

## РАБОТЫ КАФЕДРЫ «ПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ» ЗА ПОСЛЕДНИЕ ПЯТЬ ЛЕТ

Л.А. Мягков, к.т.н., доц.,  
МГТУ им. Баумана



**Научно-исследовательские работы в области оптимизации рабочих процессов и топливоподающей аппаратуры.** Руководители работ: проф. кафедры А.С. Кулешов и Л.В. Грехов.

Ужесточение законодательных ограничений к показателям транспортных дизелей, в первую очередь экологических, привело к появлению новых требований, новых технических решений и новых значений показателей функционирования. В полной мере это относится и к одной из важнейших систем дизелей — топливоподающей аппаратуре (ТПА).

За последние годы в результате работ в данном направлении сформирована сквозная технология расчетной оптимизации рабочего процесса и проектирования топливной аппаратуры (рис. 1).



Рис. 1. Схема технологии сквозного проектирования топливной аппаратуры

### Концепция проектирования топливной аппаратуры перспективных дизелей

Основные показатели работы ТПА, ее конструктивные и режимные параметры определяются из цикла оптимизационных работ.

1. Оптимизация рабочих процессов (РП) производится по заданным критериям (расходу топлива, вредные выбросы) с учетом много-режимности работы двигателя.

В качестве критерия оптимизации целесообразно принимать удельный расход топлива. Выбросы вредных веществ целесообразно учитывать в качестве ограничений. Комплексная функция цели  $F$  отражает нарушение ограничений, выход за пределы границ допустимого компромиса и отход от экстремума критериев оптимизации:

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

где  $C$  — весовые коэффициенты;  $Z_j$  — параметры оптимизации;  $\Delta Y_i$  — нарушения ограничений;  $\Delta X_k$  — выход параметров за допустимый диапазон.

2. Оптимизация РП выполняется методами математического моделирования рабочего цикла двигателя. Для этого пригодны программы с моделями термодинамического класса, в которых как составляющие описываются процессы распыливания топлива, испарения, смесеобразования, воспламенения, сгорания, образования вредных веществ (программа ДИЗЕЛЬ-РК).

При оптимизации РП используются характеристики впрыскивания. Обычно это расчетные характеристики, полученные в результате первичного моделирования ТПА (Программа ВПРЫСК-4).

3. Наиболее важные для проектирования конструктивные параметры ТПА:

- число и диаметр сопловых отверстий;
- пространственная ориентация сопловых отверстий, выступание носика распылителя в камеру сгорания.

Важнейшие расчетные рабочие параметры ТПА:

- давление впрыскивания (по всем контрольным режимам);
- характеристика впрыскивания (по всем контрольным режимам).

4. Ограничения: максимальное давление в цилиндре, скорость повышения давления  $dp/d\phi$ , температура газов перед турбиной  $t_t$ , температура деталей камеры сгорания, наибольшее давление впрыскивания и д.р.

5. Выбор типа ТПА и частных технических решений определяется с учетом ограничений для параметров РП и других условий.

6. Параметрическая оптимизация ТПА выполняется с итерационным уточнением рабочих параметров и технических решений. Используются адекватные математические модели процессов топливоподачи. (ВПРЫСК-4).

Возможна дискретная оптимизация, вариантность решений.

7. Контрольные расчеты РП выполняются для корректировки рабочих параметров ТПА с повторными циклами оптимизационных расчетов РП.

8. Совместная расчетная оптимизация РП и ТПА позволяет достигать наилучших результатов в кратчайшие сроки, может использоваться для формирования базовых программ в системах управления.

В качестве примеров реализации этой технологии можно привести две работы, выполненные в рамках ФЦП «Двигателестроение».

### 1. Оптимизация рабочего процесса дизеля Д500 для достижения уровня ВВ EU Stage 3В

Ниже приведены результаты работы по оптимизации рабочих параметров нового отечественного дизеля Д500 с достижением уровня вредных выбросов EU Stage 3В.

Выполнено исследование совместного влияния цикла Миллера, применения рециркуляции ОГ (степень рециркуляции в 0,15–0,2), что требует роста  $\pi_k$  на 0,7 единицы. С учетом того, что давление наддува существенно превышает давление перед турбиной, был применен дополнительный компрессор дожатия ОГ и электроподкрутка ТК. Результаты моделирования показаны на рис. 2.

Вклад разных режимов в суммарную эмиссию вредных веществ существенно отличается: режим полной мощности определяет эмиссию оксидов азота, а режим 50 %  $P_e$  — эмиссию твердых частиц. Поэтому для обеспечения требований EU Stage 3В необходимо высокое давление впрыскивания топлива как на средних мощностях, так и на холостом ходу.

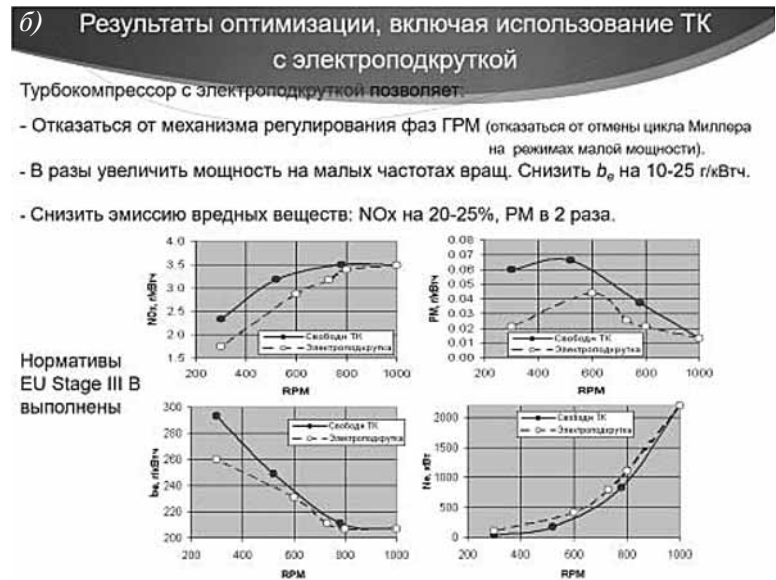
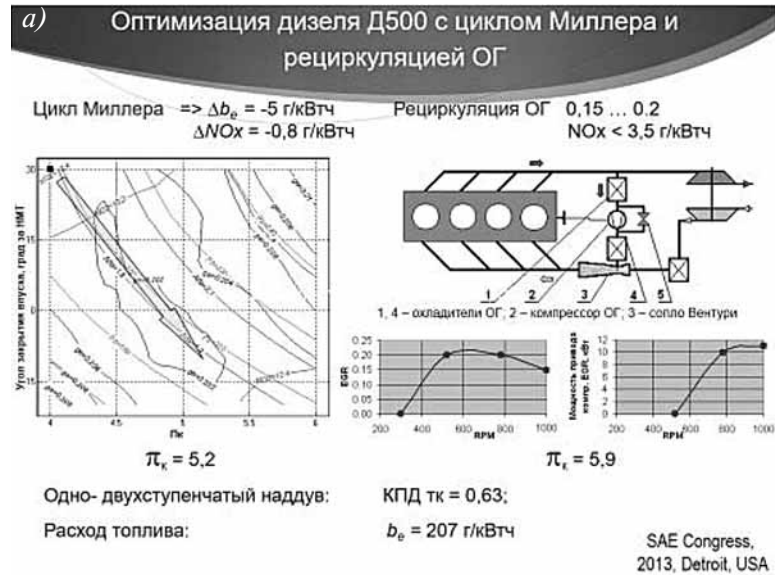


Рис. 2. Оптимизация рабочего процесса дизеля Д500 с циклом Миллера (а), влияние электроподкрутки ТК на показатели рабочего процесса

Оптимизация рабочего процесса среднеоборотного дизеля Д500 на режиме полной мощности проводилась по следующим параметрам: степень сжатия, диаметр сопловых отверстий, степень рециркуляции, давление наддува, длительность впрыскивания, давление топлива, опережение впрыскивания. Важную роль в организации рабочего процесса играет форма характеристики топливоподачи. Для ускорения сгорания топлива желательно иметь как можно более короткие фазы нарастания расхода топлива в начале впрыскивания и убывания расхода в конце. Однако резкое нарастание расхода в начале приводит к жесткому сгоранию и повышенной эмиссии  $NO_x$ . Поэтому оптимальной формой фронта характеристики впрыскивания является ломанная линия. Часть параметров, например угол

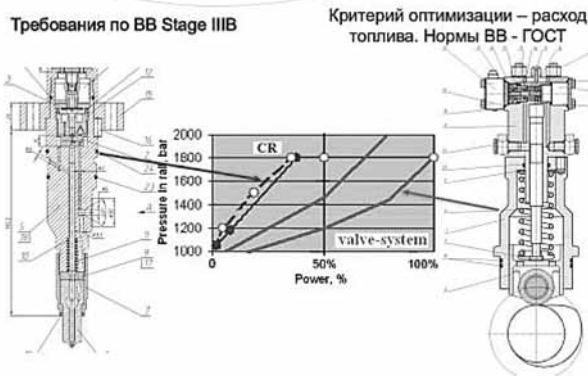


Рис. 3. Сравнение возможностей использования различных типов ТПА

ориентации сопловых отверстий в шатре, число сопел распылителя и некоторые другие, например параметры цикла Миллера выбирались на предварительном этапе оптимального поиска. Отдельной задачей является выбор функции цели. В данной работе использован комплекс, сводящий к единому значению расход топлива, выбросы оксидов азота и сажи. В качестве ограничения были приняты  $p_z$  и  $dp/d\phi$ .

Результаты работы можно сформулировать следующим образом:

- для современного форсированного СОД обоснована целесообразность одноразового впрыска топлива, причем с оптимизированным — «ломанным» передним фронтом характеристики впрыскивания;

- выбор типа ТПА обусловлен требованиями к уровню выбросов вредных веществ с ОГ. Критерию минимума расхода топлива удовлетворяет традиционная ТПА с электроклапанным управлением. Уровень требований EU Stage IIIB возможно обеспечить только при поддержании высоких давлений впрыска на частичных режимах с применением аккумуляторной системы common rail (рис. 3).

**II. Оптимизация рабочего процесса СОД 88-Г (18ДН23/2×30) производства ЗАО «Дизель-Энерго» (Санкт-Петербург)**

Решалась задача расчетного анализа процессов и возможностей форсирования дизеля с номинальной мощностью 5150 кВт при 800 об/мин до уровня 10 000 кВт при 900 об/мин при минимальном внесении изменений в конструкцию двигателя с точки зрения прочности. Двигатель имеет специальное назначение, поэтому экологические характеристики не рассматривались. В цилиндре двигателя установлены две форсунки, каждая с двумя отверстиями по 0,6 мм и одним отверстием 0,45 мм. Поршень имеет канавки

для прохода струй в объем КС. Конструктивные особенности двигателя приведены на рис. 4.

В процессе решения задачи были определены необходимая степень наддува, тип ТПА, разработаны рекомендации по модификации камеры сгорания и распылителей, выполнен расчет состояния деталей камеры сгорания (поршней).

Для требуемого увеличения мощности вполне достаточно умеренного давления наддува, а существующая топливная система ни по давлению, ни по производительности, не может обеспечить форсирование более 130 % от существующего уровня.

При анализе и оптимизации процесса смесеобразования была использована новая версия программы ДИЗЕЛЬ-РК с возможностью расчета пространственного пересечения топливных струй в объеме КС и конечно-элементного анализа теплового состояния поршней (60–80 ячеек на диаметр цилиндра). Специальная программа визуализации позволяет контролировать взаимодей-

**Оптимизация параметров дизеля 88-Г при форсировании до мощности 110%; 130%; 155%; 194%**

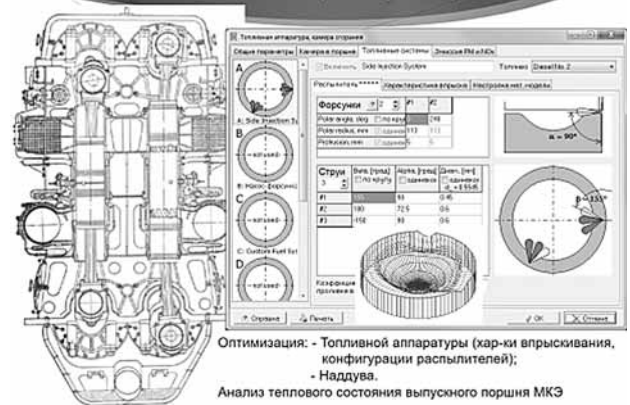


Рис. 4. Конструктивные особенности дизеля 18ДН23/2×30

**Конфигурация распылителей и развитие струй для форсированных вариантов дизеля**



Рис. 5. Пример визуализации распространения струй в КС и оптимизации сопловых отверстий

ствие струй. Для наглядности на рис. 5 показаны только четыре струи от одного распылителя. С увеличением цикловой подачи количество сопловых отверстий пришлось увеличить с трех до четырех. Ориентация сопловых отверстий подобрана таким образом, чтобы взаимодействие струй было бы минимальным. Несмотря на усложнение алгоритма расчета смесеобразования время счета одного режима не превышает 1 мин.

При форсировании дизеля целесообразна замена устаревшей ТПА на ТНВД с электроклапанным управлением с увеличенной производительностью и давлением подачи. Возможно использование как одного ТНВД, так и двух (как в исходном двигателе). В результате оптимизации с новой ТПА прогнозируется снижение расхода топлива дизеля примерно на 10 %.

Кроме того, для трех новейших двигателей – Д200 (6ЧН20/28) ОАО ПДМ, ДМ-185Т (12ЧН18,5/21) ОАО УДМЗ и М150М (12ЧН15/17,5) ОАО «Звезда» — был проведен цикл оптимизационных исследований для выявления оптимальных характеристик впрыскивания в целях выполнения нормативов EU Stage III, EPA Tier IV по выбросам вредных веществ.

Оригинальные математические модели и программы, разработанные сотрудниками кафедры под руководством проф. А.С. Кулешова и Л.В. Грехова, в течение тридцати лет совершенствовались и находили применение в НИР и ОКР для нужд промышленности [1, 2]. Сегодня они являются апробированными инструментами повышения технического уровня двигателей и проектирования ТПА по критериям энергоэффективности и экологичности.

Совместная оптимизация РП и ТПА имеет несомненные достоинства:

- оптимизация РП — единственный обоснованный способ формулирования технических требований к ТПА;
- характеристики топливоподачи необходимы для анализа РП дизеля;
- расчетные параметры РП до начала натурных испытаний могут служить критерием совершенства ТПА;
- программы ДИЗЕЛЬ-РК и ВПРЫСК выполнены в едином концептуальном ключе и позволяют обмениваться информацией.

**Рабочая группа газовой динамики**, возглавляемая д.т.н. Ю.А. Гришиным, уже свыше 40 лет занимается совершенствованием газообмена и вопросами применения численных методов для моделирования течений в элементах ДВС.

Основные инструменты для работы — ряд программных средств, созданных непосредственно на кафедре. Ключевыми являются ПК NSF-3 для

моделирования трехмерных нестационарных течений сжимаемой жидкости и ПК OneDimFlow, предназначенный для расчета одномерных потоков в разветвленных трактах ДВС.

Программный комплекс ODF предназначен для моделирования одномерных течений газа. Его расчетное ядро построено на базе линеаризованного метода Годунова, а основной интерес представляют авторские граничные условия расчета течения через клапаны двигателя, разветвления, агрегаты турбонаддува и т. п. Программный комплекс допускает расчет каналов произвольной топологической структуры с произвольным числом цилиндров и других элементов.

С применением данного программного комплекса могут решаться задачи исследования и оптимизации колебательных процессов в газозвуковом тракте двигателя, а также вопросы взаимодействия различных цилиндров в многоцилиндровом двигателе. На рис. 6 показан пример моделирования динамического наддува и течения в разветвленном тракте дизеля Д500.

Программный комплекс NSF-3 построен как классический CFD-код универсального назначения. В расчетном ядре используется разработанная проф. Ю.А. Гришиным авторская модификация метода крупных частиц, обеспечивающая значительно лучшую устойчивость по сравнению с оригинальным методом. Расчет осуществляется на ортогональной регулярной сетке с дробными ячейками, генерируемой из заданной в произвольной САПР геометрии. Реализована k-eps модель турбулентности. Имеется возможность проведения расчетов с учетом движения поршня и клапанов.

Комплекс неоднократно применялся для решения задач профилирования элементов газозвукового тракта новых и серийных двигателей таких заводов, как ОАО «Коломенский завод», ОАО «ГМЗ АГАТ», «Aumet Oy» (Финляндия),

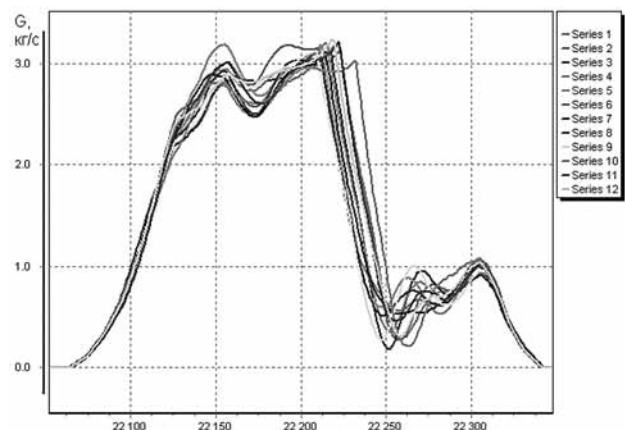


Рис. 6. Моделирование расхода газа в выпускном коллекторе дизеля Д500

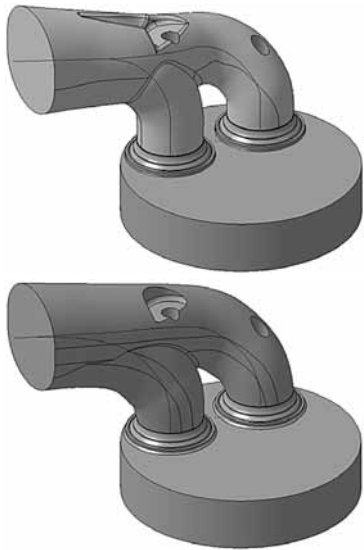


Рис. 7. 3D модель впускного канала крышки цилиндра дизеля Д500 (базового и предлагаемого вариантов)

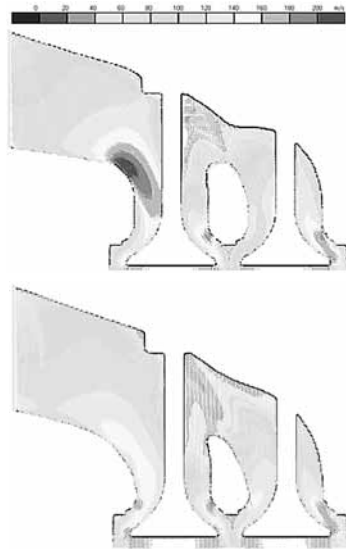


Рис. 8. Результаты моделирования течения во впускном канале крышки цилиндра дизеля Д500

ОАО «КамАЗ». Некоторые результаты этих работ приведены на рис. 7 и 8.

Оптимизация профиля позволила увеличить максимальный расход воздуха через впускной канал на 23 %, через выпускной на 16,2 % по сравнению с базовым вариантом. Прирост мощности дизеля при этом составит 40 кВт, уменьшение удельного расхода топлива 2 г/кВт·час.

Оба программных комплекса широко используются в учебном процессе для подготовки студентов и аспирантов кафедры.

**Работы по изучению локального теплообмена** выполняются под руководством профессора Р.З. Кавтарадзе по следующим направлениям:

- исследование процессов наполнения, смесеобразования и сгорания топлива в поршневых двигателях в 0–1-мерной и 3-мерной постановках;
- локальный теплообмен в камерах сгорания поршневых двигателей различных типов;
- моделирование образования вредных веществ при горении топлива в дизелях;
- рабочий процесс двигателей при использовании альтернативных топлив.

Продолжено совершенствование программных комплексов MZM (многозонное моделирование внутрицилиндровых процессов) и «Heat Transfer» (моделирование локального теплообмена для осесимметричной модели камеры сгорания), разработка которых ведется уже более 15 лет. Моделирование 3D процессов осуществляется в ПК AVL FIRE, доступного в рамках лицензионного соглашения с AVL List GmbH.

Многозонная модель, реализованная в программном комплексе MZM (разработка кафедры Э2), позволяет определить локальные нестационарные температуры рабочего тела и давление в КС, а следовательно, получить более точные данные для расчета кинетики образования вредных веществ. Для оценки количества топлива, попадающего в каждый контрольный объем (КО) используется программа «Fakel», также разработанная на кафедре Э2 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Математическая модель, реализованная в MZM, учитывает радиационный тепловой поток от соседних КО.

Программа «Heat Transfer», позволяет на основании результатов нульмерного моделирования рабочего процесса двигателя определить параметры теплообмена (тепловой поток, тепловые граничные условия) на поверхности

КС с учетом геометрии камеры в поршне в осесимметричной постановке. В математической модели учитывается наличие динамического и теплового пограничного слоя. На рис. 9 показаны результаты расчета теплообмена и образования оксидов азота в камере сгорания дизеля.

Программный комплекс AVL FIRE применялся для сквозного расчета процессов наполнения, смесеобразования, сгорания и выпуска газового двигателя 6ГЧН21/21 (280ГД) разработки ОАО «Волжский дизель им. Маминых». Характеристики двигателя: 4-тактный, 6-цилиндровый, с рядным расположением цилиндров, жидкостного охлаждения с газотурбинным наддувом и промежуточ-

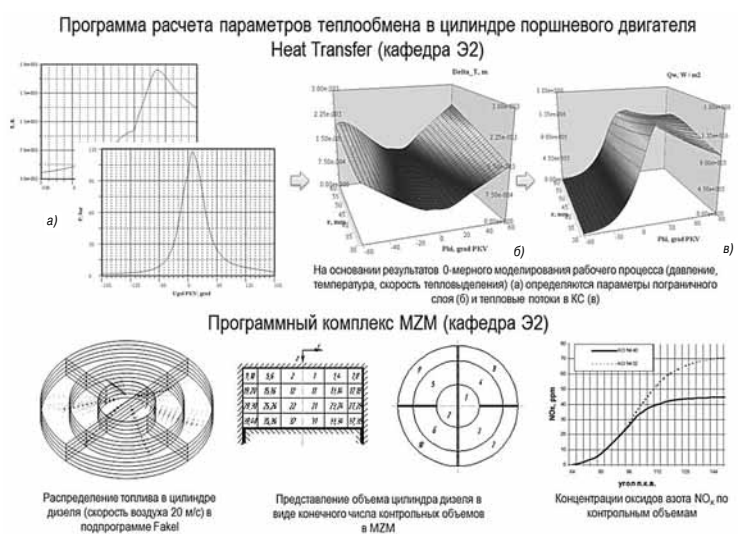


Рис. 9. Результаты расчета теплообмена и образования оксидов азота в камере сгорания дизеля в программах «Heat Transfer» и MZM, разработанных на кафедре

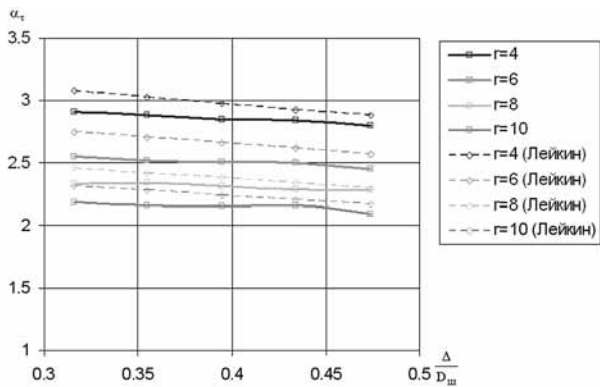


Рис. 10. Теоретический коэффициент концентрации напряжений в галтели шатунной шейки при кручении

ным охлаждением надувочного воздуха, форкамерно-факельным зажиганием (инициация сгорания в форкамере — от электрической искры). Результаты расчетов позволяют выдать практические рекомендации по изменению как регулировочных, так и конструктивных параметров двигателя.

**Направление конструирования и прочности двигателей** продолжает активно развиваться под руководством профессора Н.Д. Чайнова. Было проведено большое количество работ, основным заказчиком которых выступил Коломенский завод. В результате выполнения НИР удалось обобщить многие наработки, сделанные за последние 15 лет, и опробовать их «сквозное» использование.

В области расчета коленчатого вала был получен ряд новых результатов, которые позволяют уточнить существующие методики. Так современные методы численного моделирования напряженно-деформированного состояния позволили расширить границы применимости соотношений, полученных экспериментально более полувека назад. На рис. 10 и 11 показаны зависимости теоретического коэффициента концентрации напряжений в галтели шейки при кручении КВ и теоретического коэффициента концентрации напряжений в маслоподводящем отверстии при изгибе колена вала. В дальнейшем эти данные были включены в программный пакет KVAL, кото-

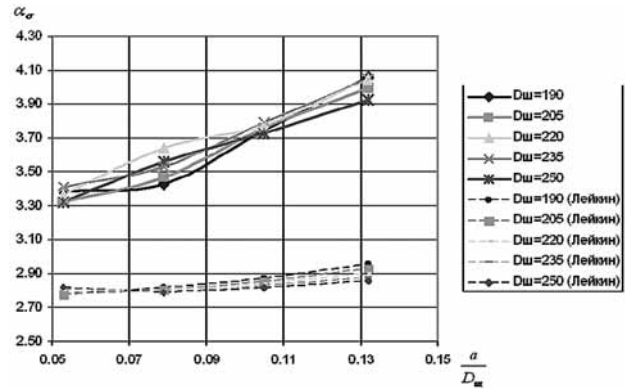


Рис. 11. Теоретический коэффициент концентрации напряжений в маслоподводящем отверстии при изгибе колена вала

рый реализует аналитический подход к расчету коленчатого вала как по разрезной, так по неразрезной схемам, учитывая при этом по-

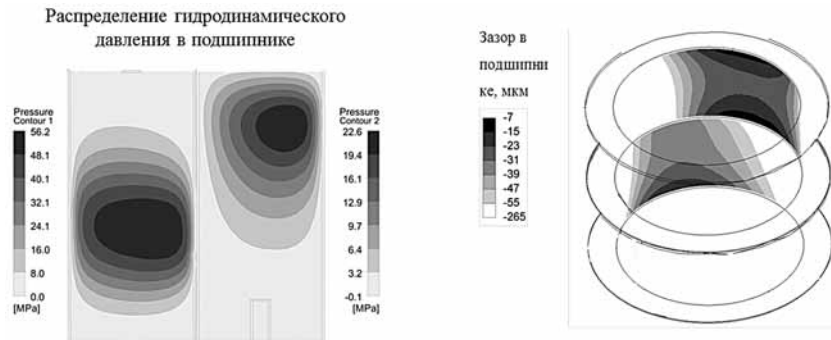


Рис. 12. Распределение параметров шатунных подшипников дизеля Д500

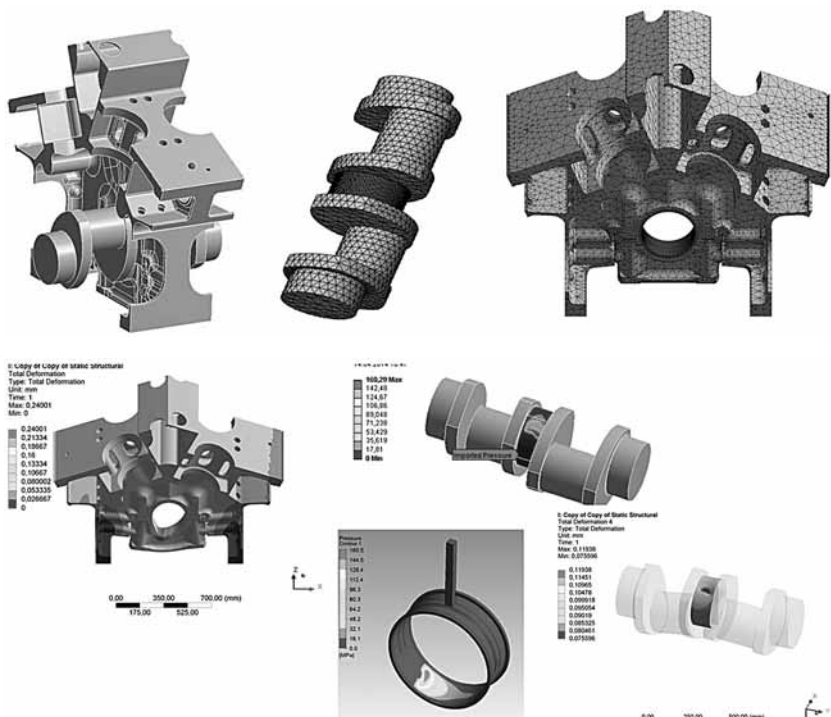


Рис. 13. 3D модель блок-картер коленчатый вал и результаты моделирования работы коренного подшипника дизеля Д500

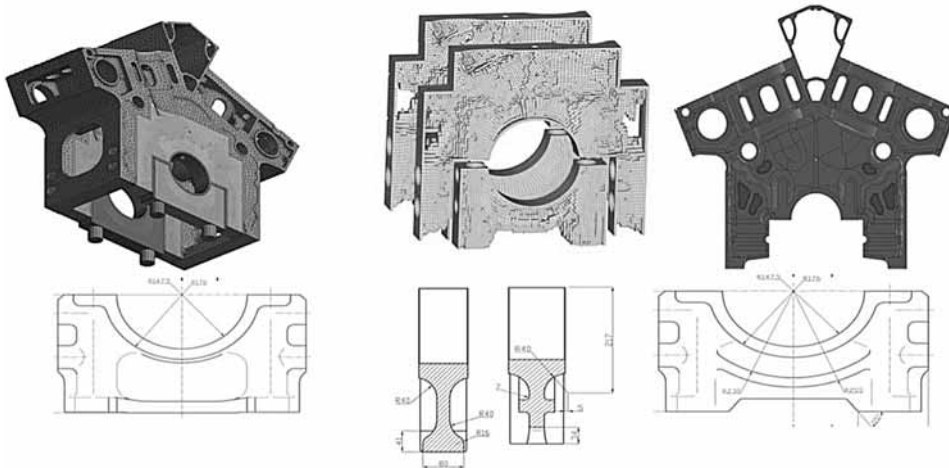


Рис. 14. Результат топологической оптимизации стойки остова дизеля Д500

датливость коренных опор и напряжения, возникающие от крутильных колебаний.

Был выполнен ряд работ по расчетному обоснованию технологических режимов обкатки галтелей коленчатого вала, проводимой для повышения его циклической прочности.

Большие усилия были затрачены на разработку методик упруго-гидродинамического расчета шатунных и коренных подшипников коленчатого вала на основе современных сред численного анализа, например ANSYS. На рис. 12 представлены результаты моделирования шатунных подшипников перспективного дизеля Д500.

Расчет коренного подшипника проводился в постановке, показанной на рис. 13. Физическая расчетная модель включала два соседних колена и секцию остова двигателя. Расчет также проводился в гидроупругой, неизотермической постановке.

В дальнейшем результаты моделирования напряженно-деформированного состояния остова были использованы для проведения топологической оптимизации детали. Для ее реализации был разработан алгоритм оптимизации по критерию циклической прочности с учетом ограничений на изменение формы подшипника. На рис. 14 показаны оптимизируемая модель и результаты оптимизации. Хорошо видны области с «лишним материалом» и изменение формы крышки коренной опоры (слева исходная форма, справа — оптимизированная).

Данная технология положена в основу определения рациональных силовых схем деталей, подверженных как статическим, так и циклическим

механическим нагрузкам.

**Направление термомеханической выносливости теплонапряженных деталей.** В рамках данного направления продолжалась разработка методик моделирования напряженно-деформированного состояния поршней и крышек цилиндров высокофорсированных дизелей с учетом неупругого деформирования, вызванного тепловыми нагрузками

(релаксации напряжений, определяющих малоцикловой характер циклической прочности), а также высокочастотными механическими и тепловыми нагрузками возникающими в течение одного рабочего цикла, действующими с различной фазой и имеющими многоцикловой характер.

На рис. 15 показаны результаты моделирования теплового напряженно-деформированного состояния стального поршня ЧН13/15 с уровнем

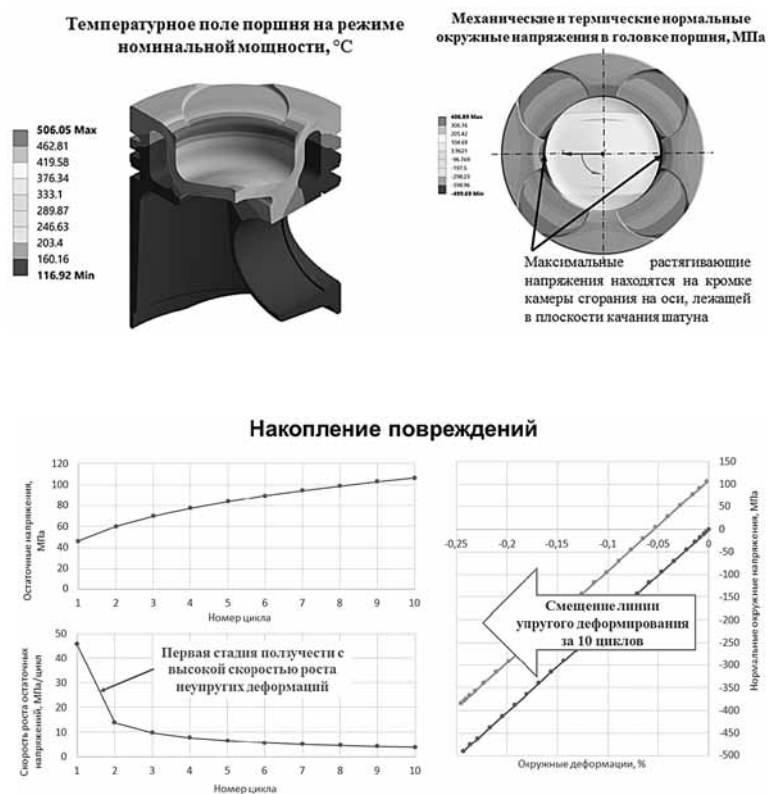


Рис. 15. Температурное поле и поля суммарных напряжений в стальном поршне дизеля ЧН13/15 при уровне форсирования ( $p_e = 35$  бар и  $p_c = 300$  бар), цикл накопления остаточных деформаций и остаточных напряжений в кромке камеры сгорания

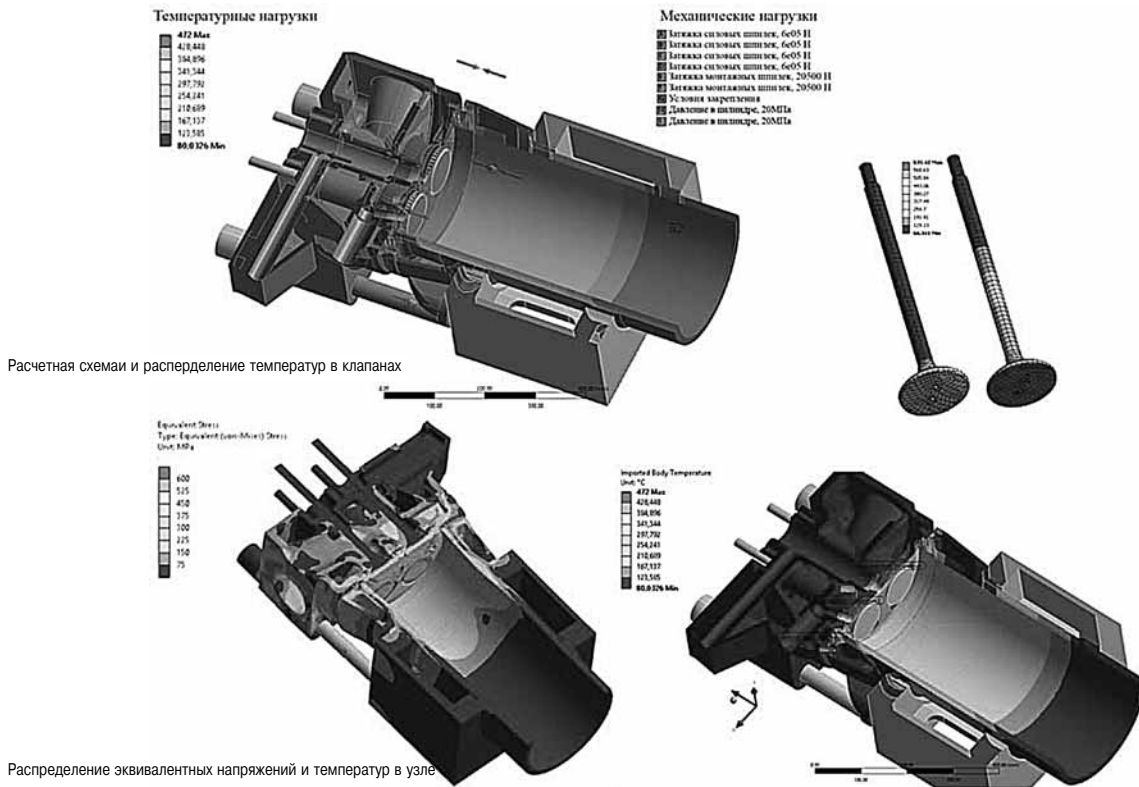


Рис. 16. 3D модель и результаты расчета ТНДС узла крышка цилиндра– клапана–прокладка стыка–цилиндр

форсирования по  $p_e = 35$  бар при максимальном давлении цикла  $p_z = 300$  бар.

В последние годы удалось реализовать обобщенную методику компьютерного моделирования теплового и напряженно-деформированного состояния (ТНДС) крышек цилиндров.

Производительность современных компьютеров позволяет в настоящее время учитывать практически все действующие на деталь нагрузки. При этом стало возможным проводить сопряженные расчеты, чтобы учесть теплообмен как между охлаждающей жидкостью и поверхностями охлаждения, так и между рабочим телом и газовоздушными каналами крышки. При моделировании теплообмена в полости охлаждения проводится расчет течения охлаждающей жидкости в блоке, в результате выбирается цилиндр с худшими условиями, далее проводится детальная оценка течения в этой полости, включая учет процесса кипения на поверхности раздела. При

расчете учитываются смежные детали: прокладка газового стыка и седла с клапанами. Температурное поле клапанов и седел согласуются между собой с помощью итерационной процедуры. На рис. 16 представлены расчетная схема, и результаты расчета узла крышка цилиндра–цилиндр–часть блока цилиндров

**В качестве заключения** хотелось бы отметить, что несмотря на сложности обеспечения экспериментальных научных исследований, коллективу кафедры удалось сохранить и развить научный потенциал и квалификацию а области моделирования физических процессов, протекающих в поршневых двигателях. В настоящее время основное внимание кафедры сосредоточено на восстановлении экспериментальной исследовательской базы, поскольку основой создания новых математических моделей и их верификации являются экспериментальные данные, как на модельных установках, так и на натуральных объектах.