ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 519.6:501

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛИВАНИЯ И ИСПАРЕНИЯ МОТОРНОГО ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ^{*}

Е.Н. ЛАДОША, Д.С. ЦЫМБАЛОВ, О.В. ЯЦЕНКО

(Донской государственный технический университет)

В целях выбора адекватного описания процессов впрыска, распыливания и испарения моторных топлив в дизелях предложена иерархия соответствующих моделей. Исследована область применения детальной модели, основанной на эволюционных уравнениях с частными производными, а также осредненных вариантов, выражаемых посредством двух и одного обыкновенных дифференциальных уравнений. Обосновано использование упрощенных моделей в компьютерной имитации рабочего процесса дизелей с разрешенным описанием образования токсичных газов и сажи.

Ключевые слова: впрыск, распыливание, испарение, распределение по размерам.

Введение. Вклад автотранспорта в загрязнение воздушной среды мегаполисов превышает 90 %. Кроме того, рост российского автопарка примерно на 60 % обусловлен его старением. Отсюда и потребность оценивать энергоэкологические характеристики двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в зависимости от технического состояния, в частности состояния топливной системы, а также состава моторного топлива [1 – 3]. Реалистичное компьютерное моделирование выступает действенным инструментом, позволяющим совершенствовать существующие и создаваемые транспортные ДВС.

Постановка задачи и описание моделей. Способы формирования заряда в ДВС в значительной степени определяются агрегатным состоянием и другими физико-химическими свойствами топлива. Если в качестве энергоносителя используется каменный уголь, требуется произвести предварительную специальную обработку и подготовить топливо к сжиганию: измельчить его до пылеобразного состояния и смешать с жидким горючим или транспортной средой (водой) в эмульсию (суспензию). Двухфазную систему – однородную взвесь призмовидных твердых частиц углерода в жидкости [4] – впрыскивают в камеру сгорания (КС) через форсунки. Таким образом, технология сжигания в ДВС твердых угольных топлив представляет собой модификацию рабочего процесса с внутренним смесеобразованием.

При внешнем смесеобразовании в КС попадает сравнительно однородная по химическому и фазовому составу топливно-воздушная смесь, что позволяет квалифицировать динамику такого процесса как вырожденный случай внутреннего смесеобразования – с бесконечно быстрыми фазовыми переходами и гомогенизацией в начале такта сжатия. Поэтому, выбрав в качестве базовой модель внутрикамерного смесеобразования с твердыми частицами в составе топлива, мы предусматриваем все практически реализуемые ситуации.

Подача топлива в цилиндр осуществляется из трубопровода высокого давления P_{τ} , а ее динамика определяется изменением во времени проходного сечения \mathcal{P} . Последнее служит параметром управления процессами в ДВС с внутренним смесеобразованием. Массовая скорость впрыска составляет [5]:

$$F(t) = \vartheta(t) \left[2(P_{\rm T} - P)/\rho \right]^{1/2} \approx (2P_{\rm T}/\rho)^{1/2} \vartheta(t), \tag{1}$$

где *Р*-давление рабочего тела в КС; *р* – плотность.

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке фонда ALCOA.

В элементах форсунки поток турбулизуется и, истекая в заполненную газом КС, дробится на капли вследствие тейлоровской неустойчивости [6, 7]. Распаду жидкой струи на капли препятствует энергия поверхностного натяжения Гельмгольца. Отношение мощности формовозмущающего и стабилизирующего факторов известно как число Вебера:

$$We = \rho u^2 \Lambda / \sigma_{\text{nob}}, \tag{2}$$

где u – скорость капель; Λ – диаметр капли; $\sigma_{\text{пов}}$ – коэффициент поверхностного натяжения.

Установившемуся дисперсному составу капель отвечает диапазон чисел We = 9-18, т. е. на диспергирование струи тратится 5–10 % взаимной кинетической энергии фаз [5, 6]. Возмущение жидкости в системе топливоподачи и турбулизация газа в КС направлены на улучшение качества распыла, т.е. на возможно более полное и мелкое дробление струи. Согласно [8], нагрев топлива сопровождается уменьшением коэффициента поверхностного натяжения, что также улучшает распыл:

$$\sigma_{\text{nob}} = \sigma_{\text{nob}}^0 \left(1 - T/T_{\text{kp}} \right)^{11/9},\tag{3}$$

где $T_{\rm kp}$ – критическая температура; $\sigma^0_{\rm пов}$ – экстраполированное значение $\sigma_{\rm пов}(T \to 0)$.

Критическое значение числа Вебера определяется в эксперименте с точностью до множителя ~ 2, что обусловлено полидисперсностью распыла. Шаблоном распределения капель по размерам выберем аналитически интегрируемый вариант обобщенной зависимости Розина–Раммлера [9]:

$$F_{\rm P-P}(\Lambda) = \alpha \Lambda^{\beta} \exp(-\gamma \Lambda^{\delta}), \tag{4}$$

где α, β, γ и δ – экспериментально определяемые константы.

Подобрать три параметра модели (4) по экспериментальным данным, объем и точность которых ограничены, проблематично. Требование аналитической интегрируемости (4) позволяет связывать β и δ соотношением $\beta = \delta - 1$. Неопределенность критического числа Вебера составляет $\sim 2^{1/2}$ [5, 6]. Распределение (4) имеет также подходящую ширину по уровню 0,1 max { $F_{\text{P-P}}(\Lambda)$ } при $\delta \approx 3$. Наконец, распределение (4) с $\delta = 3$ почти симметрично относительно максимально вероятного значения и близко к нормальному.

Предложенная модель дробления струи позволяет связать показатель диспергирования $F_{\text{P-P}}(\Lambda)$ с единственным управляющим параметром:

$$\gamma = \gamma(\langle We \rangle) = 2/3 \left[\rho u^2 / (\sigma_{\pi o B} \langle We \rangle)\right]^3 \approx 3^{-1} 0^{-4} \left[\rho u^2 / \sigma_{\pi o B}\right]^3,$$
(5)

который следует трактовать как обратный характерный размер структурно устойчивых частиц жидкой фазы.

Из уравнений (1) и (2) следует, что начало и конец впрыска характеризуются наихудшим измельчением струи. Практически крупные капли раннего формирования успевают испариться и сгореть, а финальная порция плохо распыленной жидкости оказывается в невыгодных условиях. Отмеченное обстоятельство определяет неполноту сгорания и оправдывает полезность следующей оценки. Для модели монодисперсного распыла мгновенный диаметр капель

$$\Lambda(t) \sim u^{-2} \sim \vartheta(t)^{-2}.$$
 (6)

Когда пропускное сечение открывается мгновенно в момент $t_{\rm впр}$

$$\vartheta(t) \sim \operatorname{sign}(t - t_{\scriptscriptstyle \mathrm{BHP}}),$$
 (7)

проблем не возникает: все капли идентичны. В противном случае часть струи измельчается недостаточно. Долю неудовлетворительного распыла можно определить, приблизив начальный и конечный участки функций F(t) и $\vartheta(t)$ степенной функцией вида t^{α} : при несимметричной динамике впрыска параметр α , конечно, отличен для этих участков. Диаметр структурно устойчивых жидких частиц, образующихся впоследствии из порции потока, впрыснутого в промежутке времени t - (t + dt), $\Lambda(t)$ пропорционален $t^{-2\alpha}$, а их общая масса – $\vartheta(t)dt$. Обозначив максимально допустимый диаметр капли $\Lambda_{\kappa p}$, путем несложных преобразований получим зависимость массовой доли недораспыленного топлива:

$$L = (\Lambda_{\rm kp} / \Lambda_{\rm min})^{-(\alpha+1)/2\alpha}, \tag{8}$$

где Λ_{\min} – диаметр капель в момент максимально интенсивного впрыска t_{\max} . При выводе (8) предполагалось, что впрыск с различной динамикой (значениями α) характеризуется одинаковыми продолжительностью t_{\max} и суммарной дозой (массой) жидкого топлива, причем $\Lambda_{\kappa p} > \Lambda_{\min}$. Техническая подоплека этих ограничений очевидна: а) для эффективного смесеобразования требуется осуществлять его в течение ограниченного периода; б) если чрезмерно крупными оказываются даже капли, отвечающие наилучшим условиям дробления, повышение качества распыла требует наращивания энергетики впрыска.

Интеграция моделей впрыска и неоднородного диспергирования сопровождается появлением «перекрестных членов», отвечающих мультипликации «слабых мест» обоих процессов. Поэтому динамику впрыска следует оптимизировать очень аккуратно.

Распыливание топлива в КС сопровождается постепенным сопряжением траекторий отдельных капель с траекториями мезообъемов газов. После измельчения дроблением ведущая роль отводится процессам испарения жидких частиц и газофазной гомогенизации и/или выгорания отдельных капель.

Бесполезность наиболее общей модели испарения жидкого топлива для наших целей становится очевидной, если учесть следующие обстоятельства [4, 10, 11]:

- испарение может происходить в до- и закритическом режимах;

– многокомпонентные топлива могут испаряться как с «разгонкой» фракций, так и без нее;

– испарение может сопровождаться крекингом топлива или происходить без реакций;

– фронт горения может примыкать к поверхности испарения или отсутствовать в диффузионной окрестности;

- возможны ламинарный и турбулентный режимы обтекания жидких частиц;

– в состав жидкого топлива могут входить мелкодисперсные частицы твердых горючих веществ, например угольная пыль;

– эмульсионные топлива часто содержат воду, критическое давление которой на порядок выше, чем *P*_{кр} используемых углеводородных топлив и выше достижимого давления в КС.

Корректно учесть перечисленные обстоятельства не представляется возможным, поэтому динамику фазовых превращений будем описывать с опорой на особенности испарения жидкого топлива в типичном ДВС, работающем по циклу Дизеля [10, 11].

Б. Срезневским экспериментально установлено, что диаметр испаряющейся сферической капли Λ уменьшается по закону:

$$d\Lambda/dt = -D_{\rm T} \Lambda^{-1},\tag{9}$$

где $D_{\rm T}$ – коэффициент диффузии паров топлива в вакуум.

Коэффициент диффузии зависит от молекулярного веса топлива $\mu_{\rm r},$ температуры и давления газа в КС:

$$D_{\rm T} = 5 \cdot 10^{-5} \mu_{\rm T} \,^{-1/2} T^{7/4} / P, \tag{10}$$

если давление измерять в атмосферах, а
$$D_{\scriptscriptstyle
m T}$$
 – [см²/с].

Динамика газификации топлива, поступающего в КС с массовой скоростью G(t), задается уравнением:

$$\partial f/\partial t - D_{\rm T}/2\Lambda \ \partial f/\partial\Lambda = F(\Lambda, t),$$
(11)

которое связывает темп фазового перехода с дисперсностью жидкости (ее определяет функция распределения капель по размерам $f = f(\Lambda, t)$, мкм⁻¹) и законом топливоподачи $F(\Lambda, t)$, мкм⁻¹·c⁻¹.

Для наших целей представляет интерес связь между массой испаренного на некоторый момент топлива m(t) и динамикой его впрыска G(t). Последовательное рассмотрение вопроса включает два этапа: первый – решение уравнения (11) для конкретного источника $F(\Lambda, t)$; второй – вычисление мгновенной скорости накопления жидкого топлива в КС и темпа газификации капель на основе $f(\Lambda, t)$.

Семейство характеристик (11) задается уравнением:

$$d\Lambda/dt = -D_{\rm T}/\Lambda$$
 или $\Lambda^2 = \Lambda_0^2 - D_{\rm T} t$, (12)

где Λ_0 отвечает начальному размеру капли. Действие источника $F(\Lambda, t)$ сводится к «загрузке» каплями соответствующих характеристических линий. Сингулярность ~ $1/\Lambda$ в коэффициенте уравнения (11) при $\partial f/\partial \Lambda$ побуждает прибегнуть к замене независимой переменной $\Lambda \rightarrow m = \rho \Lambda^3$ и оперировать уравнением:

$$\partial f/\partial t - 3/2 D_{\rm T} m^{1/3} \partial f/\partial m = M(m, t).$$
⁽¹³⁾

Соответственно изменятся функция распределения капель по размерам

$$F_{P-P}(\Lambda) = 3\gamma\Lambda^2 \exp(-\gamma\Lambda^3) \rightarrow M_{P-P}(m) = \gamma/\rho \exp(-\gamma/\rho m)$$
 (14)
и уравнение характеристик (ниже константа $D_{\rm T}$ увеличена в 6 раз):

$$\Lambda^{2} = \Lambda_{0}^{2} - D_{\rm T} t \longrightarrow m^{2/3} = m_{0}^{2/3} - D_{\rm T} \rho^{2/3} t.$$
(15)

Нормированная на единицу величина $M_{P-P}(m)$ во втором из уравнений (14) легко модифицируется для учета временного фактора.

Учитывая, что согласно (4)–(6) показатель измельчения струи $\gamma \sim G(t)^6$, получаем явный вид источникового члена в уравнении (13):

$$\mathcal{A}(m, t) = (\xi/\rho)^2 G(t)^{13} \exp(-\xi/\rho \ G(t)^6 \ m),$$
(16)

где ξ – коэффициент, характеризующий распыливающее устройство.

Нетрудно убедиться, проинтегрировав (16) последовательно по обеим переменным, что

$$\int_{0}^{\infty} m M(m, t) dm = G(t) \quad \mathsf{N} \quad \int_{0}^{\infty} G(t) dt = G_{\Sigma}.$$
(17)

В интегралах (17) нормирование осуществлено по цикловой подаче – массе впрыскиваемого за рабочий цикл топлива *G*_Σ.

При выбранных модельных распределениях средняя масса капель < m(t) >, поступающих в КС в момент времени t:

$$< m(t) > = \rho / \gamma = \rho / [\xi G(t)^6],$$
 (18)

что будет использовано при упрощении модели впрыска-распыливания.

Уравнения (11) и (13) позволяют физически корректно учесть динамику испарения капель неодинакового размера, поступающих в КС в различные моменты времени. Общее решение (13) получается интегрированием функции источника $M_{P-P}(m, t)$ вдоль характеристик (15) и имеет вид:

$$f(m, t) = \int_{0}^{t} M_{P-P} \left(\left[m^{2/3} + D_{T} \rho^{2/3} (t-\tau) \right]^{3/2}, \tau \right) d\tau.$$
(19)

На основании массово-геометрических характеристик жидкой фазы в КС (19) можно опре-

делять массу испаренного топлива как разность масс впрыснутой $\int_{0}^{\cdot} G(\tau) d\tau$ и еще не испаренной

 $\int_{0} f(m, t) dm$ жидкости. Рассчитываемая таким способом массовая скорость газификации, состав-

ляет:

$$\Gamma(t) = \int_{0}^{\infty} m[\partial f(m, t)/\partial t] dm.$$
 (20)

Упростить модель позволяют следующие соображения. Правую часть (20) можно записать в виде:

$$\int_{0}^{\infty} m[\partial f(m, t)/\partial t] dm = \partial/\partial t \int_{0}^{\infty} m f(m, t) dm = \partial/\partial t \{ \le m(t) > \int_{0}^{\infty} f(m, t) dm \}.$$
 (21)

Если дополнительно предположить, что характерное время испарения отдельных капель меньше, чем временной масштаб изменения их числа, можно представить правую часть (21) как

$$\partial/\partial t \{ \le m(t) > \int_{0}^{\infty} f(m, t) dm \} \approx \partial \le m(t) > /\partial t \int_{0}^{\infty} f(m, t) dm.$$
 (22)

Оценить первый множитель в (22) можно при помощи уравнения характеристик (15): $\partial < m(t) > /\partial t = 3/2 + D_{\rm T} \rho^{2/3} < m(t) > ^{1/3}$. Второй, представляющий собой число капель в КС, очевидно, равен M(t) / < m(t) >, где M(t) - масса жидкой фазы.

С учетом выполненных замен и подстановок (20) трансформируется в уравнение:

$$\Gamma(t) = 3/2 D_{\rm T} \left(\rho / \langle m(t) \rangle \right)^{2/3} M(t), \tag{23}$$

а динамика суммарной массы жидкой фазы в КС определяется уравнением (23) и условием материальной консервативности:

$$dM/dt = G(t) - 3/2 D_{\rm T} \left(\rho / \langle m(t) \rangle\right)^{2/3} M.$$
(24)

Подобная модель с постоянной величиной $\langle m(t) \rangle = \langle m \rangle$ использована в работе [12]: полидисперсность распыла учитывалась качественно – заменой «сингулярного» уравнения испарения, отвечающего конечному времени существования капли, «размытым», согласно которому капли существуют вечно.

Далее следует задать правдоподобный закон эволюции параметра $(< m(t) > / \rho)^{2/3}$, отвечающего площади поверхности среднестатистической капли в КС: необходимо учесть влияние на нее как собственно испарения, так и влияние источника. Нетрудно убедиться, что уравнение

 $d < m(t) > 2^{2/3}/dt = -D_{T} \rho^{2/3} + [\rho^{2/3}/(\xi^{2/3}G(t)^4) - (m(t)) > 2^{2/3}] [(\xi G(t)^7/\rho)/(M(t)/(m(t)))],$ (25) в котором размер вновь поступающих капель определяется законом впрыска G(t) и соотношением (18), удовлетворяет предъявленным требованиям.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) (24)–(25) представляет собой упрощенную модель испарения топлива в дизелях. Для ее получения использовался метод осреднения уравнения с частными производными (УЧП), состоящий в понижении пространственной размерности путем введения «эквивалентной» нелинейности.

Ценой отказа от использования в модели испарения УЧП (13) служат жесткость и нелинейность результирующих ОДУ (24)–(25), заметно усложняющие их численное интегрирование. Кроме того, в момент начала впрыска и/или при чрезвычайно интенсивном испарении $M \approx 0$ динамика средней площади капли не подчиняется (25) и необходимо пользоваться уравнением (18).

Согласно (24), в динамике жидкой фазы выделяются переходный и квазистационарный этапы: в начале подачи топлива $M(t) \approx \int G(t) dt$; в установившемся режиме M(t), подстраиваясь под темп впрыска, принимает значение около $2/3 [D_{\rm T} \rho^{2/3} \xi^{2/3} G(t)^3]$; по окончании поступления капель в КС величина M стремится к нулю с характерным временем $D_{\rm T}^{-1}(< m(t) > / \rho)^{2/3}$. С другой стороны, такое поведение обеспечивается свойствами уравнения (13), характеристики которого разбивают мировую плоскость $\{m \times t\}$ на области влияния источника и начальных данных. Переходные режимы в динамике жидкой массы, определяемой ОДУ (24)–(25), обусловлены пространственно-временной ограниченностью источника капель.

Функцию впрыска G(t) удобно задать линейной комбинацией $\sum G_i(t)$ звеньев вида:

$$G_{i}(t) = A_{i} \left(\alpha_{i} + 1\right) \left(t - t_{i}^{0}\right)^{\alpha_{i}} / \Delta t_{i}^{\alpha_{i}+1} \exp\left[-(t - t_{i}^{0}) / \Delta t_{i}\right)^{\alpha_{i}+1} \operatorname{sign}(t - t_{i}^{0}),$$
(26)

где A_i – удельный вес; α_i , t_i^0 и Δt_i – форм-факторы *i*-го звена.

Сумма нормируется очевидным образом: $\Sigma A_i = G_{\Sigma}$. Практически для аппроксимации реальных законов топливоподачи достаточно двух слагаемых типа (26). Удобно положить $\alpha_1 \approx 1/3$, $\alpha_2 \approx 3$, $t^0_1 \approx t^0_2$ и $\Delta t_1 \approx \Delta t_1$, а A_1/A_2 выбрать в пределах 3–5. Если имеются данные о реальной динамике впрыска, целесообразно параметры модельного распределения (26) определить как параметры аппроксимации.

Результаты компьютерного эксперимента. Для сопоставления различных способов описания кинетики газификации жидкого топлива в дизелях приведем результаты соответствующих тестовых расчетов. Объектом моделирования выбран цилиндр тепловозного дизеля: его рабочий объем составляет (15 – 20) · 10³ см³, частота вращения коленвала – 10 – 15 с⁻¹, цикловая подача топлива $G_{\Sigma} \sim 1$ г, $\Delta t \sim 4$ мс, характерный начальный диаметр капель топлива – 50 мкм, коэффициент диффузии $D_{\tau} \sim 10^{-2}$ см²/с.

Отвечающая выбранным параметрам динамика впрыска и распыливания капель представлена на рис. 1.



Рис. 1. Количественные характеристики впрыска топлива в тепловозном дизеле: *a* – массовая мгновенная подача жидкости; *б* – массовая интегральная подача жидкости; *в* – средняя масса капель; *г* – секундное число капель; *G*₁ = 0,77 г и *G*₂ = 0,23 г – массовые доли топлива, относимые соответственно к слагаемым формулы (26)

Данные рис. 1 свидетельствуют, что качество смесеобразования определяется продолжительностью и переходными режимами топливоподачи.

Теперь сопоставим описанные модели распыливания—испарения различной детальности с тем, чтобы выбрать адекватную для интеграции в новую версию автоматизированной системы МОТОР [13, 14].

Наиболее подробно процесс газификации топлива описывается уравнением (13). Его решением (19) для выбранных нами условий, служат массово-временное распределение частиц в источнике, камере сгорания, а также момент m f(m, t), изображенные на рис. 2. Условия расчетов соответствуют тепловозному дизелю на режиме номинальной мощности.



Рис. 2. Статистические характеристики распыленного топлива в дизеле согласно модели (13), (16): *a* – масса жидкого топлива в камере сгорания; *б* – распределение капель по размеру; *B* – «массовая представительность» капель размера *m*

Результаты компьютерного эксперимента, показанные на рис. 3 и 4, призваны прояснить зависимость динамики испарения топлива от качества распыла, задаваемого величиной ξ , и ко-эффициента диффузии топлива $D_{\rm r}$. На рис. 3 видна геометрия зон влияния этих параметров на конечный результат. В частности, отражены: 1) усиление зависимости f(m, t) от $D_{\rm r}$ на завершающей стадии процесса (рис. 3, *a*); 2) устойчивость формы распределения капель по размерам при разумном варьировании показателя диспергирования ξ ; 3) область сильного влияния одновременно обоих параметров (характеризуется высокими значениями и сгущением изолиний) совпадает с завершающей фазой впрыска.



Рис. 3. Влияние коэффициентов D_{τ} (*a*) и ξ (δ) на распределение капель по размерам согласно модели (13) в условиях рис. 1 и 2



Рис. 4. Влияние коэффициентов D_τ (*a*) и ξ (*б*) на динамику «массовой представительности» капель согласно модели (13) в условиях рис. 1 и 2

Для ответа на вопрос, насколько правомочным является упрощенное описание впрыска при помощи ОДУ (23)–(25) и их предельных форм, необходимо выполнить специальные сопоставительные расчеты. В качестве сопоставляемых моделей выберем следующие три: 1) основанную на УЧП (13); 2) использующую аппроксимирующие ОДУ (23)–(25); 3) совпадающую с предыдущей, но предполагающую постоянство средней массы капель, и в результате определяемую единственным уравнением (24).

Естественными объектами такого сопоставления (его результаты представлены на рис. 5 и 6) являются усредненные по мгновенному массовому распределению f(m, t) величины $\langle m(t) \rangle^{2/3}$ и M(t). На рис. 5 показаны средняя поверхность испаряющихся капель (рис. 5,*a*) и масса жидкого топлива (рис. 5,*b*) в КС тепловозного дизеля, рассчитанные в рамках различных моделей испарения: сплошные линии без маркеров – модель, основанная на УЧП (13): заштрихованный на фрагменте рис. 5,*a* коридор соответствует интервалу $\langle m^{2/3}/\rho \rangle - \langle m/\rho \rangle^{2/3}$.



Рис. 5. Характеристики распыливания–испарения согласно (13), (24)–(25), (24): *a* – средняя поверхность капель $< m(t) >^{2/3}$; *б* – количество жидкого топлива в камере сгорания; \times – описание при помощи системы ОДУ (24)–(25); \Box – модель, использующая одно ОДУ (24)

Представленные на рис. 5 данные подтверждают квазистационарность среднего размера капель в КС, чем оправдывают использование предложенных здесь упрощенных моделей испарения. Погрешность упрощенных моделей газификации топлива (24) и (24)–(25) в редких случаях превышает 20 – 30 %, что позволяет использовать в интегрированной модели рабочего процесса ДВС математическое описание испарения, основанное на предположении о постоянстве среднего размера капли и выражаемое единственным ОДУ (24).

Существенно, что сопоставляемые модели, несмотря на различную степень детальности, сходным образом воспроизводят зависимость доли испаренного (за отведенное время) топлива от качества распыливания ξ и легкости испарения $D_{\rm T}$. Расчеты показывают, что неполнота испарения, а следовательно, и сгорания сильно зависят как от качества распыливания ($\partial \ln M_{\rm ocr}/\partial \ln \xi \rightarrow -1$), так и от транспортных свойств рабочего тела ($\partial \ln M_{\rm ocr}/\partial \ln D_{\rm T} \rightarrow 2$).

Выводы. Совпадение динамики испарения в предложенной иерархии моделей различной подробности заметно облегчает моделирование внутрицилиндровых процессов, в том числе образования токсичных веществ. Результаты работы служат также строгим научным обоснованием упрощенного описания испарения посредством модели (24), применявшегося авторами в предшествующих исследованиях. На основании предложенных моделей выявлены критичные условия и режимы в системе процессов впрыска, распыливания и испарения топлива в дизелях.

Библиографический список

1. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей / А.Р. Кульчицкий. – М.: Академический проект, 2004. – 400 с.

2. Марков В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.

3. Астахов И.В. Подача и распыливание топлива в дизелях / И.В. Астахов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1971. – 359 с.

4. Основы практической теории горения / под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергия, 1973. – 264 с.

5. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.

6. Лабунцов Д.А. Механика двухфазных систем / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 374 с.

7. Салтанов Г.А. Сверхзвуковые двухфазные течения / Г.А. Салтанов. – Минск: Вышэйш. шк., 1972. – 480 с.

8. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – 480 с.

9. Rosin P. The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal / P. Rosin, J. Rammler // J. Inst. Fuel. – 1933. – N 7. – P. 29–36.

10. Вильямс Ф.А. Теория горения / Ф.А. Вильямс. – М.: Наука, 1971. – 616 с.

11. Алемасов В.Е. Основы физико-химических процессов в тепловых двигателях и энергетических установках / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.С. Черенков. – М.: Химия, 2000. – 520 с.

12. Яценко О.В. Компьютерное моделирование задач прикладной физико-химической динамики / О.В. Яценко, В.Т. Загороднюк. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 200 с.

13. Бакулин В.Н. Моделирование кинетики неравновесных физических процессов и реакций в многокомпонентном турбулентном заряде поршневых двигателей внутреннего сгорания / В.Н. Бакулин [и др.] // Мат. моделирование. – 2007. – Т. 19, № 12. – С. 81-97.

14. Ладоша Е.Н. Системная имитация динамики поршневого ДВС: фазовые переходы, турбулентность и перенос, химические реакции, теплообмен / Е.Н. Ладоша, О.В. Яценко, Д.С. Цымбалов. – Свидетельство об офиц. регистрации ПрЭВМ № 2009615832. – М.: Роспатент, 2009.

References

1. Kul`chiczkij A.R. Toksichnost` avtomobil`ny`x i traktorny`x dvigatelej / A.R. Kul`chiczkij. – M.: Akademicheskij proekt, 2004. – 400 s. – In Russian.

2. Markov V.A. Toksichnost` otrabotavshix gazov dizelej / V.A. Markov, R.M. Bashirov, I.I. Gabitov. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E`. Baumana, 2002. – 376 s. – In Russian.

3. Astaxov I.V. Podacha i raspy`livanie topliva v dizelyax / I.V. Astaxov [i dr.]. – M.: Mashinostroenie, 1971. – 359 s. – In Russian.

4. Osnovy` prakticheskoj teorii goreniya / pod red. V.V. Pomeranceva. – L.: E`nergiya, 1973. – 264 s. – In Russian.

5. Teoreticheskie osnovy` teplotexniki. Teplotexnicheskij e`ksperiment: spravochnik / pod red. V.A. Grigor`eva i V.M. Zorina. – M.: E`nergoatomizdat, 1988. – 560 s. – In Russian.

6. Labunczov D.A. Mexanika dvuxfazny`x sistem / D.A. Labunczov, V.V. Yagov. – M.: Izd-vo ME`I, 2000. – 374 s. – In Russian.

7. Saltanov G.A. Sverxzvukovy`e dvuxfazny`e techeniya / G.A. Saltanov. – Minsk: Vy`she`jsh. shk., 1972. – 480 s. – In Russian.

8. Kikoin A.K. Molekulyarnaya fizika / A.K. Kikoin, I.K. Kikoin. – M.: Nauka, 1976. – 480 s. – In Russian.

9. Rosin P. The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal / P. Rosin, J. Rammler // J. Inst. Fuel. – 1933. – N 7. – P. 29–36.

10. Vil`yams F.A. Teoriya goreniya / F.A. Vil`yams. – M.: Nauka, 1971. – 616 s. – In Russian.

11. Alemasov V.E. Osnovy` fiziko-ximicheskix processov v teplovy`x dvigatelyax i e`nergeticheskix ustanovkax / V.E. Alemasov, A.F. Dregalin, A.S. Cherenkov. – M.: Ximiya, 2000. – 520 s. – In Russian.

12. Yacenko O.V. Komp`yuternoe modelirovanie zadach prikladnoj fiziko-ximicheskoj dinamiki / O.V. Yacenko, V.T. Zagorodnyuk. – Rostov n/D: Izd-vo SKNCz VSh, 2001. – 200 s. – In Russian.

13. Bakulin V.N. Modelirovanie kinetiki neravnovesny`x fizicheskix processov i reakcij v mnogokomponentnom turbulentnom zaryade porshnevy`x dvigatelej vnutrennego sgoraniya / V.N. Bakulin [i dr.] // Mat. modelirovanie. – 2007. – T. 19, # 12. – S. 81–97. – In Russian.

14. Ladosha E.N. Sistemnaya imitaciya dinamiki porshnevogo DVS: fazovy`e perexody`, turbulentnost` i perenos, ximicheskie reakcii, teploobmen / E.N. Ladosha, O.V. Yacenko, D.S. Cy`mbalov. – Svidetel`stvo ob oficz. registracii PrE`VM # 2009615832. – M.: Rospatent, 2009. – In Russian.

Материал поступил в редакцию 18.11.2011.

INFORMATION MODELING OF FUEL DISPERSION AND VAPORATION IN DIESEL ENGINE

E.N. LADOSHA, D.S. TSYMBALOV, O.V. YATSENKO

(Don State Technical University)

To settle upon the appropriate description of such processes as fuel injection, dispersion and vaporation in the diesel engines, a hierarchy of the corresponding models is offered. The application domain of the detailed model based on the evolutionary equations with partial derivatives, as well as the averaged versions expressed through two and one ordinary differential equations, is studied. The use of simple models in the computer simulation of the work process of the diesels with the allowed description of toxic gases and soot formation is proved. **Keywords:** injection, dispersion, vaporation, size distribution.