

На правах рукописи



Сеначин Андрей Павлович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЕ**

05.04.02 – тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул - 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Коржавин Алексей Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Баев Владимир Константинович
доктор технических наук, профессор
Юр Геннадий Сергеевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Защита состоится «02» марта 2012 г. в 12-00 часов на заседании Диссертационного совета Д 212.004.03 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, АлтГТУ (тел/факс (3852)260516; E-mail: D21200403@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью Вашего учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «27» января 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



А.Е. Свистула

Абревиатура

ВМТ- верхняя мертвая точка;

ДВС- двигатель внутреннего сгорания;

ДКМ- детальный кинетический механизм;

ДТ- дизельное топливо;

КШМ- кривошипно-шатунный механизм;

ЛО- локальный объем;

ММ- математическая модель;

ПКВ- поворот коленчатого вала;

РТ- рабочее тело;

ТВ- тепловой взрыв;

СР- система топливоподачи аккумуляторного типа (Common Rail).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Оптимизация процессов воспламенения и горения топлива путем численного моделирования является фундаментальной проблемой, имеющей теоретическое и практическое значения для повышения надежности, экономичности и экологической безопасности дизелей.

Моделированию и оптимизации рабочих процессов ДВС посвящены работы Н.М. Глаголева, Б.М. Гончара, И.И. Вибе, М.Г. Круглова, Н.С. Ханина, Р.М. Петриченко, О.Г. Красовского, Н.К. Шокотова, В.Д. Сахаревича, В.З. Махова, Н.Х. Дьяченко, Ю.Б. Свиридова, Н.Ф. Разлейцева, А.С. Куценко, С.А. Батурина, Н.П. Третьякова, В.А. Звонова, А.И. Толстова, В.П. Карпова, О.Н. Лебедева, Д.Д. Матиевского, В.А. Синицына, Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе и многих других отечественных и зарубежных ученых.

Однако до настоящего времени процессы самовоспламенения в дизелях, математические модели и методы расчета разработаны недостаточно. Например, для задачи о задержке воспламенения (периоде индукции) топлива в дизеле отсутствует математическая модель, адекватно учитывающая основные физико-химические особенности процесса. Поэтому период индукции в дизеле определяется либо экспериментально, либо исключительно на основе эмпирических формул, имеющих ограниченное применение.

Объект исследования - рабочий процесс дизеля.

Предмет исследования – самовоспламенение в дизеле - задержка воспламенения топлива.

Цель работы – развитие существующих представлений о самовоспламенении в дизеле и методов определения периода индукции путем разработки математических моделей и численного моделирования задержки воспламенения топлива на основе глобальной химической кинетики.

Задачи исследования

Как известно, рабочее тело в дизеле воспламеняется от сжатия, поэтому рассматриваемая задача относится к теории теплового взрыва (ТВ). Для численного моделирования воспламенения топлива в дизеле необходима математическая модель, построение которой возможно лишь после принятия гипоте-

зы о месте локализации области самовоспламенения – ЛО. Впрыскиваемое топливной форсункой ДТ нарушает однородность РТ и требуют рассмотрения усложненной математической модели (ММ). Присутствие в задаче химических реакций требует знания макрокинетики ДТ и более точного расчета исходного состава газов.

Поэтому, с учетом уже достигнутых результатов в рассматриваемой области и в теории ТВ, необходимо решить **следующие задачи**:

1) рассмотрения самовоспламенения ДТ – задержки воспламенения в дизеле в свете современной теории ТВ и периоде индукции воспламенения топлива как задачи о самовоспламенении при адиабатическом сжатии;

2) самовоспламенения топливно-воздушной смеси в дизеле (как целого) в качестве исходной для постановки уточненной задачи о задержке воспламенения и задачи определения констант макрокинетики ДТ;

3) создания базовой математической модели динамики развития топливно-воздушного факела дизеля как тела переменной массы для обоснования гипотезы о месте локализации ЛО - очага воспламенения в дизеле;

4) разработки математической модели и компьютерной программы расчета периода индукции как задачи о самовоспламенении ЛО и определения констант макрокинетики ДТ путем решения обратной задачи о задержке воспламенения топлива с использованием собственных экспериментальных данных;

5) развития математической модели воспламенения ДТ в ЛО при использовании аккумуляторной системы топливоподачи типа Common Rail (CR), разработки компьютерной программы для численного моделирования периода индукции в дизеле и уточнения констант макрокинетики ДТ.

Научная новизна (положения, выносимые на защиту).

- Построены математические модели и разработаны компьютерные программы для численного моделирования задержки воспламенения топлива в дизеле с классической и аккумуляторной системами топливоподачи, как задачи о самовоспламенении ЛО на внешней границе факела.

- На основе экспериментальных данных стендовых исследований определены константы макрокинетики ДТ, численным решением обратной задачи самовоспламенения топлива в дизелях с классической и аккумуляторной системами топливоподачи.

- Численное моделирование показало, что самовоспламенение в дизеле происходит в условиях околостехиометрической смеси (со сдвигом в бедную область), однако при низких энергиях активации химической реакции в тяжелых углеводородах возможно воспламенение богатых смесей.

Практическая ценность работы. Полученные в работе расчетно-программные комплексы позволяют моделировать процессы самовоспламенения топлива в дизелях на стадии их проектирования и доводки.

Достоверность и обоснованность научных положений определяется использованием достоверных результатов других авторов и современных

мировых достижений в рассматриваемой области, проведением натуральных экспериментальных исследований с применением надежных экспериментальных методик и апробированных методов численного моделирования.

Апробация работы. Результаты докладывались на конференциях различного уровня: Всероссийской научно-техн. конф. «Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных сред» (Барнаул, АлтГУ, 1996); 55-й и 57-й научно-технических конф. студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического ун-та (Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1997 и 1999); VI Междунар. научно-практ. семинаре «Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС» (Владимир, ВладГУ, 1997); Междунар. научно-техн. конф., посвящ. 100-летию создания 1-го Российского дизеля «Совершенствование быстроходных ДВС» (Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1999); V Междунар. школе-семинаре «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» (Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2000); II Междунар. конф. «Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов» (Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2000); Междунар. научно-практ. конф. «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения» (Челябинск, ЮУрГУ, 2003); Всероссийской научно-практ. конф. с междунар. участием «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» - ЭЭТПЭ-2007 (Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2007); Международной конф. Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010); Юбилейной научно-техн. конф. «5-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе» (Москва, МАДИ, 2011); III Всероссийской научно-практ. конф. «Актуальные проблемы машиностроения» (Самара, Самарский областной дом науки и техники, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 23 работы, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованном ВАК, 7 статей в других периодических изданиях и специализированных сборниках, 3 доклада и 5 тезисов докладов на конференциях различного уровня и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержит 145 страниц, 37 рисунков, 5 таблиц и 135 цитированных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показаны ее научное и практическое значения, изложены основные положения, выносимые на защиту.

1 ТЕОРИЯ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА И ПРОБЛЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЕ

Рассмотрены положения классической теории ТВ – нестационарной (Н.Н. Семенова) и стационарной (Д.А. Франк-Каменецкого), применительно к

задаче самовоспламенения топлива в дизеле для прогнозирования задержки воспламенения. Математически задачи классической теории ТВ сводятся к решению уравнения вида

$$\frac{dT}{dt} = Q^+ - Q^-, \quad \text{при } t = 0, T = T_0, \quad (1)$$

описывающего процессы разогрева Q^+ и охлаждения Q^- рабочего тела (некоторой области) в результате химической реакции и теплопроводности (теплоотдачи). Решение задачи сводится к нахождению критических условий $T = T^*$ и $\delta(T^*)$, где δ - безразмерный параметр задачи. Динамические режимы ТВ (А.Г. Мержанова с сотрудниками) отличаются от классической задачи (1) только краевыми условиями, например, условиями теплоотдачи.

Задача о воспламенении в двигателе (дизеле) математически формулируется как

$$\frac{dT}{dt} = Q^+ + Q_{\text{сж}}, \quad \text{при } t = 0, T = T_0, \quad (2)$$

где $Q_{\text{сж}}$ - теплоприход за счет работы сжатия поршнем. В своей постановке задача (2) не содержит никакого критического условия и не может быть решена классическими методами.

При отсутствии внешнего сжатия $Q_{\text{сж}} = 0$ задача (2) сводится к задаче адиабатического ТВ (О.М. Годеса), где период индукции определяется как

$$\tau_i = \int_0^{\tau_i} dt = \int_{T_0}^{T_{\text{max}}} dT / Q^+ . \quad (3)$$

Для задач воспламенения при адиабатическом сжатии вида (2) сравнительно недавно разработан метод решения, основанный на использовании специального дифференциального критерия

$$\delta_{\text{порш}} = \frac{d \ln T}{dt} / \frac{d \ln p}{dt} = \text{const} , \quad (4)$$

где p - давление в рассматриваемом объеме (камере сгорания).

Применение подходов (3) и (4) к задаче воспламенения в дизеле осложнено из-за неоднородности рабочего тела, поэтому необходимо рассматривать не весь объем, в целом, а некоторый ЛО, в котором происходит самовоспламенение в режиме динамического ТВ.

2 БАЗОВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В ДВИГАТЕЛЯХ

Предложена методика расчета исходного состава рабочего заряда с учетом состава воздуха, наполнения цилиндра двигателя и остаточных газов.

Рассмотрена задача самовоспламенения топливно-воздушной смеси в дизеле (как целого) в качестве исходной для постановки уточненной задачи о задержке воспламенения. В результате анализа (с упрощением закона сжатия до синусного механизма) получаем условие самовоспламенения

$$\frac{J_e D_v (P^*)^{(s-1)\gamma-1} \exp[(1 - (P^*)^{1/\gamma-1})/\beta_0]}{\gamma \sqrt{(\varepsilon/\varepsilon_0 - (P^*)^{-1/\gamma})(P^*)^{-1/\gamma} - 1/\varepsilon_0}} = \frac{1}{e}, \quad (5)$$

определяющее критическое давление $P^* = p^*/p_0$, позволяющее найти задержку воспламенения топлива ($\varepsilon, \varepsilon_0$ - степени сжатия, геометрическая и после начала впрыска; γ - показатель адиабаты; J_e, D_v, β_0 - параметры задачи).

Построена базовая математическая модель динамики дизельного факела как тела переменной массы для обоснования гипотезы о месте локализации очага воспламенения (Рисунок 1).

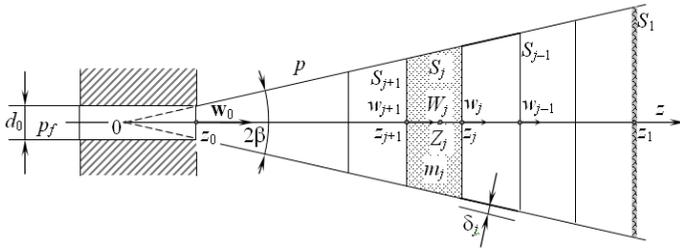


Рисунок 1 – Схематическое представление структуры топливно-воздушного факела дизеля, как тела переменной массы

Дизельный факел состоит из слоев и колец, которые обмениваются между собой и с окружающим газом энергией, импульсом и массой. Получаем систему алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих термодинамику и движение системы взаимодействующих материальных точек.

На основе анализа принята гипотеза о *месте локализации очага самовоспламенения –ЛО находится на внешней границе факела.*

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В ДИЗЕЛЕ

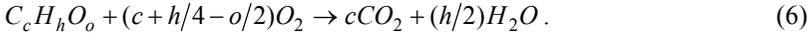
Приведено описание стенда для исследования рабочего процесса дизеля на базе одноцилиндрового двигателя 1ЧН13/14 ОАО «Алтайдизель».

Для ММ приняты следующие допущения относительно физико-химических процессов в ЛО и рабочем объеме до момента воспламенения факела:

- 1) факел поджигается от воспламенившегося ЛО, находящегося вне факела, образовавшегося из испарившихся мельчайших капель практически в момент начала подачи топлива в цилиндр;
- 2) капли испаряются за счет внутренней энергии ЛО, который в дальнейшем вплоть до самовоспламенения, не обменивается энергией и массой с окружающим газом, другими каплями и топливным факелом;
- 3) принимаем гипотезу, что образовался один ЛО;
- 4) физическое время задержки воспламенения не учитываем.

В ЛО протекает брутто-реакция, макрокинетическое уравнение которой для топлива, в условную молекулу которого $C_c H_h O_o$ ($j=6$) входит c - атомов

углерода, h - атомов водорода и o - атомов кислорода, запишется



Начальный состав смеси в ЛО для всех 6-ти компонентов (индексы: 1- O_2 ; 2- N_2 ; 3- пары H_2O ; 4- Ar ; 5- CO_2 ; 6- пары топлива) и начальная температура θ_1 находятся с учетом полного испарения капель.

Скорость брутто-реакции в реальном масштабе времени будет равна

$$W = k(a_1 a_6)^{s/2} \left(\frac{p}{R\theta} \right)^s \exp\left(-\frac{E}{R\theta} \right), \quad (7)$$

откуда, с учетом (6), находим скорости по компонентам смеси W_j . Текущее значение относительной концентрации j -го компонента смеси в ЛО имеет вид

$$\dot{a}_j = \frac{da_j}{d\varphi} = \frac{R\theta}{2\pi n_0 p} \left(W_j - a_j \sum_j W_j \right). \quad (8)$$

Уравнение энергии смеси в ЛО (из которого с помощью уравнения состояния исключен объем) имеет вид

$$\dot{\theta} = \frac{R}{\langle C_{p,ЛО} \rangle} \cdot \frac{\theta}{p} \dot{p} + \sum_j \dot{a}_j \frac{M_j}{\langle C_{p,ЛО} \rangle} \left(\frac{H_{j,ЛО}}{\langle M_{ЛО} \rangle} - \frac{H_{j,ЛО}}{M_j} \right). \quad (9)$$

Уравнение энергии всей смеси (динамики давления) запишется как

$$\begin{aligned} \dot{p}V = & - \frac{\langle C_p \rangle}{\langle C_p \rangle - R} \cdot p \dot{V} + \frac{R}{\langle C_p \rangle - R} \times \\ & \times \left[\sum_n \frac{\alpha_n}{2\pi n} (T_n - T) + \frac{C_f (T_0 - T_s)}{M_f} \dot{m}_f + \frac{C_{p6} (T_s - T) - L_s}{M_f} \dot{m}_s \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Математическая модель самовоспламенения ЛО также включает уравнения: объема системы и его динамики (для аксиального механизма); закона поступления жидкого топлива (для $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_1 + \varphi_z$); массы испарившегося топлива в рабочем объеме и состояния смеси общее. Рассматривается ДТ с термодинамическими свойствами смеси 50% н-цетана ($C_{16}H_{34}$) и 50% 1-метилнафталина ($C_{11}H_{10}$). Расчет задержки воспламенения проводится путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты четвертого порядка, пока степень выгорания топлива в ЛО не достигнет заданной величины 99%, соответствующее $a_6/a_{6l} \geq 0,01$.

Оценка констант макрокинетики. Для численного решения задачи о задержке воспламенения необходимо знать константы макрокинетики в уравнении (7) – энергию активации E , константу скорости k и суммарный порядок реакции s , которые для ДТ в настоящее время неизвестны.

В эмпирических формулах разных авторов для расчета задержки вос-

пламенения в дизеле, имеющих вид формулы О.М. Годеса для периода индукции адиабатического ТВ $\tau_i = Bp^n \exp(E/RT)$, в качестве энергии активации E и суммарного порядка реакции $s = 1 - n$ принимаются существенно отличающиеся друг от друга численные значения.

Другая проблема выбора констант макрокинетики состоит в том, что для тяжелых углеводородов энергия активации E в области температур 700-900 К испытывает довольно резкий излом или имеет неопределенное значение из-за двухстадийности самовоспламенения углеводородов. Анализ эмпирических формул по задержкам воспламенения показывает, что в них для ДТ значение барического показателя соответствует порядку реакции $s = 1 - n$ от 1,4 до 3,0 при весьма большом разбросе величины E .

Экспериментальные данные по задержкам воспламенения получены с участием соискателя при индицировании одноцилиндрового дизеля 1ЧН 13/14. Период индукции определялся визуально по скоростным и регулировочным характеристикам с экрана цифрового анализатора 657 AVL (Австрия) сопоставлением диаграмм подъема иглы форсунки и давления в цилиндре (суммарная погрешность измерения составляла ± 1 град ПКВ).

Численное моделирование для дизеля. В начале была принята энергия активации $E=25,14$ кДж/моль, характерная для высокотемпературной области воспламенения, и рассмотрено влияние коэффициента избытка воздуха $\alpha_{ЛО}$ в ЛО на задержку воспламенения ДТ. При этом для $\alpha_{ЛО}=1$ по известной из эксперимента задержке воспламенения определялась константа скорости реакции при порядке $s=1,5$ и для этой константы скорости варьировался коэффициент $\alpha_{ЛО}$. (Рисунок 2, нижняя кривая). При увеличении $\alpha_{ЛО}$ задержка воспламенения сначала уменьшается, а затем медленно возрастает, с минимумом при $\alpha=1,35$ Затем для нового коэффициента $\alpha_{ЛО}=1,35$ определялась новая константа скорости и варьирование $\alpha_{ЛО}$ подтверждало наличие минимума задержки при $\alpha_{ЛО}=1,35$ (Рисунок 2, верхняя кривая).

Аналогичные расчеты проведены для энергии активации $E=76,67$ кДж/моль, характерной для низкотемпературной области (Рисунок 3). Затем выбрали значение $E=38$ кДж/моль, характерное для переходной области, и получили зависимость задержки воспламенения τ_i от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{ЛО}$ с минимумом при $\alpha_{ЛО}=1,30$. Изменение порядка реакции приводит к изменению тангенса угла наклона скоростной характеристики (Рисунок 5). При порядке реакции $s=2,5$ имеем удовлетворительное согласие с экспериментальными данными и получаем новую константу скорости $k=9,39 \cdot 10^{12}$ моль^{-1,5}·м^{4,5}·с⁻¹ при $\alpha_{ЛО}=1,4$ (Рисунок 4, верхняя кривая), таблица 1.

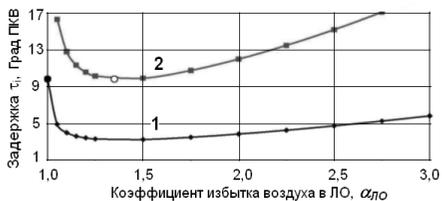


Рисунок 2 – Зависимость задержки воспламенения в дизеле от $\alpha_{ЛО}$ при энергии активации $E=25,14$ кДж/моль и $s=1,5$:
 1- $\alpha_{ЛО}=1,0, k=9,69 \cdot 10^8$;

2- $\alpha_{ЛО}=1,35, k=2,18 \cdot 10^8$ моль^{-0,5}·м^{1,5}·с⁻¹



Рисунок 3 – Задержка воспламенения топлива в дизеле от $\alpha_{ЛО}$ при $E=76,67$ кДж/моль и $s=1,5$:

1- $\alpha_{ЛО}=1,0, k=1,034 \cdot 10^{10}$;

2- $\alpha_{ЛО}=1,19, k=5,85 \cdot 10^9$ моль^{-0,5}·м^{1,5}·с⁻¹



Рисунок 4 – Задержка воспламенения топлива в дизеле от $\alpha_{ЛО}$ при $E=38$ кДж/моль и $s=2,5$:

1- $\alpha_{ЛО}=1,05, k=1,78 \cdot 10^{13}$;

2- $\alpha_{ЛО}=1,40, k=9,39 \cdot 10^{12}$ моль^{-0,5}·м^{1,5}·с⁻¹

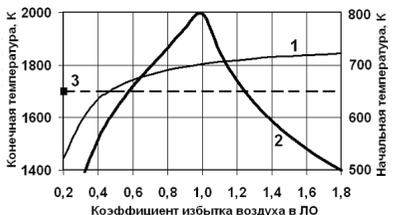


Рисунок 5 – График зависимости начальной (1) и конечной (2) температуры смеси в ЛО при варьировании коэффициента избытка воздуха, энергии активации E и порядка реакции s .

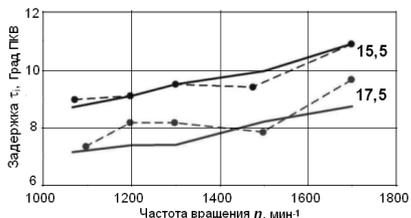


Рисунок 6 – Задержка воспламенения от частоты вращения коленчатого вала при $s=2,5, E=38$ кДж/моль, $k=9,39 \cdot 10^{12}$ моль^{-1,5}·м^{4,5}·с⁻¹:
 15,5 - $\epsilon=15,5$; 17,5 - $\epsilon=17,5$. Пунктирные линии – эксперимент, сплошные линии – расчет

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных и моделируемых задержек воспламенения

Степень сжатия, ϵ	Частота вращения, n , мин ⁻¹	Задержка τ_i , град ПКВ		Оптимальное значение $\alpha_{ЛО}$	Значения кинетических констант		
		Экспер.	Расчет		E , кДж/моль	k , (моль·м·с)	s
15,5	1300	9,5	9,5	1,35	25,14	$2,18 \cdot 10^7$	1,5
				1,19	76,67	$5,85 \cdot 10^9$	
				1,30	38	$4,04 \cdot 10^9$	
15,5	1700	10,9	10,91	1,40	38	$9,39 \cdot 10^{12}$	2,5
	1500	9,4	9,96				
	1300	9,5	9,5				
	1200	9,1	9,1				
	1100	9,0	8,7				
17,5	1700	9,7	8,73	1,40	38	$9,39 \cdot 10^{12}$	2,5
	1500	7,8	8,2				
	1300	8,2	7,39				
	1200	8,2	7,38				
	1100	7,3	7,14				

Как уже отмечалось, углеводороды с большой молекулярной массой отличаются двухстадийностью процесса самовоспламенения и при температурах 700-900 К имеют неопределенную величину энергии активации E , с низким численным значением (вплоть до нулевого), что связано с накоплением, а затем распадом гидроперикисей, преимущественно H_2O_2 . Это может привести к значительному росту скорости химической реакции при этих температурах и сдвинуть максимум в область богатых смесей, несмотря на значительное охлаждение смеси из-за испарения капель жидкого топлива. Кроме того, по данным исследований Дека (Dec J.E., 1997), Вестбрука (Westbrook Charles K., 2000) и других *воспламенение в дизеле происходит в условиях очень богатой топливной смеси*.

Поэтому были проведены исследования самовоспламенения ДТ в ЛО при расширенном диапазоне коэффициента избытка воздуха $\alpha_{ЛО}$ для различных значений энергии активации химической реакции E . Отметим, что неоднозначность выбора энергии активации E , влияющей на особенности физико-химического процесса самовоспламенения топлива, является одной из принципиальных трудностей теоретического определения задержки воспламенения топлива в дизеле.

Эти результаты приведены на рисунках 7А (для $E=38$ кДж/моль) и 7Б (для $E=76,67$ кДж/моль). Как показывают численные исследования, при низкой энергии активации E имеют место два минимума задержки воспламенения τ_i , в богатой и бедной областях, причем первый оказывается более глубоким. При увеличении энергии активации E эти минимумы приближаются к области стехиометрической смеси. При E около 85 кДж/моль минимумы τ_i сливаются в один при $\alpha_{ЛО}=1$, а при дальнейшем увеличении E этот минимум сдвигается в бедную область. Кроме того, существует ограничение по минимальной конечной температуре в ЛО $T=1700$ К, способной поджечь топливно-воздушный факел (Рисунок 5, линия 3).

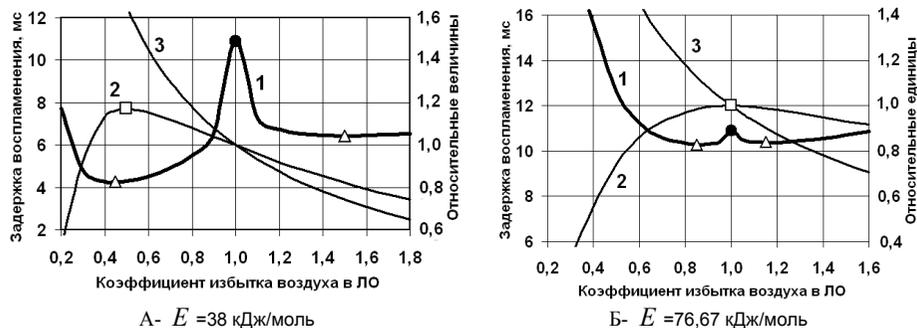


Рисунок 7 – Зависимость задержки воспламенения топлива в дизеле τ_i от коэффициента $\alpha_{ЛО}$:

- 1- задержка воспламенения; 2- начальная скорость химической реакции;
- 3- произведение концентраций топлива и окислителя

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЕ С АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ

В дизеле с аккумуляторной системой топливоподачи типа CR задержка воспламенения топлива определяется аналогично, за исключением математического блока для ЛО. Здесь отличия следующие.

ЛО мал по сравнению с общим объемом системы, его объем определяется заданным локальным коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{ЛО}$. В начале процесса впрыска топлива в этот ЛО попадает некоторое количество капель топлива (условно одна капля) с диаметром $\langle a_{ЛО} \rangle$, близким к среднему диаметру капель в факеле. В модели **учитывается процесс испарения капель** в ЛО и реакция по уравнению (6) начинается с очень малой скоростью, поскольку в начале топлива в ЛО практически нет. С учетом уравнения (6), запишем производные от числа молей компонентов смеси в ЛО:

$$\begin{aligned} \dot{v}_{1ЛО} &= -W\beta(c + h/4 - o/2), \quad \dot{v}_{2ЛО} = 0, \quad \dot{v}_{3ЛО} = W\beta \cdot h/2, \quad \dot{v}_{4ЛО} = 0, \\ \dot{v}_{5ЛО} &= W\beta \cdot c, \quad \dot{v}_{6ЛО} = -W\beta + m_{sЛО} / M_f, \quad \beta = R\theta v_{ЛО} / (2\pi n p). \end{aligned} \quad (11)$$

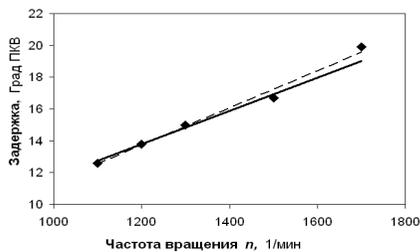
Уравнение энергии смеси в ЛО примет вид

$$\begin{aligned} \langle C_{pЛЛ} \rangle \dot{\theta} &= -\frac{1}{v_{ЛО}} \sum_{j=1}^6 H_{jЛЛ} \left[\dot{v}_{jЛЛ} - v_{jЛЛ} W \cdot \frac{R\theta}{2\pi n p} \left(\frac{h}{4} + \frac{o}{2} - 1 \right) \right] + \\ &+ \frac{R\theta}{p} \cdot \dot{p} + \frac{m_s}{M_f v_{ЛО}} [C_f(T_0 - T_s) + C_{p6}(T_s - \theta) - L_s]. \end{aligned} \quad (12)$$

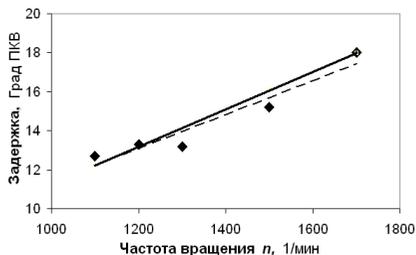
Уравнение энергии всей смеси (динамики давления) запишется в прежнем виде (10), как и уравнение (7) для скорости реакции в ЛО. Математическая модель самовоспламенения в ЛО включает также уравнения: объема системы и его динамики (для аксиального механизма); закона поступления жидкого топлива (для $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_1 + \varphi_z$); динамики массы испарившегося топлива в ЛО; динамики массы испарившегося топлива в рабочем объеме; состояния смеси в ЛО и воздушного заряда.

Поскольку уравнение энергии (12) в ЛО учитывает текущие затраты энергии на испарение топлива, то в данной постановке задачи определяется **совмещенная задержка воспламенения**, объединяющая физическую задержку (испарение капель в ЛО) и химическую задержку (самовоспламенение смеси в ЛО), поскольку оба процесса протекают одновременно.

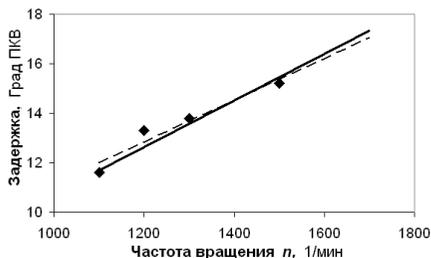
Моделирование самовоспламенения топлива в дизеле с системой топливоподачи типа CR проводилось при значении $E=38$ кДж/моль и порядке реакции $s=2$. Экспериментальные данные по задержкам воспламенения топлива в дизеле с системой топливоподачи типа CR получены соискателем при обработке индикаторных диаграмм, снятых на кафедре ДВС АлтГТУ им. И.И. Ползунова на одноцилиндровом дизеле 1СН 13/14.



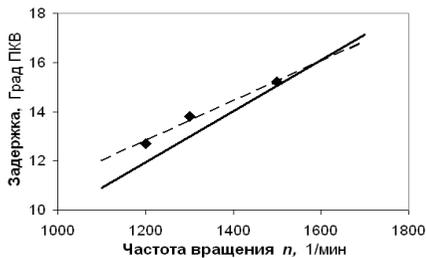
$p_{VIP} = 60 \text{ МПа}$



$p_{VIP} = 90 \text{ МПа}$



$p_{VIP} = 120 \text{ МПа}$



$p_{VIP} = 150 \text{ МПа}$

Рисунок 8 – Скоростные характеристики задержки воспламенения топлива в дизеле:
 точки – экспериментальные данные; пунктир – линия тренда;
 сплошная линия – численное моделирование

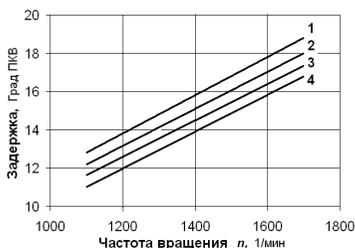


Рисунок 9 – Расчетные зависимости задержки воспламенения от частоты вращения при давлениях впрыска p_{VIP} :
 1- 60 МПа; 2- 90 МПа; 3- 120 МПа; 4- 150 МПа

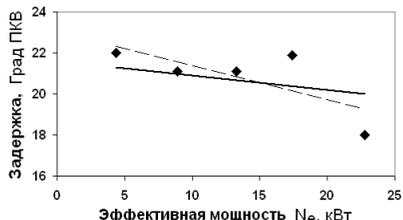


Рисунок 10 – Нагрузочная характеристика задержки воспламенения топлива в дизеле при

$p_{VIP} = 60 \text{ МПа}$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$;
 точки – экспериментальные данные;
 пунктир – линия тренда;
 сплошная линия – численное моделирование

Моделирование показало, что качественный характер влияния коэффициента избытка воздуха в ЛЮ на задержку воспламенения сохраняется, при увеличении $\alpha_{ЛЮ}$ от значения 1,0 до 1,1 наблюдается характерный минимум, однако он настолько слабо выражен, что в практически можно положить $\alpha_{ЛЮ} = 1,05$ (что принято в дальнейших расчетах).

На рисунке 8 приведены результаты численного моделирования задержки воспламенения топлива на скоростных характеристиках в сравнении с экс-

периментальными данными при давлении впрыска топлива $p_{\text{ВВР}}$ равном 60, 90, 120 и 150 МПа, которые обобщены на рисунке 9. На рисунке 10 приведена расчетная нагрузочная характеристика для задержки воспламенения топлива в сравнении с экспериментальными данными. Видно, что соответствие экспериментальных и расчетных задержек воспламенения топлива удовлетворительное. Наибольший разброс экспериментальных точек имеет место на нагрузочной характеристике (Рисунок 10), поэтому результаты численного моделирования имеют большее отклонение от экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1 Рассмотрена проблема самовоспламенения топлива в поршневых двигателях в свете классической теории теплового взрыва (ТВ) – стационарной и нестационарной. Показано, что задача задержки воспламенения в дизеле относится к новому классу задач ТВ – самовоспламенения при адиабатическом сжатии.

2 Рассмотрена задача самовоспламенения в дизеле (всего газа как целого), как базовая для разработки уточненной математической модели для расчета периода индукции и определения макрокинетики дизельного топлива (ДТ).

3 Построена математическая модель динамики и разработана компьютерная программа развития дизельного факела, как тела переменной массы, для решения вопроса о месте локализации очага воспламенения – локального объема (ЛО) в камере сгорания дизеля.

4 Разработана математическая модель самовоспламенения ЛО в дизеле и создана компьютерная программа. По экспериментальным данным индицирования одноцилиндрового двигателя 1ЧН 13/14 ОАО «Алтайдизель», полученным с участием автора, путем численного решения обратной задачи определены константы макрокинетики ДТ и проведено сравнение расчетных и экспериментальных задержек воспламенения по скоростным характеристикам двигателя с разными степенями сжатия.

5 Развита математическая модель самовоспламенения ЛО в дизеле при использовании аккумуляторной системы топливоподачи типа CR и проведено численное моделирование для нахождения макрокинетических констант ДТ и зависимостей задержки воспламенения по скоростным и нагрузочным характеристикам одноцилиндрового двигателя 1ЧН 13/14, полученным на кафедре ДВС АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

6 Численное моделирование задержки воспламенения в дизеле на основе результатов стендовых исследований показало:

- режимы воспламенения ДТ в области богатой смеси (но не ниже $\alpha_{\text{ЛО}}=0,5$) реализуются при энергии активации E порядка 40 кДж/моль, при этом наблюдаются два минимума задержки воспламенения топлива - в богатой и бедной областях, а при E более 80 кДж/моль – один минимум в бедной области, что согласуется с данными А.Н. Воинова по воспламенению ДТ в бомбе при температурах 670-730 К;

- численные исследования показывают, что воспламенение в дизеле при начальных температурах в ЛО 670-730 К происходит с E порядка 90 кДж/моль в условиях оклостехиометрической смеси со сдвигом в бедную область (при $\alpha_{\text{ЛО}}$ от 1,05 до 1,25);

- точность расчетов задержки воспламенения топлива в дизеле по разработанным неэмпирическим моделям (с классической и аккумуляторной системами топливоподачи) приемлема для практического применения (с погрешностью до 8 %);

- поскольку результаты численного моделирования задержки воспламенения в дизеле не согласуются с данными зарубежных авторов о самовоспламенении в условиях очень богатой смеси, считаем, что проблема требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований с использованием детальной химической кинетики.

Практическая ценность работы. Полученные в работе расчетно-программные комплексы позволяют моделировать процессы самовоспламенения топлива в дизелях на стадии их проектирования и доводки. Результаты работы приняты к использованию в ОАО «ПО «Алтайский моторный завод», г. Барнаул.

Разработанные при выполнении работы математические модели и компьютерные программы используются в научно-исследовательских работах и учебном процессе в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова, г. Барнаул.

Работа выполнена при частичной поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Основные результаты опубликованы в работах:

статьи в изданиях, рекомендованных ВАК -

1 Матиевский, Д.Д. Динамика топливно-воздушного факела дизеля / Д.Д. Матиевский, П.К. Сеначин, В.В. Чертищев, **А.П. Сеначин** // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.*-2003.- № 3.- С. 78-84.

2 Сеначин, П.К. Моделирование топливно-воздушного факела дизеля / П.К. Сеначин, В.В. Чертищев, **А.П. Сеначин** // *Ползуновский вестник.* - 2006. - № 4. - С. 166-170.

3 **Сеначин, А.П.** Определение глобальной кинетики дизельного топлива численным решением обратной задачи динамики самовоспламенения в дизеле / А.П. Сеначин, А.А. Коржавин, П.К. Сеначин // *Ползуновский вестник.* - 2009. - № 4. - С. 155-165.

4 **Сеначин, А.П.** Задержка воспламенения топлива в дизеле с системой топливоподачи повышенного давления / А.П. Сеначин, П.К. Сеначин // *Известия Самарского научного центра РАН.*- 2011.- Том 13, № 1(2).- С. 479-486.

5 **Сеначин, А.П.** Проблема выбора энергии активации глобальной химической кинетики при численном моделировании самовоспламенения топлива в дизеле / А.П. Сеначин, В.А. Сеницын // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.*- 2011.- № 2.- С. 232-237.

публикации в других изданиях -

6 Залюбовский, М.Н. Обратная задача динамики самовоспламенения горючей смеси в адиабатической пушке со свободным поршнем / М.Н. Залюбовский, **А.П. Сеначин**, П.К. Сеначин // Исследования по баллистике и смежным вопросам механики: Сборник статей СРЦ РАН / Под ред. И.Б. Богоряда.- Томск: Изд-во Том. ун-та, 1997.- С. 65-70.

7 Сеначин, П.К. Самовоспламенение газа в адиабатической пушке и метод определения макрокинетики горючих смесей / П.К. Сеначин, О.Н. Стародубов, **А.П. Сеначин** // Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных сред. Гидродинам. структурно-неоднородных сред. Том 4 / Труды Всерос. научно-техн. конф. АлтГУ, 1996.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1997.- С. 84-90.

8 Сеначин, П.К. Численный эксперимент для обоснования метода определения макрокинетики в обратной задаче самовоспламенения в адиабатической пушке / П.К. Сеначин, Д.Д. Матиевский, **А.П. Сеначин** // Научно-техн. творчество студентов. Автотрактор. фак-т / Сборник тезисов докл. 55-й науч. конф.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1997.- С. 43-45.

9 **Сеначин, А.П.** Уравнения энергии в многозонной модели процесса горения в двигателе с искровым зажиганием / А.П. Сеначин, Д.Д. Матиевский, П.К. Сеначин // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС / Матер. VI Междунар. научно-практ. семинара.- Владимир: Изд-во ВладГУ, 1997.- С. 149-152.

10 Сеначин, П.К. Моделирование задержки воспламенения топлива в дизеле и газодизеле / П.К. Сеначин, А.Е. Свистула, Д.Д. Матиевский, **А.П. Сеначин** // 57-я научно-техническая конф. студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического ун-та. Автотракторный факультет.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1999.- С. 50-52.

11 Сеначин, П.К. Физические и химические аспекты задержки воспламенения топлива в газодизеле, разработанном с использованием новых методов материаловедения / П.К. Сеначин, А.Е. Свистула, Д.Д. Матиевский, **А.П. Сеначин** // *Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова.* - 1999.- №2. С. 39-40.

12 Сеначин, П.К. Моделирование процесса воспламенения топлива в газодизеле, работающем на природном газе / П.К. Сеначин, Ю.Г. Верстухин, А.Е. Свистула, **А.П. Сеначин** // Совершенствование быстроходных ДВС / Матер. междунар. научно-техн. конф., посвящ. 100-летию создания 1-го Рос. дизеля.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1999.- С. 26-27.

13 Куприенко, Г.В. Моделирование процессов самовоспламенения и сгорания смеси в дизеле и газодизеле / Г.В. Куприенко, П.К. Сеначин, Д.Д. Матиевский, **А.П. Сеначин** // Эволюция дефектных структур в конденсированных средах / Сборник тезисов докл. V междунар. школы-семинара / Под ред. М.Д. Старостенкова.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2000.- С. 74-75.

14 Куприенко, Г.В. Моделирование процессов самовоспламенения и горения смеси в дизеле / Г.В. Куприенко, П.К. Сеначин, Д.Д. Матиевский, **А.П. Сеначин** // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов / Матер. II Междунар. конф. / Под ред. А.Л. Новоселова.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2000.- С. 78-79.

15 Матиевский, Д.Д. Моделирование задержки воспламенения топлива в дизеле / Д.Д. Матиевский, П.К. Сеначин, **А.П. Сеначин** // *Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова*. - 2001. № 3.- С. 64-68.

16 Сеначин, П.К. Метод расчета исходного состава газовой смеси в дизеле / П.К. Сеначин, Д.Д. Матиевский, **А.П. Сеначин** // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: Сборник статей / Под ред. А.Л. Новоселова / Академия транспорта РФ.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2001.- С. 6-10.

17 Матиевский, Д.Д. Топливно-воздушный факел дизеля как тело переменной массы / Д.Д. Матиевский, Г.В. Куприенко, П.К. Сеначин, **А.П. Сеначин** // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: Труды Между. научно-практ. конф. / Южно-Уральский гос. ун-т.- Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2003.- С. 140-143.

18 **Сеначин, А.П.** Математическая модель для расчета задержки воспламенения топлива в дизеле / А.П. Сеначин, Т.А. Сеначина // Проблемы совершенствования энергетических установок: Сб. статей / Под ред. А.А. Мельберг / Российский союз научных и инженерных организаций, АлтГТУ им. И.И. Ползунова.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008.- С. 99-106.

19 **Сеначин, А.П.** Расчет задержки воспламенения топлива в дизеле на основе кинетики цетана и 1-метилнафталина / А.П. Сеначин, П.К. Сеначин // Экологические проблемы энергоустановок с тепловыми двигателями: Сб. статей / Под ред. А.А. Мельберг / Российский союз научных и инженерных организаций, АлтГТУ им. И.И. Ползунова.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008.- С. 94-105.

20 **Сеначин, А.П.** Моделирование задержки воспламенения топлива в дизеле с аккумуляторной системой впрыска типа CR / А.П. Сеначин, П.К. Сеначин // 5-е Луканинские чтения. Решение энергэкологических проблем в автотранспортном комплексе / Тезисы докл. Юбилейной научно-техн. конф., 14 марта 2011.-М.: МАДИ, 2011.-С. 142-144.

21 **Сеначин, А.П.** Моделирование воспламенения топлива в дизеле / А.П. Сеначин, П.К. Сеначин // *Вестник Сибирского отделения Академии военных наук*.- 2011.- № 10.- С. 362-369.

22 **Сеначин, А.П.** Расчет задержки воспламенения топлива в дизеле на основе уравнения глобальной химической кинетики (DIESEL-AUTOIGNITION) // А.П. Сеначин, П.К. Сеначин / Свид-во о ГР программы для ЭВМ № 2011611881 / ГОУ ВПО «Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ) (RU).- Заявка № 2011610139 от 11.01.2011.- Зарегистрировано в Реестре 28.02.2011.

23 Сеначин, П.К. Расчет динамики изотермического факела дизеля (TORCH-Izotermal) // П.К. Сеначин, С.А. Ульрих, **А.П. Сеначин**, В.В. Чертищев / Свид-во о ГР программы для ЭВМ № 2011619013 / ФГБОУ ВПО «Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ) (RU).- Заявка № 2011617184 от 27.09.2011.- Зарегистрировано в Реестре 18.11.2011.

Подписано в печать 18.01.2012. Формат 60×84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ № 31.

Отпечатано в типографии АлтГТУ, 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел.: (8-3852)29-09-48

Лицензия на полиграфическую деятельность ПЛД № 28-35 от 15.07.97 г.