

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ И СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В ЦИЛИНДРЕ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА ЭТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

д.т.н. Лиханов В.А.¹, к.т.н. Лопатин О.П.¹, к.т.н. Чупраков А.И.², д.т.н. Юнусов Г.С.²

¹Вятская ГСХА, Киров, Россия; ²Марийский ГУ, Йошкар-Ола, Россия

nirs_vsaa@mail.ru, kafmeh@yandex.ru

Статья посвящена вопросам моделирования процессов испарения и смесеобразования в цилиндре тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ (Центральный научно-исследовательский дизельный институт) при работе на этано-топливной эмульсии.

В дизеле 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ при работе на этано-топливной эмульсии имеет место объемно-плочное смесеобразование с преобладанием испарения топлива до начала процесса горения. Испарение топлива зависит не только от динамики движения среды и температурных режимов, но и от характеристик впрыскивания и распыливания. Скорость движения и турбулизация смеси являются важными характеристиками. Поэтому вышеперечисленные параметры и определяют интенсивность испарения и смесеобразования. При испарении капля этано-топливной эмульсии и диффузии в окружающую паровоздушную среду происходит образование горючей смеси. При этом воспламеняется не само топливо, а его пары в смеси с воздухом.

Построенная модель учитывает особенности испарения и смесеобразования при распыле топлива и позволяет достаточно точно рассчитать их скорость. В зонах, где находится низкая концентрация капель, расчеты проведены для одной капли, а в зонах с большой концентрацией учтено взаимодействие между каплями при испарении и горении. С целью лучшего рассмотрения характера взаимодействия капель друг с другом и с окружающим турбулентным потоком газов весь процесс горения разделен на стадии: образование аэрозольных частиц, движение капель, их испарение, смешивание с окислителем, воспламенение и горение. Также приняты следующие основные допущения: имеет место сферическая симметрия капель; коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость постоянны и не зависят от температуры; имеет место идентичность процессов переноса тепла и массы; имеет место квазистационарность процесса.

Ключевые слова: дизель, этано-топливная эмульсия, испарение, смесеобразование, камера сгорания.

Введение

Существующее на сегодняшний день научно-техническое и технологическое состояние отечественного двигателестроения по экологическим и топливно-экономическим показателям в условиях рыночных отношений и ужесточения нормативов по ограничению вредного воздействия компонентов продуктов сгорания тракторных дизелей на окружающую среду заставляет тракторные и моторостроительные заводы коренным образом перестраивать свою техническую политику с учетом нормативных требований к экологии. Поэтому постоянно растет внимание к возможности замены стандартного моторного топлива тракторной техники альтернативным. Достаточное количество научной и популярной литературы посвящено альтернативным топливам. Причем большинство авторов [1–4] отмечают, что у альтернативных топлив есть потенциал

как в сохранении нефтяных ресурсов, так и в уменьшении выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.

Одними из наиболее перспективных видов альтернативных топлив являются простейшие спирты, представителем которых является этанол.

Цель исследования

Этанол в молекулярном весе уступает нефтяным топливам, напоминает метанол по большинству характеристик сгорания и физических свойств (табл. 1), за исключением того, что он дает значительно более чистый выброс ОГ при сгорании, менее ядовитый и менее коррозионный. Кроме того, у этанола более высокая теплота сгорания. Этанол на современном этапе может производиться не только из пищевого сырья, но и из отходов сельскохозяйственной, химической, целлюлозно-бумажной

и деревообрабатывающей промышленности, в том числе разработаны технологии производства этанола из опилок, что существенно снижает затраты и удешевляет его себестоимость.

Внедрение топлив с содержанием этанола ставит задачу о необходимости моделирования процессов испарения, смесеобразования, горения в камере сгорания дизеля, что позволит значительно сократить время на разработку требуемого состава топлива и придания ему необходимых физико-химических свойств.

Материалы и методы исследования

В Вятской государственной сельскохозяйственной академии на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены исследования по переводу тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 для работы на этаноле-топливной эмульсии (ЭТЭ).

Разработаны модели процессов испарения и смесеобразования в цилиндре тракторного дизеля при работе на ЭТЭ [1, 2].

Статья посвящена вопросам моделирования процессов испарения и смесеобразования в цилиндре тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ при работе на этаноле-топливной эмульсии.

Построенная модель учитывает особенности испарения и смесеобразования при распыле топлива и позволяет достаточно точно рассчитать их скорость. В зонах, где находится низкая концентрация капель, расчеты проведены для одной капли, а в зонах с большой концентрацией учтено взаимодействие между каплями при испарении и горении. С целью лучшего рассмотрения характера взаимодействия капель друг с другом и с окружающим турбулентным потоком газов весь процесс горения разделен на стадии: образование аэрозольных частиц, движение капель, их испарение, смешивание с окислителем, воспламенение и горение [4]. Также приняты следующие основные допущения [5–9]:

- имеет место сферическая симметрия капель;

- коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость постоянны и не зависят от температуры;
- имеет место идентичность процессов переноса тепла и массы;
- имеет место квазистационарность процесса.

Результаты и их обсуждение

В дизеле 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ при работе на этаноле-топливной эмульсии имеет место объемно-плечное смесеобразование с преобладанием испарения топлива до начала процесса горения. Испарение топлива зависит не только от динамики движения среды и температурных режимов, но и от характеристик впрыскивания и распыливания. Скорость движения и турбулизация смеси являются важными характеристиками. Поэтому вышеперечисленные параметры и определяют интенсивность испарения и смесеобразования. При испарении капле этаноле-топливной эмульсии и диффузии в окружающую паровоздушную среду происходит образование горючей смеси. При этом воспламеняется не само топливо, а его пары в смеси с воздухом.

Ввиду особенностей горения ЭТЭ в камере сгорания дизеля процесс испарения был разделен на испарение до и во время воспламенения. Также было обусловлено, что теплота, необходимая для испарения топлива, подводится от стенок камеры сгорания. Поэтому процесс нагрева и испарения топлива связан с одновременным некоторым понижением температуры среды и для топлива, впрыскиваемого в последней фазе, происходит менее интенсивно.

Химически реагирующая система в каждой точке пространства и в каждый момент времени может быть полностью описана, если известны законы изменения плотности, температуры, скорости потока и концентрации реагирующих компонентов. Изменения являются результатами конвекции, химических реакций, молекулярного переноса. Для составления модели необходимо учитывать все процессы.

Таблица 1

Физико-химические показатели этилового спирта

Внешний вид	Бесцветная прозрачная жидкость без нерастворимых примесей
Плотность (при 20°C), г/см ³	0,789
Температура вспышки, °C	13
Температура самовоспламенения, °C	404
Температура замерзания, °C	-114,6
Температура кипения, °C	78,3

Для описания химически реагирующих систем в КС можно воспользоваться свойством сохранения отдельных параметров систем, к которым относятся энергия, масса и импульс.

При высоких температурах окислительной среды перенос тепла и массы стефановским потоком, скорость которого равна выражению [5, 10, 11]:

$$U_{\text{стеф}} = \frac{J}{4\pi r^2 \rho_g}, \quad (1)$$

где $J = -dm/dt$ – массовая скорость испарения (горения) капли; r – радиальная координата; ρ_g – плотность газа.

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$c_n J \frac{dT}{dr} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_g 4\pi r^2 \frac{dT}{dr} \right) + 2\pi r W_{\text{ок}} q. \quad (2)$$

Уравнение диффузии для концентраций окислителя $n_{\text{ок}}$ и паров записываются аналогично:

$$J \rho \frac{dn_{\text{ок}}}{dr} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{ок}} \rho 4\pi r^2 \frac{dn_{\text{ок}}}{dr} \right) - W_{\text{ок}} 4\pi r^2. \quad (3)$$

Эти уравнения записаны с учетом переноса теплоты и массы стефановским потоком (левая часть уравнений 2 и 3).

Скорость реакции определим кинетическим уравнением второго порядка по выражению:

$$W_n / M_n = k_0 \rho^2 n_{\text{ок}} \exp(-E/RT), \quad (4)$$

где $M_n, M_{\text{ок}}$ – молярная масса, соответственно, паров и окислителя; $n_{\text{ок}}, n_n$ – относительная массовая концентрации окислителя и паров; c_n – удельная теплоемкость газа; $D_{\text{ок}}, D_n$ – коэффициент диффузии окислителя и паров; q – тепловой эффект реакции на единицу массы окислителя; $W_{\text{ок}}, W_n$ – скорость реакции, определяемая изменением массовой концентрации окислителя и паров, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; λ_g – коэффициент теплопроводности газа.

Процесс дополним условиями. На поверхности капли $r = r_k$; $T(r = r_k) = T_k$; концентрация паров является насыщенной и зависит от T_k по формуле Клаузиуса-Клапейрона:

$$n_n(r = r_k) = n_{n,k} = \rho_g \frac{M_0}{M_b} \exp \frac{LM_n}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{кип}}} - \frac{1}{T_k} \right), \quad (5)$$

где M_b – молярная масса воздуха (газа); L – удельная теплота парообразования, Дж/кг; M_n – молярная масса паров, кг/моль; $T_{\text{кип}}$ – температура кипения жидкости; концентрация окислителя $n_{\text{ок}}(r = r_k) = n_{\text{ок}}$.

На поверхности приведенной пленки $r = r_{\text{пл}}$; $T(r = r_{\text{пл}}) = T_{\infty}$; $n_g(r = r_{\text{пл}}) = 0$; $n_{\text{ок}}(r = r_{\text{пл}}) = n_{\text{ок},\infty}$.

При горении окислитель не доходит до поверхности капли $n_{\text{ок},k} = 0$.

Умножив уравнение (3) на q и сложив с (2), получим линейное уравнение, не содержащее $W_{\text{ок}}$:

$$J \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\lambda_g}{c_n} 4\pi r^2 \frac{dH}{dr} \right), \quad (6)$$

где $H = c_n T + q n_{\text{ок}}$ – полная энтальпия окислителя.

При получении выражения (6) предполагалось, что $D = \lambda_g / c_n \rho_g$. Поток энтальпии на поверхности капли расходуется на ее парообразование. То есть граничное условие, позволяющее определить массовую скорость испарения, имеет вид:

$$\left. \frac{\lambda_g}{c_n} 4\pi r^2 \frac{dH}{dr} \right|_{r=r_k} = JL. \quad (7)$$

Используя (7), из (6) имеем выражение для потока энтальпии через произвольную поверхность радиуса r :

$$\frac{\lambda_g}{c_n} 4\pi r^2 \frac{dH}{dr} = JL + J(H - H_k). \quad (8)$$

Учитывая граничные условия ($r = r_k, H = H_k$ и $H = H_{\text{пл}}$), разделяя переменные в (8) по r и H и интегрируя, получим:

$$J = \frac{4\pi \lambda_g r_k}{c_n (1 - r_k / r_{\text{пл}})} \ln \left[1 + \frac{H_{\text{пл}} - H_k}{L} \right]; \quad (9)$$

$$\frac{r_{\text{пл}}}{r_k} = \left[1 - \frac{2}{Nu} \right]^{-1}. \quad (10)$$

Зависимость массовой скорости испарения (горения) от интенсивности конвекции (Nu), условий и физико-химических свойств, примет вид:

$$J = -\frac{dm}{dt} = \frac{2\pi \lambda_g r_k}{c_n} \ln \left[1 + \frac{H_{\text{пл}} - H_k}{L} \right]. \quad (11)$$

Если температура газовой среды недостаточна для воспламенения, то в этом случае происходит испарение капли. Разность энтальпии окислителя для случая испарения определяется разностью температур среды T_{∞} и капли T_k :

$$H_{\text{пл}} - H_k = c (T_{\infty} - T_k). \quad (12)$$

При концентрации окислителя в среде и на поверхности капли равны. Тогда, используя связь массовой скорости испарения со скоростью изменения радиуса и квадрата диаметра капли

$$J = -\frac{dm}{dt} = -\rho_k 4\pi r_k^2 \frac{dr_k}{dt} = -\rho_k \pi \frac{r_k}{2} \frac{dd_k^2}{dt} \quad (13)$$

получим выражение для константы скорости испарения:

$$k_{исп} = -\frac{dd_k^2}{dt} = \frac{4\lambda_k}{\rho_k} Nu \cdot \ln \left[1 + \frac{c_n(T_\infty - T_k)}{L} \right], \quad (14)$$

где $k_{исп} = -dd_k^2/dt$ – константа скорости испарения, так как правая часть равенства слабо зависит от радиуса капли, который входит в Nu . Для неподвижной капли константа скорости испарения равна:

$$k_{исп} = -\frac{dd_k^2}{dt} = \frac{8\lambda}{\rho_k} \ln \left[1 + \frac{c_n(T_\infty - T_k)}{L} \right]. \quad (15)$$

То есть при температуре среды квадрат диаметра капли уменьшается в результате испарения со временем по линейной зависимости

$$d_k^2 = d_{k0}^2 - k_{исп} t, \quad (16)$$

где d_{k0} – диаметр капли в момент времени $t = 0$.

Закон линейного убывания поверхности капли с течением времени экспериментально был открыт Срезневским в 1982 году.

Для случая горения разность энтальпий:

$$H_{пл} - H_k = cT_\infty + qn_{ок,\infty} - c_n T_k - qn_{ок,\infty}. \quad (17)$$

При концентрации окислителя на поверхности капли $n_{ок,k} = 0$, получим из (8) формулы для массовой скорости и константы скорости горения:

$$J = \frac{2\pi\lambda_r r_k}{c_n} Nu \cdot \ln \left[1 + \frac{c_n(T_\infty - T_k) + qn_{0k,k}}{L} \right]; \quad (18)$$

$$k_{гор} = -\frac{dd_k^2}{dt} = \frac{4\lambda_u}{\rho_k} Nu \cdot \ln \left[1 + \frac{c_n(T_\infty - T_k) + qn_{0k,k}}{L} \right]. \quad (19)$$

При горении температура капли близка к температуре кипения. Используя определение температуры горения:

$$c_n(T_{гор} - T_\infty) + qn_{0k,\infty}, \quad (20)$$

получим формулу:

$$J = \frac{2\pi\lambda_r r_k}{c_n} Nu \cdot \ln \left[1 + \frac{c_n(T_{гор} - T_{кип})}{L} \right], \quad (21)$$

позволяющую оценить и проанализировать влияние условий и свойств на скорость горения капель J . С ростом температуры среды увеличивается $T_{гор}$, больше λ , поэтому скорость испарения (горения) увеличивается.

Выводы

Построенная модель применима к эмульгированным спиртосодержащим топливам, к которым относится ЭТЭ, учитывает особенности

испарения и смесеобразования при распыле топлива и позволяет достаточно точно рассчитать их скорость.

Литература

1. Лиханов В.А., Чупраков А.И. Исследование рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 при использовании в качестве топлива этанола-топливной эмульсии: Монография. Киров: Вятская ГСХА. 2012. 148 с.
2. Чупраков А.И. Исследование рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 при использовании в качестве топлива этанола-топливной эмульсии: дисс. ... канд. техн. наук. Киров. 2012. 158 с.
3. Патрахальцев Н.Н., Альвар Санчес Л.В. Пути развития топливных систем для подачи в цилиндр дизеля нетрадиционных топлив // Двигателестроение. 1988. № 3. С. 11–13.
4. Тереченко А.С. Экологическая безопасность автомобильных дизелей в полном жизненном цикле: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Москва. 2013. 21 с.
5. Камфер Г.М. Процессы тепломассообмена и испарения при смесеобразовании в дизелях. М.: Высшая школа. 1974. 143 с.
6. Калинин В.В., Федосеева Н.В. Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка. 1977. 256 с.
7. Cho SY, Yeller R.A., Dryer F.L A computer model for one-dimensional mass and energy transport in and around chemically reacting particles, including complex gas-phase chemistry, multicomponent molecular diffusion, surface evaporation, and heterogeneous reaction. J. Comp. Phys. 102:160, 1992. 160 p.
8. Cui Y., Deng K., Wu J. A direct injection diesel combustion model for use intransient condition analysis. Journal of Automobile Engineering. 2001. P. 996–1004.
9. Gardner T.P., Low S.S., Kenney T.E. Evaluation of a Some Alternative Diesel Fuels for Low Emissions and Improved Fuel Economy. SAE Techn. Pap. Ser., 2001, no 2001-01-0149. P. 1–55.
10. Сполдинг Д.Б. Горение и массообмен. М.: Машиностроение. 1985. 240 с.
11. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения. М: Госэнергоиздат. 1959. 320 с.

References

1. Likhanov V.A., Chuprakov A.I. *Issledovanie rabochoego protsessa dizelya 4Ch 11,0/12,5 pri ispol'zovanii v kachestve topliva etanolotoplivnoy emul'sii* [The investigation of the working process

- of a diesel engine 4Ch 11.0 / 12.5 when using ethanol fuel emulsion]. Kirov: Vyatskaya GSKhA Publ., 2012. 148 p.
2. Chuprakov A.I. *Issledovanie rabocheho protsessa dizelya 4Ch 11,0/12,5 pri ispol'zovanii v kachestve topliva etanolotoplivnoy emul'sii*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [The investigation of the working process of a diesel engine 4Ch 11.0 / 12.5 when using ethanol fuel emulsion. Dissertation for Candidate of technical science degree]. Kirov, 2012. 158 p.
 3. Patrakhal'tsev N.N., Al'vear Sanches L.B. Ways of developing fuel systems for supplying non-traditional fuels to the diesel cylinder. *Dvigatelistroenie*. 1988. No 3, pp. 11–13 (in Russ.).
 4. Terechenko A.S. *Ekologicheskaya bezopasnost' avtomobil'nykh dizeley v polnom zhiznennom tsikle*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Ecological safety of automobile diesel engines in a full life cycle: abstract. Dissertation for Candidate of technical science degree]. Moscow, 2013. 21 p.
 5. Kamfer G.M. *Protssesy teplomassoobmena i ispareniya pri smeseobrazovanii v dizelyakh* [Processes of heat and mass transfer and evaporation during mixture formation in diesel engines.]. Vysshaya shkola Publ., 1974. 143 p.
 6. Kalinchak V.V., Fedoseeva N.V. *Khimicheskaya fizika protsessov goreniya i vzryva. Gorenje geterogennykh i gazovykh sistem* [Chemical physics of combustion and explosion processes. Burning of heterogeneous and gas systems]. Chernogolovka, 1977. 256 p.
 7. Cho SY, Yeller R.A., Dryer F.L. A computer model for one-dimensional mass and energy transport in and around chemically reacting particles, including complex gas-phase chemistry, multicomponent molecular diffusion, surface evaporation, and heterogeneous reaction. *J. Comp. Phys.* 102:160, 1992. 160 p.
 8. Cui Y., Deng K., Wu J. A direct injection diesel combustion model for use intransient condition analysis. *Journal of Automobile Engineering*. 2001. P. 996–1004.
 9. Gardner T.P., Low S.S., Kenney T.E. Evaluation of a Some Alternative Diesel Fuels for Low Emissions and Improved Fuel Economy. *SAE Tehn. Pap. Ser.*, 2001, no 2001-01-0149. P. 1-55.
 10. Spolding D.B. *Gorenje i massoobmen* [Combustion and mass transfer]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 240 p.
 11. Spolding D.B. *Osnovy teorii goreniya* [Fundamentals of the theory of combustion]. Moscow: Goskergoizdat Publ., 1959. 320 p.

MODELING OF THE PROCESSES OF EVAPORATION AND MIXTURE FORMATION IN THE CYLINDER OF A TRACTOR DIESEL ENGINE WHEN WORKING ON AN ETHANOL-FUEL EMULSION

Dr. Eng. V.A. Likhanov¹, Ph.D. O.P. Lopatin¹, Ph.D. A.I. Chuprakov², Dr. Eng. G.S. Yunusov²

¹Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia; ²Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia
nirs_vsaa@mail.ru, kafmeh@yandex.ru

The article is devoted to the problems of modeling the processes of evaporation and mixture formation in the cylinder of a tractor diesel 4Ch 11.0/12.5 with a combustion chamber of the TsNIID (Central Research Diesel Institute) type when working on ethanol-fuel emulsion.

In a diesel engine 4Ch 11.0/12.5 with a combustion chamber of the TsNIID type, when working on an ethanol-fuel emulsion, a volume-film mixture takes place with the predominance of evaporation of the fuel prior to the start of the combustion process. The evaporation of fuel depends not only on the dynamics of the motion of the medium and the temperature conditions, but also on the characteristics of injection and spraying. The speed and turbulence of the mixture are important characteristics. Therefore, the above parameters determine the intensity of evaporation and mixture formation. During the evaporation of droplets of ethanol-fuel emulsion and diffusion into the surrounding vapor-air medium, a combustible mixture forms. It does not ignite the fuel itself, but its vapor mixes with air.

The constructed model takes into account the peculiarities of evaporation and mixture formation during the spraying of fuel and allows us to accurately calculate their speed. In regions where the concentration of droplets is low, calculations are made for one drop, and in zones with a high concentration, the interaction between the drops during evaporation and combustion is taken into account. In order to better understand the nature of the interaction of droplets with each other and with the surrounding turbulent gas flow, the entire combustion process is divided into stages: the formation of aerosol particles, the movement of droplets, their evaporation, mixing with the oxidant, ignition and combustion. The following basic assumptions are also accepted: there is a spherical symmetry of drops; The thermal conductivity coefficient, the specific heat are constant and do not depend on temperature; there is an identity of heat and mass transfer processes; the quasistationary nature of the process takes place.

Keywords: diesel, ethanol-fuel emulsion, evaporation, mixture formation, combustion chamber.