler T.D. KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. – Los Alamos, 1989. – 160 с.
5. Gorokhovski M., Borghi R. Model of soot formation and oxidation in diesel engines // Journal of diesels, Transactions of SAE. – 1993, 930075. – P.3-15.
6. Bracco F.V. Modeling of engine sprays, SAE Paper 850394. – 1985. – P.113-136.

7. Аскарлова А., Гороховски М., Локтионова И., Рыспаева М. Горение жидких топлив в камере сгорания // Известия НАН РК, серия физико-математическая. – 2006. – №3. – С.15-20.
8. Askarova A., Voloshina I., Ryspayeva M. Numerical study of mass influence on the process of combustion of liquid fuel spray // Abstracts of V-th International conference “Problems of industrial heat engineering”, Kiev, Ukraine, 2007. – P.27-28.
9. Аскарлова А.С, Рыспаева М.Ж. Расчет горения впрыска жидкого топлива в замкнутой камере // Вестник КазНУ, серия физическая. – 2006. – № 1. – С. 74-78.
- 10.Reitz R.D., Diwakar R. Structure of High Pressure Fuel Sprays, SAE Technical Paper 870598. – 1987. – Vol. 96. – P. 492-509.

### References

1. Gorokhovski M., Chtab-Desportes A., etc. Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure // AIP Conference Proceedings. – Xian, 2010. – Vol. 1207. – P. 66-73.
2. Chatwani A., Bracco F. Computation of dense spray jets // ICLASS-85. – 1985. – V. 1. – P.1-12.
3. Anderson J.D. Computational fluid dynamics: the basics with applications. Dep. Of Aerospace Engineering, University of Maryland, 1995. – 562 с.
4. Amsden A.A., O’Kourke P.J., Butler T.D. KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. – Los Alamos, 1989. – 160 с.
5. Gorokhovski M., Borghi R. Model of soot formation and oxidation in diesel engines // Journal of diesels, Transactions of SAE. – 1993, 930075. – P.3-15.
6. Bracco F.V. Modeling of engine sprays, SAE Paper 850394. – 1985. – P.113-136.
7. Askarova A., Gorokhovski M., Loktionova I., Ryspayeva M. Goreniye zhidkikh topliv v kamere sgoraniya // Izvestiya NAN RK, seriya fiziko-matematicheskaya. – 2006. – №3. – S.15-20.
8. Askarova A., Voloshina I., Ryspayeva M. Numerical study of mass influence on the process of combustion of liquid fuel spray // Abstracts of V-th International conference “Problems of industrial heat engineering”, Kiev, Ukraine, 2007. – P.27-28.
9. Askarova A., Ryspayeva M. Raschet goreniya vpryska zhidkogo topliva v zamknutoy kamere // Vestnik KazNU, seriya fizicheskaya. – 2006. – № 1. – S. 74-78.
- 10.Reitz R.D., Diwakar R. Structure of High Pressure Fuel Sprays, SAE Technical Paper 870598. – 1987. – Vol. 96. – P. 492-509.