

ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ ALLBEA: РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗООБМЕНА ДИЗЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ

*Т.И. Терегулов, асп., А.А. Черноусов, доцент
Уфимский государственный авиационный технический университет*

Обсуждается организация расчетов на ЭВМ процессов в ДВС как многоэтапных проектов в контексте расчетно-экспериментальной методологии. Задачи крупных этапов таких проектов — параметрический анализ или синтез объекта (или же его модели); они ставятся и решаются в общем случае как обратные задачи. В этой связи отмечается важность автоматизации расчетных работ теми или иными программными средствами. На примере расчетного анализа и оптимизации процессов газообмена дизеля 12ЧН15/18 показано использование моделей элементов тракта и вспомогательных средств из пакета программ ALLBEA в расчетном проекте.



очевидны затруднения. Компьютерные программы реализации пространственных моделей процессов в ГВТ трудоемки (генерация адекватных сеток, особенно для параметризованной задачи, нетривиальна), требуют больших затрат времени ЭВМ на одиночный расчет, а удовлетворительная точность результатов не обеспечивается автоматически.

Проектирование и доводка проектных показателей двигателя до соответствия требований технического задания во многом сводится к оптимизации процессов в его газозоообменном тракте (ГВТ). Необходимо отрабатывать газодинамическое совершенство элементов ГВТ и согласовывать совместную работу всех элементов и агрегатов (поршневой части, компрессора и турбины — для двигателя с газотурбинным наддувом). Решается эта задача расчетными и экспериментальными методами с применением конкретных инструментов и методик.

При выполнении таких расчетно-экспериментальных работ предпочтительно применять «сквозную» модель нестационарного течения газа на всем протяжении ГВТ. Только такой подход позволяет (пусть приблизительно, но во взаимной увязке) воспроизвести численными методами процессы в рабочей камере и течения газа через компрессор, коллекторы, впускные и выпускные каналы и турбину. В идеальном случае расчет нестационарного потока в ГВТ должен проводиться в пространственной постановке. С учетом того, что используемую модель желательно применять как в расчетном анализе (включая многопараметрический), так и в расчетном синтезе (оптимизации) ГВТ,

Поэтому на практике расчеты ГВТ в сквозной постановке (в основном, или, по крайней мере, на первых этапах) ведутся по модели одномерного нестационарного потока [1]. Построенные на гипотезах об осредненных (по сечениям каналов и по объемам рабочих камер, коллекторов и ресиверов) параметрах рабочего тела, такие модели не адекватно описывают пространственное течение и потому расчетные значения показателей ДВС по ним обычно заметно отклоняются от измеренных. Модели этого класса принципиально нуждаются в эмпирических зависимостях (характеристиках, задающих тепловыделение, потери полного давления на клапанах впуска и выпуска и др. местных сопротивлений и разветвлениях, расходно-напорных характеристиках агрегатов наддува и др.). Следует применять рациональные методики «прямой» идентификации характеристик из натуральных и вычислительных экспериментов, однако это не устранил отклонения результатов моделирования, вызванные присутствием самой «квазиодномерной» модели огрублением при описании процесса в ГВТ.

Таким образом, применимость моделей указанного класса к анализу процессов в ГВТ дви-

гателя и «синтезу» (оптимизации) его облика и параметров оказывается под вопросом, особенно для задач доводки. Конечно, на практике многое зависит от задачи (т. е. от структуры конкретного ГВТ); чаще всего переход к пространственным моделям (хотя бы на критических участках ГВТ) не оправдан, но всегда возможно, оперируя «калибрующими» коэффициентами для даваемых моделью показателей, использовать квазиодномерную модель лишь для *сравнительных* расчетов (что имеет смысл и удобно при «монотонном» характере отклонений).

Более обоснованную калибровку модели обеспечивает параметризация используемых в ней эмпирических характеристик (или имеющихся «быстрорасчетных» процедур для их генерации). На этой основе может быть решена обратная (оптимизационная) задача параметрической идентификации (ПИ) модели процесса в ГВТ — подбор значений введенных в модель параметров по критерию лучшего соответствия измеренным значениям показателей (базового) объекта, например, для ДВС — интегральным показателям (в выбранной режимной точке, по характеристике или по всему полю режимов). Результаты ПИ в каждом случае требуют количественной и качественной оценки — верификации. Предполагается, что откалиброванная в результате такой ПИ модель будет оставаться универсальной (при фиксированной структуре ГВТ для достаточно широких диапазонов изменения его конструктивных параметров) и потому будет полезна для анализа и оптимизации процесса на этапах доводки изделия.

Этапы расчетных работ (ПИ, верификация, одно- и многопараметрический анализ, оптимизация) и процедуры единичных и массовых расчетов на этапах целесообразно автоматизировать (запрограммировать) до возможности автоматически обновить данные в отчетах о результатах при изменении постановок задач этапов, структуры модели и параметров в массиве исходных данных. Затраты, вложенные в автоматизацию расчетной части ответственных расчетно-экспериментальных работ (например, доводка важного изделия в двигателестроении) будут оправданы, так как автоматизированная рациональная методика расчетов повышает достоверность и оперативность расчетного анализа и вырабатываемых рекомендаций. Важно и то, что получаемые на этапах испытаний изделия данные о его показателях при такой ПИ его модели рациональным образом учитываются и используются, что приближает технологию расчета к «полунатурному» моделированию.

Продуктивным видится проведение расчетных работ в рамках единого проекта, где задача каж-

дого этапа расчета в общем случае ставится как обратная задача, т. е. задача параметрического (если не структурно-параметрического) синтеза объекта или же модели (или, как минимум, основывается на решении *обратной задачи* на предыдущем этапе). Моделирование на отдельном этапе в принципе не должно ограничиваться единственным физическим аспектом (газодинамические процессы в ГВТ и т. п.) и/или фиксированной структурой модели объекта. Так, ценна возможность расчета функционирования объекта в разных аспектах на разных этапах проектирования (сопряженные задачи, «многодисциплинарные» модели) — с подключением или отключением конкретных моделей (разных физических аспектов и моделей как описаний с разной степенью детализации).

Эти и другие соображения приводят к весьма серьезным требованиям к предполагаемой информационной CALS/ИПИ-системе поддержки процессов проектирования, даже если речь идет всего лишь о реализации на всех уровнях этой системы комплексной поддержки элементов указанной общей технологии расчетного анализа и синтеза. Комплексная реализация ряда ее полезных возможностей (наряду с прочими группами существенных требований) в CALS/ИПИ-системе делает проект ее разработки нетривиальным, и провал проекта разработки отраслевой системы такого рода — весьма вероятным. По мнению авторов, чтобы быть полезной, CALS/ИПИ-система не должна навязывать «нижележащим» уровням (предметно-ориентированным методикам и прикладному ПО) каких-либо правил и ограничений в обсуждаемом аспекте поддержки расчетных проектов. Мы считаем, что системе в этом плане следует лишь приспособливаться к реализуемым расчетчиками (и, в лучшем случае, разработчиками прикладного ПО) средствам. Разработчики пакетов прикладных программ свободны в том, реализовывать ли (и если да, то — как именно) в своем ПО соответствующие средства поддержки — на уровнях (а) прикладных математических моделей и (б) пакетов прикладных программ. И здесь успеху разработки поспособствует планомерное развитие «снизу вверх» по иерархии требований.

Так, ALLBEA [4, 5] развивается как программный пакет, нацеленный на задачи анализа процессов и многопараметрические обратные задачи (синтез моделей и объектов) в многодисциплинарной постановке при проектировании технических систем вообще и в области ДВС в частности. Разработанные для ALLBEA модели процессов в ГВТ прикладной библиотеки *gasdyn* применяются на кафедре ДВС УГАТУ в расчетных работах по методике, включающей ПИ моделей

[2, 3]. В состав пакета ALLBEA в настоящее время входят лишь базовые средства поддержки параметризации исходных данных и многопараметрической оптимизации и базовые средства «распределенных» вычислений (в сети многопроцессорных ЭВМ). Алгоритм оптимизации в ALLBEA — универсальный (предметно-инвариантный), он реализован в отдельной программе пакета. Настройку программы на решение конкретной обратной задачи должен (и это принципиально) выполнять расчетчик, чтобы определить способы параметризации исходных данных и вычисления целевой функции (ЦФ) в модуле пользовательского кода (в случае ALLBEA — на С или С++); причем ему требуются навыки программирования, которые нужны еще и для того, чтобы запрограммировать последовательность расчетных задач проекта — для автоматизации расчетов и представления результатов.

Цель одного из выполняемых такого рода расчетных проектов состоит в анализе совершенства процессов газообмена дизеля 12ЧН15/18. В практические задачи проекта входила реализация расчетной методики, калибровка модели, предварительный анализ результатов моделирования и предварительный же оптимизационный расчет (в обеспечение возможных далее доводочных работ по схеме «калибровка — расчетный анализ — расчетный синтез — испытания»).

В число задач, стоящих перед разработчиками ALLBEA и библиотеки *gasdyn*, входила программная реализация расчетных процедур и на основе этого — оценка требований и возможностей для включения в пакет ALLBEA (как на уровне архитектуры, так и на уровне его «служебных» библиотек) более высокоуровневых средств поддержки расчетных работ такого рода. В ходе работ также выявлялась необходимость в доработке моделей *gasdyn* применительно к расчету течений через турбомашину [6].

В расчетном проекте использована упрощенная односекционная модель ГВТ, структурная схема которой показана на рис. 1.

В модели процессов в ГВТ (см. рис. 1) применены модели течения через компрессорную и турбинную ступени с использованием характеристик ступеней, полученных экспериментально на испытательном стенде. При прямом расчете работы КДВС на установившемся режиме по методу установления автоматически достигается согласование «рабочих точек» компрессора,

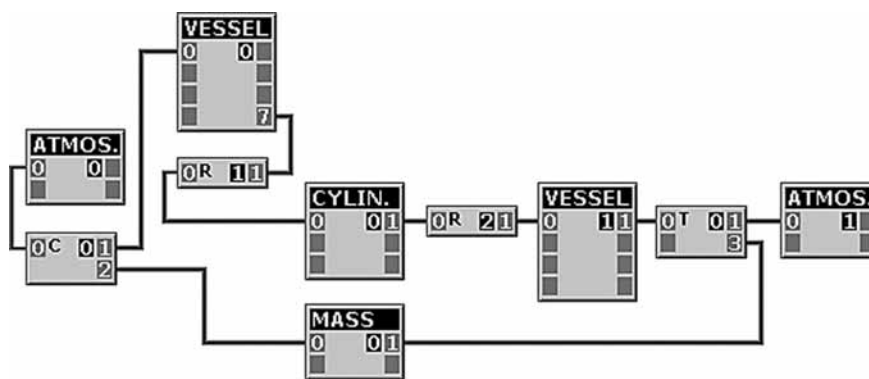


Рис. 1. Схема односекционной модели газовоздушного тракта дизеля 12ЧН15/18

турбины и поршневой части. Расчетный шаг по углу поворота коленчатого вала был фиксированным и составлял 0,5 град ПКВ. В расчетном проекте последовательно были реализованы следующие этапы расчетной методики:

- калибровка, или ПИ модели, — на основе данных из протоколов испытаний и по свободным параметрам, введенным в модель газотурбинного наддува;

- расчетный анализ — верификация результатов ПИ модели по расчетным нагрузочным характеристикам (НХ; сравнение их с измеренными показано на рис. 2), и анализ течения через клапаны впуска и выпуска — для режима двигателя, близкого к номинальному, и для критически важных для расхода воздуха режимов течения на клапанах (для этого, как и для задания расходных характеристик клапанов в расчете, применено численное моделирование в 3D течения газов, рис. 3);

- расчетный синтез; на данном этапе — оптимизационный подбор углов и продолжительности открытия органов газообмена, в будущем — более комплексная расчетная оптимизация (с постановкой реальной задачи по согласованию с Заказчиком).

Решение задачи ПИ модели было основано на расчете интегральных показателей (G_B и N_e) по НХ для ряда значений $n = 1500; 1700; 1900; 2000$ об/мин и в диапазоне $\alpha = 2-2,8$ (в пяти равноотстоящих точках). ЦФ как мера соответствия показателей по результатам расчета по модели (с интерполяцией полиномом по расчетным точкам НХ) и данных протокола испытаний задавалась суммой

$$\sum_{k=1}^K w_k \left[0,5 \cdot \left(\frac{G_{B\varepsilon} - G_{Bp}}{G_{B\varepsilon}} \right)^2 + 0,5 \cdot \left(\frac{N_{e\varepsilon} - N_{ep}}{N_{e\varepsilon}} \right)^2 \right]_k, \quad (1)$$

где подстрочные индексы «э» и «р» — соответственно для экспериментальных и расчетных

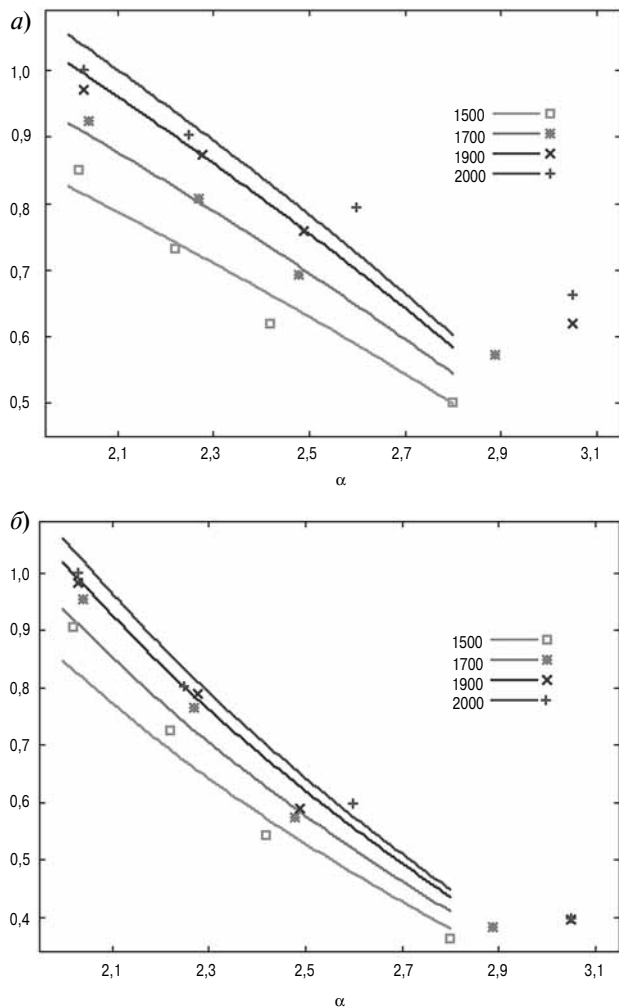


Рис. 2. Расчетные кривые
а) $\bar{G}_B = G_B/G_{B0}$; б) $\bar{N}_e = N_e/N_{e0}$ по нагрузочным характеристикам и точки измеренных значений

значений; k — индекс режимной точки протокола испытаний; w_k — весовой коэффициент, нужный, например, для исключения отдельных точки протокола; при оценке ЦФ по (1) были исключены ($w_k = 0$) экспериментальные точки с $\alpha > 2,75$ (см. рис. 2).

Минимизацией ЦФ в виде суммы (1) по генетическому алгоритму под управлением программы оптимизации из пакета ALLBEA получены значения шести свободных параметров модели. Кривыми на рис. 2 показаны НХ, рассчитанные по модели, прошедшей указанного вида ПИ; это решение позволяет выполнить верификацию модели, и далее приступить к анализу даваемых ею результатов. С качественной стороны графики на рис. 2

позволяют заключить, что расчетные показатели имеют вид гладких и «эквидистантных» НХ, чего нельзя сказать о данных из протокола испытаний.

С количественной стороны адекватность модели, прошедшей ПИ, формально характеризуют значения $\bar{\Delta G}_B = 3,9\%$ и $\bar{\Delta N}_e = 4,9\%$ среднеквадратических (по данной выборке из 12 точек с $w_k = 1$) относительных отклонений расчетных значений показателей от измеренных. Указанная степень соответствия позволила принять модель для расчетного анализа и далее для расчетной оптимизации параметров ГВТ.

Предварительный анализ совершенства процесса в ГВТ выполнен по результатам расчета газообмена на режиме $n = 2000$ об/мин и $\alpha = 2,03$. Отклонения расчетных значений показателей от измеренных для указанной точки протокола — $\bar{\Delta G}_B = 4,1\%$ и $\bar{\Delta N}_e = 3,5\%$. Результаты расчета позволили определить, в частности, критические по расходу рабочего тела режимы течения на клапанах впуска и выпуска (т. е. подъемы клапанов и отношения давлений на них). Заключение о резервах совершенствования клапанных каналов как элементов проточной части ГВТ сделано по виду полей параметров в потоке, полученных специальными расчетами в пространственной постановке в CFD-пакете. Анализ режимов течения на ступенях турбомашин делается по точкам совместной работы поршневой части и ступеней ТК на графиках характеристик компрессора и турбины. На этапе анализа выявлены некоторые резервы форсирования 12ЧН15/18 путем отработки элементов его ГВТ.

Процедуры этапа расчетной оптимизации в рамках данного проекта также запрограммированы, но решена лишь простая тестовая задача подбора фаз газообмена. На последующих этапах планируется уточнить постановку комплексной задачи расчетной оптимизации. На основе ее решения

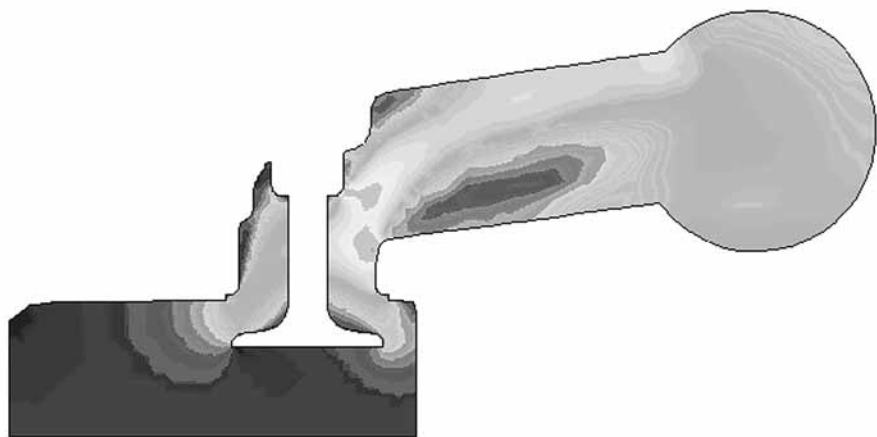


Рис. 3. Расчетное поле числа M на выпускном клапане

можно будет выдать рекомендации по изменению конструкции газоздушного тракта 12ЧН15/18.

Заключение

В двигателестроении актуальны математические модели, инструменты и методики, которые бы обеспечивали оперативное решение прямых и обратных задач расчета процессов в объектах проектирования на всех стадиях. Высокую эффективность ведения расчетных проектов мог бы обеспечить общий подход на основе автоматизации (более или менее высокоуровневыми средствами) этапов расчетного проекта, предусматривающего в общем случае решение на ЭВМ серии прямых задач (расчетного анализа) и обратных (синтеза: идентификации модели и оптимизации объекта проектирования) задач. На разных уровнях программного обеспечения (и других видов информационного обеспечения) желательно наличие средств поддержки многоэтапной методологии расчетных работ, при этом степень этой поддержки, по-видимому, может и должна определяться для специального пакета прикладных программ независимо от применяемой в проектировании (или только формируемой) CALS/ИПИ-системы, которая должна интегрировать все компоненты информационного обеспечения.

В статье показано решение задачи расчетного анализа и оптимизации процессов в газоздушном тракте дизеля 12ЧН15/18 с применением входящих в пакет ALLBEA моделей элементов тракта и вспомогательных средств и по расчетной методике обсуждаемого вида. На данном примере проиллюстрирована возможность калибровки модели процессов в газоздушном тракте, повышающей адекватность модели и, как следствие, ценность результатов расчетного анализа и последующей оптимизации газообмена на стадиях доводки. Про-

цедуры расчетной методики реализованы программно, что позволяет далее оперативно уточнять и углублять саму модель и методику и многократно выполнять расчеты для анализа и совершенствования газообмена двигателя.

В ходе работ выявлены резервы и определены направления улучшения как архитектуры пакета ALLBEA в плане поддержки ведения подобных расчетных проектов, так и прикладных моделей газодинамических процессов в ДВС.

Литература

1. Рудой Б.П. Прикладная нестационарная гидрогазодинамика: учеб. пособие. — Уфа : УАИ, 1988. — 184 с.
2. Еникеев Р.Д. Расчетно-экспериментальное совершенствование процессов газообмена двигателя АПД 800 / Р.Д. Еникеев, В.Ю. Иванов, В.С. Михайлов, В.Ф. Нурмухаметов, С.П. Павлинич, А.А. Черноусов // Вестник УГАТУ. — Уфа: УГАТУ, 2010. — Т. 14, № 2. — С. 13–20.
3. Enikeev R. Identification technique for quasi-1D model of gas-exchange process in a two-stroke engine / R. Enikeev, A. Chernousov, V. Mikhailov // SAE Paper 2011-01-1145, April 2011. — 10 p.
4. Еникеев Р.Д. Проектирование и реализация пакета прикладных программ для анализа и синтеза сложных технических объектов / Р.Д. Еникеев, А.А. Черноусов // Вестник УГАТУ. — Уфа: УГАТУ, 2012. — Т. 16, № 5. — С. 60–68.
5. Еникеев Р.Д. Программный пакет ALLBEA: задачи интеграции с информационной средой проектирования ДВС / Р.Д. Еникеев, А.А. Черноусов // Двигателестроение. — 2013. — № 2. — С. 37–40.
6. Терегулов Т.И. Модель течения через двухзаходную турбину для численного расчета волновых процессов в двигателях с импульсным наддувом / Т.И. Терегулов, А.А. Черноусов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2013. — № 2. — С. 42–47.

ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ Ориентировочные тарифы на 2 полугодие 2013 г.

Первая страница обложки	Полноцветная	40 000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	36 000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	38 000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	36 000 руб.
	Черно-белая	30 000 руб.