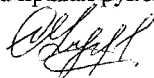


05.04.02

Н627

Контрольный  
экземпляр  
На правах рукописи



**Никифоров Сергей Степанович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ  
ОТКРЫТОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ ФОРСИРОВАНИИ  
ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО БЫСТРОХОДНОГО  
ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ**

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
2006

Диссертация выполнена на кафедре «Автомобили» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Драгунов Г.Д.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Кукис В.С.;  
доктор технических наук, профессор  
Морозова В.С.

Ведущее предприятие – ООО «ГСКБ «Трансдизель»

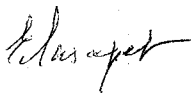
Защита состоится 14 февраля 2007 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, зал диссертационного совета (ауд.1001 гл. корп.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.298.09.

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Е.А. Лазарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из основных направлений совершенствования быстроходных транспортных дизелей является форсирование их по мощности. При этом ставятся задачи обеспечения необходимой топливной экономичности, механической и тепловой нагруженности. Решение этих задач осуществляется различными мероприятиями, в числе которых большое значение имеют работы, направленные на обеспечение качественного смесеобразования в камере сгорания (КС) дизеля.

В дизелях с открытой КС эффективным способом воздействия на качество смесеобразования является согласование параметров топливоподачи и ее формы, например, в широко распространенной КС типа Гессельман (рис. 1а). Однако при форсировании по мощности при сохранении штатной топливной аппаратуры (ТА) увеличивается длина топливного факела, что в условиях стесненности пространства сжатия приводит к контакту факелов с днищем поршня, переобогащению периферийных зон КС и, как следствие, к ухудшению качества смесеобразования. Также весьма не эффективно используется воздух, расположенный в выточках под клапаны на периферии днища поршня. Выточки выполняются для предотвращения контакта клапанов газораспределительного механизма с поршнем, но усложняют форму днища поршня и являются концентраторами тепловых напряжений, что наряду с ухудшением качества смесеобразования в периферийных зонах КС является препятствием к дальнейшему форсированию дизеля.

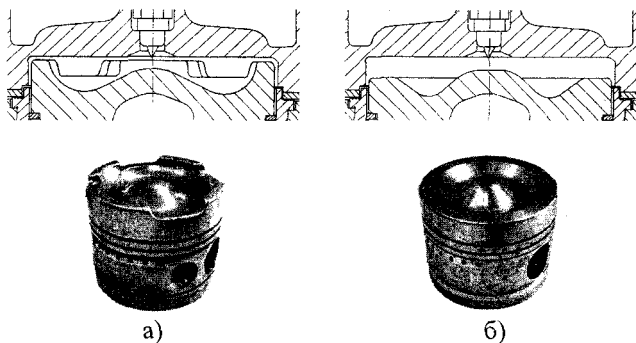


Рис. 1. Камеры сгорания быстроходного транспортного дизеля и соответствующие им поршни;

а – КС типа Гессельман, поршень с выточками под клапаны;

б – КС с равномерным увеличенным надпоршневым зазором, поршень без выточек под клапаны

Ликвидации выточек под клапаны позволяет устранить указанные недостатки. При этом на периферии камеры сгорания образуется равномерный увеличенный надпоршневой зазор, что приводит к перераспределению воздуха в пространстве сжатия (рис. 1б). Заданная величина степени сжатия достигается за счет изменения формы КС, что влечет изменение условий смесеобразования.

Процесс смесеобразования в условиях отсутствия завихрения воздушного заряда осуществляется путем организованного взаимодействия топливного факела с днищем поршня (иначе – стенкой КС), в результате которого происходит отражение факела и распределение топлива в пространстве сжатия. Форма камеры сгорания должна обеспечивать рациональное отражение топливных факелов от днища поршня и соответствующее распределение воздушного заряда.

Вопросы выбора рациональной формы открытой КС с организованным взаимодействием топливного факела со стенкой недостаточно изучены. Основным методом выбора формы КС является проведение весьма трудоемких и дорогостоящих сравнительных испытаний различных вариантов. Поэтому разработка теории и методики профилирования камеры сгорания такого типа, на основе которой могут быть получены необходимые показатели рабочего процесса форсированного дизеля, является актуальной задачей.

**Цель работы** – разработка расчетно-экспериментальной методики профилирования открытой камеры сгорания с рациональным отражением топливных факелов от днища поршня для улучшения экономичности четырехтактного быстроходного транспортного дизеля при его форсировании.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели исследования сформулированы и решены следующие задачи:

1. Сформулированы основные положения расчетно-экспериментальной методики профилирования открытой камеры сгорания, в которой процесс смесеобразования реализован путем рационального отражения топливных факелов от днища поршня.

2. Экспериментально определены параметры топливоподачи, характер развития и взаимодействия со стенкой струи распыленного топлива на форсированных режимах четырехтактного быстроходного транспортного дизеля типа ЧН15/16 и ЧН15/18, а также взаимодействия со стенкой газовой и газожидкостной струй.

3. На основе анализа литературных источников и вновь полученных экспериментальных данных разработана модель структуры топливного факела и процесса взаимодействия его со стенкой, учитывающая основные параметры топливоподачи, профиль и геометрические размеры камеры сгорания, которая позволила оценить распределение топлива в камере сгорания в результате отражения факела от днища поршня.

4. На основании расчетных исследований по разработанной модели с использованием данных безмоторных экспериментов сформулированы условия, которым должна удовлетворять форма камеры сгорания быстроходного транспортного дизеля типа ЧН15/16, ЧН15/18, и определены ее рациональные конструктивные параметры. Разработаны, изготовлены и исследованы на одноцилиндровом дизеле 1ЧН15/16 варианты камер сгорания с совокупностью заданных параметров для экспериментального определения закономерностей их влияния на эффективные показатели дизеля и подтверждения основных положений разработанной методики.

5. Экспериментально показана возможность форсирования быстроходного транспортного дизеля до уровня  $P_e = 1,05$  МПа при применении рациональ-

ной формы камеры сгорания без изменения степени сжатия и топливной аппаратуры с улучшением экономичности по сравнению с прототипом. Экспериментально определены показатели одноцилиндрового дизеля 1ЧН15/16 с рациональной формой камеры сгорания при форсировании до уровня  $P_e = 1,42$  МПа с пониженной степенью сжатия.

#### **Научная новизна работы**

1. Теоретически и экспериментально обоснованы положения методики профилирования открытой камеры сгорания при форсировании четырехтактного быстроходного транспортного дизеля, в которой процесс смесеобразования реализован путем рационального отражения топливных факелов от днища поршня. Методика базируется на принципе распределения воздушного заряда по зонам прямого и обратного тока в КС пропорционально отраженному в эти зоны количеству топлива и включает основные геометрические параметры камеры сгорания.

2. Разработаны физическая и математическая модели структуры топливного факела и процесса его взаимодействия со стенками КС, в которых свободный топливный факел рассматривается как осесимметричная двухфазная струя, а в двумерной области взаимодействия факела со стенкой – как совокупность капель топлива, отклоняющихся от первоначальной траектории под воздействием спутного потока воздуха в направлении прямого и обратного тока.

3. Сформулированы и экспериментально подтверждены условия, которым в комплексе должна соответствовать форма открытой камеры сгорания с рациональным отражением топливного факела от днища поршня. Экспериментально установлены закономерности влияния параметров камеры сгорания на эффективные показатели быстроходного форсированного транспортного дизеля типа ЧН15/16, подтверждающие основные положения разработанной модели топливного факела и процесса его взаимодействия со стенками КС.

4. Экспериментально показана возможность форсирования быстроходного транспортного дизеля до уровня  $P_e = 1,05$  МПа с ограниченным объемом камеры сгорания без организованного движения воздушного заряда только путем увеличения цикловой подачи топлива с одновременным улучшением экономичности на 5...5,5 г/кВт·ч по сравнению с прототипом за счет выбора рациональной формы камеры сгорания.

**Практическая ценность работы.** Разработанная методика определения рациональных параметров камеры сгорания при заданных конструктивных ограничениях и прикладные программы расчета профиля камеры сгорания с равномерным надпоршневым зазором применяется при профилировании КС дизелей специального назначения типа ЧН15/16 и ЧН15/18. Сформулированные требования к камере сгорания открытого типа с отражением топливного факела от днища поршня и экспериментально установленные закономерности влияния основных конструктивных параметров КС на эффективные показатели дизеля 1ЧН15/16 позволяют выбрать рациональную форму КС для конкретных условий эксплуатации дизелей.

**Реализация работы.** Результаты исследований использованы для разработки и обоснования конструкции камеры сгорания дизеля, защищенной авторским свидетельством на изобретение № 1576697 и внедренной в серийное производство в ООО «ЧТЗ – Уралтрак». Разработанная методика применяется при профилировании КС для новых дизелей специального назначения.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях в ЧПИ, ЧГТУ, ЮУрГУ и ПО ЧТЗ, на региональных конференциях, на международной научно-технической конференции к 100-летию Духова Н.Л. (2005 г.), на международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения» (Челябинск 2006 г.).

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 10 работ и получено 3 авторских свидетельства на изобретение.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, приложения и содержит 199 страниц, в том числе 131 страницу машинописного текста, 135 иллюстраций, 7 таблиц. Список использованной литературы включает 173 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, кратко раскрыто содержание диссертации.

**В первой главе** представлен обзор исследований по проблемам совершенствования КС дизелей. Значительные научные и практические результаты достигнуты в работах ЦНИДИ, ХПИ, МГТУ, МАДИ, НИИД, ПО «Пенздизельмаш», ПО «Турбомоторный завод», АлтГТУ, ЯМЗ, и др. Ряд работ посвящен вопросам согласования формы открытой КС с параметрами топливоподачи при преимущественно объемном смесеобразовании. Открытые камеры сгорания с равномерным увеличенным надпоршневым зазором исследованы на дизелях большей размерности типа ЧН21/21, ЧН26/26, ЧН26/34, ЧН31,8/33.

Попытка применения результатов этих исследований на транспортных дизелях ЧН15/16 и ЧН15/18 показали, что вопросы профилирования таких КС требуют дальнейшего изучения. Это связано с тем, что в дизелях этой группы на форсированных режимах топливные факелы контактируют со стенками КС, и влияние этого процесса на смесеобразование является определяющим. Проведен анализ опубликованных работ, посвященных изучению динамики, структуры и взаимодействия со стенками КС топливного факела, выполненных в ЦНИТА, ЦНИДИ, МГТУ, СПбГПУ, ХПИ, МАДИ, СПбГМТУ, НГавт, рядом других отечественных и зарубежных исследователей, а также работ в области теории многофазных систем и турбулентных струй. Сформулированы задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке модели структуры топливного факела и процесса его взаимодействия со стенкой камеры сгорания.

В топливном факеле, взаимодействующем со стенкой, выделены три области: свободного факела, область взаимодействия и пристеночная струя. Мо-

делирование проведено для первых двух областей, процессы в которых определяют характер распределения топлива. Свободный топливный факел представлен как совокупность капель усредненного диаметра  $d_{32}$ , движущихся в спутном потоке воздуха и взаимодействующих с ним. При анализе процесса взаимодействия факела со стенкой КС за основу принято известное по ряду работ положение о решающем влиянии на этот процесс поведения несущей среды, т.е. спутного потока воздуха.

Область свободного факела по длине разделена на два участка – начальный и основной. Приняты допущения о том, что на протяжении начального участка происходит формирование топливного факела, а именно, распад на отдельные капли вытекающей из отверстий распылителя струи топлива, обмен количеством движения между топливом и воздухом и вовлечение последнего в совместное движение. По аналогии с двухфазной турбулентной струей принято допущение о сохранении потока топлива и постоянстве скорости топлива, по крайней мере, на оси факела.

Основной участок факела рассматривается как осесимметричная турбулентная двухфазная струя, по поперечному сечению которой профили скоростей жидкой  $U_l$  и газообразной  $U_v$  фаз, а также концентрации жидкой фазы  $C_l$  описываются известным соотношением Шлихтинга:

$$P = P_m \cdot \left[ 1 - (r/R)^{1,5} \right]^2. \quad (1)$$

Здесь  $P$  – значение параметра (скорости, концентрации) в произвольной точке, находящейся на расстоянии  $r$  от оси в нормальном сечении факела радиусом  $R$ ;  $P_m$  – значение этого же параметра на оси факела. Для основного участка также приняты допущения: сохранение потока топлива по крайней мере на протяжении до  $2/3$  от максимальной длины факела; торможение капель топлива в спутном потоке воздуха, сформированном на протяжении начального участка. Относительно обмена количеством движения между топливом и воздухом принят во внимание тот факт, что согласно теории многофазных систем этот обмен осуществляется при определенной пороговой концентрации капель топлива. При концентрациях ниже порогового значения энергия частиц, потерянная в результате торможения, диссипирует в их следах. Принято допущение наличия обмена количеством движения между топливом и воздухом только для начального участка, где формируется спутный поток воздуха.

Моделирование процессов формирования факела на протяжении начального участка затруднено в виду их сложности. При помощи принятых допущений для начального участка факела определена взаимосвязь параметров в переходном сечении факела (условное сечение между начальным и основным участками факела), для которого справедливо также выражение (1). Взаимосвязь параметров в переходном сечении описана уравнениями:

$$\begin{cases} U_{mnt} = U_{ot} \cdot \sqrt{\frac{0,3541 \cdot \rho_t \cdot f_c}{\rho_v \cdot (0,13352 \cdot f_n - 0,6459 \cdot f_c)}}; \\ \frac{6}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\nu_v}{d_{32} \cdot (U_{ot} - U_{mnv})}} + 1 - 0,281 \cdot 3 \sqrt{\frac{\pi \cdot f_n}{f_c}} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $\rho_t, \rho_v$  – плотности топлива и воздуха;  $\nu_v$  – кинематическая вязкость воздуха;  $f_c$  – площадь отверстия распылителя форсунки;  $U_{ot}$  – средняя скорость истечения топлива, рассчитанная по параметрам топливopодачи, определенным экспериментально (глава 5). Размеры факела и средний диаметр капель рассчитывались по методике А.С. Лышевского.

В результате решения уравнений (2) определяются параметры переходного сечения, которые являются начальными условиями при расчете основного участка. Для определения концентрации топлива  $C_{mt}$ , скорости топлива  $U_{mt}$  и воздуха  $U_{mv}$  на оси факела на основном участке выведена система уравнений (3). Система получена путем преобразований уравнений сохранения по длине факела  $l$  импульса воздуха, потока топлива и изменения количества движения топливных капель под действием сил аэродинамического сопротивления.

$$\begin{cases} C_{mt} = C_{mnt} \cdot \frac{U_{ot} \cdot R_n}{U_{mt} \cdot R}; \\ U_{mnv}^2 \cdot f_n \cdot \left( 0,13352 - 0,08624 \cdot \frac{C_{mnt}}{\rho_t} \right) = U_{mv}^2 \cdot f \cdot \left( 0,13352 - 0,08624 \cdot \frac{C_{mt}}{\rho_t} \right); \\ U_{mt} \cdot dU_{mt} = - \left[ A \cdot (U_{mt} - U_{mv}) - B \cdot (U_{mt} - U_{mv})^2 \right] \cdot dl. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $A$  и  $B$  – коэффициенты, отражающие физические свойства воздуха, топлива и размер капель;  $f$  – площадь сечения факела на длине  $l$ , которому принадлежит выбранная точка; индексы  $m, n, v, t$  – обозначают соответственно ось факела, переходное сечение, воздух и топливо. На основном участке свободного факела положение точки однозначно определяется координатами  $l$  и  $r$ , параметры топлива и воздуха вычисляются по уравнениям (3) и (1).

При моделировании области взаимодействия топливный факел рассматривается как газовая струя с движущимися в ее объеме каплями топлива. Набегая на преграду под углом  $\varphi$ , газовая струя растекается вдоль ее поверхности (рис. 2). В случаях  $\varphi \neq 90^\circ$  растекание не симметричное, в теории турбулентных струй принято выделять ветви большого и малого расходов (ветви прямого и обратного тока). В диссертации допущения о форме и размерах области взаимодействия приняты по результатам фоторегистрации топливной и газовых струй (глава 5). Размеры области определяются по отпечатку конуса факела на преграде и зависят от угла столкновения  $\varphi$  и расстояния  $L_f$  от сопла до стенки. Высоты зон ветвей прямого  $\delta_b$  и обратного  $\delta_m$  токов (рис. 3) определяются по экспериментальной зависимости (рис. 14). Согласно теории турбулентных



струй профиль скорости воздуха на выходе из области взаимодействия описывается соотношением (1), максимальные значения скорости  $W_{mvб}$  и  $W_{mvм}$  предполагаются у поверхности преграды. Величины этих скоростей приняты неизменными на протяжении границы соответствующей зоны и определяются из условия неразрывности потока для каждой ветви.

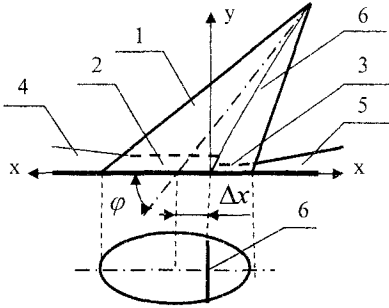


Рис. 2. Схема взаимодействия газовой струи с преградой под углом  $\varphi$ ;  
1 – свободная струя; 2, 3 – зоны ветвей прямого и обратного токов; 4, 5 – ветви отраженной струи, 6 – плоскость раздела течения

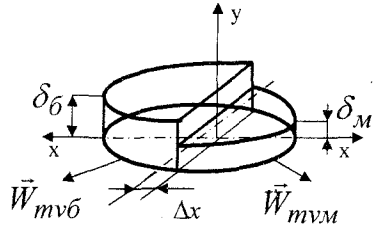


Рис. 3. Схема области взаимодействия струи с преградой

На базе модели Белова И.А., разработанной для случая симметричного растекания ( $\varphi = 90^\circ$ ), в диссертации выведены выражения для определения скорости воздуха в произвольной точке области взаимодействия при  $\varphi \neq 90^\circ$ :

$$U_v = -\frac{U_{mv} \cdot \sin \varphi}{0,45} \cdot \lambda(X) \cdot (Y - 0,8 \cdot Y^{2,5} + 0,25 \cdot Y^4),$$

$$V_v = \frac{W_{mv}}{C} \cdot f(X) \cdot (1 - Y^{1,5})^2 \pm \frac{U_{mv} \cdot \cos \varphi}{0,45} \cdot \lambda(X) \cdot (Y - 0,8 \cdot Y^{2,5} + 0,25 \cdot Y^4); \quad (4)$$

Здесь  $U_v$  и  $V_v$  – проекции искомой скорости на оси  $y$  и  $x$  соответственно;  $U_{mv}$  – скорость воздуха на оси свободной струи на входе в область взаимодействия;  $W_{mv}$  – скорость у поверхности преграды на выходе из области взаимодействия; значения коэффициента  $C$ , функции  $\lambda(X)$  и  $f(X) = \lambda'(X)$  определяются по профилю скорости на входе в рассматриваемую зону; знак «+» во втором выражении соответствует зоне прямого тока, знак «-» – зоне обратного тока. Каждая зона области взаимодействия рассматривается отдельно в своей системе координат (рис. 2 и 3). Уравнения (4) выведены в относительных координатах:  $Y = y/\delta$  и  $X = x/\delta$ , где  $\delta = \delta_b$  или  $\delta_m$ .

Изменение траекторий капель топлива в области взаимодействия происходит под действием сил аэродинамического сопротивления в потоке несущей газовой среды, отклоненной от первоначального направления движения по-

верхностью преграды. Часть капель уносится потоком в объем, другая часть попадает в пристеночную зону. Для описания движения капель топлива в области взаимодействия выведена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dV_t}{dx} = \frac{(V_t - V_v)^2}{V_t} \cdot \left[ \frac{A}{(V_t - V_v)} + B \right]; \\ \frac{dU_t}{dy} = \frac{(U_t - U_v)^2}{U_t} \cdot \left[ \frac{A}{(U_t - U_v)} + B \right]; \\ \frac{dy}{dx} = \frac{V_t}{U_t}. \end{cases} \quad (5)$$

Система (5) решается численно относительно координаты  $x$ . Начальными условиями являются значения скорости капель топлива на границе свободного топливного факела и области взаимодействия, определенные по соотношениям (3) и (1). Проекции скорости воздуха  $U_v$  и  $V_v$  задаются соотношениями (4). В результате решения уравнений (5) определяются траектории капель топлива в зонах прямого и обратного тока (рис. 4). При расчете распределения топлива принято, что капли, унесенные спутным потоком за границу зоны, считаются попавшими в объем отраженной струи, остальные — попавшими в пристеночную зону.

**В третьей главе** разработана методология подхода к решению задачи выбора рационального профиля камеры сгорания, состоящего из нескольких этапов.

1. Расчетное определение по разработанной модели диапазона значений определяющих параметров КС из условия минимизации количества пристеночного топлива.

2. Расчет значений определяющих параметров в зависимости от конструктивных ограничений и определение величин этих параметров для конкретных условий.

3. Расчет по разработанным прикладным программам профиля камеры сгорания, отвечающего определенным требованиям.

4. Экспериментальная проверка КС с рассчитанным профилем.

Параметрами КС, определяющими протекание процесса смесеобразования в камерах сгорания рассматриваемого типа при неизменной ТА, являются расстояние от распылителя форсунки до поверхности преграды  $L_f$  (иначе —

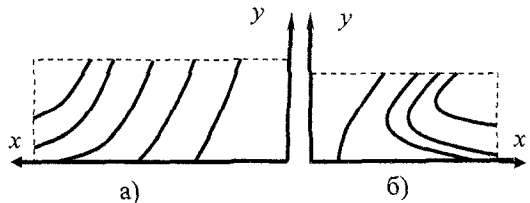


Рис. 4. Расчетные траектории капель топлива в области взаимодействия факела со стенкой камеры сгорания,  $\varphi = 60^\circ$ ;

а — зона прямого тока, б — зона обратного тока

длина свободного полета факела) и угол между осью факела и стенкой  $\varphi$  (угол столкновения). Величина угла  $\varphi$  при заданных конструктивных параметрах распылителя однозначно определяется углом наклона периферийной образующей днища поршня  $\beta$  (рис. 5). Эти параметры влияют на распределение топлива по объему, на характер распространения отраженного факела в надпоршневом зазоре и на количество топлива, попавшего в пристеночную зону камеры сгорания. Обязательные требования, совокупности которых должен удовлетворять профиль КС, сформулированы следующим образом: распределение воздуха по зонам камеры сгорания (рис. 5) пропорционально отраженному в эти зоны топливу; свободное, без бокового контакта с центральной частью днища поршня и поверхностью головки цилиндра, развитие топливного факела до начала его организованного взаимодействия со стенкой камеры сгорания; максимальная длина полета факела до стенки КС.

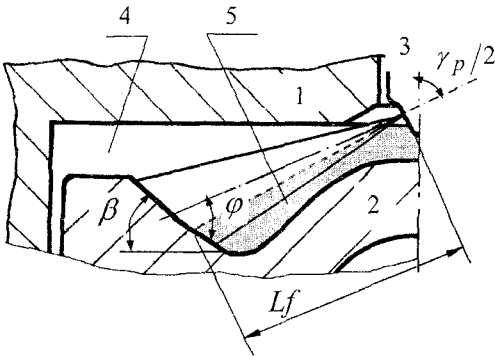


Рис. 5. Схема КС для расчета профиля; 1 - головка цилиндра, 2 - поршень, 3 - распылитель форсунки, 4, 5 - зоны прямого и обратного тока

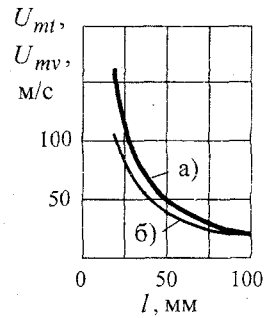


Рис. 6. Расчетное изменение скорости топлива  $U_{mt}$  (а) и воздуха  $U_{mv}$  (б) на оси струи по ее длине  $l$

На первом этапе для оценки распределения топлива производится расчет параметров в свободной топливной струе (рис. 6), расчет траекторий капель в области взаимодействия, например рис. 4, и определение изменения доли пристеночного топлива при различных  $\varphi$  и  $L_f$  (рис. 7). Диапазон рациональных значений, при которых минимизировано количество топлива в пристеночной зоне, составляет  $\varphi = 20 \dots 60^\circ$ . Расчетная зависимость доли топлива, приходящегося на ветвь обратного тока, от угла  $\varphi$  показана на рис. 9. Исходными данными для расчетов по модели являются параметры ТА, определенные в данной работе экспериментальным путем (глава 5).

На втором этапе по отдельной расчетной программе определяется величина конструктивно достижимой максимальной степени сжатия  $\varepsilon_{\max}$  при различных параметрах  $L_f$  и  $\beta$ , т.к. она является основным ограничительным параметром максимальных размеров КС. Результаты расчета для одноцилиндро-

вого дизеля 1ЧН15/16 с распылителем  $8 \times 0,3 \times 140^\circ$  представлены на рис. 8. Так, например, для  $L_f = 50$  мм степень сжатия 14 возможно обеспечить в диапазоне  $\beta > 10^\circ$ . Величина  $L_f$ , определенная по рис. 8, является максимально возможной для выбранной степени сжатия без касания боковой образующей факела и днища поршня. Обеспечение условия распределения воздуха по зонам камеры сгорания пропорционально отраженному в эти зоны топливу неизбежно ведет к некоторому уменьшению  $L_f$ .

Третий и четвертый этапы методики предполагают расчет рационального профиля КС и его экспериментальная проверка. В диссертации для экспериментального подтверждения и уточнения положений методики, определения закономерностей влияния параметров КС на эффективные показатели дизеля спроектированы, изготовлены и испытаны на одноцилиндровом дизеле несколько вариантов КС (рис. 10).

Опытная КС № 1 спроектирована согласно существовавшей ранее методике профилирования КС объемного смесеобразования типа Гессельман. КС № 2 является немного измененным исходным вариантом штатной КС дизеля 12ЧН15/18 со степенью сжатия 14. Изменения заключались в уменьшении высоты центрального выступа на 2 мм и величины угла  $\beta$  на  $5^\circ$ . Сравнительные испытания КС № 2 и штатной КС (глава 5) выявили идентичность показателей дизеля 1ЧН15/16 за исключением случаев, когда при увеличении выступания носка распылителя в штатной КС топливный факел контактировал с центральным выступом поршня, и показатели дизеля ухудшались. Вариант КС № 2 принят в качестве базового и обязательно испытывался в каждой серии моторных экспериментов.

Опытные камеры сгорания № 3...8 спроектированы для одноцилиндрового дизеля 1ЧН15/16 с  $\varepsilon = 14$  в соответствии требованием распределения воздушного заряда по зонам КС пропорционально отраженному в эти зоны количеству топлива, в то время как КС № 2 требуемого распределения не обеспечивает (рис. 9). Расчетная величина  $L_f$  в КС № 3...5 практически одинакова и составляет 50 мм, что на 1 мм ( $\approx 2\%$ ) меньше, чем в базовой КС № 2. В КС № 6...8 уменьшение  $L_f$  по сравнению с базовым вариантом составляет 3...6 мм (6...12%), рис. 19, что неизбежно вытекает из условия сохранения степени сжатия  $\varepsilon = 14$ .

КС № 9 и № 10 разработаны для экспериментального определения параметров дизеля при значительном снижении величины  $L_f$  – более чем в 2 раза, а с распылителями с углом шатра  $\gamma_p = 130^\circ$  и  $120^\circ$  в КС № 9 – в 2,8 и 3,6 раза.

Камеры сгорания в условиях одноцилиндрового дизеля 1ЧН15/16 с  $\varepsilon = 14$  обеспечивают длину свободного полета факела до стенки от 51 мм и ниже. Большие значения  $L_f$  возможно получить при снижении степени сжатия. КС № 11, 12 и 13 спроектированы для  $\varepsilon = 9,5$ . В этих КС обеспечено распределение воздуха пропорционально расчетному распределению топлива (рис. 9), а  $L_f = 56...62$  мм.

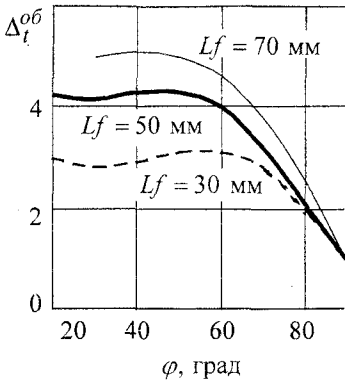


Рис. 7. Расчетная зависимость от угла  $\varphi$  доли топлива  $\Delta_t^{об}$ , отраженного в объем в результате взаимодействия топливной струи со стенкой КС, по отношению к случаю фронтального взаимодействия

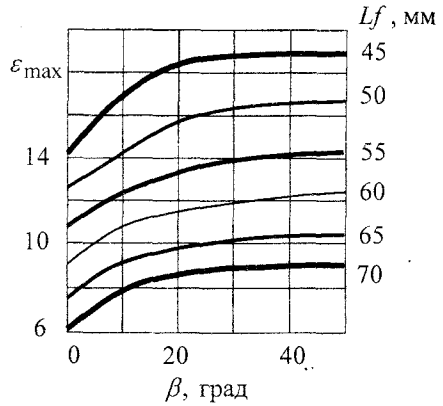


Рис. 8. Взаимосвязь максимально возможной степени сжатия  $\varepsilon_{max}$  и конструктивных параметров  $\beta$  и  $Lf$  для дизеля 1ЧН15/16

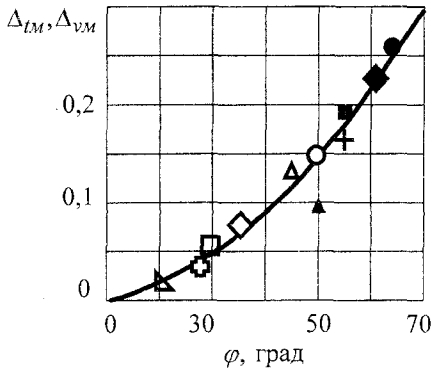


Рис. 9. Расчетная зависимость для зоны обратного тока доли топлива  $\Delta_{LM}$  от угла  $\varphi$  и значения доли воздуха в этой зоне  $\Delta_{vM}$  для опытных КС:  $\blacktriangle$  КС № 2 с  $\gamma_p = 140^\circ$ ,  $\blacktriangle$  КС № 2 с  $\gamma_p = 150^\circ$ , остальные точки – камеры сгорания № 3...8 и № 11...13 со штатной ТА

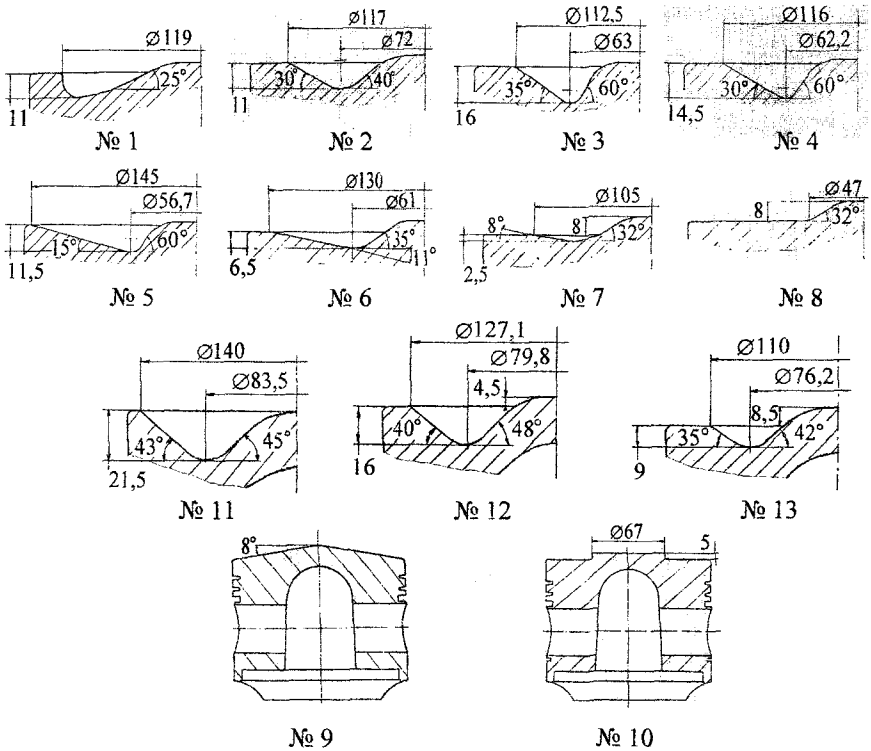


Рис. 10. Профиль дна поршня в опытных вариантах камеры сгорания.  
 $\varepsilon = 14$  – КС № 1...10;  $\varepsilon = 9,5$  – КС № 11...13

**В четвертой главе** представлены схемы и описания экспериментальных установок, методик экспериментальных исследований. В рамках работы проводились безмоторные и моторные экспериментальные исследования.

Безмоторные исследования проводились с целью определения динамики развития и характера взаимодействия с плоской стенкой топливного факела в условиях противодействия среды, взаимодействия в атмосферных условиях с плоской стенкой струй газа и распыленной воды. Отдельные исследования проведены для определения параметров топливоподачи, использованных в качестве исходных данных при расчетах.

В процессе исследований параметров топливоподачи регистрировались осциллограммы перемещения иглы распылителя, давления у штуцера насоса и под иглой распылителя, по которым определялись продолжительность топливоподачи, величины максимального и среднего давления впрыска. Динамика развития струй распыленного топлива определялись методом фоторегистрации развития факела в имитационных камерах с противодействием среды.

Исследования формы взаимодействующих с плоской преградой стационарных газовых струй проведено методом кинорегистрации. Визуализации течения осуществлялась путем применением дыма. Дымовые струи истекали из круглых насадок диаметром 12, 16, 19 и 40 мм со скоростями 40...200 м/с. Для сохранения пропорциональности с зарегистрированной струей распыленного топлива преграда на пути дымовой струи располагалась на расстоянии 400...800 мм от насадки, углы столкновения составляли 15...90°. Для оценки адекватности разработанной расчетной модели реальным процессам на специально разработанной установке проведен эксперимент по определению доли жидкости, осажженной на поверхности преграды при взаимодействии с ней стационарной струи распыленной воды и сравнение этих результатов с расчетными.

Моторные экспериментальные исследования опытных КС проведены на дизеле 1ЧН15/16 в одинаковых условиях. В качестве критерия для сравнения камер сгорания выбран удельный эффективный расход топлива  $g_e$ . Сравнения КС производились как при одинаковом максимальном давлении цикла, обеспеченном путем выбора по регулировочной характеристике геометрического угла начала подачи топлива  $\varphi_n$ , так и при одинаковых значениях  $\varphi_n$ .

С каждой опытной КС на режиме номинальной мощности (частота вращения коленчатого вала  $n_{\partial\theta} = 2000 \text{ мин}^{-1}$ , часовой расход топлива  $G_T = 12 \text{ кг/ч}$  для  $\varepsilon = 14$  и  $G_T = 16 \text{ кг/ч}$  для  $\varepsilon = 9,5$ ) экспериментально определялась величина выступления носка распылителя  $\delta_p$  за поверхность головки цилиндра, при котором обеспечивается минимальный  $g_e$ . Все другие характеристики снимались при этих величинах  $\delta_p$ . Сравнительные испытания КС № 1 и № 2 проводились дополнительно на режимах внешней скоростной характеристики. По этим результатам в последующих экспериментах в качестве основного режима для сравнения различных вариантов КС выбран режим номинальной мощности. Нагрузочные характеристики при  $n_{\partial\theta} = 2000 \text{ мин}^{-1}$  снимались выборочно. Параметры наддува по нагрузочной характеристике для вариантов КС с  $\varepsilon = 14$  выдерживались постоянными. При  $\varepsilon = 9,5$  – изменялись для сохранения постоянного значения коэффициента избытка воздуха.

В качестве топливной аппаратуры в безмоторных и моторных экспериментах использована бессливная ТА дизеля 12ЧН15/18 с распылителем  $8 \times 0,3 \times 140^\circ$ . Для подтверждения эффективности сформулированных требований к профилю камеры сгорания некоторые КС испытывались в сочетании с распылителями, имеющими значение  $\gamma_p = 120^\circ, 130^\circ$  и  $150^\circ$ .

**В пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований на безмоторных установках и одноцилиндровом дизеле 1ЧН15/16.

Результаты исследования развития топливного факела в условиях имитационной камеры показаны на рис. 11. Взаимодействие факела со стенкой начинается через 3 град п.в.н. после начала впрыска при общей продолжительности топливоподачи 15...16 град п.в.н.

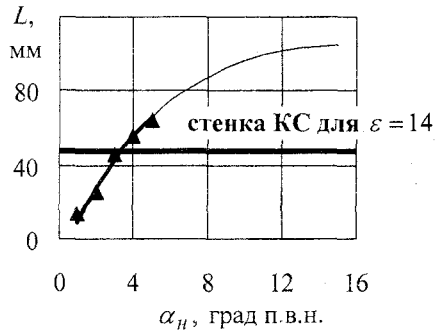
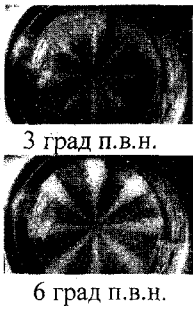


Рис. 11. Развитие топливного факела в условиях имитационной камеры

Результаты фоторегистрации взаимодействия с плоской преградой топливного факела дизельной форсунки и дымовых струй дают основания принять допущение о геометрическом подобии этих процессов (рис. 13). По обработке фоторегистрации процесса взаимодействия дымовых струй с преградой получена зависимость от угла столкновения  $\varphi$  толщины пристеночной струи относительно радиуса свободной струи для ветвей прямого и обратного тока (рис. 14). Толщина пристеночной струи определена в ее начале, то есть согласно принятому допущению, на выходе из области взаимодействия.

На рис. 12 представлены результаты исследования процесса взаимодействия с преградой струи распыленной воды. За относительную единицу принято количество жидкости, отраженной в объем при угле  $\varphi = 90^\circ$ . Результаты расчетов по разработанной модели согласуются с экспериментальными данными. При уменьшении угла столкновения струи с преградой увеличивается количество жидкости, унесенной спутным потоком до 5...6 раз. С увеличением расстояния от начала струи до поверхности преграды в эксперименте зафиксировано уменьшение количества жидкости, осажденной на преграде, особенно в области малых величин углов. Аналогичный эффект дают расчеты по разработанной в диссертации модели (рис. 7 и 12).

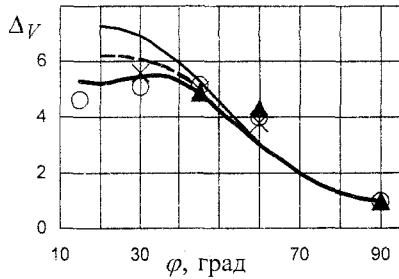


Рис. 12. Зависимость от угла  $\varphi$  относительного расхода жидкости  $\Delta V$ , отраженной в объем при взаимодействии струи распыленной воды с преградой. Точки – эксперимент, линии – расчет.  
 $\bigcirc$   $L = 100$  мм;  $\times$   $L = 150$  мм;  $\blacktriangle$   $L = 200$  мм



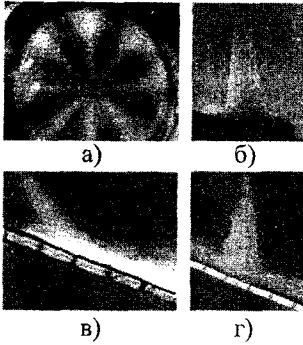


Рис. 13. Взаимодействие с преградой: а и б – топливного факела дизельной форсунки при  $\varphi = 20^\circ$  (вид через прозрачную преграду) и  $\varphi = 72^\circ$ ; в и г – дымовых струй при  $\varphi = 35$  и  $70^\circ$

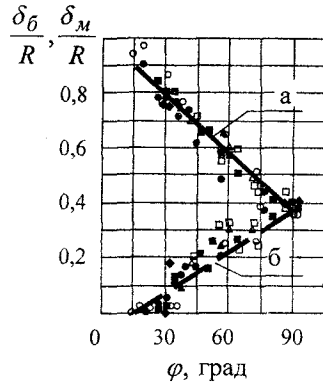


Рис. 14. Полученная экспериментальная зависимость от угла  $\varphi$  толщин  $\delta_b$  ветви прямого (а) и  $\delta_m$  обратного (б) тока относительно радиуса свободной струи  $R$

Сравнительные исследования опытных вариантов КС позволили выявить влияние на показатели дизеля 14Н15/16 параметров открытой КС. Некоторые характеристики показаны на рис. 15, 16 и 17. С КС № 1, спрофилированной по известной методике для КС типа Гессельман, в которой не учитывается процесс взаимодействия топливного факела со стенкой, экономичность дизеля ухудшается на  $\approx 5$  г/кВт·ч (рис. 15 и 19). Параметры дизеля при изменении  $\delta_p$  в различных КС, подтвердили наличие положительного эффекта в случаях свободного развития топливного факела до начала его организованного взаимодействия со стенкой камеры сгорания. Распределение воздуха пропорционально отраженному топливу за счет рационального профилирования КС приводит к снижению  $g_e$  дизеля на 3...5,5 г/кВт·ч, например, КС № 2 и № 4 (рис. 15, 19).

Изменение показателей одноцилиндрового дизеля с  $\varepsilon = 9,5$  и различными КС, отличающимися величинами длины свободного полета топливного факела до стенки, показано на рис. 17. С КС № 11, в которой величина  $L_f$  максимальная для этих трех вариантов, обеспечивается лучшая экономичность дизеля.

Зависимость экономичности одноцилиндрового дизеля от длины свободного полета топливного факела  $L_f$  показана на рис. 18. Уменьшение  $L_f$  с 55 до 20 мм при  $\varepsilon = 14$  приводит к монотонному увеличению  $g_e$  из-за увеличения доли топлива в пристеночной зоне КС. Аналогичный эффект зафиксирован и для степени сжатия 9,5. При  $L_f < 20$  мм (КС №9 с распылителями  $8 \times 0,3 \times 130^\circ$  и  $8 \times 0,3 \times 120^\circ$ ) зафиксировано резкое ухудшение экономичности, что объясняется взаимодействием факела со стенкой в пределах его начального участка. Основная часть топлива в этом случае оказывается в пристеночной зоне с неблагоприятными условиями для смесеобразования.

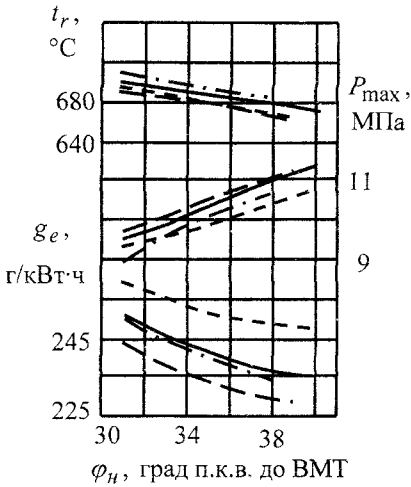


Рис. 15. Регулировочная характеристика дизеля 1ЧН15/16,  $\varepsilon = 14$ .  
 - - - - - KC №1; ——— KC №2;  
 - - - - - KC №4; - · - · - KC №6

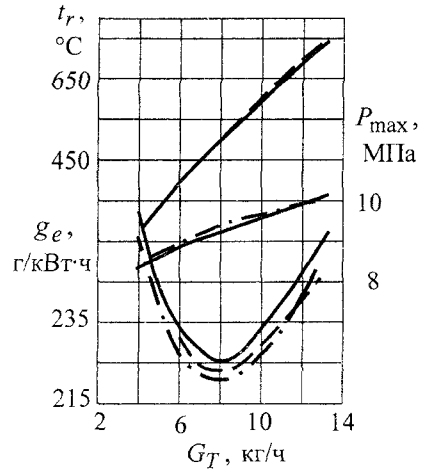


Рис. 16. Нагрузочная характеристика дизеля 1ЧН15/16,  $\varepsilon = 14$ .  
 ——— KC №2; - - - - - KC №4;  
 - - - - - KC №5

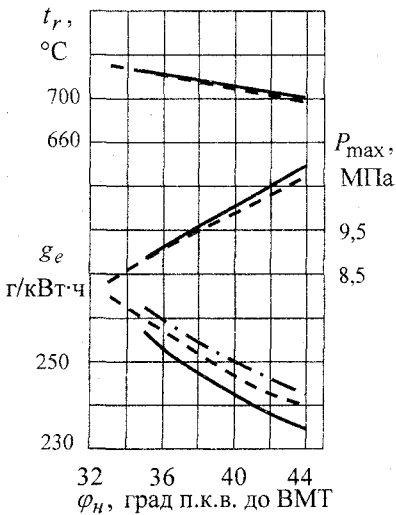


Рис. 17. Характеристика дизеля 1ЧН15/16 по углу опережения начала подачи топлива,  $\varepsilon = 9,5$ .  
 ——— KC №11; - - - - - KC №12;  
 - · - · - KC №13

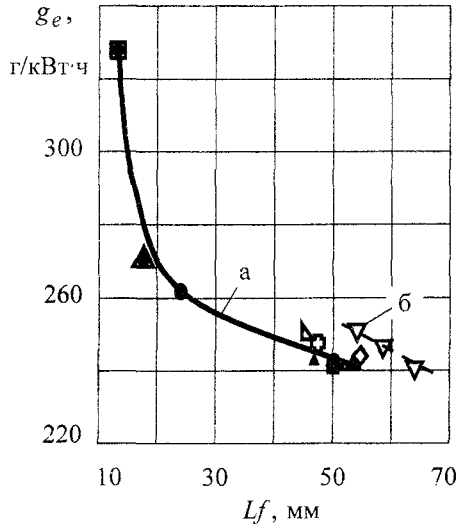


Рис. 18. Зависимость удельного расхода топлива дизеля 1ЧН15/16 от расстояния  $L_f$  между распылителем и стенкой КС. а -  $\varepsilon = 14$  различные КС и распылители, б -  $\varepsilon = 9,5$  и распылитель  $8 \times 0,3 \times 140^\circ$

Итоговая экспериментальная диаграмма для степени сжатия 14 (рис. 19) доказывает, что профиль КС оказывает существенное влияние на экономичность дизеля. В исследованном разнообразии форм КС различия значений  $g_e$  составило до 30 г/кВт·ч. Наименьший удельный расход топлива на режиме номинальной мощности обеспечивается с неглубокой КС № 5 – на 5,8 г/кВт·ч ниже, чем базовая КС № 2. С углубленными КС № 3 и № 4  $g_e$  снижается на несколько меньшую величину – 2,5...4,5 г/кВт·ч, но эти КС по сравнению с КС № 5 эффективнее на средних нагрузках на  $\approx 3$  г/кВт·ч (рис. 16).

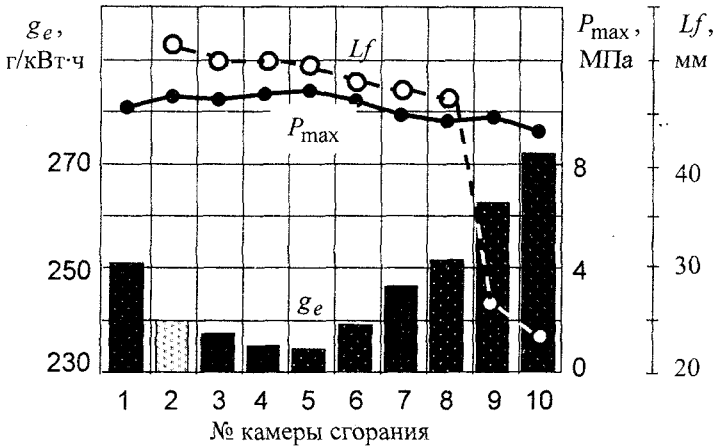


Рис. 19. Значения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , максимального давления цикла  $P_{max}$  и расстояния от сопла до стенки КС  $L_f$  дизеля 1ЧН15/16 со степенью сжатия  $\varepsilon = 14$  и различными камерами сгорания. Режим номинальной мощности,  $\varphi_n = 36$  град п.к.в. до ВМТ

## ВЫВОДЫ

1. При форсировании четырехтактных быстроходных транспортных дизелей с открытыми КС на режимах высоких нагрузок происходит взаимодействие топливного факела со стенкой. В этом случае улучшение процесса смесеобразования может быть осуществлено за счет рациональной организации отражения топливного факела от днища поршня и соответствующего распределения воздушного заряда в пространстве сжатия.

2. На основании теоретических представлений, анализа и обобщения литературных данных, а также результатов проведенных в рамках данной работы исследований сформулированы следующие основные положения методики и порядок профилирования КС с рациональной организацией отражения топливных факелов:

- экспериментальное определение параметров топливоподачи и расчет по разработанной модели распределения топлива по зонам прямого и обратного тока в КС в результате взаимодействия факела со стенкой при различных углах между осью факела и поверхностью стенки;

- расчет и выбор значений расстояния от сопла распылителя до стенки КС по оси топливного факела и угла столкновения факела со стенкой из условий обеспечения конструктивных ограничений и минимизации количества топлива в пристеночной зоне; для дизелей типа ЧН15/16 и ЧН15/18 рациональный диапазон значений угла столкновения факела со стенкой составляет 30...60°;

- расчет по разработанным прикладным программам профиля КС, отвечающего сформулированным условиям;

- изготовление поршня с рассчитанным профилем днища и проведение контрольных испытаний на одноцилиндровом дизеле.

3. Для оценки распределения топлива в КС разработана модель, описывающая структуру топливного факела и процесс его взаимодействия со стенкой. Топливный факел рассматривается как осесимметричная двухфазная струя, на протяжении начального участка которой происходит, наряду с прочими, процесс обмена количеством движения между топливом и воздухом; на протяжении основного участка струи энергия торможения капель топлива в спутном потоке воздуха диссипирует в их следах. Взаимодействие топливного факела со стенкой рассматривается как процесс отклонения от первоначальных траекторий капель топлива в области взаимодействия спутного потока воздуха со стенкой КС. Течение воздуха в области взаимодействия полагается двумерным и состоящим из двух ветвей – прямого и обратного тока, поле скоростей определяется из условий неразрывности потока и соблюдения граничных условий.

4. Разработаны алгоритм и программа расчета взаимосвязи степени сжатия и начальных значений параметров открытой КС с выступающей центральной конусной частью днища поршня, а именно, максимально возможного расстояния от сопла распылителя до стенки КС и угла между осью факела и поверхностью стенки. Граничными условиями приняты величина минимально допустимого равномерного надпоршневого зазора, угол конуса топливного факела, угол шатра сопловых отверстий и выступание распылителя в КС.

5. Профиль открытой камеры сгорания с рациональным отражением топливного факела от днища поршня должен соответствовать совокупности следующих условий, каждое из которых в отдельности является необходимым, но не достаточным:

- распределение воздуха по зонам прямого и обратного тока в камере сгорания пропорционально поступившему в эти зоны количеству топлива;

- свободное, без бокового контакта с центральной выступающей частью днища поршня и поверхностью головки цилиндра, развитие топливного факела до начала его организованного взаимодействия со стенкой камеры сгорания;

- максимальная длина свободного развития факела до стенки КС.

6. В результате экспериментальных исследований на одноцилиндровом дизеле 1ЧН15/16 широкого разнообразия форм открытых КС с одинаковой топ-

ливной аппаратурой на режиме номинальной мощности зафиксированы различия значений удельного эффективного расхода топлива до 30 г/кВт·ч, обусловленные различной организацией отражения факела от днища поршня. Причем, за счет рационального распределения по зонам камеры сгорания воздушного заряда пропорционально поступившему в эти зоны количеству топлива обеспечено снижение  $g_e$  одноцилиндрового дизеля на 5,5 г/кВт·ч по сравнению с исходным вариантом серийной КС. Увеличение расстояния между распылителем и стенкой КС на 10% при сохранении пропорционального распределения топлива и воздуха повлекло снижение  $g_e$  на 7...8 г/кВт·ч, а отражение топливного факела от стенки в пределах его начального участка приводит к значительному ухудшению показателей рабочего процесса дизеля.

7. При экспериментальных исследованиях на дизеле 1ЧН15/16 установлено, что открытые КС с равномерным надпоршневым зазором, разработанные по предлагаемой методике, обеспечили при одинаковом максимальном давлении сгорания снижение удельного эффективного расхода топлива на режиме номинальной мощности на 10...11 г/кВт·ч по сравнению с КС, спроектированной по методу расчета профиля КС типа Гессельман.

8. Наилучшие варианты опытных камер сгорания (№ 4 и № 5) обеспечили снижение удельного эффективного расхода топлива на 5...5,5 г/кВт·ч на номинальном режиме и на 2,5...4,5 г/кВт·ч на средних нагрузках по сравнению с исходным вариантом серийной КС. Причем более глубокая камера сгорания (№ 4) на средних нагрузках дает лучшие результаты.

9. Разработанная камера сгорания транспортного дизеля защищена авторским свидетельством на изобретение № 1576697 и внедрена в серийное производство в дизелях типа 6ЧН15/16, 12Ч15/18 и 12ЧН15/18 в ООО «ЧТЗ – Уралтрак», а также использована при создании опытного дизеля типа 12ЧН15/16. Результаты работы могут быть полезны для профилирования камер сгорания и выбора параметров топливной аппаратуры при форсировании дизелей аналогичного типа.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

1. Особенности тепловыделения при согласовании распределения воздуха и топлива по радиусу камеры сгорания дизеля / С.С. Садовский, Г.Д. Драгунов, В.В. Егоров, С.С. Никифоров // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1981. – № 268. – С. 125–130.

2. Садовский, С.С. Вопросы разработки камер сгорания объемного смешения форсированных по мощности дизелей / С.С. Садовский, С.С. Никифоров // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: тем. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1985. – С. 76–80.

3. Садовский, С.С. Исследования по созданию камеры сгорания форсированного дизеля / С.С. Садовский, С.С. Никифоров // Исследование силовых ус-

тановок и шасси транспортных и тяговых машин: тем. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1986. – С. 6–8.

4. Никифоров, С.С. Выбор камеры сгорания для дизелей с различным уровнем форсирования / С.С. Никифоров // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: тем. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1987. – С. 47–49.

5. А.с. 1402685 СССР, МКИ F 02 В 23/00. Камера сгорания двигателя внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия / С.С. Садовский, В.М. Сергеев, С.С. Никифоров – № 4000406/25–06; заявл. 30.12.85, опубл. 15.06.88, Бюл. № 22.

6. Никифоров, С.С. К вопросу выбора формы камеры сгорания с увеличенным надпоршневым зазором / С.С. Никифоров, В.М. Сергеев, Н.Г. Вересов // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: тем. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1989. – С. 43–45.

7. А.с. 1576697 СССР, МКИ F 02 В 23/06. Двигатель внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия / В.И. Бутов, В.В. Егоров, С.С. Никифоров, С.С. Садовский, Л.В. Чернова – № 4412452/25–06; заявл. 18.04.88, опубл. 07.07.90, Бюл. № 25.

8. А.с. 1800077 СССР, МКИ F 02 В 23/02. Двигатель внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия / В.М. Сергеев, С.С. Никифоров – № 836126/25–06; заявл. 07.06.90, опубл. 07.03.93, Бюл. № 9.

9. Егоров, В.В. Математическое моделирование взаимодействия топливного факела со стенкой камеры сгорания / В.В. Егоров, С.С. Никифоров // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: тем. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. – С. 19–24.

10. Никифоров, С.С. Моделирование процессов смесеобразования в быстроходном форсированном транспортном дизеле / С.С. Никифоров, А.В. Губарев, В.М. Сергеев // Механика и процессы управления: труды XXXIV Уральского семинара. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2004. – Том 2. – С. 98–105.

**11. Егоров, В.В. Моделирование взаимодействия топливного факела со стенкой в камере сгорания быстроходного транспортного дизеля / В.В. Егоров, С.С. Никифоров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2005. – Вып.7. – № 14 (54). – С. 58–65.**

12. Сергеев, В.М. Совершенствование внутрицилиндрового пространства дизеля / В.М. Сергеев, С.С. Никифоров, А.В. Пермяков // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: труды Международной научно-технической конференции. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – С. 317–320.

13. Егоров, В.В. Проектирование камеры сгорания транспортного дизеля / В.В. Егоров, С.С. Никифоров // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: труды Международной научно-технической конференции. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – С. 48–52.

Никифоров Сергей Степанович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОТКРЫТОЙ  
КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ ФОРСИРОВАНИИ ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО  
БЫСТРОХОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ**

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать 22.12.2006. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 469/79.

---

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ, 454080, г. Челябинск,  
пр. им. В.И. Ленина, 76.