

Источник: Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов. - М.: Изд-во Легион-Автодата, 2011. - 344 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Компьютерная оптимизация рабочего процесса и ТПА позволяет резко ускорить и удешевить трудоемкий процесс доводки дизелей, сократить число занятых сотрудников, добиться лучших результатов благодаря анализу значительно большего числа вариантов. Ключевыми вопросами здесь являются достоверность математических моделей, организация поиска оптимальных решений, а также доступность потенциальным пользователям программного обеспечения, возможность его квалифицированного использования.

Не случайно при рассмотрении проблем конструирования ТПА мы останавливаемся на программах расчета рабочего процесса. Обычный подход при формулировке технических требований к показателям функционирования ТПА базируется на опыте создания дизелей-прототипов и самой ТПА, сведений об аналогах и результатах их исследований, собственных, всегда ограниченных экспериментальных данных. В редких случаях, при работе специалистов с высочайшей квалификацией и большим опытом, относительно быстро удается достигнуть хороших результатов. К сожалению, до сих пор встречается и другой подход: простой перебор вариантов ТПА и принятие решений на основании результатов испытаний их на дизеле. В любом случае такие подходы, строго говоря, нельзя назвать *научными*, хотя бы только потому, что в лучшем случае, они связаны с индивидуумами – носителями знаний и опыта - и не позволяют в разумное время *научить* этой работе нового специалиста. Компьютерная оптимизация рабочего процесса позволяет формализовать работу по получению требований к показателям ТПА. Более того, только совместная оптимизация рабочего процесса и ТП позволяет добиться наиболее высоких показателей дизеля в целом.

Современное программное обеспечение для моделирования и оптимизации рабочего процесса. Значительные усилия передовых научных центров сосредоточены на развитии технологии Computational Fluid Dynamic (CFD), реализующей трехмерное моделирование течения газа и впрыскиваемого топлива в цилиндрах и коллекторах ДВС. Рассматриваемые элементы двигателя разбиваются на большое количество ячеек (порядка 300 ... 600 тыс.), в каждой из которых решается система уравнений сохранения. В процессе расчета моделируются процессы испарения, сгорания и образования

вредных веществ. Наибольшей популярностью пользуются программы: KIVA (Los Alamos), FIRE (AVL), VECTIS (Ricardo), STAR-CD (Computational Dynamics Ltd.). Значительные усилия предпринимаются для организации расчета в них эмиссии сажи, NO_x и CO. Однако утверждать, что эта задача решена, пока преждевременно. Достоверность результатов расчета, как правило, неудовлетворительна. Существенным недостатком CFD на сегодняшний день является трудоемкость расчетов и необходимость использования суперкомпьютеров. Время счета одного варианта составляет десятки, и даже сотни часов на очень мощных компьютерах. Подготовка данных квалифицированным специалистом для одного варианта расчета занимает несколько дней (5...15 и более дней для нового двигателя). Инженерная оптимизация процесса ДВС с расчетом сотен и тысяч вариантов конструкций пока невозможна, хотя эти программы с успехом используются для других целей, например, для доводки газозоудушного тракта ДВС.

Наряду с CFD традиционно существует и развивается другой подход - термодинамический или феноменологический, использующий 0 - и 1- мерные представления. Мировыми лидерами популярности здесь являются программы BOOST (AVL), WAVE (Ricardo), GT-Power (Gamma Technologies). Из отечественных разработок, доведенных до коммерческого исполнения, следует назвать программы ИМПУЛЬС и ВОЛНА (ЦНИДИ), а также ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т (МГТУ им. Н.Э.Баумана). Конкурирующие между собой программы BOOST, WAVE и GT-Power представляют собой весьма совершенные разработки, в частности, для отработки газозоудушного тракта и подбора агрегатов наддува. Для работы такой программы достаточно процессора Pentium. Для расчета сгорания, эти программы используют методики, базирующиеся на уравнениях, предложенных еще в 1962 г. И.И.Вибе, или на более поздних, но аналогичных подходах. Все зарубежные программы позволяют пользователям подключать свои подпрограммы для расчета процесса сгорания. Но именно моделирование смесеобразования и сгорания представляет собой основную проблему при разработке таких программ. В лучшем случае, в перечисленных программах применяются расчетные методы, каким-либо образом учитывающие характеристику впрыска и мелкость распыливания, среднее расстояние от сопел до стенки и турбулизацию заряда в КС. В частности, в последней версии программы ИМПУЛЬС (ЦНИДИ) и ранних версиях программы ДИЗЕЛЬ (МВТУ им. Н.Э.Баумана) реализована методика расчета сгорания, опубликованная проф. Разлейцевым Н.Ф. в 1980 г. и являвшаяся в то время самой передовой из существующих. В американской программе GT-Power, в качестве дополнительной к модели Вибе, реализована модель сгорания проф. Хироюсу (Hiroyasu), в которой рассматривается развитие свободной струи. Вопросы оптимального проектирования формы камеры сгорания, увязки направленности струй топлива с формой камеры в поршне и интенсивностью вихря, вопросы учета взаимодействия

струй топлива со стенками и между собой в настоящее время реализованы только в новой версии ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т (МГТУ им. Н.Э.Баумана). В основу расчетного метода легли уравнения, полученные проф. Н.Ф. Разлейцевым в начале 90-х годов. Этот метод, в дальнейшем 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 показывает очень 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. Программа ДИЗЕЛЬ-2/4т имеет развитый пользовательский интерфейс, и прошла проверку на двигателях разной размерности, быстроходности и назначения.

Благодаря использованию нового метода расчета сгорания, ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т позволяет решать принципиально задачи, непосильные для других программ и незаменимые при проектировании или подборе ТПА. В состав ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т включена программа визуализации процесса смесеобразования, которая отображает в виде мультфильма результаты расчета развития топливных струй и образованных струями пристеночных потоков. Ее использование облегчает проведение оптимального проектирования формы камеры сгорания и выбор направления топливных струй во всех плоскостях с учетом интенсивности вихревого движения заряда. Анализ наглядного изображения подвижной картины развития топливных струй при проведении компьютерной оптимизации смесеобразования позволяет контролировать количество топлива попадающего в характерные зоны КС, и добиваться его наивыгоднейшего распределения.

Высокое быстродействие ядра ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т позволило авторам внедрить в нее процедуры для решения оптимизационных задач с использованием методов нелинейного программирования, что радикальным образом увеличивает эффективность работы, снижая затраты времени на проведение численных экспериментов в десятки раз. ПК поддерживает работу с удаленными пользователями через Internet. Его описание, приведено на сайте МГТУ: <http://www.bmstu.ru/facult/em/em2/diesel/d11rus>. Ведущий разработчик – с.н.с. МГТУ А.С.Кулешов.

Оптимизацию рабочего процесса для целей выбора или проектирования топливной аппаратуры наиболее удобно проводить именно с использованием ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т. На рис.1.9 приведен пример работы с ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т: расчет смесеобразования и сгорания тракторного дизеля СМД при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$, $p_e=0,77 \text{ МПа}$, $g_{ц}=0,08 \text{ г}$, вихревое отношение в ВМТ $H=3,15$.

Сравнение результата расчета движения струй топлива с экспериментальной кинограммой развития пристеночных потоков в камере сгорания и сравнение кривых скорости тепловыделения, полученных расчетом и обработкой индикаторной диаграммы говорит об адекватности модели по учету влияния тангенциального вихря на движение топливных струй и образованных ими пристеночных потоков.

Известна современная тенденция уменьшения диаметров сопел и увеличения давления впрыска. Рис.1.10 иллюстрирует попытку улучшения показателей дизеля Д120 (2Ч10,5/12) за счет этих факторов. Из табл.1.1 следует, что в целом при уменьшении диаметра сопел с 0.3 мм до 0,22 мм результат отрицательный (сравнение двух первых столбцов).

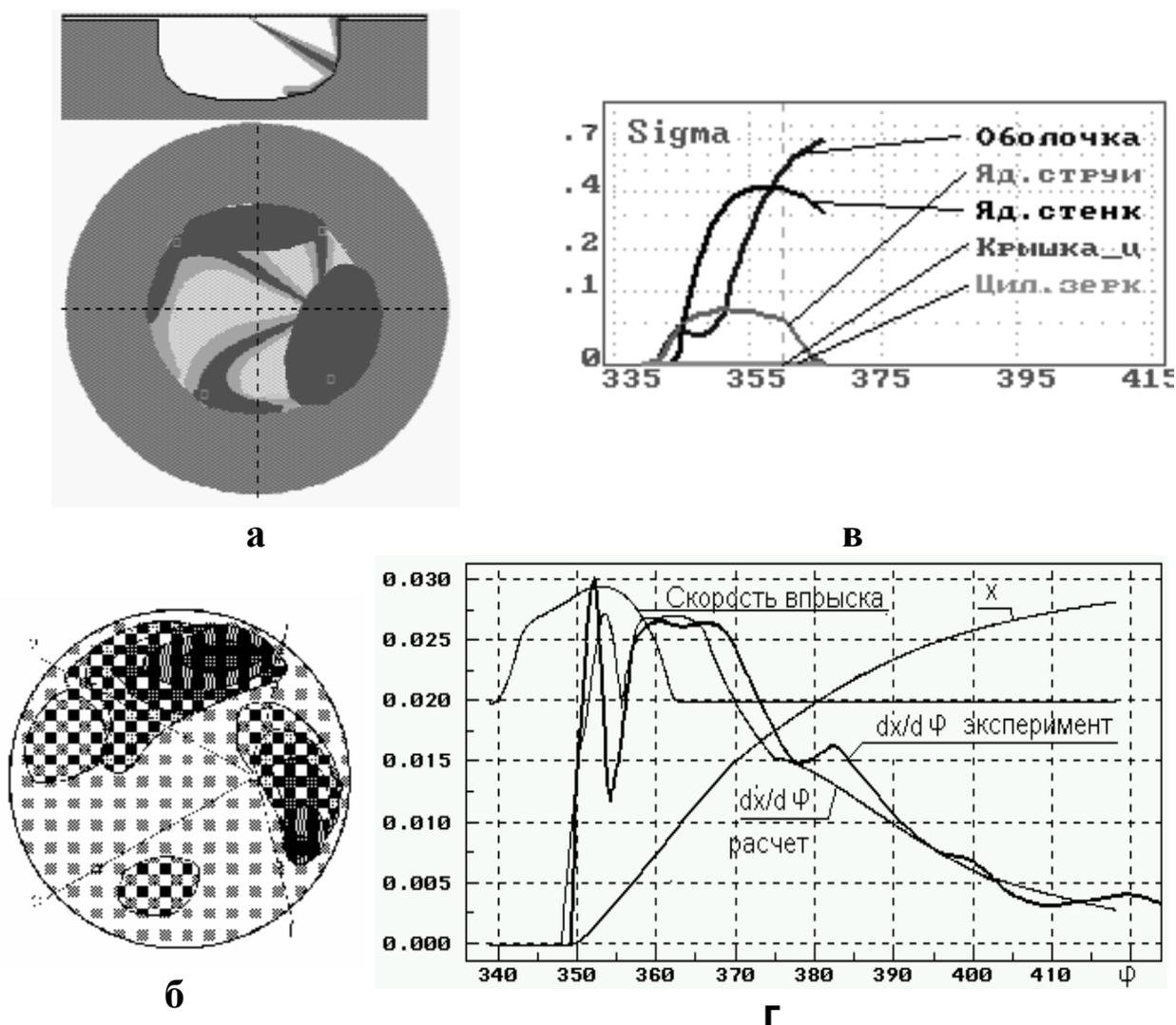


Рис.1.9. Результаты экспериментальных и расчетных исследований дизеля СМД. Движение топливных струй и пристеночных потоков: а – расчет, б - экспериментальная кинограмма ГСКБД; в – расчет распределения впрыснутого топлива по характерным зонам струи № 1; г - скорость тепловыделения $\frac{dx}{d\phi}$, скорость впрыска, доля выделившегося тепла X [70]

Несмотря на увеличение давления впрыска и мелкости распыливания, ввиду затянутого впрыска происходит неблагоприятное распределение топлива: 23.5% его оказывается в зонах пересечения пристеночных потоков, где низка скорость испарения (при соплах 0.3 мм в этих зонах только 1.7% топлива); доля топлива в разреженной оболочке (где наилучшие условия испарения) снижается на 5%; доля топлива в непересекающихся частях пристеночных потоков, где также неплохие условия испарения, составляет 17.5 % (при соплах 0.3 мм она достигает 37%). Т.е. при столь длительном впрыске струям недостаточно пространства для развития и они мешают друг другу. Процесс сгорания затягивается, в результате вырос расход топлива и дымность. Снижение NO_x , обусловленное некачественным сгоранием, нельзя считать достижением.

Таблица 1.1. Результаты исследования процесса дизеля Д120 с уменьшенным диаметром сопловых отверстий

Вариант дизеля	а (штатн.)	б	в	г
Камера сгорания, распылитель	Штатн. КС, 3x0,3x120°	Штатн. КС, 3x0,22x120°	Штатн. КС, 3x0,22x120°	Оптим.КС, 3x0,22x150°
Степ. сж.	16	16	19,5	19,5
УОВ оптим.(кол.в)	16	16	11,5	11,5
Вихр. отн.	3,1	3,1	3,1	2,98
$P_{впр}$, МПа	52	66,5	66,5	66,5
d_{32} , мкм	30	19	19	19
g_e , г/кВтч	239	247	242	236
NO_x , г/м ³	3,4	2,7	1,8	1,92
Hartridge	17,2	25,6	24,2	17,9

Этот пример хорошо иллюстрирует неэффективность частичной оптимизации и даже опасность попыток рационализации путем независимого изменения одного из параметров сложного и многосвязанного рабочего процесса дизеля. В связи с этим видится естественным, что изменение параметров ТП требуют сопряженной оптимизации параметров самого дизеля. На рис.1.10 представлены результаты расчета с измененным распылителем удельного расхода топлива, максимального давления в цилиндре, дымности и выбросов NO_x , полученные методом двухфакторного эксперимента по параметрам дизеля: степени сжатия и УОВ.

Протекание сгорания улучшается при $\epsilon > 19,5$, когда надпоршневой зазор становится тоньше на 0,5 мм, а при $УОВ < 11,5^0$ интенсивно растут расход топлива и эмиссия сажи. В то же время при большем УОВ растут температуры сгорания и эмиссия NO_x . Таким образом, вырисовывается новое опти-

мальное сочетание параметров ТПА и дизеля, обеспечивающее улучшение варианта “в” в сравнении с вариантом “б” (табл.1.1).

Для снижения расхода топлива и эмиссии дыма необходимо изменить форму КС и направленность сопел таким образом, чтобы обеспечить топливным струям большую свободу для развития, что позволит увеличить скорость тепловыделения на участке догорания. Дальнейшие исследования проводились в направлении совершенствования формы камеры в поршне и оптимизации ориентации топливных струй. Учитывалось изменение интенсивности вихря вследствие изменения диаметра камеры сгорания и надпоршневого зазора. Удовлетворительные результаты показала опытная камера, представленная на рис.1.11, г.

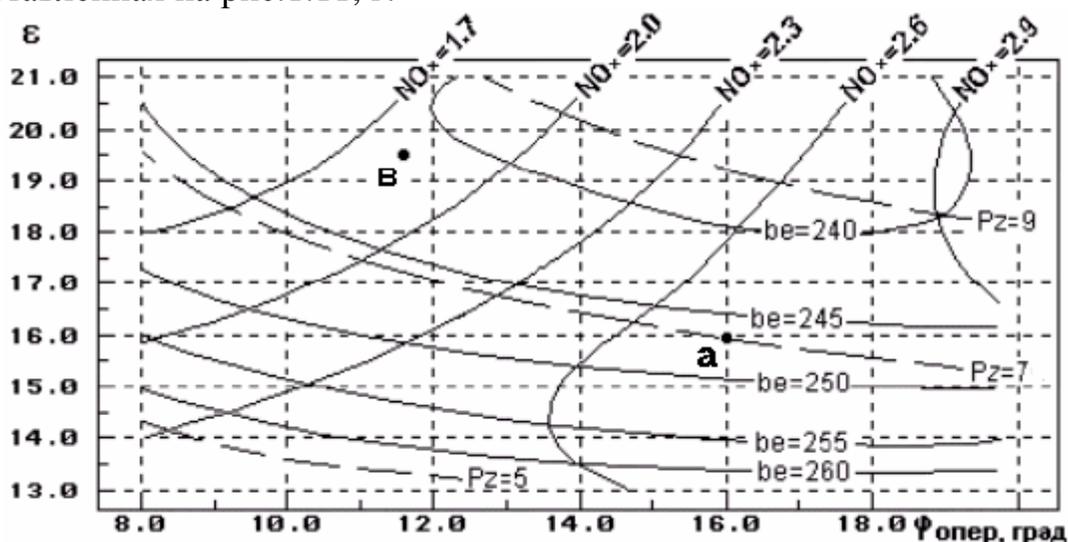


Рис.1.10. Влияние степени сжатия ϵ и УОВ $\phi_{\text{опер}}$ на удельный расход топлива g_e [г/кВт ч], эмиссию NO_x [г/м³]; максимальное давление цикла P_z [МПа]; а – штатная система, в – оптимизированная по ϵ и УОВ (обозначения табл.1.1)

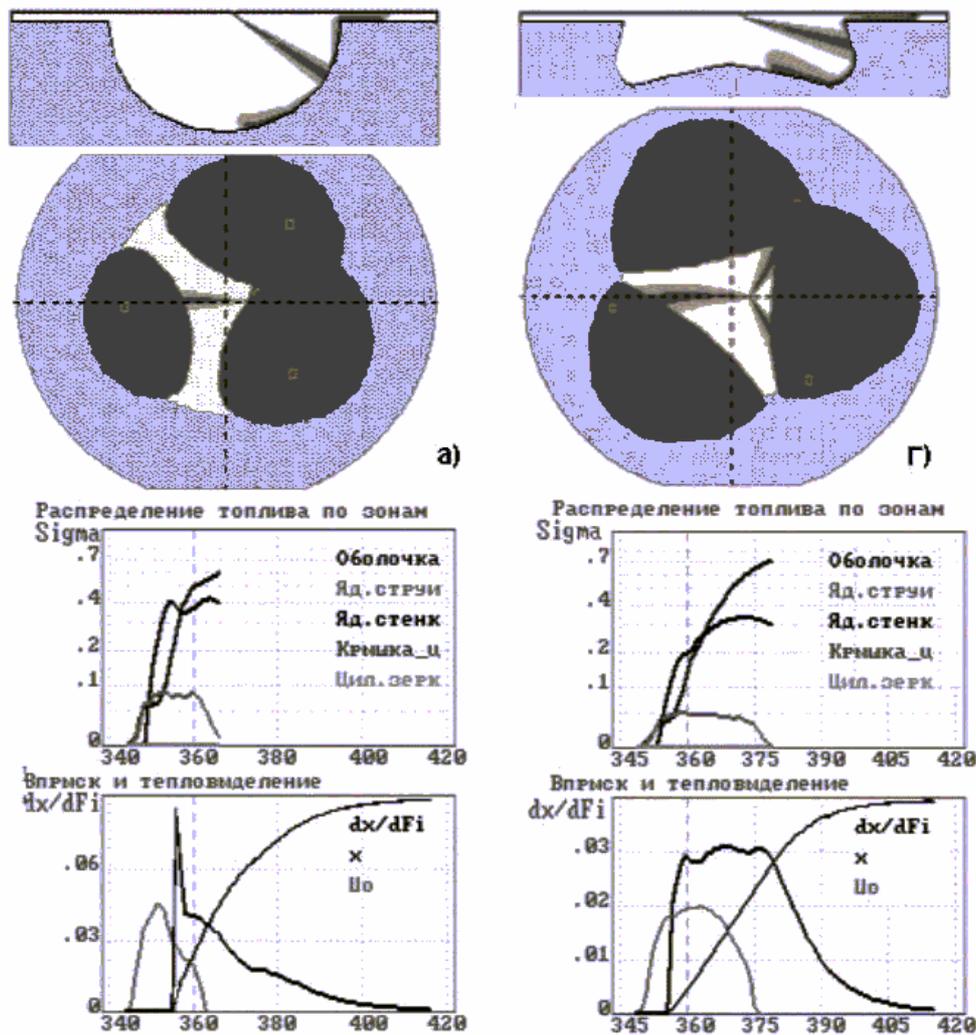


Рис.1.11. Результаты расчета вариантов организации рабочего процесса безнаддувного дизеля:

а) - штатная конфигурация; г) - после проведения оптимизации.

Распределение впрыснутого топлива в опытной камере более благоприятно, чем в штатной ввиду следующего: 1) в разреженной оболочке струи и оболочке пристеночного потока, где наилучшие условия испарения, распределено 69% топлива (в штатной - 60%); 2) в ядре пристеночного потока, где условия испарения несколько хуже чем в объеме, в опытной камере оказывается 27,9% топлива (в штатной - 37 %); 3) растянутый по времени впрыск, малая задержка самовоспламенения и малое количество топлива, испарившееся за период задержки обуславливают отсутствие выраженного первого пика скорости тепловыделения (кривая dx/dFi , рис.1.11, г) и, следовательно, скачка локальной температуры в объеме взрывного горения, что и обуславливает снижение эмиссии NO_x ; 4) малый средний диаметр капель d_{32} (19 мкм) обуславливает высокую скорость испарения; 5) топливо с пристеночного потока короны поршня не попадает на поверхность головки цилиндра.

Таким образом, более полная оптимизация дает положительный эффект несмотря на первые негативные результаты. Только она позволяет обоснованно сформулировать технические требования к важнейшим параметрам и показателям ТПА. Именно такую методологию и соответствующее программное обеспечение мы предлагаем для заводской практики. В МГТУ, единственном вузе России, где топливная аппаратура выделена в отдельную дисциплину, а на 6 курсе по ней выполняется курсовой проект. В нем работа также начинается с оптимизации рабочего процесса. Такой подход нашел одобрение научной общественностью [26, 27].

Программный комплекс ВПРЫСК разработки МГТУ предназначен для проектирования, исследования и оптимизации ТПА любого типа. Он применим для разработок дизелей и двигателей с непосредственным впрыском бензина и обладает рядом достоинств и дополнительных возможностей.

Первой особенностью ПК ВПРЫСК является его универсальность относительно типа и особенностей ТПА 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. ТПА 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 ТПА. Поэтому помимо “словесного портрета” используется графический редактор, в котором пользователь из имеющихся примитивов рисует понятную ему схему ТПА, устанавливает связи между элементами (рис.1.12). 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.

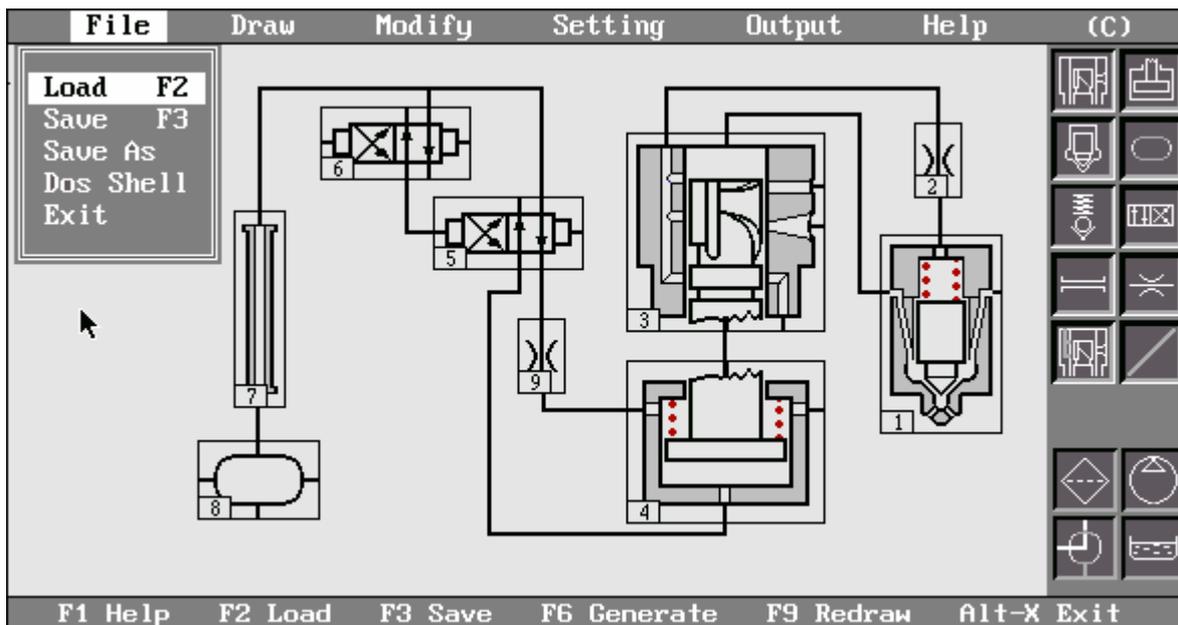


Рис.1.12. Окно графического редактора для генерирования схемы ТПА

Математическая модель, положенная в основу ПК, базируется как на апробированных подходах, так и на результатах оригинальных фундаментальных исследований, посвященных процессам в современной ТПА. В ней максимально учтены существенные для ТП явления и процессы. 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 также для ТПА 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 возможности анализа ТПА с электроприводом клапанов (золотников), электро-гидроприводом 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 дружелюбный пользовательский интерфейс, удобную форму редактирования данных с их быстрым и детальным анализом их достоверности, представление резуль-

татов 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-2/4г. Описание ПК приведено на сайте: <http://www.bmstu.ru/facult/em/em2/p01rus>. Ведущий разработчик Л.В.Грехов. Приведенная в табл.1.2 сводка особенностей известного программного обеспечения для исследования и проектирования ТПА дизелей свидетельствует о совершенности математической модели ПК среди аналогов. Новые научные разработки, использованные в ней, изложены в этом издании.

Таблица 1.2. Сравнение ПК ВПРЫСК с передовыми мировыми аналогами

Характеристики программ	Разработчики программ, их название				
	Ricardo Finject	AVL Hydsim	Caterpillar	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 геометр. (Г) элементы	Г	Г	нет	Ф	Ф
Одномерная оптимизация	да	да	да	да	да
Двухмерная оптимизация	нет	нет	нет	нет	да
Многомерная оптимизация	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. или 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 крутил. 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

Оптимизация ТПА. Первой ступенью оптимизационных расчетов можно считать одно- и двухфакторные численные эксперименты. Если параметров оптимизации 1 или 2, то результаты еще возможно представить наглядно в графической форме. Такая организация работы предпочтительна ввиду простоты организации, наглядностью и прозрачностью для анализа процессов, надежностью и достоверностью. Для этой цели в ПК Впрыск использована плоская, трехмерная и квазитрехмерная графика. Независимыми переменными могут быть все конструктивные и режимные параметры ТПА. Ввиду ориентированности ПК Впрыск на ТПА произвольных схем и значительности массивов, число мгновенных показателей ограничено выбором из 130 возможных. При грамотной организации работы трудно обмануться с поиском глобального оптимума. Эффективность сканирования определяется мелкостью разбиения расчетной области, ее близости к оптимуму, и пределам работоспособности ТПА. На рис.1.13 и 1.14 представлены результаты двухфакторных экспериментов в традиционной при проектировании ТПА задаче выборе хода, диаметра плунжера и фазы начала подачи. На кривые нанесены изолинии целевой функции – продолжительности впрыска и ограничения – контактных напряжений на кулачке $\sigma_k^{\max}=1900$ МПа. При выборе $h_{пл}$ и $d_{пл}$ (рис.1.13) выявлены две области возможных решений - А и Б. В первой удастся избежать высоких σ_k^{\max} , обеспечив окончание подачи до выхода ролика на выпуклый профиль тангенциального кулачка. Во второй небольшие σ_k^{\max} обязаны малой площади плунжера. При варьировании геометрическим началом подачи (ГНП). Область Б на рис.1.14 связана с нагнетанием топлива при уменьшающемся угле давления в конце подачи. По значениям целевой функции области А и Б равноценны. Область С соответствует глобальному оптимуму.

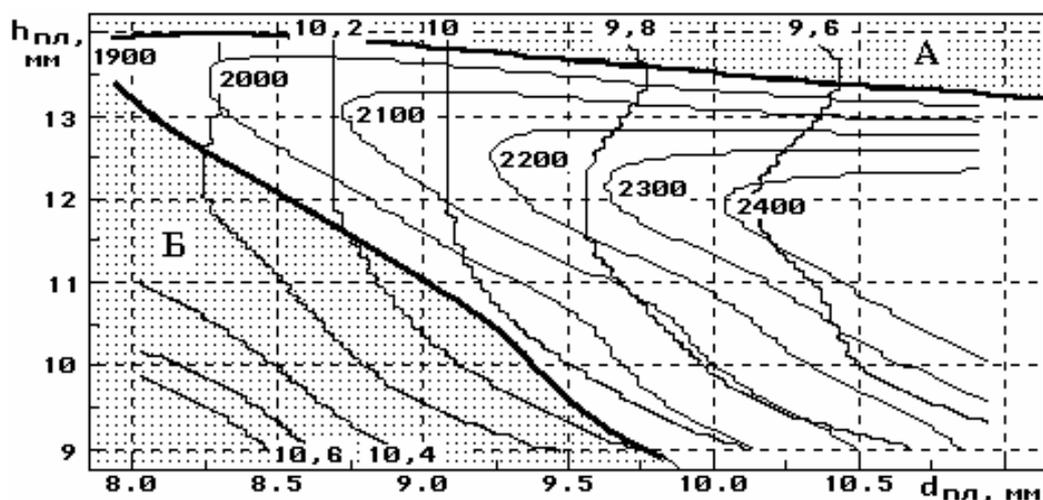


Рис.1.13. Продолжительность впрыска (9,6...10,6 град) дизеля Д-65 при ограничении максимальных контактных напряжений $\sigma_k^{max} = 1900$ МПа в функции хода и диаметра плунжера (ГНП 4,9 мм)

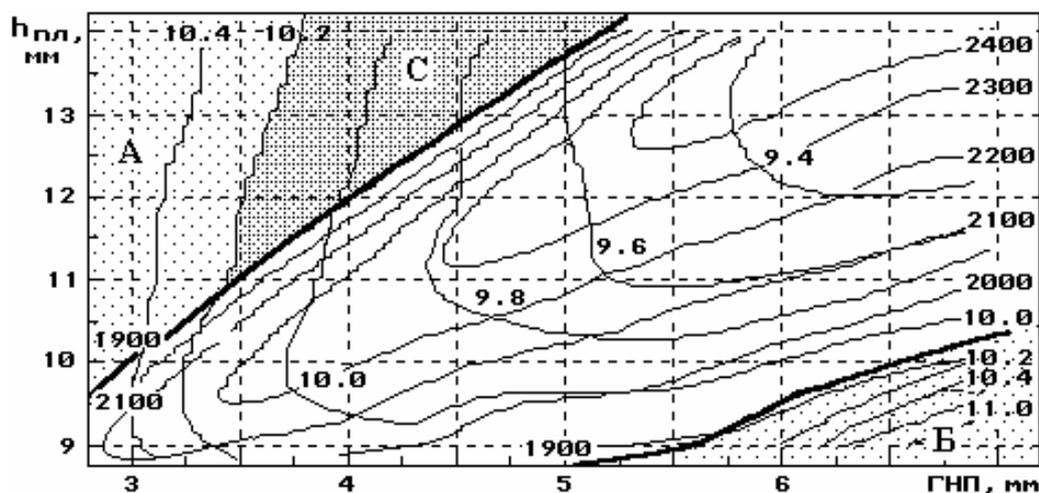


Рис.1.14. Продолжительность впрыска (9,4...11,0 град) дизеля Д-65 при ограничении максимальных контактных напряжений $\sigma_k^{max} = 1900$ МПа в функции хода плунжера и геометрического начала подачи ($d_{пл} = 10$ мм)

При необходимости выбора числа параметров ТПА, больших двух, применялся подход, являющийся по сути решением обратной гидродинамической задачи: по заданным показателям найти параметры ТПА [100]. Такая задача – некорректно поставленная, имеет множество решений и, что самое главное – ни одного надежного, универсального относительно параметров и приемлемого для практических расчетов. Наиболее применимыми из таких методик оказались полуэмпирические, реализованные в комплексе приближенных формул или номограммах, например [64]. Удачных примеров решений обратной задачи на базе точных и универсальных соотношений не имеется, и это направление, по всей видимости, бесперспективно.

Альтернативный подход – математически формализованная процедура оптимизации, базирующаяся на многократном решении прямой задачи с раз-

ными значениями параметров ТПА. Оптимизация - более строгий и универсальный метод отыскания параметров ТПА. При проведении многопараметрической оптимизации результаты работы нельзя представить в графическом виде, их трудно проанализировать, а число необходимых расчетов быстро растет, делая и саму работу нереальной. Бурное развитие и обилие методов оптимизации привело к формированию самостоятельного раздела математики.

Вопросам оптимизации ТПА были посвящены работы известных отечественных специалистов [24,52]. Наибольшую популярность приобрели методы, основанные на построении в каждой точке области функциональной модели процесса и определении вектора поиска на основе ее анализа. Для получения регрессии используется теория планирования эксперимента, как метод, позволяющий найти направление поиска при существенно сокращенном числе необходимых экспериментов. Период его широкого использования прошел, более привлекательными становятся методы параметрической оптимизации (непрерывного движения по направлению). Их процедуры логически более простые, алгоритмы универсальны, а современные ЭВМ позволяют успешно их реализовывать. Здесь изложен подход, реализованный и апробированный для оптимизации ТПА А.С.Кулешовым и Л.В.Греховым [70].

Задача оптимизации процессов в ТПА сводится к задаче нелинейного программирования для функции многих переменных с ограничениями. Учет ограничений производится методом штрафных функций. В общем случае минимизируемая целевая функция имеет вид:

$$F = C_j^Z \cdot \bar{Z}_j + \sum_{i=1}^n C_i^Y \cdot \Delta \bar{Y}_i^2 + \sum_{k=1}^m C_k^X \cdot \Delta \bar{X}_k^2, \quad (1.1)$$

где C_j^Z - весовой коэффициент оптимизируемой функции Z;

Z_j - показатель ТПА, отнесенный к своему среднему значению;

C_i^Y - заданный коэффициент штрафа i-го ограничения;

$\Delta \bar{Y}_i$ - нарушение i-го ограничения вне диапазона от $\bar{Y}_{i \min}$ до $\bar{Y}_{i \max}$:

$\Delta \bar{Y}_i = \left[\bar{Y}_i - \bar{Y}_{i \min(\max)} \right] / \bar{Y}_{i \text{ ср}}$; если же $\bar{Y}_{i \max} < \bar{Y}_i < \bar{Y}_{i \min}$, то $\Delta \bar{Y}_i = 0$;

C_k^X - коэффициент штрафа, накладываемого на целевую функцию при выходе k-ой независимой переменной за пределы допустимых значений;

$\Delta \bar{X}_k$ - выход k-го параметра за допустимый диапазон $\bar{X}_{k \min}$ до $\bar{X}_{k \max}$:

$\Delta \bar{X}_k = \left[\bar{X}_k - \bar{X}_{k \min(\max)} \right] / \bar{X}_{k \text{ ср}}$; если же $\bar{X}_{k \max} < \bar{X}_k < \bar{X}_{k \min}$, то $\Delta \bar{X}_k = 0$.

В программном комплексе Впрыск использован блок алгоритмов с 14 методами поиска (варианты градиентных, симплекс-методов, случайного поиска и методы для специальных функций) [14,108]. При нахождении экстремального решения по одному направлению вектора независимых переменных

ных используются квадратичная интерполяция, методы Фибоначчи или золотого сечения.

Техника поиска оптимальных решений разнообразна, но и универсальна относительно практических приложений. Ниже обсуждаются специфические моменты, касающиеся ТПА.

Теория нелинейного программирования не дает ответа на вопрос о том, какие поисковые методы лучше, иногда приходится пользоваться несколькими процедурами. В сложной системе с многомерным поиском, как ТПА, экстремумов может быть несколько, и трудно гарантировать или даже понять какой найден экстремум: глобальный или локальный. Так, в зависимости от организации поиска возможно нахождение оптимумов в зонах А, Б или С (рис.1.13, 1.14). Только при их сопоставлении выясняется, что оптимум С на рис.1.14 – глобальный (обеспечивает более короткий впрыск по сравнению с зоной Б). Другой пример: в табл.1.3 представлены два результата, полученных при оптимизации аккумуляторной ТПА типа Common-Rail для дизеля ЗМЗ-514 при варьировании одними параметрами, использовании одной стартовой точки, но двух разных методов поиска. Решения 1 и 2 принципиально различны: в первом максимум $\bar{P}_{впр}$ получен за счет минимизации снижения давления у форсунки, возникающем при расходовании топлива через клапан слива и сопла. При этом требуются максимальные объемы полостей $V_{ф}$, диаметра трубопровода $d_{тр}$, минимальная его длина $L_{тр}$. Решение 2, напротив, использует волну сжатия, сгенерированную при отражении от аккумулятора первичной волны разрежения. Примечательно, что целевая функция получилась практически равной (129 и 126,5 МПа), но закон подачи и значения трех параметров оптимизации - принципиально различные. Тот же результат может быть получен при использовании разных стартовых точек.

Таблица 1.3. Поиск максимумов среднего давления впрыска при использовании метода Розенброка (1) и наискорейшего спуска (2)

	$V_{ф}, \text{мм}^3$	$\mu F_{ж}, \text{мм}^2$	$h_{кл}, \text{мм}$	$L_{тр}, \text{мм}$	$d_{тр}, \text{мм}$	$V_{и}, \text{мм}^3$
Интервал	200...10 ⁴	0,1...1	0,1...1	75...10 ³	2...6	100...2000
Старт	500	0,4	0,6	350	4	500
Решение 1	9230	0,13	0,51	75	6	100
Решение 2	200	0,15	0,465	275	3,85	100

Учитывая это и опыт проектирования ТПА, оказалось полезным использовать следующие принципы решения оптимизационных задач.

С учетом резкого увеличения времени поиска по мере увеличения числа параметров оптимизации (факторов), ей должен предшествовать отсеивающий эксперимент или, по крайней мере, тщательный количественный анализ. Его использование надежнее и, в конечном счете, эффективнее формального оптимизационного поиска. На этом этапе незаменимы 1- или 2-

факторные эксперименты. Если фактор малозначим или значим, но невзаимосвязан, т.е. оптимален при любых значениях прочих факторов, он выводится из числа параметров оптимизации. Даже специалисту сложно определить степень взаимовлияния факторов. Так, в рассмотренном примере (табл.1.3) объем наддыгольной полости V_n всегда стремился к минимальному.

При включении фактора в вектор независимых переменных следует иметь в виду, что процедуры оптимизации наиболее эффективно работают при равном влиянии факторов. В противном случае в процедуру вводится "относительная протяженность" параметра, не равная 1.

При большом числе факторов оправдано физическое расщепление процесса на отдельные составляющие, для которых ищется оптимальное сочетание определяющих его факторов. Так же рациональным оказалась раздельная оптимизация рабочего процесса дизеля и ТПА. Последнюю целесообразно раздельно оптимизировать поблочно, например, для традиционной ТПА:

- диаметр, ход плунжера, начало подачи, кулачковый привод;
- размеры, подъем, параметры конуса иглы, давление начала впрыска;
- прочие параметры ТПА.

Если параметр - дискретный (например, число отсечных окон), то выбирается целочисленное его значение, ближайшее к полученному. Нежелательно включать их в вектор независимых переменных. Лучше решить несколько оптимизационных задач, используя сканирование. То же касается собственно дискретной оптимизации (дополнительный клапан есть или отсутствует).

Для уменьшения размерности задачи желательно перевести параметры оптимизации в число ограничений или условий счета (цикловая подача, активный ход плунжера, начальное давление, давление над иглой и т.д.)

Все методы поиска должны приводить к одному решению задачи. В противном случае особенно важно использовать разные методы и разные стартовые точки, а результирующее решение выбирать методом экспертных оценок.

Для "овражистых" поверхностей отклика целесообразно применять градиентные методы поиска с сопряжением (тяжелого шарика, Дэвидсона - Флетчера - Пауэлла и др.), а для гладких поверхностей типа "плато" - метод деформируемого многогранника, наискорейшего спуска, Розенброка. Для многоэкстремальных задач наиболее эффективна комбинация случайного поиска с методами нелинейного программирования. Используемый в ПК метод Монте-Карло сродни многомерному сканированию, только случайным образом делает большое количество пробных расчетов во всей расчетной области. Впоследствии лучшие решения целесообразно использовать как стартовые точки для поиска градиентными методами. Применение метода Мон-

те-Карло особенно эффективно на высокопроизводительных ЭВМ, при этом целесообразно задавать большое количество (500 и более) расчетных точек.

На рис.1.15 иллюстрируется процесс поиска максимума $\bar{P}_{впр}$ в ТПА дизеля Д245. Для наглядности на график нанесены изолинии, полученные предварительно двухфакторным численным экспериментом.

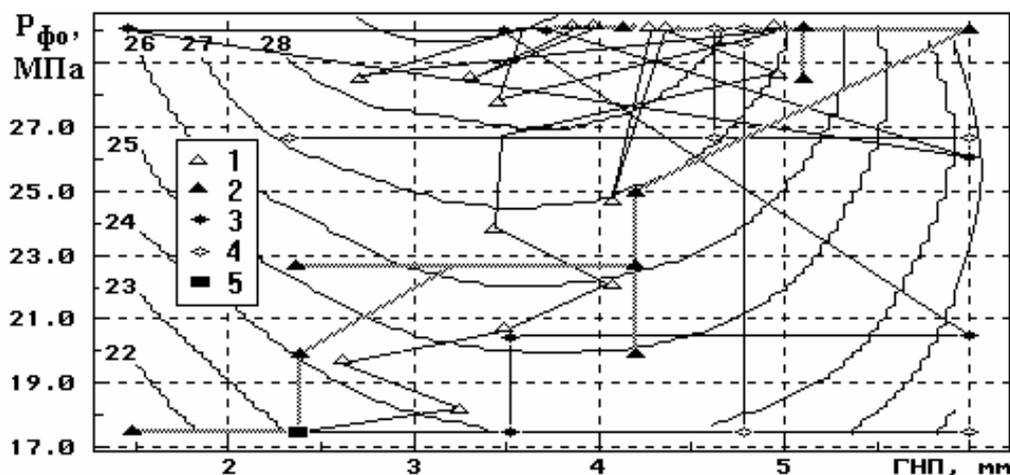


Рис.1.15. Движение к оптимуму в поле давления начала впрыска и геометрического начала подачи: 1- метод деформируемого многогранника; 2- наискорейшего спуска; 3- Розенброка; покоординатного спуска; 5- стартовая точка; изолинии (22...28 МПа) - среднее давление впрыска

В качестве ограничений, обычно, принимаются максимальное контактное напряжение, отсутствие подвпрыска, заброс газов в распылитель, иногда, максимальные давления в полостях, момент на валу, степень неравномерности вращения вала, цикловая подача, цикловой расход на управление (Common-Rail), цикловая доза всасываемого в ЛВД топлива (ТПА с клапанами подпитки ЛВД) и т.д.

Как это ни странно, труднее оказывается сформулировать целевую функцию. Решить эту задачу должны специалисты по рабочему процессу двигателя. Достаточно ясны задачи обеспечения заданного максимального или среднего давления впрыска, продолжительности или характеристики впрыска. В последнем случае вместо (1.1) ищется минимум целевой функции:

$$F = 1/t_{впр} \int [Q_{ф}^{зад} / Q_{ф}^{действ} - 1]^2 dt + \sum_{i=1}^n C_i^Y \cdot \Delta \bar{Y}_i^2 + \sum_{k=1}^m C_k^X \cdot \Delta \bar{X}_k^2. \quad (1.2)$$

В других случаях в качестве целевой функции могут использоваться средний заутеровский диаметр капли, коэффициент динамичности цикла, скорость плунжера или опять-таки контактные напряжения, цикловая подача, подача топлива через клапаны, расход на управление и др. В зависимости от функции получаем различные решения.