

выполнение автомобилем нормативных требований ЕВРО-3 без применения штатной системы нейтрализации [3].

Применение рассмотренного способа энергопреобразования топлива в транспортных двигателях представляется, априори, весьма перспективным благодаря технической простоте его реализации. В качестве базового двигателя может быть использована любая серийная модель ДВС (в том числе и двигатель, находящийся в эксплуатации). Основным элементом системы термохимического преобразования топлива – каталитический реактор представляет собой простейшую конструкцию теплообменного аппарата, массовые и габаритные характеристики которого (идентичные серийному нейтрализатору) обеспечивают удобство его установки в выпускной системе двигателя.

Важным стимулом дальнейшего развития подобных систем является то, что они обуславливают возможность совокупного совершенствования характеристик ДВС по комплексу показателей. Их реализация, в частности, позволяет снизить расход топлива за счет утилизации энергии ОГ, совершенствовать процессы сгорания, улучшать экологические качества двигателя, обеспечивая при этом возможность замены традиционного нефтяного топлива альтернативным энергоносителем из возобновляемых, в том числе, биологических источников, способствуя, таким образом, решению проблемы ресурсосбережения.

#### **Литература:**

6. Носач В.Г. Методы повышения эффективности использования топлива в технологических процессах // Теплофизика и теплотехника. 1977. № 37. С.44-47.

7. Fomin V.M. and Makunin A.V. Thermo chemical recovery of heat contained in exhaust gases of internal combustion engines (a general approach to the problem of recovery of heat contained in exhaust gases) // Theoretical foundations of chemical engineering. Vol. 43. No5. 2009. P.p.834-840.

8. Фомин В.М., Каменев В.Ф., Хрипач Н.А. Повышение эффективности работы ДВС применением термохимической регенерации теплоты отработавших газов // Проблемы энергоаккумулирования и экологии в машиностроении. Сб.научн.тр. М.: Изд. ИНМАШ РАН, 2003. С. 156-170.

## **ПРОГРАММА ДИЗЕЛЬ-РК: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДВС**

**Кулешов А.С., Козлов А.В., Фадеев Ю.М., Барченко Ф.Б.**  
(МГТУ им. Н.Э.Баумана);

Разработка программ для моделирования и оптимизации рабочих процессов в ДВС является важной практической задачей, особенно в настоящее время, когда потребность совершенствования двигателей, снижения вредных выбросов становится особенно актуальной. Для решения задач оптимизации поршневых двигателей в МГТУ им. Н.Э.Баумана разработана программа ДИЗЕЛЬ-РК. Программа ДИЗЕЛЬ-РК принадлежит к классу термодинамических программ описывающих замкнутый цикл поршневого двигателя. Она предназначена для расчетов и оптимизации 2- и 4-тактных ДВС с любыми схемами наддува, позволяя рассчитывать следующие типы двигателей: дизели; бензиновые двигатели с искровым зажиганием; газовые с искровым зажиганием, включая предкамерные ДВС. Программа ДИЗЕЛЬ-РК поддерживает все типы продувки 2-тактных ДВС: прямоточно-

клапанную продувку; петлевую продувку; двигатели с противоположно движущимися поршнями (двигатели Юнкерса); ДВС с кривошипно-камерной продувкой.

Использование современных расчетных моделей с минимальным числом эмпирических коэффициентов позволяет моделировать рабочий процесс двигателей с высокой точностью. Величины этих эмпирических коэффициентов легко подбираются и являются строго постоянными во всем диапазоне работы ДВС, включая режимы малой мощности и холостой ход. Типичная область применения программы:

- Расчет и оптимизация характеристик двигателей.
- Расчет и оптимизация расхода топлива.
- Оптимизация сгорания и выбросов вредных веществ.
- Оценка детонации.
- Оптимизация фаз газораспределения.
- Оптимизация системы рециркуляции отработавших газов.
- Оптимальный подбор агрегатов наддува и системы управления наддувом.
- Перевод дизелей на газ и биотопливо.

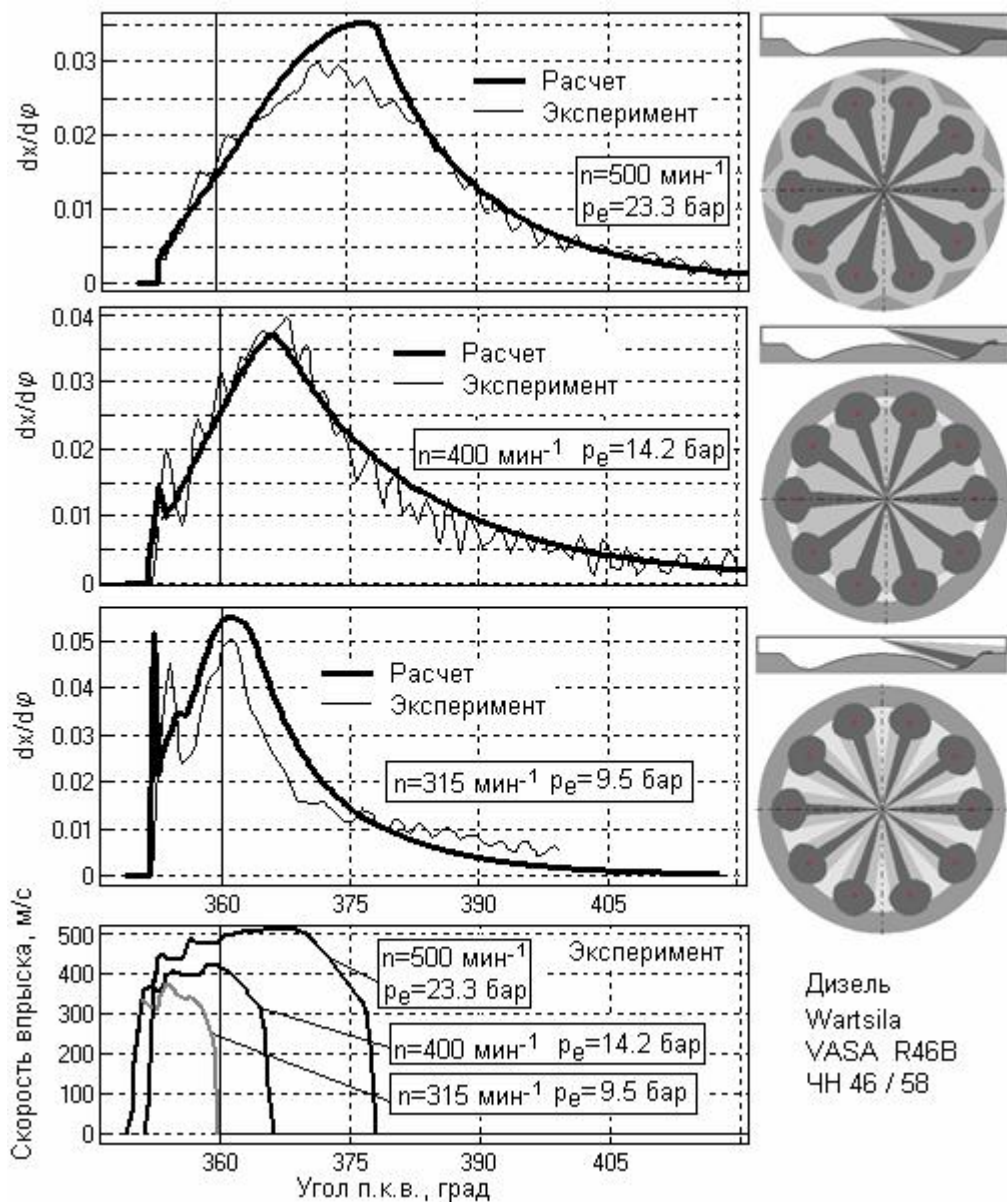


Рис.1. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых скорости тепловыделения судового дизеля на разных режимах.

Параметры газа в цилиндрах и коллекторах двигателей определяются методом пошагового решения систем разностных уравнений баланса массы, энергии и уравнения состояния записанных для открытой термодинамической системы [1].

Модель газообмена учитывает нестационарное течение газа в каналах и окнах, особенности конструкции каналов и окон, а также преобразователя импульсов. При расчете продувки в 2-тактных двигателях используется комбинация гипотез о послойном вытеснении, полном перемешивании и замыкании, что позволяет проводить оптимизацию конфигурации впускных и выпускных окон двухтактных ДВС.

ДИЗЕЛЬ-РК позволяет исследовать двигатели с двухступенчатым наддувом, системой Гипербар, а также согласовывать характеристики турбин и компрессоров, заданных в формате SAE, с поршневым ДВС.

Многослойная модель сгорания, построенная на основе расчета развития дизельной струи [2-6] учитывает:

- форму камеры в поршне: любая форма КС может быть заложена в расчет и сохранена в базе данных, которая уже содержит наиболее популярные конструкции;
- динамику развития и профиль вихря в КС;
- расположение форсунки, а также количество, диаметр и направления распыливающих отверстий;
- форму характеристики впрыска, включая многоразовый впрыск;
- диаметр капель и динамику развития топливных струй, включая их взаимодействие со стенками и между собой.

Модель смесеобразования и сгорания обеспечивает высокую точность расчета на разных режимах, рис. 1 и позволяет оптимизировать форму камеры сгорания, параметры топливной системы (число, диаметр и направление топливных струй), а также стратегию многоразового впрыска и алгоритм управления системой Common Rail совместно с системой рециркуляции ОГ во всем диапазоне работы.

Включенная в комплекс программа визуализации развития струй позволяет представлять в виде фильма результаты расчета взаимодействия струй с воздушным вихрем и стенками, а также взаимодействия струй между собой во время процесса топливоподачи, рис. 2. Эта функция помогает проектировать камеру сгорания и выбирать оптимальными диаметр, количество и ориентацию сопловых отверстий, учитывая продолжительность впрыска и интенсивность вихря.

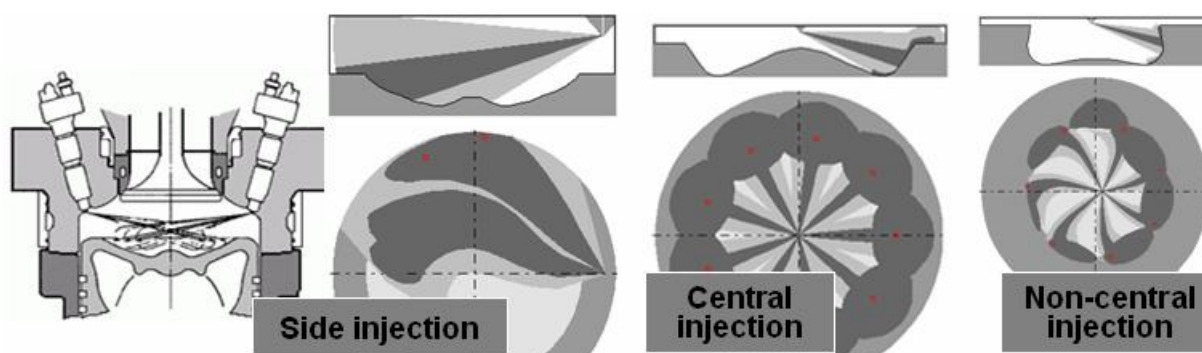


Рис. 2. Визуализация смесеобразования при разных способах ее организации.

В программе реализованы две модели образования оксидов азота: механизм Зельдовича используемый для традиционной организации рабочего процесса дизеля и Детальный Кинетический Механизм (199 реакций для 33 компонентов) используемый для дизелей с многоразовым впрыском и большой рециркуляцией ОГ.

Специальный интерфейс для задания стратегии многоразового впрыска и математическая модель расчета периода задержки самовоспламенения на основе расчета детальной химической кинетики предпламенных реакций с использованием механизма разработанного Lawrence Livermore National Laboratory (1540 реакций между 160 компонентами) [5] позволяют исследовать и оптимизировать PCCI процесс (Premixed Charge Compression Ignition) с очень большим опережением впрыска, когда часть топлива сгорает по механизму низкотемпературного окисления (LTC – Low Temperature Combustion), рис. 3. Изображения развития струй на рис. 3. соответствуют моментам окончания впрыска каждой порции топлива.

В связи с возросшей актуальностью применения альтернативных топлив для работы ДВС, алгоритмы расчета сгорания были расширены для возможности расчета смесеобразования и сгорания биодизельного топлива [7] и расчета газовых двигателей работающих на газе произвольного состава, включая биогаз и сингаз. Интерфейс программы позволяет указывать объемные доли составляющих газовой смеси подающейся в двигатель, свойства же смеси рассчитываются автоматически.

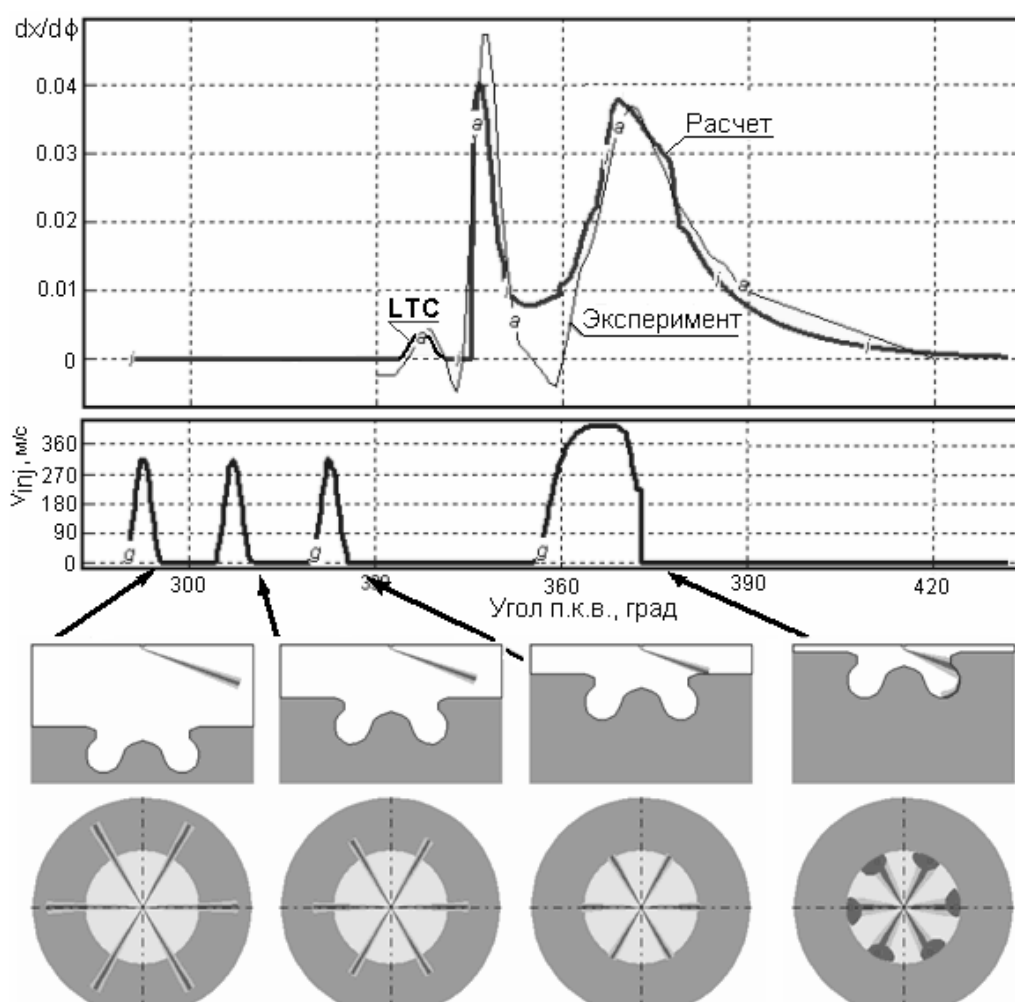


Рис. 3. Результаты расчета скорости тепловыделения  $dx/d\phi$  процесса PCCI в дизеле Peugeot DW10.

Программа имеет специальные функции для моделирования работы двигателя оснащенного системой управления клапанами газораспределения. Можно осуществлять оптимизацию управления фазами газообмена на каждом из режимов работы, включая управление механизмом удержания клапана, рис. 4.

При решении задач связанных с одновременной оптимизацией целого ряда параметров, формирующих рабочий процесс ДВС (степень сжатия, опережение

впрыска, диаметр, число и направленность сопловых отверстий, форма КС, фазы газораспределения, степень рециркуляции ОГ, параметры наддува и т.д.) трудно сформировать численный эксперимент и проанализировать его результаты из-за подчас большого числа исследуемых факторов.

Поэтому, для выполнения оптимизационных исследований программа ДИЗЕЛЬ-РК имеет встроенные процедуры многомерной оптимизации, которые включают 14 методов нелинейного программирования, а также процедуры одномерного и двумерного параметрического исследования (сканирования). Средства оптимизации позволяют радикально увеличить эффективность численных экспериментов направленных на поиск путей совершенствования ДВС. Благодаря высокому быстродействию ядра программы, оптимизация выполняется очень быстро и без больших затрат.

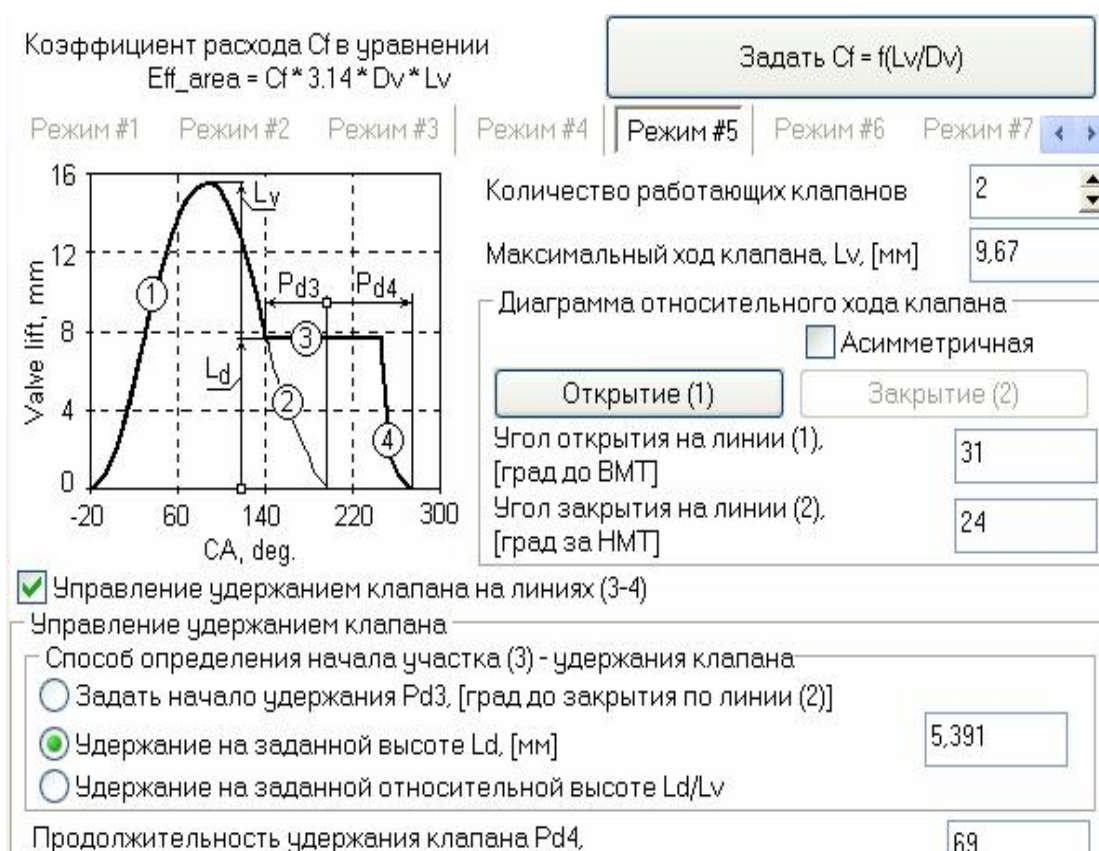


Рис. 4. Фрагмент интерфейса программы для исследования и оптимизации механизма управления клапанами газораспределения.

Программа имеет развитый пользовательский интерфейс и контекстную систему помощи, ядро программы ДИЗЕЛЬ-РК может запускаться под управлением внешней программы пользователя, для чего используются текстовые файлы входных и выходных данных. Демонстрационная учебная версия программы ДИЗЕЛЬ-РК работает через Интернет и может быть загружена с сайта [www.diesel-rk.bmstu.ru](http://www.diesel-rk.bmstu.ru)

#### Литература:

1. Мизернюк Г.Н., Кулешов А.С. Методика расчета рабочего процесса КДВС на ЭВМ // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1986. – № 6. – С. 97-101.
2. Кулешов А.С. Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. 1. Расчет распределения топлива в струе // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2007. – Специальный выпуск Двигатели внутреннего сгорания. – С. 18 – 31.

3. Кулешов А.С. Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. 2. Расчет скорости тепловыделения при многоразовом впрыске // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2007. – Специальный выпуск Двигатели внутреннего сгорания. – С. 32 – 45.
4. Процессы в перспективных дизелях. Под ред. А.Ф. Шеховцова. – Х.: Изд-во «Основа» при Харьк. Ун-те, 1992. - 352 с.
5. A.S. Kuleshov, A.V. Kozlov, K. Mahkamov Self-Ignition Delay Prediction in PCCI Direct Injection Diesel Engines Using Multi-Zone Spray Combustion Model and Detailed Chemistry // SAE Pap. No. 2010-01-1960, 2010, P. 18.
6. Kuleshov A.S. Multi-Zone DI Diesel Spray Combustion Model for Thermodynamic Simulation of Engine with PCCI and High EGR Level // SAE Tech. Pap. Ser. – 2009. – N 2009-01-1956. – P. 21.
7. Kuleshov A., Mahkamov K. Multi-zone diesel fuel spray combustion model for the simulation of a diesel engine running on biofuel // Proc. Mechanical Engineers. – 2008. – Vol. 222, Part A, Journal of Power and Energy. – P. 309 - 321.

## РАСПЫЛИВАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ИЗОПЕРИМЕТРИЧЕСКИЕ НЕРАВЕНСТВА

**Антониук П. Н.** (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

**1. Распределения капель.** Рассматривается задача о быстром распаде трехмерной сплошной среды на большое число осколков. Распад может быть результатом взрыва твердого тела, либо результатом распыливания жидкости форсункой. Осколки жидкости – это капли. Немецкие инженеры Пауль Отто Розин (1890-1967) и Эрих Раммлер (1901-1986) предложили в 1933 году эмпирическую формулу для функции распределения по размерам капель распыливаемой жидкости. Аналогичная эмпирическая формула, которую предложил в 1939 году шведский инженер Эрнст Яльмар Валодди Вейбулл (1887-1979), часто используется в качестве функции распределения по размерам осколков твердого тела.

В 2007 году автор настоящего сообщения дал теоретический вывод [1,2] универсальной функции распределения по размерам – универсальной в том смысле, что она одновременно описывает распределения и капель, и осколков. Согласно выводу, плотность распределения вероятностей радиусов капель задается формулой

$$f(R) = \frac{8}{3\sqrt{p}a^5} R^4 e^{-R^2/a^2},$$

где  $R$  – радиус капель,  $a$  – параметр распределения (характерный радиус капель). Средний радиус (математическое ожидание радиуса) и мода радиуса (абсцисса максимума плотности) соответственно равны

$$\frac{8}{3\sqrt{p}}a \text{ и } \sqrt{2}a,$$

причем средний радиус больше моды. Функция распределения  $F(R)$  равна определенному интегралу от функции плотности в пределах от минус бесконечности до текущего значения  $R$ . Функция  $F(R)$  определяет вероятность того, что радиус капли меньше  $R$ . Эта вероятность пропорциональна числу молекул, образующих такие капли.