

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЕЙ СО СТРУЙНЫМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕМ

Для успешного решения задач создания новых и модернизации существующих дизелей с целью улучшения их технико-экономических и экологических показателей необходимо использование математических моделей рабочего цикла двигателя и составляющих его процессов. Чрезвычайно сложным для изучения и описания и вместе с тем ключевым в комплексе процессов, происходящих в цилиндре дизеля, является процесс развития топливной струи и распределения в ней распыленного топлива.

Формулирование проблемы

Известно, что необходимый уровень сложности модели и ее адекватности реальному процессу определяется целями и задачами, для решения которых предназначена модель, а также наличием достоверных экспериментальных данных об описываемых процессах. Экспериментальные данные о структуре и развитии топливной струи (ТС), полученные на основе современных методов исследования [1, 2, 3, 4, 5, 6] указывают на наличие в ней начального и основного участков развития, подтверждают кумулятивный механизм развития струи на основном участке, а также разделение ее на зоны ядра, оболочки и фронтальную часть, отличающихся параметрами: движения элементарных порций капель топлива (ЭПКТ), микро- и макрораспределения ЭПКТ, тепло- и массообмена.

Анализ известных моделей ТС показывает, что представления о процессах развития струй в камерах сгорания (КС) дизелей и способы их описания весьма разнообразны и, иногда приводят к противоречивым результатам [6]. Используются модели различного уровня сложности – от моделей, описывающих

ТС как совокупность невзаимодействующих капель, до моделей, в которых ТС рассматривается как двухфазная нестационарная турбулентная струя со сложным взаимодействием составляющих ее фаз. Возможность эффективного использования этих моделей ограничена и, в значительной мере, зависит от степени достоверности входящих в них экспериментальных зависимостей, отражающих воздействие основных влияющих факторов на закономерности протекания отдельных стадий смесеобразования.

Решение проблемы

Наиболее приемлемой для использования в математической модели цикла дизеля является модель, разработанная в НТУ «ХПИ» под руководством профессора Н.Ф. Разлейцева и подробно описанная в [7]. Опыт использования этой модели для расчетной оптимизации показателей струйного смесеобразования и сгорания в дизелях с диаметром цилиндров 120-360мм, частотой вращения 500-2200 мин⁻¹ показал, что она выгодно отличается простотой и хорошей приспособляемостью к решению различных практических задач. Вместе с тем, новые экспериментальные данные, полученные В.В.Гавриловым в ГМТУ (Санкт-Петербург) [1], предоставили возможность уточнить эту модель (см. рис. 1) для использования в задачах согласования характеристик топливной аппаратуры и формы неразделенных КС.

В результате физического моделирования ТС, стробоскопического отбора, кинорегистрации и применения иконки были получены новые количественные данные о параметрах движения и распределения ЭПКТ в ТС, как при ее свободном развитии, так и при взаимодействии со стенками КС.

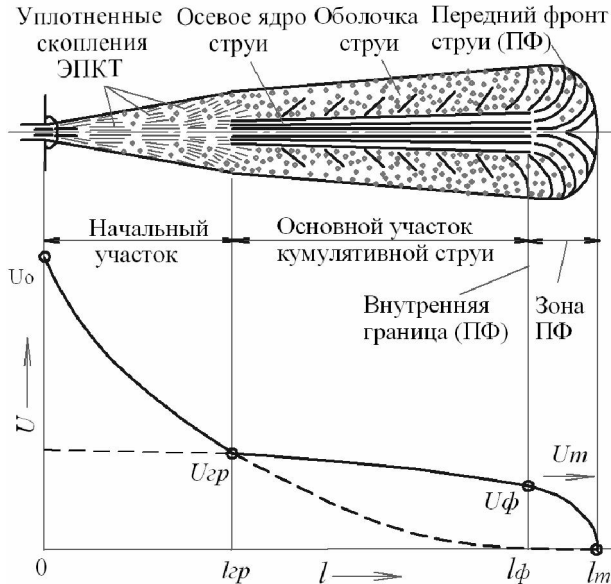


Рис. 1. Схема к расчету развития дизельной струи и движения в ней элементарных порций топлива: l_{cp}, l_{ϕ}, l_m - соответственно, путь ЭПКТ до границы между начальным и основным участками развития струи, до внутренней границы ПФ струи и текущая длина струи; $U_o, U_{cp}, U_{\phi}, U_m$ - соответственно, скорость в момент истечения ЭПКТ, достижения ЭПКТ l_{cp}, l_{ϕ} и текущая скорость вершины струи

Методика расчета характеристик движения

ЭПКТ в свободной ТС

Важным результатом анализа этих и других исследований является обоснование предположения, о том, что ЭПКТ, аналогично струе в целом, проходят три стадии развития (см. рис.1). Свободное движение с резким торможением на начальном участке развития до тыльной границы осевого ядра l_{cp} , движение в уплотненном осевом потоке ядра струи с незначительным торможением до внутренней границы переднего фронта (ПФ) струи и - резкое торможение в ПФ.

Изменение скорости U движения ЭПКТ топлива, поступившей из форсунки со скоростью U_o , хорошо приближают следующие зависимости: на начальном участке:

$$U/U_o = (1 - l/l_{ma})^2; \quad (1)$$

в ядре струи:

$$U/U_o = B \cdot (1 - l/l_{ma})^{0,25}; \quad (2)$$

в ПФ струи:

$$U/U_o = 1 - (l - l_{\phi} / (l_m - l_{\phi}))^2, \quad (3)$$

где: l - расстояние до рассматриваемого сечения ТС; l_{ma} - максимальная длина ТС; l_m - расстояние до сечения ТС, в котором затормозилась и перешла в оболочку рассматриваемая ЭПКТ; l_{ϕ} - расстояние до внутренней границы ПФ (здесь принято $l_{\phi} = l_m - 0,7 \cdot r_n$, где r_n - наружный радиус поперечного сечения струи на расстоянии l_m).

Коэффициент снижения скорости на начальном участке:

$$B = (1 - l_{cp} / l_{ma})^{1,75}. \quad (4)$$

Скорость подлета ЭПКТ к ПФ струи:

$$U_{\phi} = B \cdot U_o \cdot (1 - l_{\phi} / l_{ma})^{0,25}. \quad (5)$$

Время движения ЭПКТ до l_{cp} :

$$\tau_{cp} = (3 \cdot l_{ma} / U_o) \cdot (l_{cp} / l_{ma})^2 / (1 - (l_{cp} / l_{ma})^3). \quad (6)$$

Время движения ЭПКТ в осевом ядре:

$$\tau_{я} = (l_{ma} / (0,75 \cdot B \cdot U_o)) \cdot ((1 - l_{cp} / l_{ma})^{0,75} - (1 - l_{\phi} / l_{ma})^{0,75}). \quad (7)$$

Время движения ЭПКТ в ПФ струи:

$$\tau_{\phi} = 1,5 \cdot (l_m - l_{\phi}) / U_{\phi}. \quad (8)$$

Общее время движения ЭПКТ до ее полного торможения:

$$\tau_m = \tau_{cp} + \tau_{я} + \tau_{\phi}. \quad (9)$$

Используя систему уравнений для характеристик: впрыскивания топлива ($U_o = f(\tau)$, $\sigma = f(\tau)$); развития ТС по А.С.Лышевскому и движения ЭПКТ ТС по (1...9), итерационным путем находим моменты впрыскивания и массу капель, затормозившихся на заданных расстояниях от форсунки (аналогично алгоритму, описанному ранее в работах [7, 8]).

Адекватность математической модели развития свободной ТС проверена по экспериментальным данным [1]. На рис. 2 сопоставлены результаты экс-

перимента и расчета скорости продвижения ЭПКТ, поданной с максимальной скоростью в момент $\tau = 1,95$ мс. Совпадение расчета с экспериментом удовлетворительное. Аналогичный результат получен при других условиях впрыскивания и иных моментах истечения топлива.

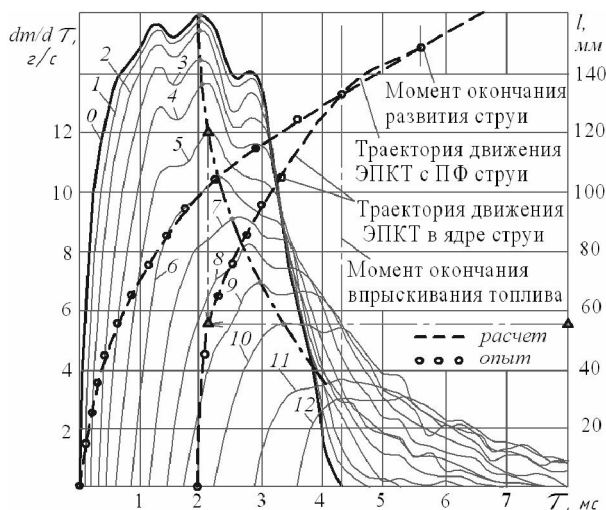


Рис. 2. К моделированию характеристик движения ЭПКТ в ядре свободной топливной струи (по опытными данным [1] для дизеля 1ДН23/30 при $B_c = 0,052$, $d_c = 0,35$ мм, $\rho_b = 19,6$ кг/м³):

0 — дифференциальная характеристика впрыскивания; 1-12 — расходные характеристики топлива через сечения струи соответственно на расстояниях 15-125 мм от форсунки

Расчет характеристик распределения ЭПКТ в свободной ТС

В модели расчета смесеобразования и сгорания необходимо располагать распределением топлива по характерным зонам испарения в струе и КС по ходу процесса впрыскивания топлива, а для расчетного профилирования огневой поверхности камеры — распределение на момент окончания развития струи τ_{SE} . Здесь: $\tau_{SE} = \tau_{ВПР} + \Delta\tau$, где $\Delta\tau$ — время движения ЭПКТ в ядре струи после окончания впрыскивания под действием спутного движения воздушного заряда, а также сил инерции. По экспериментальным данным $\Delta\tau = 0,3-0,5$ мс.

Часть капель ЭПКТ рассеивается в оболочке ТС

по пути их движения в ядре струи от форсунки к ПФ. Для учета этого явления в приведенных ниже зависимостях введем понятие коэффициента рассеивания — $K_r \approx 0,25...0,40$. По нашим косвенным оценкам многих экспериментальных данных в расчетах K_r может быть связан с углом раскрытия ядра струи на основном участке ее развития следующей зависимостью $K_r \approx r_{я} / r_H$. Для упрощения принимаем, что каждая ЭПКТ при своем движении в ядре к ПФ теряет за счет рассеивания в оболочку часть капель пропорционально $K_r \cdot \Delta\sigma$.

Кроме общей доли рассеянных ЭПКТ капель при их движении в ядре для расчетного профилирования КС важно знать закон распределения этих капель по длине струи. Таких прямых экспериментальных данных пока нет. Поэтому на основании оценок рассеивания топлива по приведенным выше расходным характеристикам и соответствующих расчетов распределения топлива по длине струи принимаем, что рассеянная доля ЭПКТ распределяется вдоль струи по криволинейному закону с максимумом в момент перехода от начального участка развития струи к основному. Крутизна переднего и заднего фронтов закона рассеивания оценивалась сопоставлением с мгновенными расходными характеристиками [1]. Для аналитического описания закона рассеивания воспользуемся функцией вида

$$\sigma_{r,n} = a_r \cdot (\bar{l}_1^{m_1} \cdot e^{m_2 \bar{l}_1}) - d_r \cdot \bar{l}_2^{m_3} \quad (10)$$

Здесь: $\bar{l}_1 = l / l_{SE}$ — относительная координата ЭПКТ по длине струи для показательной функции; $m_1 = 1,75$ — показатель степени, определяющий крутизну переднего фронта функции; $m_2 = -m_1 \cdot \bar{l}_3$ — показатель степени, определяющий момент экстремума функции; $\bar{l}_3$ — момент экстремума; $\bar{l}_2 = \bar{l}_3 - l / l_{SE}$ — относительная координата по длине струи для параболы; $m_3 = 3$ — показатель параболы,

корректирующей кривизну заднего фронта характеристики; d_r - поправочный множитель на параболическую функцию, обеспечивающий $\sigma_{rn} = 0$ при $\bar{l}_l = 1$; $a_r = \sigma_{\Sigma} / (\bar{l}_{\Sigma}^m \cdot e^{m_2 \bar{l}_{\Sigma}})$ - поправочный множитель для обеспечения наперед заданной площади под функцией, численно равной $K_r \cdot \sigma_{KE}$; σ_{Σ} - уточняемое программой максимальное значение функции.

Для расчета характеристики распределения ЭПКТ по длине свободной струи в цикле по n в интервале от l до l_{SE} с шагом Δl задаемся текущим значением l_n .

Если $0 < l_n \leq l_{Sm}$, то расчет ведем по формулам для начального участка развития струи. Принимаем, что это топливо заполняет оболочку струи на начальном участке ее развития и распределяется по закону: $\sigma_n = \sigma_1 \cdot (l_n / l_{SE})^2$. Здесь же распределяется некоторая часть капель топлива, рассеянная последующими ЭПКТ, поступающими в цилиндр на основном участке развития струи: $\Delta \sigma_n = \sigma_n - \sigma_{n-1}$. Здесь $\Delta \sigma_n$ - ЭПКТ, затормозившаяся на расчетном шаге без учета рассеивания.

Если $l_{Sm} \geq l_n \leq l_{SE}$, то расчет ведем по формулам для основного участка развития. Из формулы (2.11, [7]) находим текущее время развития струи τ_s , и используя формулы (1 - 9) подбираем моменты τ впрыскивания ЭПКТ, затормозившейся на расчетном шаге. Определяем долю впрыснутого топлива σ_n и ее приращение $\Delta \sigma_n = \sigma_n - \sigma_{n-1}$ на текущем интервале расчета. В соответствии с законом (10) находим долю капель, рассеянных текущей ЭПКТ по пути к ПФ струи:

$$\Delta \sigma_{rn} = \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta \sigma_r / (n_K - n)). \quad (11)$$

Оставшаяся часть капель этой порции переходит в оболочку через ПФ:

$$\Delta \sigma_{ПФ}(n) = \Delta \sigma_n - \Delta \sigma_{rn}. \quad (12)$$

Координата центра заторможенной доли ЭПКТ:

$$l_o(n) = l_n - \Delta l / 2. \quad (13)$$

Долю цикловой порции топлива, оставшуюся в ядре струи на момент окончания ее развития распределим по треугольному закону [7].

Тогда распределение доли цикловой порции топлива в текущем сечении струи определяется как сумма составляющих:

$$\Delta \sigma_o(n) = \Delta \sigma_{ПФ}(n) + \Delta \sigma_r(n) + \Delta \sigma_{я}(n). \quad (14)$$

На рис. 3 сопоставлены результаты расчета по оценке распределения топлива вдоль свободной струи на момент окончания ее развития с экспериментальными данными [1]. В целом расчетные характеристики удовлетворительно отражают качественную картину распределения топлива вдоль струи - увеличение доли топлива в сечениях струи с удалением от форсунки. Некоторое различие в распределение топлива на начальном и основном участках по расчету и опытным данным может быть связано с отличием расчетной и опытной характеристик впрыскивания топлива.

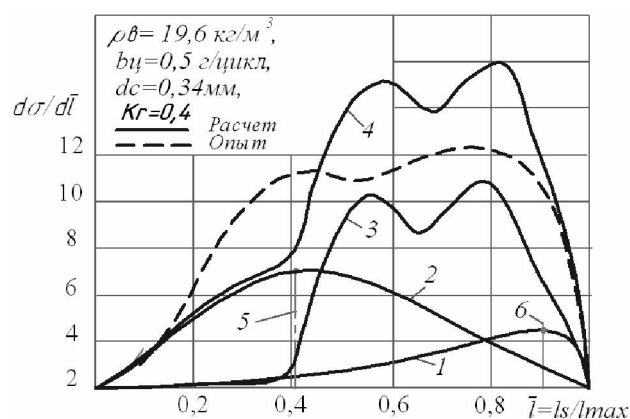


Рис. 3. Распределение топлива вдоль свободной струи для момента окончания ее развития на номинальном режиме работы двигателя 1ДН23/30):

1 — в ядре струи; 2 — в оболочке от рассеивания ЭПКТ ядра; 3 — в оболочке от рассеивания ПФ струи; 4 — суммарное распределение вдоль струи; 5 — граница между начальным и основным участками струи; 6 — внутренняя граница ПФ струи

Методика расчета характеристик движения и распределения ЭПКТ в стесненной ТС

При налете ТС на боковую стенку КС топливо растекается по ней в виде пятна со сложной послойной структурой. Строгого математического решения задачи переноса массы и импульса энергии в многокомпонентном турбулентном пристеночном слое не существует. Вместе с тем, в ряде исследований установлено подобие развития пристеночных потоков и свободных ТС. Естественно, что сопротивление движению топлива в пристеночном слое выше, чем при свободном развитии струи, а скорость растекания топлива в различных направлениях по стенке зависит, прежде всего, от угла встречи струи с периферийной стенкой КС. Изложенная выше методика расчета характеристик движения ЭПКТ в свободной ТС позволяет оценить скорость подлета капель к точке контакта с периферийной стенкой КС. Принимая эту скорость за некий аналог скорости истечения топлива из форсунки, мы можем применить формулы (1...9) также и для описания растекания топливного пятна по стенке, уточнив предварительно максимальный размер радиуса пятна с учетом возросшего сопротивления движению топлива у стенки (см. формулу 2.32 [7]). Методом итераций находим моменты выхода и массу ЭПКТ, затормозившихся на расчетном расстоянии l_{wm} от точки пересечения струи со стенкой до текущей границы овалообразного топливного пятна на стенке КС. Длину полуосей овала и потоки массы по различным направлениям вдоль стенки в первом приближении свяжем с углом встречи ТС со стенкой в точке контакта, введя коэффициент неравномерности растекания пристеночных потоков K_j и выделив четыре направления для векторов потоков: вверх по стенке, вниз, влево и вправо (соответственно $j=1, 2, 3, 4$). Эти характеристики удовлетворительно (см. рис. 4) описывают зависимость вида:

$$K_j = 0,5 \cdot (\sin(\gamma_1) + \sin(\gamma_2)) - 1,6675 \cdot (\cos(\gamma_j) \cdot |\cos(\gamma_j)|), \quad (15)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_j$ - углы между j -тым вектором и осью струи в точке ее пересечения со стенкой.

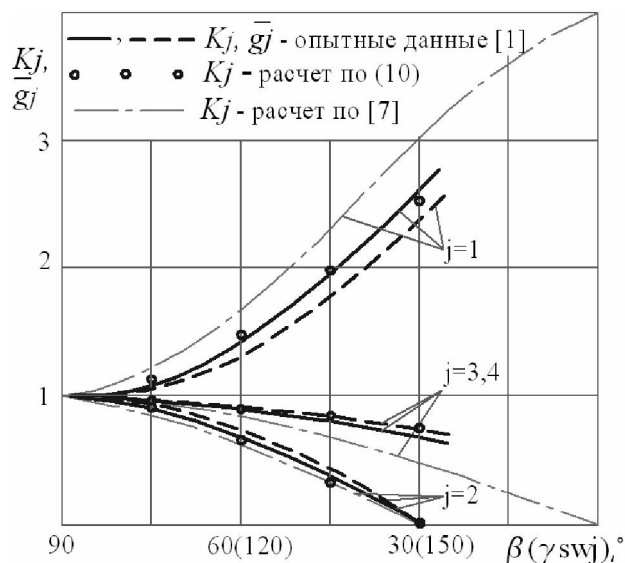


Рис. 4. Относительное изменение размеров пристеночного топливного слоя $K_j = l_{wj} / l_{wm}$ и распределения массы топлива в соответствующем секторе потока g_j в зависимости от угла встречи ТС со стенкой КС

Заключение

Изложенная в работе методика расчета характеристик движения элементарных порций топлива и их распределения в свободной и стесненной топливной струе включает в себя основные влияющие факторы, обладает определенностью выбора и постоянством коэффициентов расчетных уравнений, а также достаточно проста для использования в программном комплексе расчетной оптимизации параметров рабочего процесса форсированных среднеоборотных дизелей. Аналитическая связь уравнений (1...9) с показателями впрыскивания, распыливания и динамикой развития вершины ТС через критериальные зависимости А.С.Лышевского позволяет выполнять расчетные исследования по распределению топлива в камерах сгорания для различных характеристик топливоподачи, а также решать задачи оптимального

проектирования неразделенных КС с учетом ограничений. В качестве ограничений приняты: постоянство воздушно-топливного отношения вдоль радиуса цилиндра, рациональная минимизация доли топлива, поступающего в пристеночные зоны крышки и гильзы цилиндра, а также в зону смыкания растекающихся по стенке встречных потоков от соседних струй.

В качестве перспективы дальнейшего развития модели намечена ее модернизация в плане учета взаимодействия ТС с движением воздушного заряда, особенно у периферийных стенок КС. Такая задача, прежде всего, актуальна для дизелей с интенсивным движением воздушного заряда в КС.

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... д-ра техн. наук: 05.08.05. /ГМТУ.-Санкт-Петербург, 2004.-35 с. 2. Гаврилов В.В., Захаренко

Б.А. Экспериментальный метод исследования структуры струи дизельной форсунки//Двигателестроение.-1979.-№9.-С. 34-37. 3. Гафуров Р.А., Глебов Г.А., Скворцов Ю.М. Исследование структуры дизельной топливной струи при циклическом впрыскивании методом импульсной голографии//Двигателестроение.-1996.-№3,4. -С. 10-12. 4. Калужин С.А., Романов С.А., Свиридов Ю.Б. Распределение жидкого топлива в объеме дизельного факела//Двигателестроение. -1980. -№8. -С. 6-8. 5. Лышевский А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях. – Л., 1971. –248 с. 6. Современное состояние и задачи дальнейших исследований смесеобразования в дизеле //Двигателестроение. -1991. -№5. 7. Процессы в перспективных дизелях /Под редакцией А.Ф. Шеховцова.-Х.: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992.-352 с. 8. Разлейцев Н.Ф., Сукачев И.И. Расчет движения и распределения топлива в дизельной струе //Двигатели внутр. сгорания, 1989, №49, с. 72-80.