

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА ПРИ ВЫСОКИХ ЧИСЛАХ ВЕБЕРА

Проведены исследования процесса горения жидкого топлива в зависимости от значения числа Вебера в камере сгорания при заданных начальных условиях. Выбран оптимальный вариант организации процесса горения жидкого топлива.

Введение. В настоящее время основным источником вырабатываемой энергии является энергия при сжигании топлива. Для выработывания энергии служат все виды топлива. 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 [1, 2]. Один из способов изучения процессов, протекающих в камере сгорания, заключается в использовании численных методов. Компьютерное моделирование предоставляет возможность для изучения процесса горения различных видов топлив более эффективно, качественно и с наименьшими затратами на эксперимент [3]. В Казахстане этими исследованиями занимаются такие научно-исследовательские институты, как КазНИИ Энергетики им. акад. Ш. Ч. Чокина в «Лаборатории топлива и охраны окружающей среды», НИИ ЭТиФ в Институте проблем горения и в «Лаборатории моделирования процессов тепломассопереноса» при КазНУ им. аль-Фараби.

Горение – это химический процесс окисления горючих компонентов топлива, сопровождающийся интенсивным выделением теплоты. Известно, что при низких температурах наличие топлива и окислителя не обеспечивает их химического соединения, называемого горением. Горение начинается только после того, как частицы прогрелись до температуры, обеспечивающей им энергию активации E , достаточную для вступления в реакцию. Поэтому жидкое топливо сгорает всегда в паровой фазе (испарение и горение могут идти параллельно).

В технических устройствах жидкое топливо распыляется форсунками того или иного типа, а затем поступает в факел в виде капель. Распыл всегда полидисперсен. Очень мелкие капли успевают полностью испариться при прогреве, и пары образуют с окислителем газовую смесь. Эта смесь воспламеняется. Более крупные капли горят в процессе испарения, они могут окружаться собственными факелами.

Математическая модель. Математическая модель задачи о дисперсии и горении впрыска жидкого топлива включает в себя уравнение неразрывности для компоненты m (1), уравнение импульса (2), уравнение энергии (3), уравнения к-е модели турбулентности (4-5).

Уравнение неразрывности для компоненты m :

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

где ρ – плотность смеси; ρ_m – парциальная плотность m -й компоненты; $\vec{u} = (u, v, w)$ – компоненты скоростей газа; D – коэффициент диффузии; $\dot{\rho}_m^c$ – химический источниковый член; $\dot{\rho}^s$ – источниковый член вследствие впрыска; δ_{m1} – символ Кронекера для m -й компоненты.

Уравнение импульса:

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

где A_0 – коэффициент перемежаемости; k – кинетическая энергия турбулентности; $\vec{\nabla}$ – оператор градиента; $\vec{\sigma}$ – тензор вязких напряжений.

Уравнение энергии:

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

где $\vec{J} = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right)$; I – удельная внутренняя энергия; \vec{J} – тепловой поток; ε – скорость диссипации энергии турбулентности; \dot{Q}^c – источниковый член вследствие химических реакций; \dot{Q}^s – источниковый член вследствие взаимодействия с впрыском.

Уравнения к-с модели турбулентности:

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

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} \varepsilon) = -\left(\frac{2}{3} c_{\varepsilon_i} - c_{\varepsilon_j} \right) \rho \varepsilon \vec{\nabla} \vec{u} + \quad (5)$$

$$+ \vec{\nabla} \left[\left(\frac{\mu}{Pr_k} \right) \vec{\nabla} \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left[c_{\varepsilon_i} \vec{\sigma} : \vec{\nabla} \vec{u} - c_{\varepsilon_i} \rho \varepsilon + c_i \dot{W}^r \right];$$

$$\vec{\sigma} : \vec{\nabla} \vec{u} = \sigma_{ij} e_{ij},$$

$$\text{где } \sigma_{ij} = 2 \mu e_{ij} - \frac{2}{3} \mu e_{kk} \delta_{ij}, \quad i, j, k = 1, 2, 3,$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

$$\mu = (1.0 - A_0) \rho V_0 + \mu_{air} + A_0 \rho c_{\mu} k^2 / \varepsilon,$$

$$\mu_{air} = \frac{A_1 T^{3/2}}{(T + A_2)}.$$

$$\text{Здесь } K = \frac{\mu c_p}{Pr}, \quad D = \frac{\mu}{\rho Sc}.$$

Уравнение изменения массы частицы имеет вид:

$$\frac{dm}{dt} = -2\pi r_p (\rho D)_{air} (\bar{T}) \frac{Y_1^* - Y_1}{1 - Y_1^*} Sh_p. \quad (6)$$

Уравнение состояния:

$$P = R_0 T \sum_m \left(\frac{\rho_m}{W_m} \right), \quad I(T) = \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) I_m(T),$$

$$c_p(T) = \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) c_{p_m}(T), \quad \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) = 1. \quad (7)$$

Уравнение движения частиц вдоль ее траектории имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \vec{u}_p &= D_p (\vec{u}_g + \vec{u}'_g - \vec{u}_p) + \vec{g}, \\ \frac{d}{dt} \vec{x}_p &= \vec{u}_p, \end{aligned} \quad (8)$$

где $D_p = \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{|\bar{u}_g + \bar{u}'_g - \bar{u}_p|}{r_p} C_D (\text{Re}_p)$.

Коэффициент лобового сопротивления для жидкокапель равен:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_p} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{\text{Re}_p^2}{3} \right), & \text{при } \text{Re}_p \leq 1000; \\ 0,424, & \text{при } \text{Re}_p > 1000. \end{cases}$$

Здесь

$$\text{Re}_p = \frac{2\rho |\bar{u}_g + \bar{u}'_g - \bar{u}_p| r_p}{\mu_{air}(\bar{T})},$$

$$\bar{T} = \frac{T + 2T_p}{3}, \quad (9)$$

$$\text{Pr}_p = \frac{\mu_{air}(\bar{T}) c_p(\bar{T})}{K_{air}(\bar{T})},$$

$$Nu_p = \left(2,0 + 0,6 \frac{1}{\text{Re}_p} \frac{1}{\text{Pr}_p} \frac{1}{3} \right) \frac{\ln \left(1 + \frac{B_p}{B_p} \right)}{B_p},$$

$$K_{air} = \frac{K_1 \bar{T}^{3/2}}{\bar{T} + K_2}.$$

В формуле 9 случайный вектор возмущения скорости газа — \bar{u}'_g .

Дополнительные члены в уравнениях газовой фазы (1)–(5), появляющиеся за счет межфазного обмена и за счет химической реакции можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\rho}^s &= - \int f \rho_p 4\pi r^2 R d\bar{u}_p dT_p dy dy, \\ \dot{\rho}_m^c &= W_m \sum_r (b_{mr} - a_{mr}) \dot{\omega}_r, \\ \dot{F}^s &= - \int f \rho_p \left(\frac{4}{3} \pi r^3 (\bar{F} - \bar{g}) + 4\pi r^2 R \bar{u}_p \right) \times \\ &\quad \times d\bar{u}_p dr dT_p dy dy, \\ \dot{Q}^s &= - \int f \rho_p \left\{ 4\pi r^2 R \left[I(T_p) + \frac{1}{2} (\bar{u}_p - \bar{u})^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4}{3} \pi r^3 \left[c(T_p) + (\bar{F} - \bar{g})(\bar{u}_p - \bar{u} - \bar{u}') \right] \right\} \times \\ &\quad \times d\bar{u}_p dr dT_p dy dy, \\ \dot{Q}^c &= \sum_r \sum_m (a_{mr} - b_{mr}) (\Delta h_f^0)_m \dot{\omega}_r, \\ \dot{W}^s &= \\ &= - \int f \rho_p \frac{4}{3} \pi r^3 (\bar{F} - \bar{g}) \bar{u}' d\bar{u}_p dr dT_p dy dy, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В выражениях 10 величины: $\dot{\rho}^s, \dot{F}^s, \dot{Q}^s$ — скорости изменения массы, импульса и энергии всех капель, имеющих радиус-вектор \bar{x} в момент времени t . \dot{W}^s — скорость, при которой турбулентные вихри совершают работу по распространению впрыскиваемых капель.

Для расчета колебаний и дробления капель нам требуется два дополнительных уравнения y_p и \dot{y}_p . Величина y_p пропорциональна смещению поверхности капель из состояния равновесия, градуированная радиусом капли. Капля распадается, тогда и только тогда, когда y_p превышает единицу.

Для обновлений значений y_p и \dot{y}_p каждого вычислительного цикла используем уравнение:

$$y(t) = \frac{We}{12} + \exp(-t/t_d) \times \quad (11)$$

$$\times \left[\left(y(0) - \frac{We}{12} \right) \cos \omega t + \frac{1}{\omega} \left(\dot{y}(0) + \frac{y_0 - \frac{We}{12}}{t_d} \right) \sin \omega t \right],$$

где $We = \frac{\rho u^2 r}{\alpha}$ число Вебера, u относительная скорость между каплей и газом; α – коэффициент поверхностного натяжения; $t_d = \frac{2 \rho_d r^2}{5 \mu_l}$ врем-

мя вязкого затухания; μ_l – вязкость жидкости и

$$\omega^2 = 8 \frac{\alpha}{\rho_d r^3} - \frac{1}{t_d^2} \quad \text{квадрат частоты колебаний}$$

[5-9].

Результаты численного эксперимента по горению жидкого топлива и их обсуждение. В данной работе проведено исследование влияния высоких чисел Вебера на процессы горения тетрадекана ($C_{14}H_{30}$). Получены рисунки распределения: капель по размерам, концентрации топлива и паров воды, температуры в пространстве камеры сгорания в зависимости от чисел Вебера.

Жидкое топливо при температуре 300К впрыскивается в камеру сгорания через круглое сопло, расположенное в центре нижней части камеры. Камера сгорания представляет собой цилиндр высотой 15 см и радиусом 2 см, заполненный воздухом при температуре 900К и при давлении 32 Бара. В работе кинетика задается с помощью глобальной модели химических реакций [10]. Реакция горения тетрадекана с образованием воды и углекислого газа представлена ниже:



Исследование процесса горения жидкого топлива, проведено для различных значений числа Вебера: 4, 6 и 8. Полученные данные представлены в табл. 1. Эти результаты можно объяснить тем, что с увеличением числа Вебера инерциальные силы, действующие на капли растут, деформируя капли, что приводит к их разрыву, а следовательно, к уменьшению размеров.

Таблица 1. Распределение размера капель тетрадекана $C_{14}H_{30}$ при различных числах Вебера в момент времени $t = 1,5 \cdot 10^{-4}$ с

Значение числа Вебера	Размеры частиц, мкм
4	От 1,02 до 7,65
6	От 0,64 до 7,09
8	От 0,44 до 6,19

С увеличением числа Вебера и уменьшением размера капель увеличивается область максимальных температур в камере сгорания, следовательно, топливо горает быстрее и эффективнее.

Таблица 2. Распределение концентрации тетрадекана $C_{14}H_{30}$ при различных числах Вебера в момент времени $t = 10^{-3}$ с

Значение числа Вебера	Относительная концентрация топлива, г/г
4	0,1106
6	0,0991
8	0,0912

На рис. 1–3 показаны результаты численного эксперимента по горению тетрадекана. Для значения числа Вебера равном 4 (рис. 1) количество топлива колеблется в пределах от 0,05 до 0,7 г/г.

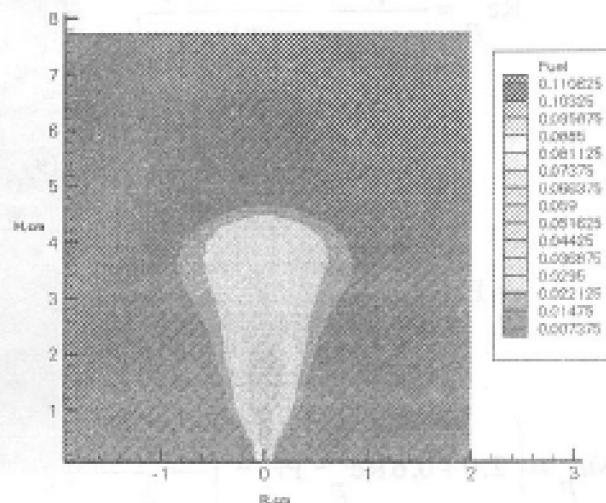


Рис. 1. Распределение концентрации тетрадекана при $We = 4$

Зона горения на рис. 2 увеличивается, при этом концентрация топлива уменьшается до 0,06 г/г, что говорит о более интенсивном процессе горения, чем на предыдущем рис. 1.

Самое интенсивное сгорание и соответственно, наименьшая концентрация топлива, которая лежит в пределах от 0,03 до 0,06 г/г, показана на рис. 3. При увеличении числа Вебера количество топлива уменьшается, так как горение происходит быстрее и эффективней.

На рис. 4–6 показано распределение температуры при сжигании тетрадекана. Значение температуры меняется от 756 К до 1418 К при $We = 4$ при этом горения охватывает большую часть камеры сгорания (рис. 4).

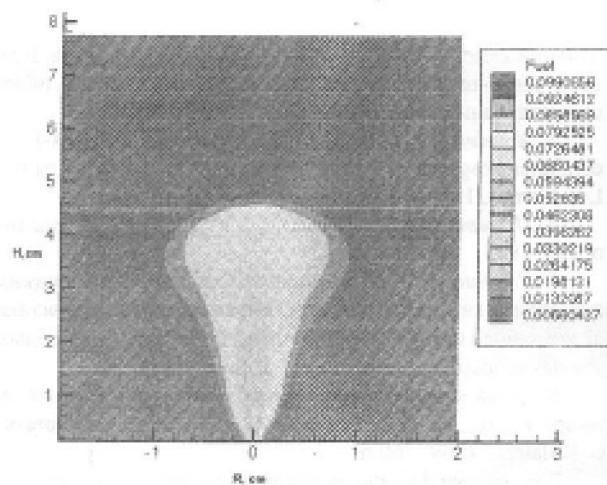


Рис. 2. Распределение концентрации тетрадекана при $We = 6$

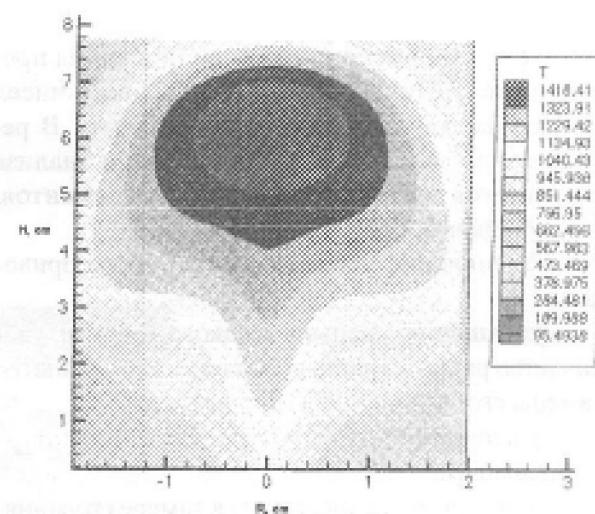


Рис. 4. Распределение температуры (T, K) тетрадекана при $We = 4$

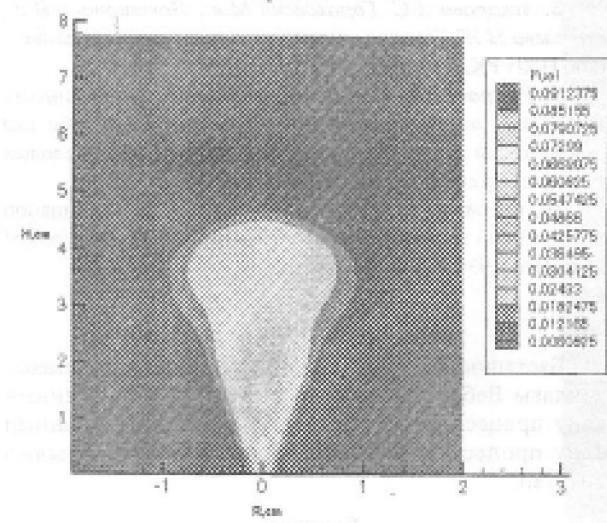


Рис. 3. Распределение концентрации топлива тетрадекана при $We = 8$

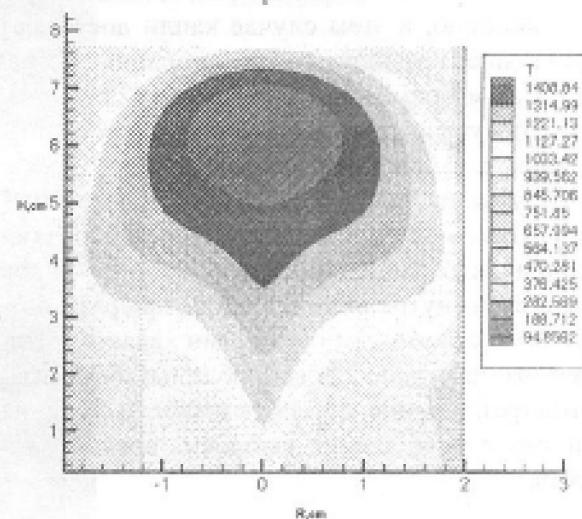


Рис. 5. Распределение температуры (T, K) тетрадекана при $We = 6$

На рис. 5 показано распределение температуры при сжигании тетрадекана. Значение температуры меняется от 751 до 1408 К, но зато горение охватывает большую часть камеры сгорания и протекает интенсивно и с высокой температурой. Область максимальных температур на данном рисунке больше чем на рис. 4, это обусловлено тем, что при увеличении числа Вебера до 8 улучшаются характеристики процесса горения.

На рис. 6 показано, что температурный фронт тетрадекана достигает значения 1421 К. Горение охватывает большую часть камеры сгорания и протекает интенсивно и с высокой температурой. Область максимальных температур на рис. 6 наибольшая по сравнению с рис. 4, 5, это обусловлено тем, что при увеличении числа Вебера улучшаются характеристики процесса горения.

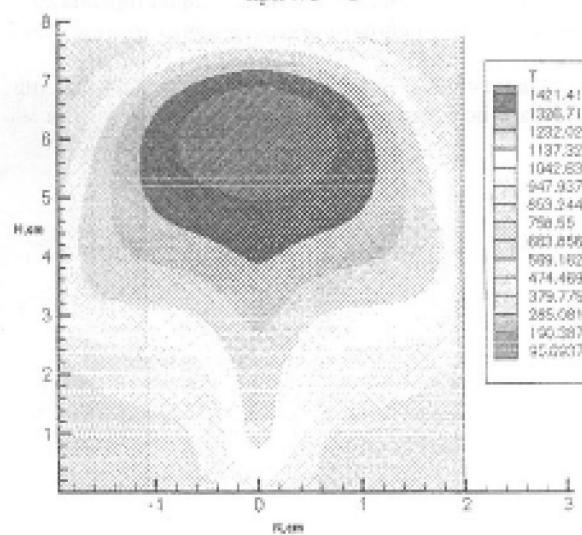


Рис. 6. Распределение температуры (T, K) тетрадекана при $We = 8$

Методами численного моделирования проведено исследование влияния высоких чисел Вебера на процесс горения тетрадекана. В результате проведенного исследования и анализа результатов вычислительных экспериментов, можно сделать следующие выводы.

– Увеличение значения числа Вебера приводит к:

– улучшению распыла жидкого топлива, увеличению распространения капель в пространстве камеры сгорания,

– увеличению области занятой температурным факелом,

– повышению температуры в камере сгорания,

– Оптимальным для процесса горения является значение $We = 8$ при котором топливо сгорает полностью, в этом случае капли достигают наименьшего размера, камера сгорания прогревается до максимального значения 1422 К.

– При увеличении числа Вебера более 8 значительных изменений не наблюдается.

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при проектировании различных технических устройств, таких как двигателей внутреннего сгорания, при разработке топлив с заданными рабочими характеристиками, которые решали бы проблемы: минимизации затрат, увеличения эффективности сгорания топлива и уменьшения выбросов вредных веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярин Л.П., Сухов Г.С. Основы теории горения двухфазных сред. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. 240 с.

2. Зайцев С.А., Кузнецов В.Р., Кунцев Г.М. Влияние прогрева и испарения жидкого топлива на горение в мо-

дельной камере сгорания // Физика горения и взрыва. Всесоюз. науч.-теоретич. журнал. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. 1991. С. 45-52.

3. 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 p.

4. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. 1973.

5. Рыспаева М.Ж. Моделирование горения жидкых впрысков в камерах сгорания и образования CO₂ // Физика окружающей среды. Мат-лы V Междунар. школы молодых ученых и специалистов. Томск, 2006. С. 120-124.

6. 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 p.

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

8. Аскарова А.С., Гороховски М.А., Локтионова И.В., Рыспаева М.Ж. Горение жидкого топлив в камере сгорания // Изв. НАН РК. Сер. физ.-мат. 2006. № 3. С. 10-14.

9. Рыспаева М.Ж. Моделирование горения жидкых впрысков в камерах сгорания и образования CO₂ // Физика окружающей среды. Мат-лы V Междунар. школы молодых ученых и специалистов. Томск, 2006. С. 120-124.

10. Gorokhovski M., Borghi R. Model of soot formation and oxidation in diesel engines // J. of diesels. Transactions of SAE. 1993. 930075.

Резюме

Бастапқы шарттар берілген кездегі жану камера-сындағы Вебер сан мәнінде тәуелді сүйық отынның жану процесіне зерттеу жүргізілді. Сүйық отынның жану процесіне онтайлы вариант үйімдастырылып алынған.

Summary

Investigations of combustion process of liquid fuel, depending on the value of Weber number in the combustion chamber at the given initial conditions. The optimum variant of the organization process of burning liquid fuel.

КазНУ им. аль-Фараби,
г. Алматы

Поступила 14.06.2010г.