

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ И РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МАЛОТОКСИЧНОГО ДИЗЕЛЯ

Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Кулешов А.С. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия)

В связи с ужесточением нормативов, ограничивающих выбросы вредных веществ, требованиями к экономичности и удельной мощности двигателей, значительно возрастают объемы НИР и ОКР при их доводке. В этой связи перспектива компьютерной оптимизации рабочего процесса и топливной аппаратуры (ТА) двигателей, особенно дизелей, имеет особую актуальность.

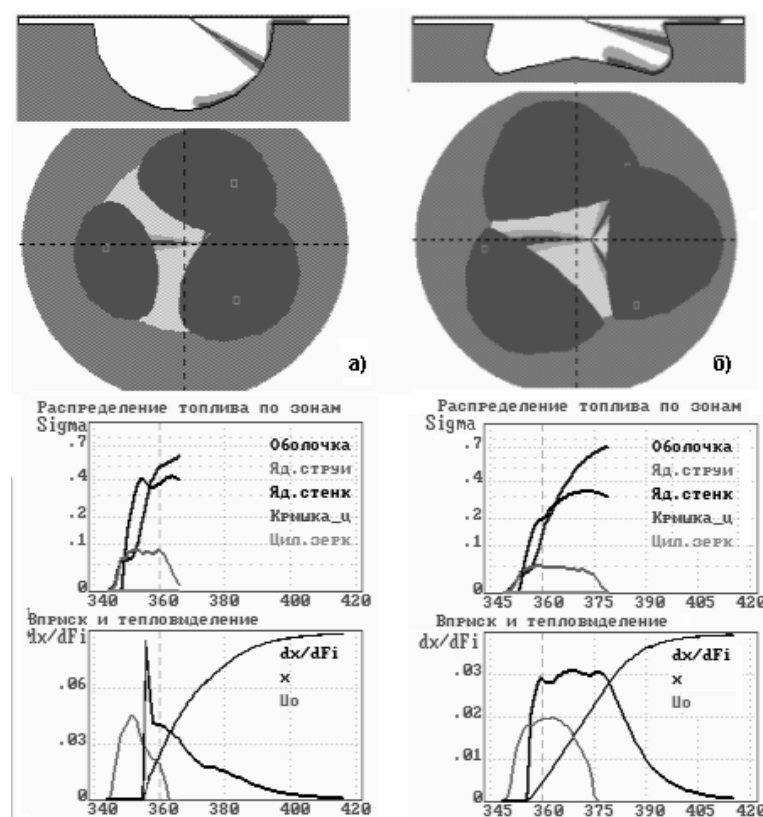
В отличие от ряда конструкторских задач, оптимизация камеры сгорания, характеристики впрыска, количества, диаметра и ориентации сопел распылителя на сегодняшний день решается экспериментально. Причиной этому является отсутствие в широкой практике адекватного программного обеспечения. Интенсивное развитие Computational Fluid Dynamic (CFD), реализующей трехмерное моделирование течения газа и впрыскиваемого топлива, пока не дает практически ощутимых результатов ввиду огромной трудоемкости расчетов (сотни часов расчетов на мощных компьютерах и до 5...15 дней подготовки данных) и недостаточной достоверности результатов. Говорить об использовании этих программ для инженерных оптимизационных расчетов тем более преждевременно.

Наиболее популярные программы BOOST (AVL), WAVE (Ricardo), GT-Power (Gamma Technologies), использующие термодинамический подход ограничены в возможностях оптимизации камеры сгорания и параметров ТА и при этом дороги для российских потребителей (стоимость их инсталляции на 1 рабочем месте – 50...85 тысяч долл). Ниже описана разработка МГТУ им. Н.Э.Баумана, доведенная до коммерческого исполнения – программный комплекс (ПК) ДИЗЕЛЬ-2/4т.

Для расчета смесеобразования и сгорания в ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т реализован новый метод, основанный на уравнениях, полученные профессором Н.Ф. Разлейцевым в начале 90-х годов. Этот метод, доработанный А.С. Кулешовым, позволяет рассчитать движение струй впрыскиваемого топлива в завихренном заряде камеры сгорания, развитие пристеночных потоков топлива в зависимости от условий соударения топливных струй со стенками и переносного влияния вихря, взаимодействие пристеночных потоков между собой. Метод обеспечивает хорошее совпадение с результатами экспериментов, не требует специальной настройки и позволяет исследовать влияние на рабочий процесс различных параметров: формы камеры сгорания, направленности топливных струй, интенсивности вихря, диаметра и числа сопловых отверстий форсунки, характеристики впрыска. Модель сгорания дополнена методикой расчета эмиссии окислов азота и сажи. Методика прошла проверку на двигателях разной размерности, быстроходности и назначения. В состав ПК включена программа визуализации процесса смесеобразования, отображающая в виде мультфильма результаты расчета развития топливных струй и образованных струями пристеночных потоков. Ее использование облегчает проектирование камеры сгорания и выбор направления топливных струй в обеих плоскостях с учетом интенсивности вихревого движения заряда. Высокая скорость расчета позволяет применять ПК для решения оптимизационных задач с использованием процедур нелинейного

программирования, что радикальным образом увеличивает эффективность работы, снижая затраты времени на проведение численных экспериментов в десятки раз. ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т поддерживает работу с удаленными пользователями через ИНТЕРНЕТ. Описание ПК с инструкцией получения удаленного доступа приведено по адресу: <http://www.bmstu.ru/facult/em/em2/diesel/d11rus>.

Рис.1. иллюстрирует оптимизацию параметров ТА и камеры сгорания для снижения вредных выбросов и расхода топлива безнаддувного дизеля.



Варианты КС и ТА:
а) исходная КС, распылители $3 \times 0,3 \times 120^\circ$; б) оптимизир. КС, $3 \times 0,22 \times 150^\circ$.

Вариант:	а	б
Степ. сж.	16	19.5
Опер., гр.	16	11.5
Вихр. ч.	3.1	2.98
$P_{впр}$, бар	520	665
d_{32} , мкм	30	19
b_e , г/кВтч		-1,2%
NO_x , г/м ³		-43%
Hartridge		+4%

Рис. 1. Результаты оптимизации камеры сгорания безнаддувного дизеля и ТА

Оптимизация рабочего процесса - единственно научно обоснованный способ формулировки требований к важнейшим показателям впрыска и, соответственно, ТА. К их числу относятся число и диаметр сопел, давление и характеристика впрыска, режимные характеристики и др. После дополнения требований, выбора типа и основных конструктивных решений исходного варианта (нескольких различных вариантов) ТА, в целях исключения длительных натурных испытаний предлагается ее компьютерная дискретная и параметрическая оптимизация. Для этой цели используется ПК ВПРЫСК.

Первой особенностью ПК ВПРЫСК является его универсальность относительно типа и особенностей ТА дизелей и двигателей непосредственного впрыска бензина. Он позволяет работать с аккумуляторными системами, электроуправляемыми форсунками, мультипликаторами давления, рядными, распределительными, роторными ТНВД, с кулачковым, гидравлическим или иным приводом. Форсунки могут быть любого типа, с гидроимпульсным запирающим, двумя пружинами. ТА может включать дополнительные клапаны, золотники, жиклеры, аккумуляторы, трубопроводы, фильтры и т.д.

При анализе сложных систем пользователь испытывает трудности интерпретации их схем и идентификации получаемых результатов по элементам ТА. Поэтому помимо “словесного портрета” используется графический редактор, в котором пользователь из имеющихся примитивов рисует понятную ему схему ТА, устанавливает связи между элементами (рис.2). Предусмотрены типовые редакционные манипуляции с элементами и файлами. Программы обработки распознают образы, формируют матрицу связей, расчетную схему, проверяют корректность и доступность для расчета созданной схемы. Аналогичные возможности имеют ПК фирм Ricardo (Finject), AVL (Hydsim) R.Bosch, но только в ПК R.Bosch и МГТУ пользователь без ограничения возможностей анализа, оперирует с укрупненными элементами (плунжерная пара, гидропривод, клапан и т.д.), а не с элементарными (зазор, щель, конус, окно и т.п.). Это облегчает и ускоряет работу пользователя.

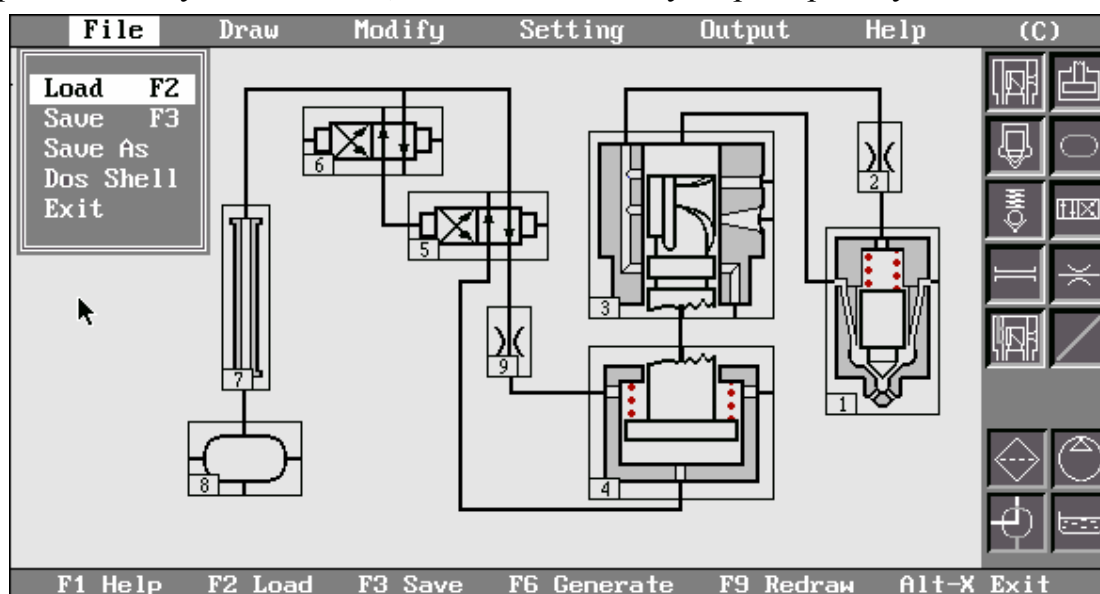


Рис.2. Окно графического редактора для генерирования схемы ТА

Математическая модель, положенная в основу ПК, базируется как на апробированных подходах, так и на результатах оригинальных фундаментальных исследований, посвященным процессам в современной ТА. ПК отличается от известных максимальным учетом существенных для топливоподачи явлений и процессов. Течение в трубопроводе рассчитывается в зависимости от целей работы с использованием решения Д'Аламбера или линеаризованного метода С.К.Годунова (т.е. с учетом переменности скорости звука). Только в ПК ВПРЫСК достоверно рассчитывается нестационарное сопротивление трубопроводов, что ныне стало актуально и для ТА быстроходных и среднеоборотных двигателей. Корректно учитывается неизотермичность процесса с соответствующим изменением свойств топлива. Используются уточненные соотношения для описания свойств однофазного и двухфазного состояния топлива, включая и нигде математически не описанный гистерезис двухфазного состояния. В уравнениях граничных условий использованы уравнения массового баланса, впервые - с формулами истечения сжимаемой жидкости. Расчет топливоподачи ведется как сопряженный с расчетом привода ТНВД, как многомассовой крутильной системы с учетом нелинейных жесткостей и характеристик демпфирования, люфтов, наличия ведомой ветви ремней (цепей) и т.д. В ПК заложены воз-

возможности анализа ТА с электроприводом клапанов (золотников), электрогидроприводом плунжера, современными кулачками и расчетом нагрузок. Устойчиво рассчитываются все эксплуатационные режимы двигателя, включая пуск и холостой ход, переходные режимы, а также многофазный, дробящий впрыск, подвпрыск.

ПК разрабатывался как инструмент конструктора, имеет дружественный пользовательский интерфейс, удобную форму редактирования данных с их быстрым и детальным анализом их достоверности, представление результатов в табличном виде, плоской, квазитрехмерной и трехмерной графики, совмещение семейств кривых. Встроенный аппарат оптимизации на базе методов нелинейного программирования с ограничениями предлагает к использованию 14 различных способов. ПК совместим с ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т. Описание ПК приведено на сайте: <http://energy.power.bmstu.ru/inject/i00rus.htm>

Приложение. Сравнение ПК ВПРЫСК с передовыми мировыми аналогами

Характеристики программ	Разработчики программ, их название				
	Ricardo FINJECT	AVL HYDSIM	Cate rpilla r	Bosch	МГТУ ВПРЫСК
Возможность исследование систем произвольных схем	да	да	нет	да	да
Графическая генерация схемы топливной системы	да	да	нет	да	да
Примитивы графического редактора: функциональные (Ф) / простейшие геометрич. (Г)	Г	Г	нет	Ф	Ф
Одномерная оптимизация	да	да	да	да	да
Двухмерная оптимизация	нет	нет	нет	нет	да
<i>Многомерная оптимизация</i>	нет	нет	нет	нет	да
Возможность проектирования ТПА по заданным параметрам (характеристике) впрыска	нет	нет	нет	нет	да
Метод расчета течения в трубопроводах	МКЭ	Годунова	характеристик	характеристик	Даламб., Годунова
Учет переменности скорости звука	да	да	нет	нет	да
Учет нестационарного трения	нет	нет	нет	нет	да
Учет неизотермичности	да	нет	нет	да	да
Учет газовой фазы в ЛВД	да	да	да	да	да
Учет гистерезиса двухфазного состояния топлива	нет	нет	нет	нет	да
Расчет объемного (О) или массового (М) баланса в полостях	О	О	О	О	М
Учет податливости привода ТНВД	да	да	да	нет	да

Привод ТНВД как много-(М) или одно-(О) массовая крут. система	нет	М	О	нет	М
Нелинейные жесткостей, характеристик демпфирования	нет	да	да	нет	да
Учет люфтов в приводе	нет	нет	да	нет	да
Кольцевая крутильная система	нет	нет	нет	нет	да
Электро-гидропривод плунжера	да	нет	нет	нет	да
Переходные режимы в ТПА	нет	нет	нет	нет	да
Совместимость с программами расчета цикла дизеля	да	да	нет	да	да