

На правах рукописи

Рудаков Владимир Юрьевич

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНЫХ  
СТРУЙ В ОТКРЫТЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЕЙ

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Коломна – 2016

Работа выполнена в Коломенском институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ) в г. Коломне московской области

Научный руководитель:

**Карелин Александр Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Леонов Игорь Владимирович**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры теории механизмов и машин  
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана  
(НИУ)

**Дунин Андрей Юрьевич**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры теплотехники – тепловых  
двигателей ФГБОУ ВО МАДГТУ  
(МАДИ)

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Российский университет  
дружбы народов»

Защита диссертации состоится 25.10.16 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.09 при ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ) по адресу: 105005, Рубцовская наб., д. 2/18,  
Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.09.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Тумашев Р.З.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Смесобразование предшествует рабочему процессу двигателя и является важнейшей подготовительной фазой, от качества которой зависят его выходные показатели. В настоящее время жесткие требования предъявляются к экологическим показателям ДВС, в связи с чем принимаются высокие стандарты по составу выпускных газов. Их выполнение связано с организацией рабочего процесса, протекание которого в значительной степени определяется динамикой развития топливного факела. С целью оптимизации рабочего процесса дизелей следует согласовывать геометрию открытых и полуоткрытых камер сгорания с длиной и углом конуса топливных струй за период задержки воспламенения. Для согласования их геометрии с геометрией камеры сгорания необходим прогноз ее развития еще на стадии проектирования дизеля. Имеющиеся методы расчета не обеспечивают необходимой точности, что компенсируется длительностью и трудоемкостью дорогостоящих доводочных испытаний, не всегда позволяющих получить требуемые выходные параметры двигателя, включая состав выпускных газов.

**Цель работы:** разработать метод расчета дальности и угла конуса струи распыленного топлива (СРТ), впрыскиваемой в камеру сгорания дизеля. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

- 1) проведен анализ предложенных ранее методов расчета развития топливной струи и определены их недостатки;
- 2) разработаны теоретические основы развития топливных струй;
- 3) разработана методика проведения экспериментов;
- 4) получены экспериментальные данные, необходимые для определения степени влияния действующих факторов на развитие топливных струй;
- 5) выполнена верификация численного расчета по результатам экспериментальных исследований движения топливной струи и динамики изменения угла конуса.

**Научная новизна** работы определяется тем, что:

- 1) предложено представление о распаде СРТ и ее продольном строении;
- 2) определено, что расчет движения СРТ следует проводить по интегральной характеристике диаграммы давления впрыска;
- 3) сформулировано представление о рабочем участке диаграммы давления впрыска;
- 4) выявлено среднее время передачи количества движения дискретной массы вершине СРТ и исследовано влияние на него длительности и давления впрыска, плотности воздушного заряда, диаметра распыливающих отверстий;
- 5) получены результаты по развитию СРТ в холодной статической бомбе, в камере сгорания без воспламенения топлива и в условиях дизельного рабочего процесса;
- 6) получены сведения о воспламенении и сгорании факела в дизелях;
- 7) выявлено и дано объяснение сложной эволюции угла конуса СРТ и определены основные факторы, влияющие на его формирование;
- 8) разработан метод расчета развития СРТ, обладающий низкими погрешностями.

**Достоверность и обоснованность** результатов определяются:

- 1) применением современных экспериментальных и расчётно-экспериментальных методов исследований;
- 2) применением сертифицированных приборов и оборудования;
- 3) сходимостью полученных результатов с результатами экспериментов;

4) отсутствием противоречий между результатами исследования и фундаментальными законами.

**Практическая ценность** заключается в следующем:

1) предлагаемый метод расчета позволяет на стадии проектирования дизеля с высокой точностью определять развитие СРТ в камере сгорания и обоснованно согласовывать ее геометрию с геометрией камеры сгорания;

2) метод применим для дизелей с объемным смесеобразованием, открытыми и полуоткрытыми камерами сгорания с пробегом струй до 105 мм.

**Методы исследования** экспериментальные оптические с применением скоростной киносъемки, установки «Двигатель с прозрачными окнами» (ДПО), шлирен-теневого прибора и аккумуляторной электрогидравлической системы топливоподачи. Особенностью примененного метода является выявление времени передачи количества движения дискретных (элементарных) масс топлива вершине СРТ, регистрации осциллограмм давления впрыска в момент киносъемки и скоростная кинорегистрация реальных дизельных процессов.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1) результаты экспериментальных исследований развития СРТ;

2) уточнения к модели СРТ;

3) метод экспериментального изучения движения и развития СРТ и угла ее конуса;

4) метод расчета дальности и угла конуса СРТ.

**Апробация работы.** Основные положения работы обсуждены на научно – технических семинарах по автоматическому управлению и регулированию теплотехнических установок им проф. В.И. Крутова в 2006... 2010 гг. в МГТУ им. Н.Э. Баумана, в Коломне, Кирове и Новосибирске. В практическом применении разработанный метод был применен для расчета ряда режимов впрыска в дизелях типа ЧН 26/26 и ЧН 21/21. Результаты расчета сопоставлялись с экспериментальными материалами и показали высокую сходимость.

**Публикации.** По рассматриваемой теме опубликовано 28 печатных работ, из них 17 в изданиях, рецензируемых ВАК общим объемом 12,8 п.л. и получены 2 авторских свидетельства.

**Личный вклад автора** заключается в научно-техническом обосновании поставленных цели и задач; усовершенствовании исследовательского комплекса, разработке и создании автоматики управления работой исследовательского комплекса; монтаже и испытании электронной аппаратуры управления впрыском; разработке теоретического обоснования развития СРТ и методики проведения исследований; постановке и проведении экспериментов и верификации расчетного метода.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, включающего 116 наименований и приложение. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 149 рисунков, фотографий, кинограмм и 31 таблицу.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы и выбранного направления ис-

следования, сформулированы его цель и задачи.

**В первой главе** рассмотрены физические принципы, примененные для разработанных ранее методов расчета развития СРТ, и предложена их классификация:

- 1) методы расчета, основанные на втором законе Ньютона;
- 2) методы расчета, основанные на закономерности падения скорости вершины СРТ;
- 3) метод расчета, основанный на уравнении Мещерского;
- 4) методы расчета, основанные на определении энергии струи;
- 5) прочие методы.

Анализ разработанных ранее методов позволил определить физические принципы, которые следует закладывать в основу расчета. Была выполнена проверка наиболее распространенных методов расчета. По полученным результатам были выбраны зонная модель Свиридова Ю.Б. и турбулентная модель Лышевского А.С.. От модели Свиридова было взято уравнение Мещерского для движения тела переменной массы т.к. оно объективно соответствует физическим процессам, сопровождающим развитие СРТ. От модели Лышевского было взято представление об СРТ как о турбулентном потоке.

**Методы расчета, основанные на втором законе Ньютона.** Включают три группы методов. В первой группе оценка движения струи производится по одиночной капле. Во второй группе оценка движения струи производится по движению множества капель. Третья группа известна как «метод порций» и представлена в трудах МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ и Камимото. Во всех группах в качестве исходного принималось уравнение второго закона Ньютона без учета силы тяжести. Однако второй закон Ньютона не учитывает длительность впрыска, изменение давления топлива и питание струи распыленным топливом. Величина аэродинамического сопротивления движению СРТ определяется для одной или множества сфер, тогда как СРТ является двухфазным потоком. Обсчет экспериментальных данных по этим методам показывает, что время движения струи в сравнении с экспериментом может увеличиться на 39%, а угол конуса занижается до 11%. Исключением являются методы порций, в которых впрыск топлива рассматривается как последовательная подача отдельных его масс, движение каждой из которых подчиняется второму закону Ньютона. В них учитывается меняющиеся давление и длительность впрыска вместе с питанием струи топливом, но не достаточно объективно определяется величина аэродинамического сопротивления движению порции и струи. В **турбулентной модели Лышевского А.С.** СРТ стационарного истечения представляется свободной и безграничной. В основе представления - теорема об изменении количества движения. Расчет развития струи производится по критериальным зависимостям. Модель хорошо обоснована, проработана теоретически и экспериментально, широко применяется в практике дизелестроения. Ее недостатки: дальность и угол конуса СРТ рассчитывается по среднему давлению впрыска без учета фронта давления и питания струи топливом. Обсчет экспериментальных данных показал, что результаты расчета могут занижать пробег струи до 30,5 %, а угол конуса представляют не объективно.

**Методы расчета, основанные на закономерности падения скорости вершины струи.** Из экспериментально установленной Миллером и Бердслеем закономерности

падения скорости вершины струи Засс и Мелькумов получили одинаковые выражения для дальности. Мелькумов предупреждает о его непригодности для получения количественных соотношений и справедливо для капли, а не струи в целом. Для практического применения этот метод развит Астаховым. Обладает теми же недостатками, что и в предыдущих методах. Отклонения рассчитанного пробега от экспериментальных данных могут достигать сотен процентов.

**Метод Свиридова Ю.Б.** Представлен в зонной модели и основан на уравнении Мещерского для движения тела переменной массы. В нем учитываются изменения длительности и давления впрыска вместе с питанием СРТ распыленным топливом. Однако величина аэродинамического сопротивления движению СРТ определяется по фиксированному количеству твердых сфер одного диаметра, движущихся по трассам, тогда как СРТ является двухфазным потоком.

**Методы расчета, основанные на определении энергии СРТ.** Метод Ишкука основан на срабатывании энергии СРТ для стержневой модели. В расчет принимается постоянное давление впрыска, фиксированная масса топлива, но нет учета питания струи распыленным топливом. Аэродинамическое сопротивление определяется для стержня как для плоского диска. Для расчета необходимо располагать значением угла конуса. Метод не проработан, но физический принцип, положенный в его основу, следует признать рациональным. Метод Пугачева разработан для зонной модели. Может применяться для двухфазного впрыска. Учитывается сопротивление движению со стороны воздуха и напор от догоняющих капель шлейфа. Струя рассматривается как тело переменной массы. Расчет дальности ведется методом численного интегрирования по зависимости  $P_{вп} = f(t)$ , где  $P_{вп}$  - давление впрыска,  $t$  - время, с учетом угла конуса струи и изменения плотности воздушного заряда. Угол конуса рекомендуется определять по формуле Лышевского. Автор не приводит решения исходного уравнения и способов определения скорости фронта. Расчет движения СРТ строится на уравнении Мещерского с учетом силы сопротивления движению, которая не обозначена.

На основе рассмотренного материала делается заключение о том, что наиболее объективно физические процессы впрыска могут быть отражены уравнением Мещерского и турбулентной моделью СРТ.

**Во второй главе** обосновывается выбор турбулентной модели топливной струи Лышевского, приводятся уточнения к ее модели, полученные на установке ДПО, и рассматриваются теоретические основы развития СРТ. Турбулентная модель подтверждается истечением и распадом топлива, структурой струи, распределением масс и концентрацией микроэлементов. Особенности движения и взаимодействия макроэлементов характерны для турбулентных струй. В развитии струи фаза нестационарного впрыска, приходящаяся на фронт давления, сменяется квазистационарным истечением. Эти фазы можно принимать в качестве начального и основного участков в турбулентной модели. Уточнения к турбулентной модели топливной струи Лышевского. При изучении кинограмм, полученных на установке ДПО, сложилось следующее представление о распаде и строение топливной струи: при турбулентном течении топлива, как только длина вытекающего не распавшегося столбика превысит определенную длину, его оболочка и вершина распадаются на капли

одновременно, образуя конусообразный сгусток (сегмент). Укоротившийся столбик топлива продолжает вытекать и, удлинившись до того же значения, распадается точно так же. Поэтому продольное строение СРТ сложено последовательно расположеннымми сегментами (Рис. 1). Представление о движении микроэлементов СРТ можно составить по кинограммам второй струи двухфазного впрыска, которые показывают, что торможение 1й струи происходит относительно быстро и особенностей не имеет (Рис. 2 ряд 1). Вторая струя (ряд 2) движется в 1,6...1,8 раз быстрее первой и догоняет ее на расстоянии 84 мм за 4,1 мс. С ростом  $P_{вп}$  это расстояние растет. Начало движения 2й струи имеет высокую крутизну и линейность. Расчет движения 2й струи без учета сопротивления воздуха показал, что ее движение происходит по степенной зависимости (ряд 3). Различие вызвано действием спутного потока воздуха, имеющего скорость, близкую к скорости истечения при  $P_{вп}$  макс, и его малым затуханием за период паузы между первым и вторым впрыском. Неравномерности движения 2й струи вызваны колебаниями  $P_{вп}$  2го гидроимпульса. На движение струи они оказывают воздействие с задержкой  $t_k$ , в течение которой происходит передача вершине количества движения. Для 1й струи неравномерное воздействие  $P_{вп}$  на движение СРТ демпфируется взаимодействием струи с воздухом. Таким образом, можно допустить, что движение элементарных масс топлива происходит согласно начальному участку струи топлива.

Количество движения топливной струи. В уравнении Мещерского

$$mdU + (V - U)dm = Rdt \quad (1)$$

$mdU$  - количество движения впрынутого топлива,  $(V - U)dm$  - количество движения элементарной массы,  $Rdt$  - импульс силы сопротивления воздуха,  $U$  - скорость вершины СРТ,  $V$  – скорость истечения топлива. Для стационарного истечения Лышевский получил количество движения:  $I = 0,25\pi d_c^2 \rho_t U^2$ , где  $d_c$  - диаметр сопла,  $\rho_t$  – плотность топлива. Но при подаче топлива в камеру сгорания количество движения струи меняется за счет давления топлива и продолжительности впрыска. Согласно Свиридову пробег струи есть интегральная функция. Соглашаясь с этим, получим количество движения струи, впрынутой в течение интервала времени  $0...t$ , при меняющемся давлении впрыска:

$$I = 5 \cdot 10^5 \pi d_c^2 \mu_c^2 \int_0^t P_{\text{вп}} dt \quad \text{или} \quad I = k \int_0^t P_{\text{вп}} dt, \quad (2)$$

где  $\mu_c$  – коэффициент сопла. При проектировании топливной аппаратуры функцию  $P_{\text{вп}} = f(t)$  можно задать лишь ориентировочно, что затрудняет аналитическое решение данного выражения. Но ее несложно получить в виде осциллограммы, которую можно проинтегрировать и получить подинтегральное выражение.

Лышевский показал, что движение турбулентной топливной струи на основном участке происходит в соответствии с выражением:

$$S_\phi = \sqrt{\frac{U t d_c}{a_u \sqrt{2}}}, \quad (3)$$

где где  $a_u = A_1 We^{l_1} \rho^{k_1} M^{n_1}$  ( $A_1$  – множитель,  $We$  – критерий Вебера,  $\rho$  – симплекс плотности,  $M$  – критерий распыливания). Примем, что движение впрыснутого топлива можно выразить уравнением (3), которое соответствует первому слагаемому левой части уравнения (1). Так как формула (2) имеет интеграл давления, оценивать движение струи следует по интегральной характеристике давления впрыска, определяемой по выражению:

$$P_u = \frac{1}{\sum_i t_p} \int_0^t P_{\text{вп}} dt$$

где  $t_p$  шаг расчета. Это требует пересмотра полученного Лышевским выражения для коэффициента свободной турбулентности (КСТ)  $a_u$ . Движение элементарной массы Лышевский не рассматривал и не предложил для нее выражение. Но, принимая, что ее движение происходит аналогично начальному участку струи, можно применить для этого уравнение движения струи на начальном участке:

$$S/d_c = A_2 We^{l_2} M^{n_2} \rho^{k_2} \mathcal{E}^{s_2}, \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}$  – критерий нестационарности. В этом случае положение вершины струи можно определить совместным решением уравнений (3) и (4).

Количество движения элементарной массы составит:

$$I = 5 \cdot 10^5 \pi d_c^2 \mu^2 P_{\text{вп}} dt.$$

Для решения выражения (1) необходимо располагать временем достижения вершины струи элементарной массой (вторым слагаемым уравнения (1)), включая скорость движения фронта. Если на дистанции  $S$  от соплового отверстия до вершины струи элементарная масса движется со средней скоростью  $V_{\text{ср}}$ , время ее движения определится выражением:  $t_k = S/V_{\text{ср}}$ , а полное время движения струи от начала впрыска на дистанцию  $S$ :  $t_s = t_p + t_k$ , где  $t_p$  – момент истечения массы  $dm$ ,  $t_k$  – время движения массы  $dm$  от соплового наконечника до вершины струи со средней скоростью. Аналитически определить значения  $V_{\text{ср}}$ ,  $t_k$ ,  $a_u$  и др. можно лишь с большими погрешностями. Отсюда следует необходимость определения их с помощью эксперимента. Электронная аппаратура управления аккумуляторной электрогидравлической системой топливоподачи позволяет решить эту задачу изменением продолжительность впрыска ( $t_{\text{вп}}$ ). При этом каждому значению  $t_{\text{вп}}$  будет соответствовать свое количество движения струи. Обозначив  $mdU = I_0$ , и  $(V-U)dm = I_x$ , где  $I$  – количество движения, получим:

$$I_0 + I_x = Rdt, \quad (5)$$

где  $R$  – сила аэродинамического сопротивления. Последнее уравнение позволяет изучать топливную струю нестационарного истечения. Уравнение для угла конуса  $\alpha$  согласно Лышевскому:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = A_3 \frac{We^{l_3} M^{n_3}}{\rho^{k_3}}. \quad (6)$$

**В третьей главе** приводится описание установки «Двигатель с прозрачными окнами» и методика проведения экспериментов.

**Установка ДПО** предназначена для изучения процессов, протекающих в камере сгорания четырехтактных двигателей. Содержит одноцилиндровый двигатель 1Ч10,5х13 с приводом, шлирен – теневую оптическую систему ИАБ 451, кинокамеру со скоростью киносъемки до 5000 кадров/сек, аккумуляторную электрогидравлическую систему топливоподачи с управляемыми  $P_{впр}$  и  $t_{впр}$ , электронную систему управления впрыском, систему наддува (0,9 МПа), подогреватель воздуха ( $300^{\circ}\text{C}$ ) и измерительный комплекс. Схема ее приведена на Рис. 3. Сопловой наконечник форсунки от дизеля ЧН 26/26 с одним распыливающим отверстием оснащен тензодатчиком для измерения давления впрыска. Крышка цилиндра двигателя заменена головкой с оппозитно расположенным окнами, что позволяет регистрировать объем камеры сгорания с внутренними размерами в плане 130х50х300 мм.

**Методика проведения экспериментов.** С помощью электронной аппаратуры для минимальной  $t_{впр}$ , задаются приращения длительности впрыска  $\Delta t$  вместе с соответствующими приращениями массы топлива  $\Delta m$  (дискретной массы), поэтому уравнение (1) запишем следующим образом:

$$m\Delta U + W\Delta m = R\Delta t.$$

Обозначив  $m\Delta U = I_0$  и  $W\Delta m = I_x$ , получим:

$$I_0 + I_x = R\Delta t. \quad (7)$$

Выражение (7) аналогично (5). В соответствии с (7) следует проводить экспериментальные исследования движения топливной струи. Изменение длительности впрыска меняет количество движения струи, ее дальность и время движения. Рассмотрим это по схеме Рис. 4, совмещающей диаграммы  $P_{впр} = f(t)$  и  $S = f(t)$ . Минимально возможной длительности впрыска  $t_{p1}$  соответствует пробег струи на удаление  $S_1$  за время  $t_{k1}$ . Далее струя движется по инерции (линия  $S'_1$ ). Увеличение дли-

тельности впрыска до значения  $t_{p2}$  удлиняет пробег до значения  $S_2$  за время  $t_{p2} + t_{k2}$ . Далее СРТ движется по инерции ( $S'_2$ ). То же самое происходит при дальнейшем увеличении  $t_{\text{впр}}$ . Кривая  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  представляет зависимость  $S = f(t)$ . Каждому значению пробега соответствует собственное время ее достижения  $t_s$ . Связав в отдельном графике  $t_s = f(t_{\text{впр}})$  для фиксированных значений  $S$  выявленные моменты перехода движения в инерционное, можно получить зависимость времени передачи количества движения дискретной массы  $\Delta t$  до любого значения  $S$ . Приведя такие опыты для разных давлений впрыска, значений плотности воздуха, диаметра сопловых отверстий, можно выявить их влияние на время движения массы  $\Delta t$  и любого значения  $S$ . Исследования проводились в холодной бомбе и включали следующие группы опытов:

- 1) Определение влияния длительности впрыска на дальность СРТ для разных значений давления впрыска, для чего был принят ряд давлений топлива в аккумуляторе ( $P_{\text{ак}}$ ): 200; 300; 400; 500; 600 кГ/см<sup>2</sup>.
- 2) Определение влияния длительности впрыска на дальность струи для разных значений плотности воздушного заряда  $\rho_v$  для чего прияты значения: 16; 22; 25,5; 29; 35 кг/м<sup>3</sup>.
- 3) Определение влияния длительности впрыска на дальность для разных значений диаметра распыливающих отверстий для чего были прияты значения  $d_c = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$  мм.
- 4) Сравнительные испытания в режиме бомбы и двигателя для сопоставления результатов исследований в бомбе и реальной камере сгорания.

**Методика обработки экспериментальных данных** проведена по методу Лышевского. Из диаграмм  $S = f(t)$  с  $t_{\text{впр}} = \text{var}$  получены зависимости  $t_s = f(t_{\text{впр}})$  для всех групп опытов. Из полученных зависимостей определяются величины  $t_p = f(t)$ ,  $t_k = f(P_{\text{впр}})$ ,  $t_k = f(\rho)$ ,  $t_k = f(d_c)$ . Моментам  $t_p$  соответствуют точки изгиба линий на диаграммах  $t_s = f(t_{\text{впр}})$ . Из осциллограмм  $P_{\text{впр}} = f(t)$  получают интегральные характеристики  $P_{\text{и}} = f(t)$ . Показатели степеней и множитель  $A_1$  для коэффициента свободной турбулентности определяют из равенства:

$$a_u = A_1 W e^{l_1} M^{n_1} \rho^{k_1} = U d_c t (S^2 \sqrt{2})^{-1} \quad (8)$$

Связь  $S = f(t)$  определяется формулой (3). Показатели степеней и множитель  $A_2$  в выражении для движения элементарной массы  $dm$  выводится согласно уравнению (4). Согласно уравнению (6) определяются показатели степеней и множитель  $A_3$  для выражения угла конуса СРТ.

**В четвертой главе** приведен вывод формул. На Рис. 5. для примера приведена одна

из совмещенных диаграмм давления впрыска  $P_{\text{вп}} = f(t)$ , на Рис. 6...9 приведены диаграммы  $t_s = f(t_{\text{вп}})$ ;  $S = f(t)$  и  $S = f(t_p)$ ;  $P_u = f(t)$ ;  $\alpha = f(t)$ . Для определения влияния **давления** впрыска на КСТ по данным экспериментов получена серия зависимостей  $t_s = f(P_u)$  (Рис. 10) для  $S = 35 \dots 105$  мм. По ним согласно (8) рассчитаны  $\lg a_u$ ;  $\lg We$ ;  $a_u$ . Значения  $a_u$  практически постоянны для разных  $S$ , но меняются для разных  $P_u$ . По полученным данным построена линейная зависимость  $\lg a_{u(\text{cp})} = f(\lg We)$  (Рис. 11) и получено  $k_1 = 0,07246$ . Неизвестные определены согласно уравнению (8).

Для определения влияния **плотности** воздушного заряда на КСТ по данным экспериментов получена серия зависимостей  $t_s = f(\rho_b)$  ( $16 \dots 35$  кг/м $^3$ ). Из них взяты значения  $S$ ;  $t$  и рассчитаны значения  $a_u$ ;  $\lg a_u$ ;  $\lg \rho$ . Значения  $a_u$  практически постоянны для разных  $S$ , но меняются для разных  $\rho_b$ . По данным таблицы построена зависимость  $\lg a_{u(\text{cp})} = f(\lg \rho)$  и получено  $k_1 = 0,917$ . Для определения влияния **диаметра** распыливающих отверстий на КСТ по данным экспериментов получена серия зависимостей  $t_s = f(d_c)$ . Из них взяты значения  $S$ ;  $t$  и рассчитаны  $a_u$ ;  $\lg a_u$ ;  $d_c$ ;  $\lg M$ . Значе-

ния  $a_u$  постоянны для разных  $S$ , но меняются для разных  $d_c$ . По полученным данным построена зависимость  $\lg a_{u(cp)} / We^{-0,07246} = f(\lg M)$ , и определено  $n_1 = 0,2067$ . Для коэффициента свободной турбулентности получено выражение:

$$a_u = 0,553 We^{0,07246} M^{0,2067} \rho^{0,917}. \quad (9)$$

Количественная связь  $t_k$  и движения дискретной массы определялась согласно (4). По данным экспериментов получены зависимости  $t_k = f(P_{впр})$  и  $t_k = f(U_k)$ , приведенные на Рис. 12 и Рис. 13, где  $U_k$  – скорость дискретной массы. По зависимости  $t_k = f(U_k)$  получены значения  $S_k$ ;  $\lg S_k/d_c$ ;  $t_k$ , рассчитаны значения критерия  $\mathcal{E}$  и  $\lg \mathcal{E}$ . В таблицу сведены значения  $S$ ;  $\lg \mathcal{E}$ ;  $\lg S/d_c$ ;  $t_k$  и по ним построена зависимость  $\lg S/d_c = f(\lg \mathcal{E})$  из которой определено  $s_2 = 0,2105$ . По средним значениям  $\lg(S/d_c \mathcal{E}^{0,2105})$ ;  $\lg We$  также построена зависимость  $\lg(S/d_c \mathcal{E}^{0,2105})_{cp} = f(\lg We)$  из которой определено  $I_2 = 0,161$ . По зависимости  $t_k = f(\rho_b)$  рассчитаны значения  $\lg \rho$ ;  $S/d_c \mathcal{E}^{0,2105}_{cp}$ ;  $\lg(S/d_c \mathcal{E}^{0,2105})_{cp}$  и по ним, включая значения  $S$  и  $t_k$ , построена зависимость  $\lg(S/d_c \mathcal{E}^{0,2105})_{cp} = f(\lg \rho)$  из которой определено  $k_2 = -0,291$ . Аналогично для зависимости  $t_k = f(d_c)$  рассчитаны значения  $\rho^{0,291}$ ;  $(S/d_c \mathcal{E}^{0,2105} We^{0,161} \rho^{0,291})_{cp}$ ;  $\mathcal{E}^{0,2105}$ ;  $We^{0,161}$ ;  $S/d_c \mathcal{E}^{0,2105}$ ;  $\lg(S/d_c \mathcal{E}^{0,2105} We^{0,161} \rho^{0,291})_{cp}$ ;  $\lg M$ . По ним построена зависимость  $\lg(S/d_c \mathcal{E}^{0,2105} We^{0,161} \rho^{0,291})_{cp} = f(\lg M)$ , из которой определено  $n_2 = 0,175$ ;  $A_2 = 41,807$

и получено уравнение движения дискретной массы:

$$\frac{S_k}{d_c} = 41,807 \frac{We^{0,161} \mathcal{E}^{0,2105} M^{0,175}}{\rho^{0,291}}. \quad (10)$$

Угол конуса измерялся в интервале времени 0,2...3,0 мс. Экспериментальные данные показали, что по мере движения СРТ коэффициент  $A_3$  и показатели степени  $k_3$ ,  $l_3$ ,  $n_3$  меняют свои значения согласно  $P_{впр}$ ,  $\rho_{в}$ ,  $d_{с}$ . Их количественные величины определены согласно уравнению (6).

Для определения влияния давления впрыска на угол конуса топливной струи получены значения  $t$ ;  $\alpha/2$ ;  $\lg \alpha/2$ ;  $P_{впр}$ ;  $We$ ;  $\lg We$ . По ним построены зависимости  $\lg \alpha/2 = f(\lg We)$ , из которых получены значения  $l_3$  и сведены в Таблицу 1.

По данным таблицы построена зависимость  $l_3 = f(t)$ , (Рис. 14), откуда определены аналитические выражения для показателя степени  $l_3$ . С достаточной для практических целей точностью его можно рассчитать по трем уравнениям.

Таблица 1

$t$ , мс	0,2	0,4	0,6
$l_3$	0,0288	0,0889	0,1248
$t$ , мс	0,8	1,0	1,2
$l_3$	0,1728	0,2392	0,1984
$t$ , мс	1,4	1,6	1,8
$l_3$	0,2288	0,2112	0,2048
$t$ , мс	2,2	2,6	3,0
$l_3$	0,1960	0,1917	0,1921

В интервале времени 0,2...1,2 мс  $l_3 = 0,2t$ ;  
в интервале 1,2...1,8 мс  $l_3 = 0,31 - 0,0583t$ ;  
в интервале 1,8...3,0 мс  $l_3 = 0,236 - 0,0183t$ .

Подобным образом определены показатели степени  $k_3$ ,  $n_3$  и коэффициент  $A_3$ .

В интервале времени 0,2...2,3 мс  $k_3 = 0,091 + 0,113t - 0,025t^2$ ;  
далее  $k_3 = 0,146 + 0,064t - 0,0142t^2$ .

В интервале времени 0,2...1,1 мс  $n_3 = 1,83t - 0,83t^2 - 0,08$ ;

в интервале 1,1...1,6 мс  $n_3 = 1,81 + 0,753t$ ;

далее  $n_3 = 0,63 - 0,0233t$ .

В интервале 0,2...1,2 мс  $\lg A_{3\text{cp}} = 0,075 + 7,99t - 3,333t^2$ ;

в интервале 1,2...1,65  $\lg A_{3\text{cp}} = 3,19t - 8,66$ ;

далее  $\lg A_{3\text{cp}} = 0,18t - 3,78$ .

### Последовательность расчета развития СРТ:

1) интегрируется функция  $P_{\text{впр}} = f(t)$  и определяется функция  $P_{\text{и}} = f(t)$ ;

2) по индикаторной диаграмме определяют плотность заряда за период впрыска;

3) для заданного  $t_p$  определяют величину  $P_{\text{и}}$  и рассчитывают значения  $U_{\text{и}}$ ,  $We$  и  $a_{\text{и}}$  ( $U_{\text{и}}$  – скорость топлива, полученная по значению  $P_{\text{и}}$ );

4) по зависимости  $P_{\text{впр}} = f(t)$  для принятого  $t_p$  определяют  $P_{\text{впр}}$ ,  $U_{\text{k}}$  и величину  $We$  ( $U_{\text{k}}$  – скорость топлива, полученная по значению  $P_{\text{впр}}$ );

5) значение  $t_{\text{k}}$  и пробег вершины струи определяют совместным решением выражений (3), (9), (10) для чего (9) и (10) по отдельности приводят к виду:

$$S_{\phi} = k_{\phi} \sqrt{t_p + t_{\text{k}}} \quad \text{и} \quad S_{\text{k}} = k_{\text{k}} t_{\text{k}}^{0,421};$$

затем, исходя из  $S_{\phi} = S_{\text{k}}$ , получают  $at_{\text{k}}^{0,842} - t_{\text{k}} - t_p = 0$  откуда определяют  $t_{\text{k}}$  и  $S$ .

6) угол конуса СРТ определяют по формуле (6), где число  $We$  вычисляют по зависимости  $P_{\text{впр}} = f(t)$ , а значения  $l_3$ ,  $k_3$ ,  $n_3$ ,  $A_3$  определяют по графикам или вычисляют по формулам;

7) производится расчет по пп. 2...7 для нового значения  $t_p$ . Расчет производится до максимального значения  $S$ .

**В пятой главе** выполнена оценка погрешностей метода и выявлено тепловое и газодинамическое воздействие воздушного заряда на СРТ. Оценка погрешностей вклю-

чает погрешности аппаратных средств, погрешности измерений, погрешности обработки полученного материала и оценку погрешностей расчета по предлагаемым формулам. Погрешность расчета величины  $S_{\phi}$  не превышает 6,18%, а погрешность

расчета величины  $S_k$  не более 5,64%. Погрешность расчета угла конуса СРТ по графикам не более 8,50%, по формулам - 12,5%.

Практическая применимость метода связана со сходимостью развития СРТ в камере сгорания и холодной бомбе. Для выяснения этого были проведены эксперименты, позволившие сравнить развитие струи в дизельном процессе, в процессе без

воспламенения топлива и в холодной бомбе. Протекающие процессы, осциллограммы впрыска и индикаторные диаграммы фиксировались одновременно. В качестве базового был принят дизельный процесс, обозначенный индексом «Г» (горение).

Процесс без воспламенения топлива обозначен индексом «Д» (динамика). Процесс в холодной бомбе обозначен индексом «С» (статика). Сравнение данных показало, что при  $P_{впр} = 18,8$  МПа струя проходит 95 мм за 2 мс (Рис. 15), при  $P_{впр} = 13,8$  МПа за 2,1...2,3 мс. Различие по дальности на одном режиме, но в разных условиях (Г,Д,С), объясняется некоторым различием в скорости нарастания фронта диаграммы давления.

Изменение  $\alpha$  во всех случаях имеет сложный характер (Рис.16) и делится на четыре фазы. В первой фазе отмечается быстрый рост величины угла конуса. Во второй фазе он снижается. В третьей фазе угол конуса снова растет. Воспламенение топлива приходится на ее начало. В четвертой фазе наблюдается его медленное снижение со средней скоростью 0,5...1,5°/мс. После отсеч-

ки впрыска геометрия струи нарушается. Очаг пламени деформируется, сосредотачивается на периферии камеры и, растекаясь по поверхности поршня, сгорает до открытия выпускного клапана. Границы вариаций угла конуса обозначены на диаграмме штриховой линией. В режиме «Д» аналогичные изменения угла конуса происходят в меньших пределах. Изменения угла конуса в бомбе имеют тот же характер, но происходят в еще меньших пределах. Площади профиля струи имеют значительную зависимость от температуры и приведены на Рис. 17.

**Апробирование метода** расчета осуществлялось для различных режимов впрыска топлива в камеры сгорания дизелей ряда ЧН26/26 «глубокий Гессельман», «мелкий Гессельман», ЧН 21/21 и др. Применялись данные, полученные на установке ДПО. Ниже приведены результаты расчета для  $P_{впр} = 18,8$  МПа. На Рис. 18 приведены диаграммы  $P_{впр}$  и  $P_i$  по которым производился расчет. На Рис. 19 приведены рассчитанные и экспериментальные зависимости  $S = f(t)$  и  $\alpha = f(t)$ , которые показывают высокую точность расчетов. Произведен расчет развития топливной струи для номинального режима работы судового дизеля 16Д49. Параметры двигателя:  $N_e = 4418$  кВт;  $P_e = 2,167$  МПа;  $b_e = 1,886$  г;  $n = 1100$  мин<sup>-1</sup>; давление воздуха в ресивере  $P_p = 0,342$  МПа;  $\theta = 23^\circ$  до ВМТ;  $V_a = 14\ 908,49\text{см}^3$ ;  $V_c = 1104,33\text{см}^3$ ;  $T_a = 415, 68^\circ$  К;  $P_{впр} = 1200$  кГ/см<sup>2</sup>. Согласно расчету, за период задержки воспламенения струя проходит дистанцию 91,5 мм до стенки поршня за 1,52 мс, что совпадает с режимом работы дизеля. Сопоставление с индикаторной диаграммой показало, что воспламенение топлива происходит в момент касания стенки вершиной струи.

### Основные результаты и выводы

1. Разработан метод расчета развития топливных струй, обладающий малыми погрешностями.
2. Для разработки метода уточнена, методически обоснована и принята турбулентная модель, дополненная уравнением движения тела переменной массы.
3. Эксперименты проводились для давлений впрыска 7 - 40 МПа; плотности воздушного заряда 16 - 35 кг/м<sup>3</sup>; диаметров распыливающих отверстий 0,3 - 0,6 мм и дальности до 105 мм. Проверка по техническим характеристикам дизеля 16Д49 показала, что метод обеспечивает удовлетворительную точность для давления впрыска до 100 МПа.
4. В рассмотренном диапазоне действующих факторов предложенный метод расчета позволяет рассчитывать дальность топливной струи с точностью 6,18 %, а угол конуса по графикам 8,5%, по формулам 12,5%, что значительно выше в сравнении с другими методами. Наибольшее влияние на величину погрешности оказывают погрешности измерения давления впрыска.

5. Угол конуса в своем развитии претерпевает сложную, ранее не отмеченную эволюцию. Наибольшее влияние на эволюцию угла конуса оказывает динамика изменения давления впрыска. При росте давления от 2,5 до 40 МПа угол конуса снижается с  $27^\circ$  до  $10^\circ$ . При снижение давления с 40 МПа до 7 МПа угол конуса возрастает до  $16^\circ$  -  $22^\circ$ . При снижение давления с 37 до 6,5 МПа угол конуса возрастает до  $17,5^\circ$  -  $23,5^\circ$ . Рост температуры воздушного заряда от 293° К до 475° К

увеличивает его с  $16^{\circ}$  до  $20^{\circ}$ , далее, до температуры воспламенения и сгорания топлива, угол конуса возрастает от  $20^{\circ}$  до  $28^{\circ}$  для пристеночного положения СРТ.

6. Отмечено, что распределение распыленного топлива по длине струи приближается к дискретному.

7. Получены данные о неравномерном движение второй струи для двухфазного впрыска, что связано с изменением давления впрыска.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Крупский М.Г., Рудаков В.Ю., Чугунов А.В.. Методика расчета геометрических параметров струи распыленного топлива в камерах сгорания дизелей // Новые технологии. №2. 2000. С. 31-33. (0,35/0,15/0,05 п.л.).
2. Крупский М.Г., Рудаков В.Ю., Чугунов А.В. О двухфазном впрыскивании дизельной форсункой // Новые технологии. 2000. № 2. С. 34-36. (0,34/0,15/0,07 п.л.).
3. Рудаков В.Ю. Исследование теплового и газодинамического воздействия воздушного заряда на развитие топливной струи // Двигатель. 2004. № 4. С. 7 - 9.; Двигатель. 2005. № 1. С. 46-47. (1,1 п.л.).
4. Рудаков В.Ю. О формировании угла конуса топливной струи. Тезисы доклада // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Всероссийский научно-технический семинар по автоматическому управлению и регулированию теплотехнических установок им проф. В.И. Крутова. 28 февраля, 2006 г. 2006. № 3. С. 121. (0,02 п.л.).
5. Крупский М.Г., Рудаков В.Ю. Методика расчета геометрических параметров и динамики струи распыленного топлива при впрыске дизельной форсункой. Тезисы доклада // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Всероссийский научно-технический семинар по автоматическому управлению и регулированию теплотехнических установок им. проф. Крутова В.И. 31 января 2007 г. 2007. № 4. С. 116. (0,02/0,01 п.л.).
6. Крупский М.Г., Рудаков В.Ю. Расчет геометрических параметров струи топлива при впрыске в камеру сгорания дизеля // Двигателестроение. 2008. № 1. С. 24-25. (0,15/0,1 п.л.).
7. Крупский М.Г, Рудаков В.Ю. Особенности движения топливных струй при двухфазном впрыске. Тезисы доклада // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Всероссийский научно-технический семинар по автоматическому управлению и регулированию теплотехнических установок им проф. В.И. Крутова. 28 января, 2009 г. 2009. № 4. С. 120. (0,02/0,015 п.л.).
8. Крупский М.Г, Рудаков В.Ю. Опыт организации объемного смесеобразования по результатам исследований на двигателе с прозрачными окнами // Двигателестроение. 2009. № 2. С. 31-34. (0,56/0,2 п.л.).
9. Рудаков В.Ю. Метод расчета угла конуса топливной струи. Тезисы доклада // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Всероссийский научно-технический семинар по автоматическому управлению и регулированию теплотехнических установок им проф. В.И. Крутова. 27 января, 2010 г. 2010 г. № 3. С. 116-125. (0,02 п.л.).
10. Рудаков В.Ю. Особенности строения топливной струи // Двигателестроение. 2010. № 3. С. 10-35. (0,56 п.л.).

11. Рудаков В.Ю. Методика определения величины аэродинамического сопротивления воздушного заряда движению топливной струи. Тезисы доклада // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Всероссийский научно-технический семинар по автоматическому управлению и регулированию теплотехнических установок им. проф. В.И. Крутова. 27 января, 2011. 2011. № 4. С. 118-119. (0,02 п.л.).
12. Рудаков В.Ю. Особенности развития топливной струи при двухфазном впрыске // Двигателестроение. 2011. № 1. С. 9-11. (0,34 п.л.).
13. Рудаков В.Ю. Метод расчета геометрических параметров топливной струи для открытых камер сгорания среднеоборотных дизелей // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 3. С. 33-41. (1,7 п.л.).
14. Рудаков В.Ю. Установка для исследования рабочих процессов газовых двигателей оптическим методом // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 5. С. 60 – 61. (0,31 п.л.).
15. Рудаков В.Ю. Методика определения величины аэродинамического сопротивления движению топливной струи // Тяжелое машиностроение. 2011. № 5. С. 27-30. (0,88 п.л.).
16. Крупский М.Г., Куюнов Ю.Ф., Рудаков В.Ю. Установка для исследования газодинамических процессов оптическим методом // Автогазозаправочный комплекс плюс альтернативное топливо. 2011. № 5. С. 23. (0,16/0,12/0,2 п.л.).
17. Карелин А.Н., Рудаков В.Ю. Расчет угла конуса топливной струи // Вестник машиностроения. 2012. № 2. С. 30-32. (0,45/0,75 п.л.).
18. Рудаков В.Ю. Особенности распыливания и сгорания топливного шлейфа после отсечки впрыска // Вестник машиностроения. 2012. № 4. С. 17-20. (0,75 п.л.).
19. Карелин А.Н., Рудаков В.Ю. Закономерности развития топливных струй в открытых камерах сгорания дизелей и методика проведения исследований на установке «Двигатель с прозрачными окнами» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 4. С. 30-46. (1,0/1,2 п.л.).
20. Устройство для впрыска топлива в двигатель внутреннего сгорания. А.С. № 1467245 / Крупский М.Г., Кузин В.Е., Рудаков В.Ю., Комков В.А. Заявл. 24.10.86; опубл. 23.03.89. Бюлл. № 11. (0,02 п.л.).
21. Ахтырский С.А., Рудаков В.Ю., Мордвинков В.В. Устройство управления подачей топлива для экспериментальной установки «Двигатель с прозрачными окнами» // Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона. Научно-практический журнал Коломенского института (филиала) Университета машиностроения. Коломна, 2013. №3. С.149-151. (0,35/0,1/0,05 п.л.).
22. Рудаков В.Ю. Формирование угла конуса топливной струи. //Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона. Научно-практический журнал Коломенского института (филиала) Университета машиностроения. Коломна, 2013. № 3. С.199-206. (0,6 п.л.).