

УДК 621.43.068

## ПРОГРАММА CyberDiesel ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОПЛИВОПОДАЧИ И ЛОКАЛЬНЫХ ВНУТРИЦИЛИНДРОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДИЗЕЛЕ С ОБЪЁМНЫМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕМ

В.Ю. Мащенко

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
E-mail: masvladimir@yandex.ru

*Программа CyberDiesel разработана на основе комплексной математической модели топливоподачи и локальных внутрицилиндровых процессов дизеля с объемным смесеобразованием. Программа предназначена для решения практических задач согласования конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания дизеля методами математического моделирования.*

Анализ развития судовой энергетики показывает, что актуальность проблемы повышения экономических и экологических показателей дизелей не снижается. Одним из основных способов решения этой проблемы является согласование конструктивных параметров топливной аппаратуры (ТА) и камеры сгорания (КС) на этапах разработки нового и модернизации существующего дизеля. В настоящее время такое согласование выполняют путём, главным образом, дорогостоящих доводочных испытаний. Эффективным средством снижения стоимости и продолжительности доводочных испытаний является применение программного обеспечения, ориентированного на решение специальных задач при проектировании ТА и КС.

В настоящее время ощущается недостаток программных продуктов, имеющих свойство направленности на решение прикладных задач проектирования. Известные зарубежные программы (KIVA, Star-CD, FIRE и др.) дороги и громоздки. Расчёты с большим количеством трудно определяемых начальных и граничных условий не всегда приводят к достоверным результатам. Это осложняет их использование для решения поставленной прикладной задачи. Частично этот недостаток преодолен в известном отечественном программном комплексе Дизель-ПК, разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Его достоинством является удобный и интуитивно понятный для пользователя интерфейс. Несмотря на это, необходимо отметить, что «ядром» программного комплекса является математическая модель смесеобразования и сгорания топлива в КС, предложенная Н.Ф. Разлейцевым. Эта математическая модель более других известных моделей приспособлена к решению задач конструирования дизелей. Однако ей свойственны условность деления пространства, занимаемого топливным факелом, на зоны, а также произвольность задания границ указанных зон и параметров теплообмена в них. Отсутствие в распоряжении автора модели некоторых необходимых экспериментальных данных об этих параметрах не позволило ему достаточно строго смоделировать процессы смесеобразования и сгорания в дизеле и описать зависимость их качества от многих существенных факторов. Кроме того, количество эмпи-

рических коэффициентов довольно велико, ввиду чего «настройка» модели, выполняемая по экспериментальным кривым тепловыделения базового варианта дизеля, весьма трудоёмка.

Имея ввиду изложенное, разработчики программы CyberDiesel стремились придать базовой математической модели следующие свойства [1].

1. Возможность моделировать процесс топливоподачи и отслеживать его влияние на протекающие внутрицилиндровые процессы.
2. Локальность описания параметров рабочего тела в КС. Именно это свойство может быть необходимым условием для того, чтобы результаты работы программы адекватно отражали влияние изменения профиля КС и параметров топливной ТА на индикаторные показатели рабочего цикла.
3. Подтверждённая адекватности математического моделирования результатами экспериментальных исследований. Причем это свойство должно относиться не только ко всей модели, но и к отдельным подмоделям комплекса процессов топливоподачи – смесеобразование – сгорание.

Предлагаемая программа базируется на следующих подмоделях элементарных процессов, происходящих в ТА и КС: топливоподача, распад струи топлива на капли, развитие испаряющейся топливной струи, перемешивание паров топлива с газом, предпламенные реакции, выделение теплоты при горении и образование оксида азота NO. В качестве исходных данных задаются конструктивные параметры топливной аппаратуры и камеры сгорания, теплофизические свойства топлива и воздуха, некоторые эмпирические коэффициенты и параметры расчетной сетки. Главными результатами расчета являются индикаторная диаграмма, характеристика тепловыделения, характеристика образования NO. В качестве промежуточных результатов выводятся характеристика топливоподачи, поля концентраций компонентов и скоростей рабочего тела, поля температур и давлений. Важно отметить, что сопоставление результатов работы программы с экспериментами проведено не только для расчётных индикаторной диаграммы и характеристик тепловыделения, но и для расчётов промежуточных процессов.

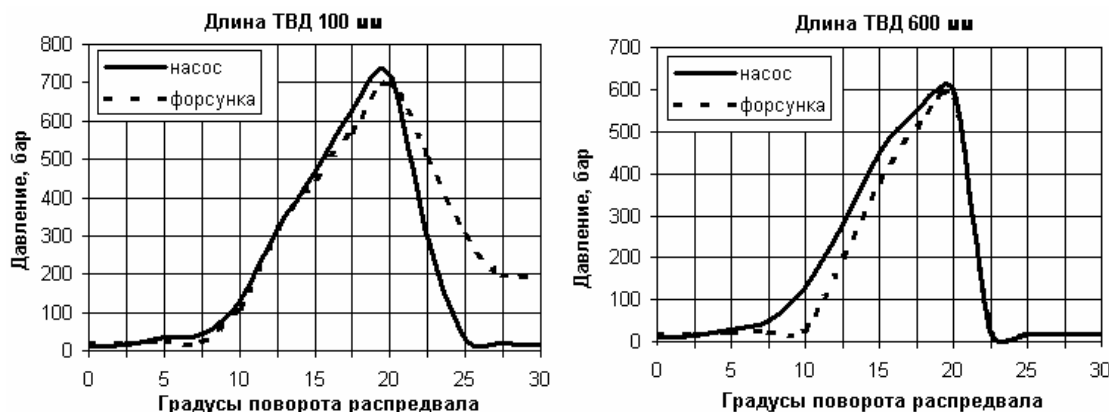


Рис. 1. Импульсы в топливной аппаратуре при базовом варианте граничных условий

Процесс топливоподачи рассчитывается с использованием известной динамической модели. При этом способ решения системы уравнений был заимствован у Б.П. Пугачева. Практика расчётно-экспериментальных исследований показала, что при некоторых специфических исходных данных модель реагирует на изменение длины трубопровода высокого давления (ТВД) неадекватно: увеличение длины ТВД в соответствии с моделью приводит к уменьшению отставания импульса давления в форсунке относительно импульса в ТНВД. Пример такого расчётного варианта для дизеля ЧН30/38 (Д42), выполненный для длин ТВД 100 и 600 мм, приведён на рис. 1.

Очевидно, что этот результат не соответствует действительности. Анализ выражений показал, что причина такой реакции – в неточности выражений для скоростей топлива в граничных сечениях трубки высокого давления.

Граничные условия базовой методики [2] задают значения скоростей движения топлива в начальном ( $i=0$ ) и конечном ( $i=n$ ) сечениях ТВД по следующим уравнениям:

$$w_{0,j+1} = w_{0,j} + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \tau}{\Delta x} (p_{u,j+1} - p_{1,j+1}),$$

$$w_{n,j+1} = w_{n,j} - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \tau}{\Delta x} (p_{\phi,j+1} - p_{n-1,j+1}), \quad (1)$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta \tau$  – шаги расчётной сетки соответственно по координате расстояния ТВД  $x$  и координате вре-

мени  $\tau$ ;  $i, j$  – номера узлов сетки, соответствующие условиям  $x=i\Delta x$  ( $i=0, 1, 2, \dots, n$ ) и  $\tau=j\Delta \tau$  ( $j=0, 1, \dots$ ),  $w_{ij}$  – скорость в узле,  $p_{ij}$  – давление в узле,  $p_{u,j+1}$  и  $p_{\phi,j+1}$  – давление соответственно в штуцере ТНВД и форсунке на следующем шаге расчёта по времени.

Предложенные уравнения граничных условий имеют следующий вид:

$$w_{0,j+1} = w_{0,j} + \frac{\Delta \tau}{\rho \Delta x} (p_{u,j} - p_{1,j}) + \frac{\Delta \tau}{\Delta x} |w_{u,j}| (w_{u,j} - w_{1,j}),$$

$$w_{n,j+1} = w_{n,j} - \frac{\Delta \tau}{\rho \Delta x} (p_{\phi,j} - p_{n-1,j}) - \frac{\Delta \tau}{\Delta x} |w_{\phi,j}| (w_{\phi,j} - w_{n-1,j}). \quad (2)$$

Сравнение выражений показывает, что (1) является частным случаем (2), если задать скорости в штуцере ТНВД и форсунке тождественно равными нулю  $w_{u,j} \equiv w_{\phi,j} \equiv 0$ . Известно, что в современных высокофорсированных дизелях скорости движения топлива в ТВД могут существенно отличаться от нуля. Допущение о нулевых скоростях в граничных сечениях приводит к существенному занижению расчетного давления в ТВД (особенно в первом сечении).

На рис. 2 приведены графики, рассчитанные по уточнённой нами методике (то есть с применением уравнений (2) граничных условий в ТВД) по исходным данным анализируемого расчетного варианта. В

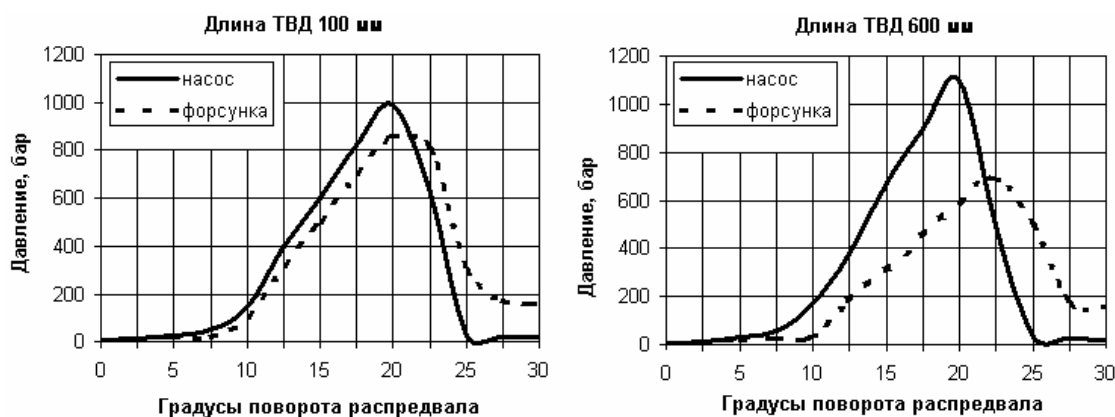


Рис. 2. Импульсы давления в топливной аппаратуре при уточнённом варианте граничных условий

результате расчетов оказалось, что при увеличении длины ТВД увеличивается отставание по углу поворота распределительного вала (по времени) импульса давления в форсунке от импульса давления в ТНВД (рис. 2). Кроме того, максимум давления в форсунке заметно уменьшается. Полученный результат соответствует реальному процессу топливоподачи.

Сравнение расчётной и экспериментальной характеристик давления впрыскивания в зависимости от угла поворота распредвала, полученные для топливной аппаратуры дизеля ЧН30/38, представлены на рис. 3. Отклонение расчётных значений давления от опытных не превышает 120 МПа, что соответствует максимальной относительной погрешности 10 %.



Рис. 3. Характеристики давления впрыскивания

Расчет процесса развития топливной струи построен на базе уравнений, описывающих комплекс процессов: продвижение капель, формирование спутного газового потока, взаимодействие двухфазной струи со стенками камеры сгорания.

Продвижение капель в пространстве КС моделируется согласно известному в классической гидромеханике методу Лагранжа. Для этого непрерывная характеристика впрыскивания дискретизируется с расчетным интервалом по времени  $\Delta\tau$  так, что за каждый интервал вылетает из сопла форсунки одна расчетная порция топлива массой  $m_{fi}$ .

Масса  $i$ -ой порции (индекс номера порции соответствует интервалу  $i=(1,2,\dots,n_i)$ ) рассчитывается по среднему значению ординат характеристики впрыскивания на расчетном интервале времени:

$$m_{fi} = (\overline{d\sigma/d\tau})_i \frac{G_u}{2\tau_{\text{впр}} i_c} \Delta\tau. \quad (3)$$

Координата вектора скорости по оси абсцисс для  $i$ -ой порции на выходе из соплового отверстия:

$$w_{xi} = \frac{m_{fi}}{\rho_f (\mu_c f_c) \Delta\tau} = (\overline{d\sigma/d\tau})_i \frac{G_u}{\rho_f (\mu_c f_c) \tau_{\text{впр}} i_c}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4)  $(\overline{d\sigma/d\tau})_i$  – ордината относительной дифференциальной характеристики впрыскивания для  $i$ -ой порции;  $G_u$  и  $\rho_f$  – соответственно цикловая подача и плотность топлива;  $\mu_c$  и  $f_c$  – соответственно коэффициент расхода и площадь проходного сечения соплового отверстия;  $i_c$  – число сопловых отверстий в форсунке;  $\tau_{\text{впр}}$  – время впрыскивания.

Проекция вектора скорости на ось ординат для  $i$ -ой порции на выходе из соплового отверстия

можно рассчитать по формуле, полученной из теоретического решения О.Н. Лебедева:

$$w_{yi} = K_w \sqrt{\frac{\sigma_f}{\rho_f d_{32i}}},$$

где  $\sigma_f$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива,  $\rho_f$  – плотность топлива,  $K_w$  – численный коэффициент.

Средний заулеровский диаметр капли  $d_{32i}$  является постоянным в пределах  $i$ -ой порции и вычисляется по известной формуле Танасавы:

$$d_{32i} = C_d \sqrt{g} \frac{d_c}{w_i} \left( \frac{\sigma_f}{10\rho_f} \right)^{0,25} \left( 1 + 0,331\mu_c f_c \sqrt{\frac{10g}{\sigma_f \rho_f d_c}} \right),$$

где  $\sigma_f$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива,  $g=9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $d_c$  – диаметр соплового отверстия;  $C_d$  – численный коэффициент;  $w_i$  – модуль вектора скорости для  $i$ -ой порции;  $w_i^2 = w_{xi}^2 + w_{yi}^2$ .

Сопротивление движению капель в вязкой среде вычисляем, используя известную из классической гидромеханики формулу для обтекания тела шарообразной формы. Проекция векторов ускорения для  $i$ -ой порции:

$$\frac{dw_{kxi}}{d\tau} = -C_{Dx} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_f} \cdot \frac{(w_{kxi} - w_{axi})^2}{d_{32i}},$$

$$\frac{dw_{kyi}}{d\tau} = -C_{Dy} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_f} \cdot \frac{(w_{kyi} - w_{ayi})^2}{d_{32i}},$$

где  $C_{Dx}$  и  $C_{Dy}$  – эмпирические коэффициенты сопротивления движению капли соответственно в направлениях  $x$  и  $y$ ;  $w_k$  и  $w_a$  – скорости движения соответственно капли и воздуха.

На рис. 4 представлены расчетные и соответствующие экспериментальные характеристики движения топливной струи для ТА дизеля ДН23/30 (40Д). Оказалось, что различие расчётных и экспериментальных значений исследуемых величин не превышает 10 %. Попутно заметим, что координата центра массы впрыснутого топлива  $X_{цт}$  находится на расстоянии, примерно соответствующем половине дальности струи  $L$ . Это замечание справедливо для всего времени впрыскивания. Следовательно, предполагаемое некоторыми авторами необратимое накапливание основной массы топлива в головной части струи не подтверждается ни экспериментом, ни расчетом по программе CyberDiesel.

$L, X_{цт}, \mu\mu\mu$   $i \times d_c = 8 \times 0,32 \text{ мм}, \rho_a = 12,8 \text{ кг/м}^3$

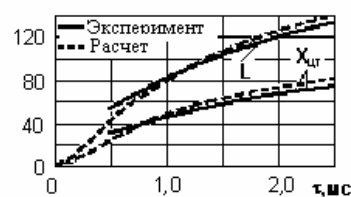


Рис. 4. Характеристики дальности струи и положения центра масс струи

Особенностью расчета процесса топливной струи является допущение о потенциальности газового потока, что позволило использовать метод конформных отображений для расчёта поля скоростей в КС [3]. Уравнения построены согласно известному принципу Эйлера, теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены [1].

Моделирование газового потока в КС выполнено на основе метода суперпозиции гидродинамических особенностей, который позволяет получить суммарный комплексный потенциал потока. Влияние движения частиц топлива на поле скорости газа смоделировано в виде течения от плоских диполей. Суммарный комплексный потенциал и суммарная комплексная скорость для любого момента времени вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \Phi_0(z) &= \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} \left[ -\frac{E_i}{(z-z_i)} \right] + \Phi_s(z) + \Phi_r(z) + \dots, \\ v_0(z) &= \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} \left[ \frac{E_i}{(z-z_i)^2} \right] + v_s(z) + v_r(z) + \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $E_i$  – интенсивность диполя;  $z_i$  – и координата центра масс  $i$ -ой порции топлива;  $z$  – текущая точка на комплексной плоскости;  $i_{\text{max}}$  – номер порции топлива, поступившей в КС на текущем шаге счета по времени;  $\Phi_s(z)$ ,  $v_s(z)$  – комплексный потенциал и комплексная скорость газового потока вдоль оси цилиндра, вызванные движением поршня;  $\Phi_r(z)$ ,  $v_r(z)$  – комплексный потенциал и комплексная скорость газового потока в направлении, перпендикулярном оси цилиндра.

Влияние динамики обтекания капель на поле скоростей газа выражается потерей интенсивности диполя на расчетном шаге по времени  $\Delta t$ , которая определяется как разность интенсивностей диполя в начальном и конечном квазистационарных состояниях потока:

$$\Delta E_{\tau, \tau+\Delta\tau} = 2\pi[(w_{ki} - w_{ai})_{\tau} - (w_{ki} - w_{ai})_{\tau+\Delta\tau}] R_i^2, \quad (6)$$

где  $R_i$  – эффективный радиус  $i$ -ой расчетной порции капель топлива.

Газовый поток, направленный вдоль оси цилиндра, представляет собой плоскопараллельное течение, скорость которого на поверхности поршня равна скорости его движения, а на поверхности крышки цилиндра равна нулю. Изменение указанной скорости вдоль направления движения происходит по линейной зависимости. Комплексный потенциал этого потока определяется:

$$\Phi_s(z) = k_s e^{-j\theta} z,$$

где  $k_s$  – вещественная величина, зависящая от текущей скорости поршня и его текущего положения в КС, при движении поршня до ВМТ при движении поршня от ВМТ; знак  $k_s$  зависит от текущего направления скорости поршня;  $\theta$  – угол между осью соплового отверстия и плоскостью крышки цилиндра;  $j$  – мнимая единица.

Комплексный потенциал радиального потока рассчитывается по формуле

$$\Phi_r(z) = k_r e^{-j\theta} z,$$

где  $k_r$  – вещественная величина, зависящая от текущей скорости поршня и его текущего положения в КС; знак  $k_r$  зависит от текущего направления скорости поршня.

Комплексный потенциал и комплексная скорость потока с учётом дополнительных потенциалов, вызванных обтеканием стенок КС, вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \Phi(z) &= \Phi_0(z) + \Delta\Phi_r(z) = \Phi_0(z) + f_1[g(z), \Phi_0(z)], \\ v(z) &= v_0(z) + \Delta v_r(z) = v_0(z) + f_2[g(z), v_0(z)], \end{aligned} \quad (7)$$

где  $g(z)$  – функция конформного отображения обтекаемой поверхности в единичную окружность. При моделировании задач обтекания профиля КС сложной формы (для которого невозможно найти единую функцию конформного отображения), его следует разбить на несколько простых элементов (дуг окружностей, прямых и т. д.), для которых такие функции известны.

Формулы (5–7) являются основой моделирования поля скоростей рабочего тела, которое оказывает существенное влияние на формирование поля концентраций в КС, следовательно, и на характер последующих предпламенных реакций, а также на характеристики тепловыделения.

Алгоритм предпламенных реакций реализован с использованием теоретических разработок [1]. Он учитывает так называемые цепное и тепловое ускорения реакций, а также зависимость их скорости от локальных концентраций реагентов. На рис. 5 представлено расчётное исследование поля температур газовой фазы в испаряющейся топливной струе дизеля ДН23/30 на момент времени 0,25 мс от начала впрыскивания (ось соплового отверстия направлена горизонтально). Как видно из рисунка, в струе наблюдается снижение температуры. Причем градиент температуры в той части поля, которое занимает струя, направлен от некоторого центра, лежащего на оси струи. Результаты расчёта поля температур для моментов времени, близких к окончанию периода задержки воспламенения, позволяют определить положение очагов пламени.

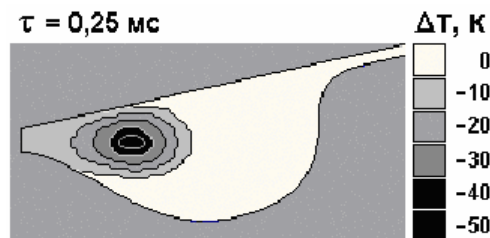


Рис. 5. Расчётное поле температур в КС

Горение топлива и эмиссия окислов азота в продуктах сгорания рассчитываются с использованием кинетических уравнений. Средние по цилиндру

параметры (давление, температура, доля выгоревшего топлива, масса образовавшегося NO) вычисляются путем интегрирования соответствующих локальных параметров.

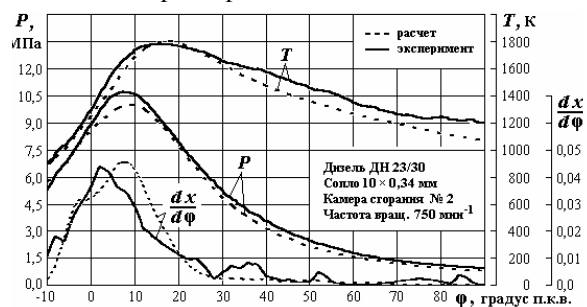


Рис. 6. Пример расчетных и экспериментальных характеристик давления, температуры и относительной скорости тепловыделения

Пример сравнения расчётных индикаторных диаграмм и характеристик тепловыделения с соответ-

ствующими экспериментальными данными представлен на рис. 6. Видно, что отклонение расчётных значений давления от экспериментальных не превышает 1 МПа, что соответствует максимальной относительной погрешности менее 10 %. Относительные погрешности характеристик температуры и скорости тепловыделения не превышают соответственно 10 и 20 %.

Таким образом, исследования показали, что результаты математического моделирования процессов топливоподачи и внутрицилиндровых процессов (включая элементарные процессы, промежуточные и завершающие стадии комплекса процессов) вполне удовлетворительно совпадают с результатами экспериментов. Это означает, что использование предложенной программы CyberDiesel в дизелестроительной практике позволит решать вопросы согласования конструктивных и регулировочных параметров дизеля и добиваться за счет этого повышения его технико-экономических и экологических показателей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов В.В. Методы повышения качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле на основе математического и физического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 43 с.
2. Работа дизелей в условиях эксплуатации. / А.К. Костин, Б.П. Пугачев, Ю.Ю. Кочнев; под ред. А.К. Костина. — Л.: Машиностроение, 1989. — 284 с.
3. Шукин П.А. Комплексная математическая модель рабочего процесса дизеля с объемным смесеобразованием. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: ЦНИДИ, 1999. — 22 с.

Поступила 15.01.2007 г.