

- при самовоспламенении углеводородных смесей в ДВС с искровым зажиганием динамика температуры перед фронтом пламени имеет три точки перегиба по причине двустадийности процесса;
- при самовоспламенении смесей изооктана и н-гептана в ДВС с искровым зажиганием концентрация изооктанового перекисного радикала  $C_8H_{17}O_2$  последовательно проходит четко выраженные максимум и минимум на первой (холоднопламенной) стадии процесса, а на второй стадии (перехода к объемному взрыву или детонации) стремится к нулю, что может быть использовано при численном моделировании процесса;
- предложено уточненное значение дифференциального критерия самовоспламенения вида  $d \ln T_u / d \ln p$  - для численных расчетов процессов горения в ДВС с искровым зажиганием за критерий самовоспламенения можно положить достижение его значения порядка 20-30.

**Литература** (продолжение, начало нумерации в предыдущей статье):

12. Жгутова, В.И. Моделирование горения смеси в ДВС с искровым зажиганием с образованием токсичных веществ в рамках многозонной модели / В.И. Жгутова, М.Ю. Свердлов, Д.Д. Матиевский, П.К. Сеначин // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова.- 2000.- № 2.- С. 67-76.
13. Варнац Ю. Моделирование процессов горения с помощью детальной кинетики элементарных реакций // Химическая физика.- 1994.- Т. 13, № 2.- С.3-16.
14. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль.- Томск: МП «Раско», 1991.- 272 с.
15. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.- М.: Наука, 1972.- 720 с.
16. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. / Ред. В.П. Глушко, Л.В. Гурвиц и др.- Т.2. Кн.2. / Л.В. Гурвиц, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др.- М.: Наука, 1979.- 344 с.
17. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. акад. И.К. Киикоина / В.Г. Аверин, Б.А. Аронзон, Н.С. Бабаев и др.- М.: Атомиздат, 1976.- 1008 с.
18. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид., Т. Шервуд / Пер. с англ. под ред. В.Б. Когана.- Л.: Изд-во «Химия», 1971.- 704 с.

## **РАЦИОНАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ В ГАЗОВОЗДУШНОМ ТРАКТЕ ДВС В КВАЗИОДНОМЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ**

**Черноусов А.А.** (Уфимский государственный авиационный технический университет)

В настоящее время показатели ДВС рассчитываются посредством численного моделирования нестационарного течения *рабочего тела* (РТ) в *газовоздушном тракте* (ГВТ). Рациональной является «сквозная» постановка задачи, т. е. моделирование зависящих от времени характеристик потока во всем объеме ГВТ ДВС. Процессы при этом описываются как моделями пространственно трехмерного (3D) течения рабочего тела, так и более огрубленными *квазиодномерными* (1D) моделями. В основе моделей обоих классов лежат законы сохранения для нестационарного потока РТ как реагирующей смеси. Уравнения конкретных моделей получаются из законов сохранения применением тех или иных замыкающих (модельных) гипотез и соотношений.

Законы сохранения для 3D, замкнутые при минимуме допущений (при детальном учете состава и химической кинетики, адекватных уравнениях состояния и моделях молекулярного переноса и излучения) дают *детальную* 3D модель, адекватно описывающую сколь угодно сложный процесс в ГВТ ДВС (включая многофазное течение). Однако для практических расчетов наиболее детальная модель неприменима – прежде всего, ввиду многомасштабности учитываемых явлений и следующих отсюда непомерных требований к вычислительным ресурсам. Уравнения применимых на практике 3D моделей выводятся в дополнительном допущении о том, что описываются не актуальные, а осредненные или же «отфильтрованные» (с шириной фильтра порядка размера расчетной ячейки) распределения характеристик потока. Для замыкания таких уравнений привлекаются гипотезы и модельные соотношения, выражающие вклад турбулентных пульсаций в перенос и физико-химические превращения и т. п. Неполная адекватность гипотез и неуниверсальность модельных соотношений приводит при решении конкретной задачи к заметным отклонениям, которые возрастают при использовании грубой и/или некачественной расчетной сетки. В итоге применяемые 3D модели процессов в ГВТ требуют значительных вычислительных затрат, отнюдь не гарантируя удовлетворяющую расчетчиков точность численных решений. Эти обстоятельства, а также сложность параметризации модели объекта (размеров элементов ГВТ и т. д.) делает практически невозможной глобальную многопараметрическую оптимизацию (по крайней мере, в оперативном режиме).

Напротив, «сквозной» расчет по 1D модели – действенный инструмент оперативного анализа процессов и автоматизированного параметрического синтеза оптимальных конструкций ГВТ ДВС. Нетребовательность к ресурсам ЭВМ и простота параметризации (как самой модели, так и исходных данных задачи) облегчает решение прямых и обратных задач, включая мероприятия по адаптации модели к объекту (в методиках «полунатурного» моделирования).

Рациональной основой уравнений 1D моделей процессов в ГВТ ДВС также служит система законов сохранения для реагирующей смеси. Течение описывается как «квазиодномерное» в допущении о пространственно одномерных распределениях характеристик потока в элементах расчетной схемы ГВТ вида *каналов* (гладких в смысле  $dF/dx$  и  $dP/dx$ ) или же однородных («нульмерных») распределениях в элементах вида *емкостей* (строго говоря – в одной или нескольких зонах внутри таких элементов). Принципиальная невозможность описывать в этом приближении существенные аспекты процесса заставляет привлекать для замыкания уравнений модели (на граничных сечениях в потоке и для ряда процессов в элементах ГВТ) эмпирические *характеристики*. Рациональный путь их получения («идентификации») – применение (справедливых в контексте исходных гипотез) методик натурального и вычислительного эксперимента и представление зависимостями в обобщенных переменных. В пределе уравнения 1D модели могут быть замкнуты только соотношениями и характеристиками, следующими из исходного допущения об одно- или «нуль»-мерности потока (исключая оправданные линеаризации соотношений и неучет «вырожденных» обобщенных переменных). Такую модель процессов в ГВТ в квазиодномерном приближении назовем *рациональной*.

Рациональность модели – необходимое условие высокой достоверности результатов моделирования в задачах, для которых исходное огрубляющее допущение несущественно (процессы в трубопроводных системах из относительно компактных емкостей и протяженных трубопроводов), но не достаточное для получения столь же точных результатов моделирования в общем случае. Однако если мо-

дель рациональна (и методики идентификации характеристик элементов ГВТ достаточно совершенны в указанном смысле), то допущение о квазиодномерности – превалирующий фактор, «ответственный» за отклонения результатов моделирования.

Исходные уравнения модели для элементов ГВТ вида *каналов* суть

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_k F}{\partial t} + \frac{\partial \rho_k u F}{\partial x} = 0, \quad k = 1, \dots, K, \\ \frac{\partial \rho u F}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) F}{\partial x} = \tau_w \Pi + p \frac{dF}{dx}, \\ \frac{\partial \rho E F}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E + p u) F}{\partial x} = q_w \Pi, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho_k(x, t)$ ,  $k = 1, \dots, K$  – парциальные плотности компонентов, кг/м<sup>3</sup>;  $u(x, t)$  – скорость потока смеси, м/с;  $E(x, t) = e + 0,5u^2$  – удельная полная энергия смеси, Дж/кг;  $p(x, t)$  – давление, Па;  $\tau_w$  – касательное напряжение,

Па;  $q_w$  – плотность теплового потока на твердой стенке, Вт/м<sup>2</sup>;  $F = F(x)$  – поперечное сечение, м<sup>2</sup>;  $\Pi = \Pi(x)$  – периметр канала, м. Величины  $\tau_w$  и  $q_w$  заданы полуэмпирическими выражениями для квазистационарного потока.

Уравнения модели элемента вида *емкостей* (или зон в емкостях):

$$\begin{cases} \frac{dm_k}{dt} = \sum_{j=1}^J (GY_k)_j + \left( \frac{dm_k}{dt} \right)_{\text{сг}} = 0, \quad k = 1, \dots, K, \\ \frac{d(me)}{dt} = \sum_{j=1}^J (Gh^*)_j + \left( \frac{dQ}{dt} \right)_w + \left( \frac{dH}{dt} \right)_{\text{топл}} - p \frac{dV}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) замыкаются, во-первых, термическими и калорическими уравнениями состояния для многокомпонентных смесей. В работе принято двухкомпонентное представление:  $K = 2$ , оба компонента РТ задаются свойствами воздуха (*свежего заряда*, СЗ) и «чистых» *продуктов сгорания* (ПС), образующих смесь со свойствами смеси идеальных газов с переменными теплоемкостями.

Для случая РК ДВС тепловой поток в стенку  $(dQ/dt)_w$  в (2) вычислялся по коэффициенту теплоотдачи, заданному формулой Вошни, а источниковые члены массы СЗ и ПС – через эмпирическую зависимость для массовой скорости выгорания. Для ДВС с внешним смесеобразованием учитывается подвод массы и энтальпии с впрыскиваемым топливом:  $(dH/dt)_{\text{топл}} = [d(Gh^*)/dt]_{\text{топл}} \geq 0$ .

Течение в рабочей камере при продувке (в части перемешивания и потерь СЗ) описано в двухзонном приближении. Условием замыкания служит продувочная характеристика. Для ее идентификации предложена и реализована методика проведения и обработки (без учета  $\theta = T_{\text{сз}}/T_{\text{пс}}$  и  $Re$ ) результатов расчета пространственного течения в упрощенной постановке.

Нетрудно показать, что в качестве условий на *граничных сечениях* (ГС) – сопряжениях *каналов* друг с другом и с *емкостями* – из (1) следуют соотношения для теплоизолированного квазистационарного потока смеси. Так, простое (т. е. без разделения потока) ГС описывается соотношениями для местного сопротивления – условиями непрерывности потоков массы и энергии и (эмпирической в общем случае) зависимостью для коэффициента сохранения полного давления в потоке сжимаемого газа [1]. Обобщенные условия непрерывности потоков массы и энергии заложены в основу систем соотношений на ГС, задающих условия совместности и для случаев разветвлений, а также компрессионных или расширительных машин.

Замыкающие соотношения на ГС используют приближение совершенного газа, т. е. линеаризацию уравнений состояния РТ. Не учитывается и зависимость характеристик ГС от числа  $Re$ . Оба допущения не являются сильными для условий в ГВТ ДВС и потому не порочат описываемую здесь 1D модель в качестве рациональной. Разработанные методики идентификации характеристик ГС и продувочной характеристики рабочей камеры вычислительным экспериментом используют данные приближения.

Модель реализована в специальном пакете прикладных программ [2]. Численное решение как системы (2), так и системы (1) *уравнений в частных производных* (УЧП) проводится консервативным методом второго порядка по времени, с кусочно-параболической аппроксимацией (1) по  $x$ . На одномерных тестовых задачах с разрывами решения показана сходимость и эффективность предложенных для УЧП (1) методов «сквозного» счета.

Соотношения на характеристических кривых системы УЧП (1) при  $F = \text{const}$ ,  $c_p/c_v = \text{const}$  учтены на ГС, сопрягающих канал с каналом или с емкостью для поиска решения обобщенной задачи о распаде разрыва на ГС.

В экспериментальной части сравнивались измеренные и рассчитанные регистрограммы давления в сечениях трубопровода безмоторной одноцикловой установки с генератором волн конечной амплитуды [3]. Сравнение показало высокую точность воспроизведения расчетом амплитуд и профилей волн давления в трубопроводе для интервала времени, достаточного для нескольких прохождений прямой и обратной волны: относительное отклонение по амплитуде – до 2% (рис.1) для неразветвленного трубопровода [4] и до 8% – для содержащего разветвление вида тройника [5]. Заметно бóльшие отклонения для трубопровода с тройником вызваны предположительно несовершенством примененной методики идентификации нестационарной характеристики тройника.

Выполнены эксперименты и на полноразмерных ДВС на стенде. Найдены отклонения расчетных значений интегральных показателей газообмена  $G_B(n)$  и рабочего процесса  $N_i(n)$  по ВСХ от измеренных значений, а также отклонения индикаторных диаграмм для трех экспериментальных ДВС: 2-тактных – дизельного двигателя ЯАЗ-М204А и бензинового двигателя АПД-800, а также 4-тактного дизеля Yanmar-L100V (рис.2).

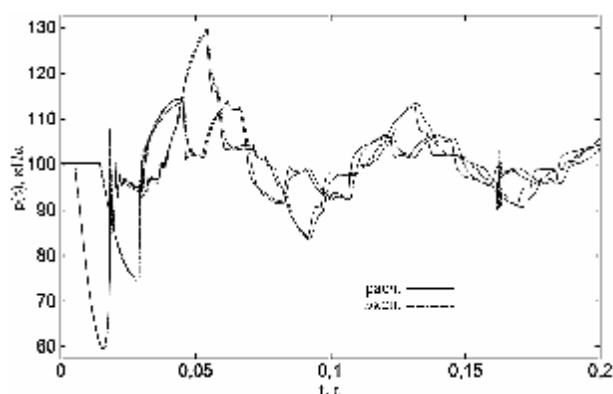


Рис.1. Расчетная и измеренная регистрограммы давления для эксперимента с прохождением волн по трубопроводу с диафрагмой.

В случае 2-тактных двигателей в исследованном диапазоне оборотов отмечаются отклонения расчетных величин по ВСХ – до +24 % от  $N_i$  для ЯАЗ-М204А и до +43 % от  $G_B$  для АПД-800; такие результаты нельзя признать удовлетворительными.

Для четырехтактного дизельного двигателя Yanmar-L100V найденные отклонения как  $G_B$  так и  $N_i$  укладываются в диапазон 9 %.

Таким образом, в ходе исследования сформулирована квазиодномерная модель течения в ГВ, предельно близкая к рациональной, и определены да-

ваемые ею отклонения, как для волновых движений газа в протяженных трубопроводах, так и для практически важных схем ГВТ ДВС.

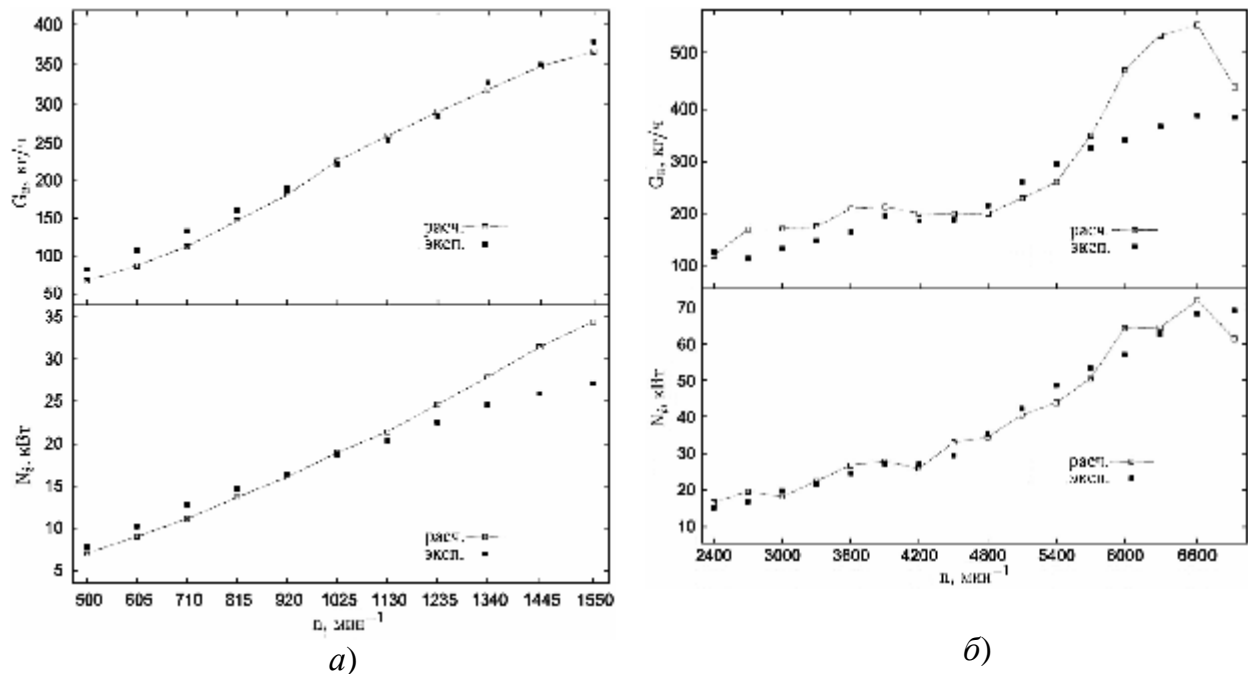


Рис.2. Графики расчетных и измеренных значений расхода воздуха  $N_i(n)$  и индикаторной мощности и  $G_B(n)$  по ВСХ для исследовательских двигателей на базе а) ЯА3-М204А; б) АПД-800.

### Литература:

4. Рудой Б.П. Прикладная нестационарная газовая динамика: учеб. пособие / Уфа: УГАТУ, 1988. – 184 с.
5. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 201063235. Программа для ЭВМ Nonserpower Lab 1D для численного моделирования газообмена и рабочего процесса ДВС / А.А. Черноусов. М.: Роспатент, 2010. Зарег. 17.05.2010 г.
6. Гришин Ю.А., Рудой Б.П. Установка для генерирования уединенных волн конечной амплитуды // Вопр. теории и расч. рабочих процессов тепл. дв-лей: межв. научн. сб. Уфа: УАИ, 1976. Вып. 1. С. 53–55.
7. Черноусов А.А. О достоверности результатов моделирования движения волн конечной амплитуды в длинном неразветвленном трубопроводе с местными сопротивлениями в одномерном приближении // Вестник УГАТУ, Уфа: УГАТУ, 2009. Т. 12. № 1(30). С. 197–210.
8. Черноусов А.А. Экспериментальная проверка модели взаимодействия волн конечной амплитуды с разветвлением канала // Ползуновский Вестник. Барнаул: АлтГТУ, 2006. № 4. С. 182–186.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ТОПЛИВА

Фомин В.М. (МГТУ «МАМИ»)

Исходя из основных положений химической термодинамики, можно утверждать, что исходное топливо путем термохимических превращений (конверсии) может быть преобразовано в новое (искусственное) топливо, переход химической