

РАЗВИТИЕ МНОГОЗОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА СГОРАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ДВС

А.С. Кулешов, д.т.н., Ю.М. Фадеев, инж., А.А. Кулешов, инж.
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Представлены основные направления совершенствования программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана для моделирования рабочего процесса и кинетики образования вредных веществ в цилиндре дизеля. В целях расширения круга решаемых задач применительно к двухтопливным (газодизелям) многотопливным двигателям традиционная модель смесеобразования и сгорания топлива была улучшена в направлениях расчета скорости испарения и тепловыделения в характерных зонах многозональной модели развития топливной струи с учетом пересечения топливных факелов в объеме камеры сгорания. Новые возможности математической модели позволяют решать задачи оптимального согласования топливных струй с формой камеры сгорания с учетом вихревого движения, давления впрыскивания, конфигурации распылителя.

В настоящее время к поршневым двигателям предъявляются все более жесткие требования по удельной мощности, экономичности, вредным выбросам и стоимости эксплуатации.

Эта мировая тенденция побуждает применять все более сложную организацию рабочих процессов современных двигателей, применять альтернативные топлива, в том числе газовые, а также комбинации разных топлив в одном цикле. Даже в традиционных дизелях рециркуляция отработавших газов может достигать 30 % и более, а система подачи топлива должна формировать характеристику впрыскивания со сложным профилем нарастания расхода. В судовых двухтактных двигателях используются несколько независимых топливных систем. Большое разнообразие способов организации процессов топливоподачи и сгорания требует развития быстродействующих и точных методов расчета этих процессов для их компьютерной оптимизации вв взаимосвязи с процессами наддува, газообмена, теплообмена и пр. Причем высокое быстродействие этих расчетных методов чрезвычайно важно, ибо в процессе решения реальных оптимизационных задач требуются сотни и даже тысячи сессий расчета рабочего процесса двигателя.

Для расчета и оптимизации современных ДВС в МГТУ им. Н.Э. Баумана уже много лет развивается программа ДИЗЕЛЬ-РК [1], сочетающая в себе удобный пользовательский интерфейс и ядро, выполняющее замкнутый расчет рабочего цикла бензиновых, газовых и дизельных ДВС с моделированием детальной химической кинетики образования оксидов азота, расчетом эмиссии сажевых частиц, поддержкой концепций РССИ/НССИ с низкотемпературным окислением и т. п. При расчете газовых двигателей поддерживается произвольный состав газа, форкамерное воспламенение, рассчитывается детонация. Математическая модель расчета рабочего процесса дизеля базируется на основе многозональной модели топливной струи, в основу которой положена методика профессора Разлейцева Н.Ф. [2]. В указанной методике струя разбивается на 10 характерных зон. На рис. 1 показаны 6 из них; если же в процессе развития струи топливо попадает на зеркало цилиндра и на поверхность крышки цилиндра, то добавляются соответствующие дополнительные зоны. В каждой из зон с определенным шагом по времени определяется количество топлива и рассчитывается его испарение с учетом среднего диаметра капель по Заутеру и характерной температуры зоны. Конфигурация зон определяется формой камеры сгорания, взаимодействием струи с вихрем и стенками, а также ориентацией струй в пространстве камеры сгорания с движущимся поршнем.

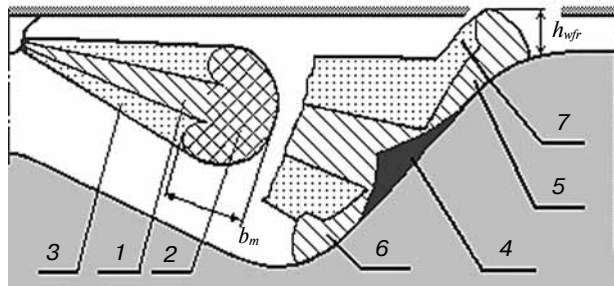


Рис. 1. Конфигурация зон топливной струи в модели Разлейцева Н.Ф.:

1 — осевое ядро; 2 — передний фронт; 3 — разреженная оболочка; 4 — осевое коническое ядро пристеночного потока (ПП); 5 — уплотненное ядро ПП над поверхностью поршня; 6 — уплотненный передний фронт ПП; 7 — разреженная оболочка ПП

Суммарная скорость тепловыделения во всем цилиндре в функции от времени определяется в основном суммарной скоростью испарения в зонах. Эта феноменологическая модель диффузионного сгорания была апробирована и показала хорошую точность применительно к нескольким десяткам двигателей разного назначения и разных производителей (от малоразмерных безнаддувных ДВС до двухтактных малооборотных судовых дизелей, а также почти для всех дизелей, выпускающихся в России) [3]. Используемые в методике эмпирические коэффициенты в значительной степени сбалансированы для свойств дизельного топлива (поэтому калибровка модели не является большой проблемой для пользователя); а разбиение струй на зоны не подразумевает объемного взаимодействия их друг с другом, что вполне справедливо для двигателей с центральным расположением форсунки.

Однако в современных высокофорсированных двигателях, особенно в двухтактных с боковым расположением форсунок, имеется дефицит свободного пространства, и задача оптимальной ориентации топливных струй с минимизацией их объемного и пристеночного взаимодействия приобретает особую актуальность. Кроме того, во всем мире расширяется применение альтернативных топлив, а также многотопливных двигателей, когда основное топливо поджигается впрыскиванием запальной дозы дизельного топлива. В последнем случае двигатель оснащается несколькими топливными системами. Эти новые решения нуждаются в расчетных исследованиях и компьютерной оптимизации, для чего нужны быстродействующие математические модели, описывающие актуальные особенности рабочих процессов. Исходя из необходимости расширения круга решаемых с помощью расчета задач, традиционная модель смесеобразования программы ДИЗЕЛЬ-РК была улучшена в следующих основных направлениях.

1. В характерных зонах топливной струи решается система уравнений баланса массы, энергии и состояния для расчета средней температуры в зоне. Знание этой температуры позволяет корректно рассчитать прогрев и испарение капель любого топлива. Необходимые для такого расчета свойства топлив сохраняются в собственной базе данных программы. Распределение топлива по характерным зонам рассчитывается по уравнениям, предложенным Н.Ф. Разлейцевым [2]. Газообмен между зонами струи (рис. 2) и масса газа, вовлеченного в струю, рассчитывают исходя, из совместного решения уравнения сохранения импульса элементарной порции топлива, вылетающей из сопла форсунки и модифицированных уравнений Лышевского А.С. для даль-

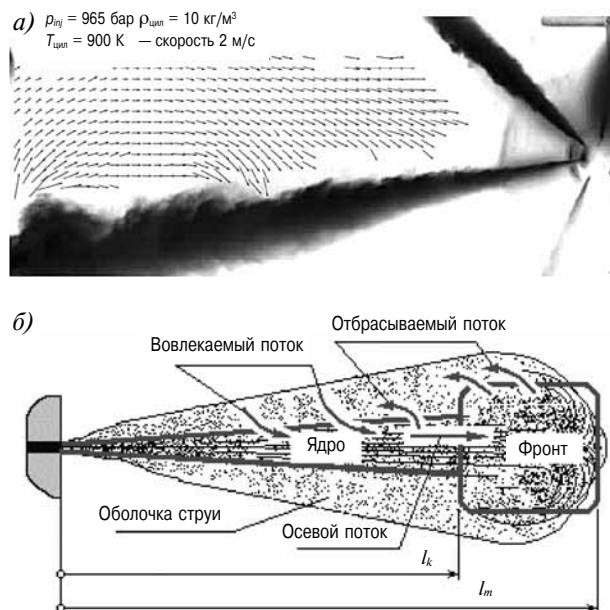


Рис. 2. Схема движения газа в дизельной струе (а); потоки газа и характерные зоны свободной струи (б)

нобности струи [3, 4].

Испарение капель рассчитывается по уравнению Б.И. Срезневского, где константа испарения определяется через параметры газа, коэффициент диффузии и равновесную температуру капли. Эта температура определяется из уравнения баланса энергии вокруг одиночной капли, полученному Вырубовым Д.Н. [5]. Такой подход позволяет рассчитывать испарение капель любого топлива в специфических условиях каждой зоны и в итоге определять скорость тепловыделения с учетом свойств альтернативного топлива.

2. Для учета сложной геометрической формы струй и их пересечения в объеме камеры сгорания применяется представление струй как совокупности кубических ячеек, на которые разбивается весь объем цилиндра (см. рис. 2, а, б). Густота сетки составляет 50–90 ячеек на диаметр цилиндра. Изначально геометрия струй рассчитывается в виде последовательности усеченных конусов с непараллельными овальными основаниями. Ячейки, попадающие внутрь этих конусов, а точнее, внутрь характерных зон струи формируют кластеры ячеек, позволяющие проследить эволюцию этих зон и рассчитать объемы пересечения зон. То есть в отличие от технологии CFD расчета, здесь уравнения баланса решаются не для каждой ячейки, а сразу для кластера ячеек, что экономит время счета в тысячи раз. На рис. 3, в показаны характерные зоны 4-х струй (из б) в камере сгорания двигателя с противоположно движущимися поршнями 18ДН23/2×30; темным показаны ядра струй, светлые фронты — присте-

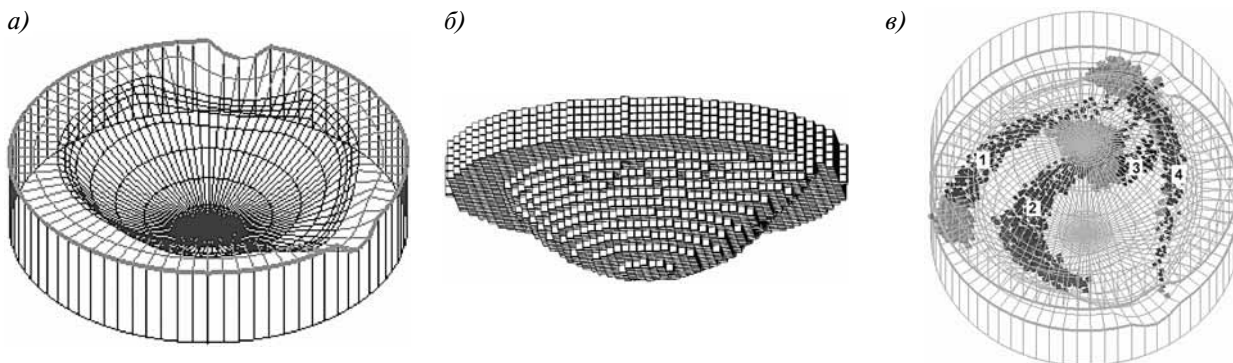


Рис. 3. Форма камеры в поршне двигателя 18ДН23/2×30 (а) и соответствующая сетка половины камеры сгорания (б); расположение струй № 1–4 в камере сгорания (струи № 5 и 6 не показаны) (в)

ночный поток на поверхности поршня. Вихрь направлен против часовой стрелки.

3. Для удобства работы с программой разработан интерфейс, позволяющий в удобной форме задавать конфигурацию нескольких топливных систем, установленных в одном цилиндре, и их характеристики впрыскивания (рис. 4). На рис. 5. представлен вариант задания конфигурации опытной форсунки с четырьмя запорными иглами, которая испытывалась применительно к двигателю Wartsila ($D/S = 320/350$), для подачи метанола и запального дизельного топлива в

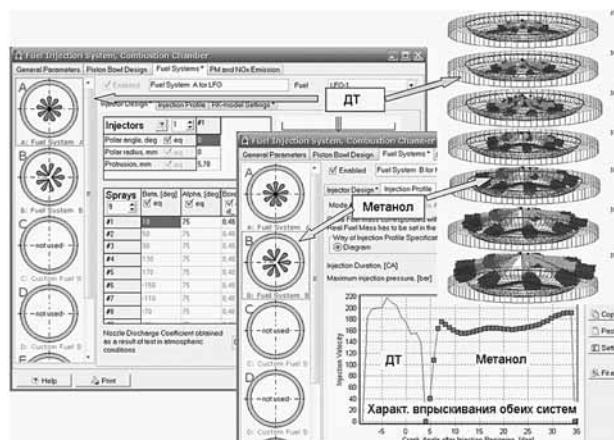


Рис. 5. Интерфейс, позволяющий задать конфигурацию форсунки для подачи альтернативного топлива и запального дизельного топлива (ДТ) в цилиндр дизеля, а также результаты расчета развития струй обоих топлив в камере сгорания на примере среднеоборотного судового двигателя

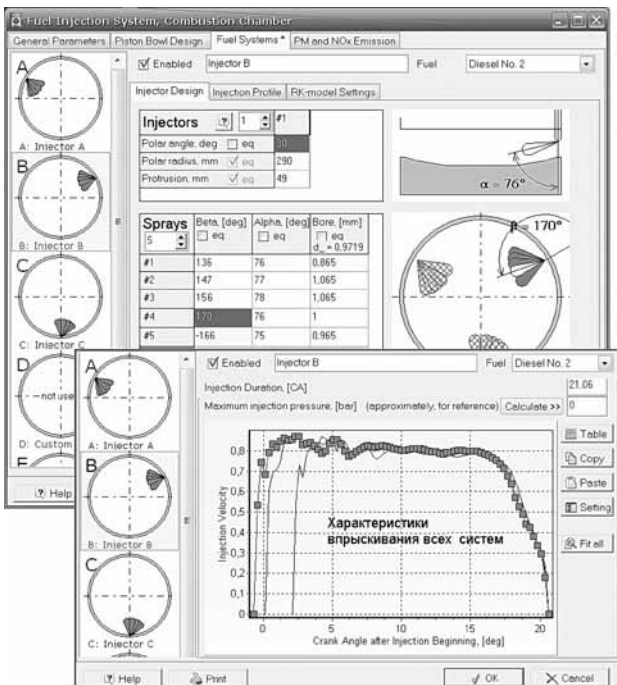


Рис. 4. Интерфейс для задания конфигурации нескольких топливных систем в одном цилиндре и их характеристик впрыскивания на примере двухтактного малооборотного дизеля. (Первой подает топливо система В, затем система А, последней — система С)

цилиндр, а также результаты расчета развития струй обоих топлив в камере сгорания.

4. Для удобства анализа взаимного расположения топливных струй и оптимизации направленности сопловых отверстий распылителей в камере сгорания разработан 3D визуализатор, который позволяет выделять нужные зоны нужных струй или групп струй и проследить их развитие в объеме в виде анимации. Данный инструмент помогает находить оптимальную ориентацию сопловых отверстий, сводя к минимуму зоны пересечения отдельных струй. На рис. 6 показан пример визуализации развития струй в камере сгорания двухтактного малооборотного дизеля в начале впрыскивания и в конце. Ядра струй обозначены более темными маркерами, фронты струй — более светлыми. Каждая форсунка имеет по 4 отверстия. Направление вихря: против часовой стрелки. Причиной «провала» скорости тепловыделения в период второй

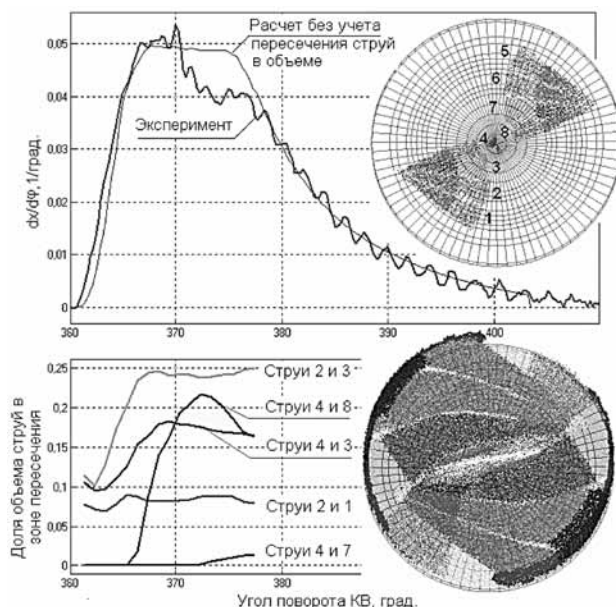


Рис. 6. Скорость тепловыделения в цилиндре двухтактного малооборотного дизеля, визуализации развития струй в камере сгорания и зоны пересечения свободных струй в объеме камеры сгорания

половины впрыскивания является объемное пересечение некоторых струй. Пары струй, имеющие наиболее значительные пересечения, указаны на графике рис. 6.

Реализованные новые возможности математической модели позволяют решать задачи оптимального согласования формы камеры сгорания, вихря, параметров наддува с конфи-

гурацией распылителя, формой характеристики впрыска, давлением в топливной системе [6, 7]. В настоящее время авторами ведется разработка программы расчета воспламенения газовой смеси пилотной порцией дизельного топлива, впрыснутой в форкамеру.

Литература

1. DIESEL-RK: [Электронный ресурс]. URL: <http://diesel-rk.bmstu.ru> (дата обращения 16.03.2017).
2. Процессы в перспективных дизелях / А.Ф. Шеховцов [и др.]; под ред. А.Ф. Шеховцова. — Харьков : Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992. — 352 с.
3. Кулешов А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: дис. ... докт. техн. наук., МГТУ им. Н.Э. Баумана. — М., 2011. 235 с.
4. Лышевский А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях. — Л. : Судостроение, 1971. — 248 с.
5. Вырубов Д.Н. О методе расчета испарения топлива // Двигатели внутреннего сгорания. — М. : Машгиз, 1954. — С. 20–34.
6. Leonid Grekhov, Khamid Mahkamov, Andrey Kuleshov. Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software // JSAE Paper № 20159328 SAE Paper № 2015-01-1859. — 2015, 17 p.
7. Andrey Kuleshov, Leonid Grekhov. Multidimensional Optimization of DI Diesel Engine Process Using Multi-Zone Fuel Spray Combustion Model and Detailed Chemistry NO_x Formation Model // SAE Paper № 2013-01-0882. — 2013, 20 p.