

УДК 621.432.4

Р. Д. ЕНИКЕЕВ, В. Ю. ИВАНОВ, В. С. МИХАЙЛОВ,
В. Ф. НУРМУХАМЕТОВ, С. П. ПАВЛИНИЧ, А. А. ЧЕРНОУСОВ

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗООБМЕНА ДВИГАТЕЛЯ АПД-800

Приведены результаты расчетно-экспериментального исследования газообмена и рабочего процесса двухтактного двигателя АПД-800 по моделям на основе квазиодномерного описания течения в газозвушном тракте. Использование автоматизированной методики параметрического синтеза (включающей идентификацию модели по экспериментальным данным) позволило более обоснованно подобрать сочетание размеров газозвушного тракта двигателя по критерию соответствия желаемому характеру протекания внешней скоростной характеристики. *Газообмен ДВС; математическое моделирование; параметрический синтез*

В настоящее время в двигателестроении расширяется применение расчетного параметрического синтеза при проектировании и доводке изделий.

В области моделирования рабочих процессов ДВС важен вопрос о том, какими моделями и методиками может быть достигнуто достоверное моделирование процессов газообмена и рабочего процесса. Модели указанных процессов пониженной пространственной размерности являются достаточно экономичными для решения многопараметрических задач глобальной оптимизации, однако их неполная адекватность описываемым явлениям делает проблематичным получение достоверных прогнозов показателей изделия.

В данной работе представлены некоторые результаты применения методики расчетного параметрического синтеза оптимального технического объекта с применением развиваемой методики, в которой используются экспериментальные данные, полученные при испытаниях прототипа рассматриваемого двухтактного двигателя.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В течение длительного времени успехи отечественной науки и техники позволяют нашей стране находиться в числе ведущих авиационных держав мира. При этом предпочтение всегда отдавалось созданию мощных и высокоскоростных боевых и военно-транспортных самолетов и вертолетов. Впоследствии именно они послужили базой создания отечественной авиа-

ции, необходимой для перевозки гражданских грузов и пассажиров.

Малочисленная и слабо развитая по своему техническому уровню отечественная авиация общего назначения (АОН) не справляется с существующим, явно заниженным, объемом задач. Это создает значительные препятствия в развитии народного хозяйства России, которая даже после распада СССР является государством с самой большой территорией и с недостаточной сетью наземных путей сообщения.

Функции АОН в настоящее время сводятся к перевозке грузов и пассажиров, а также тренировке и обучению летчиков. В сравнительно малых объемах выполняются сельскохозяйственные, спасательные и патрульные операции в чрезвычайных ситуациях, проводится экологический и противопожарный мониторинг лесов, нефте- и газопроводов, разведка недр, промысловая и ледовая разведка на море.

На сегодняшний день интерес к созданию АОН значительно возрастает. Вследствие этого растет спрос на легкие воздушные суда, которые позволяют резко сократить затраты на выполнение специфических авиационных работ и перевозок. Развитие экономической системы привело к появлению новых для России групп потенциальных потребителей легкой авиационной техники. Вместе с существующими владельцами авиатехники в лице крупных промышленных предприятий, использующих самолеты и вертолеты для своих производственных целей, увеличивается число новых авиакомпаний, предприятий и частных лиц, заинтересованных в приобретении легких самолетов и вертолетов.

Необходимо отметить недооценку возможности военного применения легкомоторной авиации. Учитывая сложившуюся военно-политическую обстановку в России и вокруг нее, необходимо обратить внимание на положительный опыт боевого применения легких бронированных самолетов и беспилотных летательных аппаратов США во Вьетнаме, Афганистане и Ираке. Достоинства такой техники очевидны, это низкая стоимость (на несколько порядков меньше, чем Су-24, Су-25), сравнительно невысокий расход топлива. Потери этих машин минимальны. Развитие производства легких самолетов и вертолетов представляет для предприятий оборонного комплекса достаточно большой интерес, поскольку позволяет использовать имеющийся научно-технический и производственный потенциал по его прямому назначению.

Отечественная авиапромышленность готова начать массовое производство современной конкурентоспособной техники для рынка стран СНГ, потребности которого на начальном этапе составляют порядка 30 тыс. самолетов и вертолетов. Решением этой задачи заняты различные организации, от самых крупных самолетных, вертолетных и двигательных КБ до небольших конструкторских групп. На различных стадиях создания – от эскизных проектов и макетов до опытных и серийных образцов – находятся более 50 типов и модификаций летательных аппаратов взлетной массой менее 10 т [1]. Однако значительная часть выпускающихся и разрабатываемых самолетов и вертолетов оснащаются или будут оснащаться импортными моторами, стоимость которых очень высока. В настоящее время совершенно очевидна необходимость в исследованиях, разработке и налаживании выпуска широкой номенклатуры конкурентоспособных поршневых двигателей для отечественной авиации общего назначения.

Рассматривая авиационные поршневые двигатели, необходимо отметить некоторые особенности, характерные для их использования в авиации.

Поршневые двигатели классифицируются по большому числу признаков. Главное разделение проводится по способу осуществления рабочего цикла (двухтактные и четырехтактные), а также по способу воспламенения рабочей смеси (с воспламенением от сжатия – дизельные, и с искровым воспламенением). Дизельное топливо впрыскивается непосредственно в цилиндры двигателя, а бензиново-воздушная смесь готовится либо в карбюраторе,

либо впрыскивается во впускную систему. В последнее время появились системы впрыска легкого топлива непосредственно в цилиндры двигателя.

Все отмеченные типы двигателей достаточно широко представлены в различных видах наземного транспорта. Основу авиационных поршневых двигателей составляют четырехтактные бензиновые, а двухтактные бензиновые двигатели используются преимущественно в сверхлегкой авиации. Несмотря на большие преимущества в экономичности, дизельные двигатели вследствие большого удельного веса и необходимости длительной доводки рабочего процесса, не успевавшей за прогрессом самолетостроения, представлены в истории авиации всего лишь двумя примерами постройки сравнительно небольших серий. Это немецкие Jumo и отечественные АЧ-30Б. Однако в последнее время возобновился интерес к созданию авиадизелей.

Другой особенностью отрасли авиационного поршневого двигателестроения является ее консервативность, в результате чего в производстве, а соответственно и в продаже, находятся в значительной мере устаревшие конструкции. До перехода основной части авиации (боевой и гражданской магистральной) на реактивную тягу поршневые авиадвигатели занимали лидирующие позиции прогресса моторостроения. Затем ситуация резко изменилась. Финансирование отрасли со стороны государства прекратилось, производители стали экономить на дорогой процедуре сертификации. Получилось, что в массовом производстве находятся двигатели, сертифицированные несколько десятков лет назад. Престиж старых проверенных надежных конструкций, а также высокие требования сертификации тормозят внедрение новых разработок. Покупатель авиатехники всегда предпочтет лишние расходы на топливо для малоэкономичного, но проверенного двигателя. Кроме того, в большинстве стран несертифицированная техника не может быть застрахована, не будет иметь надлежащего аэродромного обслуживания.

Поэтому многие разработки, уже используемые в автомобильных двигателях, в авиации пока не используются. Здесь можно выделить регулирование фаз газообмена и длины настроенных трубопроводов, многоклапанные головки и многое другое.

В связи с необходимостью создания мощных и экономичных конструкций в кратчайшие сроки, авиационные поршневые двигатели развивались в основном как четырехтактные. Не-

смотря на такие важнейшие преимущества двухтактных двигателей, как высокая удельная мощность и более высокая надежность, длительное время, необходимое для доводки рабочего процесса, газообмена и некоторых элементов конструкции двухтактных двигателей, не позволяло укладываться в требуемые сроки разработок.

Так, например, известные немецкие авиадизели фирмы «Юнкерс» с момента постройки первого опытного образца *Jumo F02* в 1916 г. до последних модификаций *Jumo 224* доводились 28 лет. Еще одним примером длительной доводки может служить отечественный дизель М-20, проектировавшийся, как и модификация *Jumo 224*, с противоположно движущимися поршнями (ПДП) и рассчитанный на получение 3000 л. с. на высоте 10 км. После перехода к реактивной технике и утраты интереса к крупным поршневым авиадвигателям этот мотор доводился в системе Минтрансмаша. Итогом работы стали двухтактный танковый дизель 5ТДФ мощностью 700 л. с. и его современная шестицилиндровая модификация БТД2 в 1200 л. с. На базе этого двигателя создается современный трехцилиндровый авиадизель ДН-200 [1].

Наличие приведенных выше особенностей двухтактных авиадвигателей привело к тому, что серийно выпускаются и применяются только бензиновые двигатели с кривошипно-камерной продувкой и ограниченной мощностью (в пределах 120 л. с.), предназначенные для установки на сверхлегких летательных аппаратах. Однако именно в этом применении двухтактные авиадвигатели имеют неоспоримые преимущества перед четырехтактными.

В настоящее время в УМПО осуществляется разработка легкого двухтактного поршневого авиадвигателя, получившего обозначение АПД-800. Научное сопровождение разработки ведет УГАТУ. Сравнительный анализ технического уровня двигателя АПД-800 с двухтактными бензиновыми авиационно-поршневыми двигателями, выпускаемыми для легкой авиации зарубежными и отечественными производителями, показал следующее:

1. Как отечественные, так и иностранные производители отдают предпочтение оппозитной схеме расположения цилиндров и, реже, рядной схеме.

Конструктивная схема двигателя АПД-800 фактически представляет собой четыре одноцилиндровых двигателя с отдельными картерами, что, с одной стороны, позволяет осуществлять кинематическую развязку модулей цилин-

дров двигателя (при отказе), с другой стороны, это несколько усложняет и утяжеляет конструкцию двигателя.

2. Используется как жидкостное, так и воздушное охлаждение двигателей. Системы воздушного охлаждения (охлаждение набегающим потоком и принудительно-воздушное охлаждение) обеспечивают столь же высокий уровень форсированности, что и системы жидкостного охлаждения. В АПД-800 применена система жидкостного охлаждения.

3. Большинство из представленных двигателей имеют кривошипно-камерную продувку. Схема продувки цилиндров, как правило, петлевая многоканальная.

4. В качестве топлива используются высокооктановые автомобильные бензины.

5. Система смазки – совмещенная, все трущиеся элементы смазываются топливомасляной смесью. Этот способ смазки имеет серьезные преимущества, в частности, он позволяет двигателю работать длительное время в любом пространственном положении.

6. Используются топливные системы различного типа, начиная от простейших карбюраторных (с карбюраторами поплавкового и мембранного типа) и заканчивая сложными системами непосредственного впрыска топлива. Имеются также системы с впрыском топлива в подпоршневое пространство. В двигателе АПД-800 применена система впрыска топлива, обеспечивающая, по существу, внешнее смешивание, при сохранении преимуществ адекватного и гибкого дозирования топлива электронных систем впрыска.

Двигатель АПД-800 по примененным техническим решениям и основным техническим характеристикам соответствует современному уровню авиационных поршневых двухтактных двигателей.

Степень совершенства базового варианта газоздушного тракта (ГВТ) и возможности модернизации двигателя оценивались методом математического моделирования.

Наивысшую достоверность результатов моделирования течения рабочего тела в ГВТ ДВС могут в принципе обеспечить численные расчеты на основе математических моделей, описывающих процессы в достаточно детальной пространственной постановке. Существуют известные программные пакеты, реализующие модели такого класса средствами вычислительной гидрогазодинамики (англ. Computational Fluid Dynamics, CFD).

Тем не менее, указанные процессы зачастую в хорошем приближении моделируются

также «сквозным» численным расчетом, но по моделям на основе пространственно одномерного описания процесса [2]. Имеются программные средства, ориентированные (в большей или меньшей степени) на моделирование процессов в ДВС по таким моделям.

Областями применения данного класса моделей в настоящее время (и в обозримом будущем) будут предварительный анализ вариантов (сравнительные расчеты) и, в силу экономичности данных моделей, массовые расчеты, нацеленные на решение обратных задач (идентификация, параметрический синтез).

Необходимый компонент методики применения моделей такого класса – привлечение в качестве условий «замыкания» моделей элементов ГВТ зависимостей, представленных в виде критериальных уравнений, получаемых обработкой натуральных или вычислительных экспериментов (по методикам, учитывающим условия одномерного приближения). Неполная адекватность данного описания действительным явлениям в ГВТ снижает достоверность результатов расчета даже при указанном рациональном подходе к их «замыканию».

Можно предположить, что достоверность результатов, даваемых такими моделями, может быть существенно улучшена при включении в расчетную методику рациональных мероприятий по идентификации («калибровке») модели по имеющимся экспериментальным данным о показателях объекта или его прототипа.

Исследования, направленные на создание и верификацию методики параметрического синтеза газозооного тракта ДВС по рациональным «быстрорасчетным» моделям процессов газообмена, представляются актуальными.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование процессов в ГВТ четырехцилиндрового двухтактного двигателя АПД-800 выполнено по заданию и с участием специалистов Центра перспективных разработок (ЦПР) УМПО. Цель исследования состояла в расчетной оценке степени совершенства базового варианта ГВТ и поиске возможностей повышения показателей двигателя по внешней скоростной характеристике (ВСХ). В соответствии с целью в ходе исследования решались следующие задачи:

1) проведены стендовые испытания АПД-800, в ходе которых измерены $N_i(n)$ и $G_b(n)$ по ВСХ;

2) создана и идентифицирована (по данным измерений) модель ГВТ АПД-800;

3) выполнены оптимизационные расчеты размеров ГВТ.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе стендовых испытаний двигателя АПД-800 (рис. 1), проведенных в лаборатории ЦПР УМПО, получены данные по его показателям (индикаторные диаграммы кривошипной и рабочей камер (РК), величины расходов воздуха, топлива, коэффициента избытка воздуха) при работе по ВСХ. Эти данные использованы для идентификации модели и для оценки достоверности ее результатов.

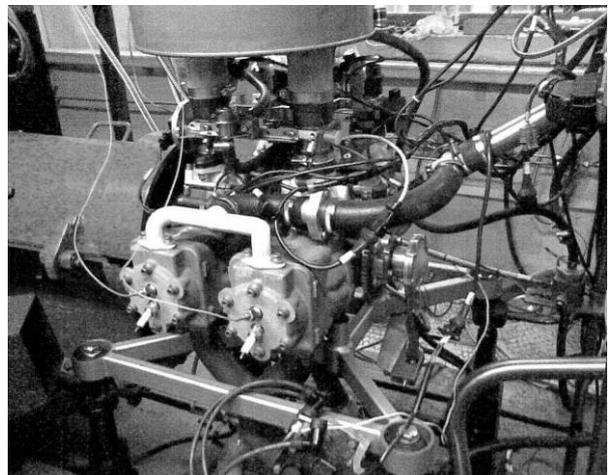


Рис. 1. Двигатель АПД-800 на стенде

Процессы в двухтактном ДВС АПД-800 моделировались в квазиодномерном приближении [2], что позволило адекватно учитывать волновые явления в ГВТ, влияние его профиля и других конструктивных параметров на продувку и дозарядку РК. При таком описании течение на гладких (dF/dx) участках каналов принимается одномерным и неустановившимся, для элементов типа емкостей принимается «нульмерное» представление (при этом, например, процесс продувки РК может описываться двухзонной моделью). Сопряжения каналов и каналов с емкостями описываются моделями местных сопротивлений в нестационарном потоке сжимаемого газа, газодинамические характеристики которых определяются статической продувкой (в натурном или вычислительном эксперименте).

Численные расчеты на ЭВМ выполнялись с применением перспективной версии пакета прикладных программ (ППП) «Альбея» [3], в которой реализованы модели элементов ГВТ указанного класса.

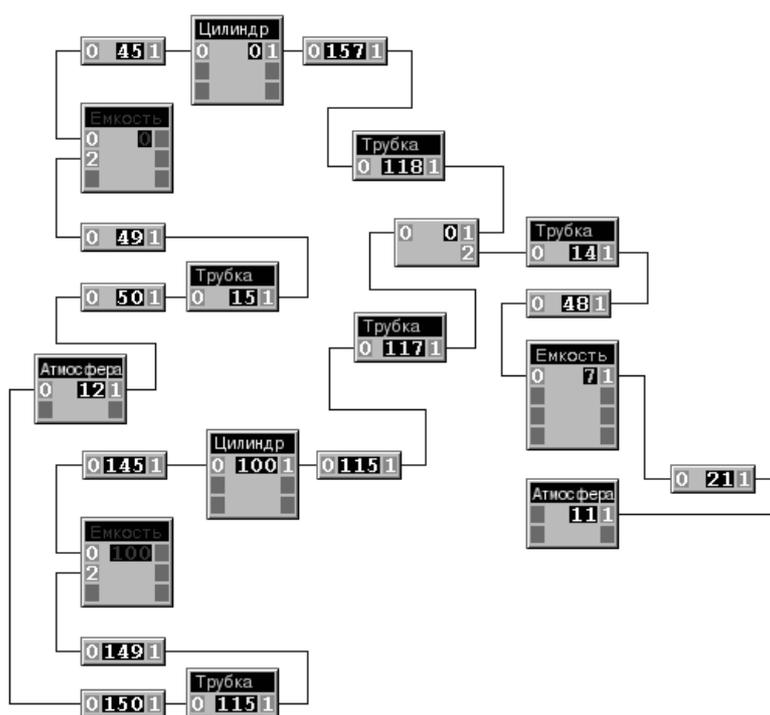


Рис. 2. Модель ГВТ двигателя АПД-800 на поле сборки ППП «Альбея»

Использована двухкомпонентная модель рабочего тела – в виде смеси свежего заряда (СЗ) и продуктов сгорания (ПС). Теплотворная способность СЗ определена с учетом низшей теплотворной способности бензина ($H = 0,145$; $C = 0,855$; $H_u = 43,9$ МДж/кг) и коэффициента избытка воздуха α . Атмосферные условия и состав горючей смеси в модели задавались по данным испытаний АПД-800.

В ППП «Альбея» была собрана поэлементная структурная схема («сборка», рис. 2), учитывающая конструктивные особенности ГВТ АПД-800, заданы размеры и др. характеристики его элементов. Так, зависимости для потерь полного давления в газовом потоке через выпускные и перепускные окна определены расчетами [4] в пространственной постановке для всех возможных режимов течения по числу M и для ряда положений кромки поршня. Сопряжение трех каналов в модели ГВТ АПД-800 представлено моделью типа ТРОЙНИК [6]. Для расчета течения через этот элемент ГВТ применялась нестационарная газодинамическая характеристики тройника, рассчитанная специальной программой также с учетом реальной геометрии.

Модели применяемого класса позволяют проводить «сквозной» расчет процесса в ГВТ, оперативно оценивать влияние конструктивных параметров на показатели ДВС, в том числе

опираясь на расчетные значения величин, которые получить измерениями затруднительно или невозможно. Однако принятое в модели огрубление физических полей в пространстве снижает достоверность результатов моделирования даже при задании в модели ГВТ конкретного вида характеристик его элементов («законы» продувки и выгорания, характеристики местных потерь полного давления и тройников), полученных по методикам [4–6].

Поэтому в методику расчетов по моделям данного класса полезно включить этап идентификации модели, на котором погрешности моделирования можно снизить, подобрав оптимальное по критерию соответствия измеренным значениям показателей базового варианта моделируемого объекта сочетание «свободных» параметров модели (например, параметров «замыкающих» характеристик элементов).

Если на этапе идентификации достигается хорошее соответствие имеющимся экспериментальным данным, можно предположить, что идентифицированная («калиброванная») модель послужит на следующем этапе полезным инструментом расчетной оптимизации объекта. На этапе оптимизации принимается иной набор свободных параметров модели; применительно к ГВТ ДВС такими параметрами становятся его конструктивные размеры, определяющие про-

филь каналов, и законы открытия органов газообмена.

Оба указанных этапа расчетной методики (идентификация модели и параметрический синтез с ее применением) сводятся к решению оптимизационных задач, которые нетрудно автоматизировать на ЭВМ.

В настоящем исследовании применены средства поддержки многопараметрической оптимизации из ППП «Альбея», позволяющие использовать вычислительные ресурсы многопроцессорных ЭВМ, получать и оперативно оценивать результаты каждого сеанса массовых расчетов, а также сохранять и документировать их в рамках расчетных проектов. Так, массовое решение «прямых» задач расчетного анализа для наших целей выполнялось расчетной программой из ППП «Альбея», запускаемой на узлах кластера из ПЭВМ (рис. 3).

На этапе идентификации модели ГВТ за свободные параметры были приняты:

1) два параметра идеализированной модели обратного пластинчатого клапана $F_{\text{онк}}(n)$,

2) семь параметров интерполяции продувочной характеристики (ПХ) для двухзонной модели продувки РК.

Последняя зависимость задает объемный расход \bar{Q} из зоны рабочей смеси, отнесенный к сумме объемных расходов газов, вытекающей из обеих зон РК через выпускные органы газообмена, от относительного объема той же зоны \bar{V} .



Рис. 3. Вычислительный кластер из 4-ядерных ПЭВМ (каф. ДВС УГАТУ)

Целевой функцией служила сумма квадратов относительных разностей расчетного и эталонного значений $N_i(n)$ и $G_e(n)$ в точках ВСХ:

$$f = \sum_{j=4}^{16} \left(\frac{N_{iP} - N_{iЭ}}{N_{iЭ}} \right)_j^2 + \sum_{j=4}^{16} \left(\frac{G_{BP} - G_{BЭ}}{G_{BЭ}} \right)_j^2.$$

Полученная после идентификации расчетная зависимость индикаторной мощности по ВСХ показана на рис. 4, а на рис. 5 – вид подобранной ПХ.

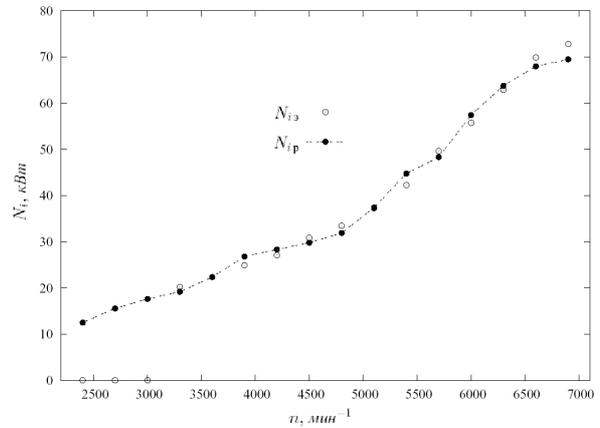


Рис. 4. Расчетные и измеренные значения индикаторной мощности АПД-800 по ВСХ

Далее параметры идентифицированной модели были зафиксированы, и с ее помощью выполнена серия сеансов расчетной оптимизации. В одном из них были подобраны параметры профиля «настроенной» выпускной трубы (рис. 6), а также эквивалентная ширина и высота перепускных и выпускных окон (рис. 7) – всего 12 параметров. Использован штатный инструмент для решения многопараметрических оптимизационных задач из ППП «Альбея».

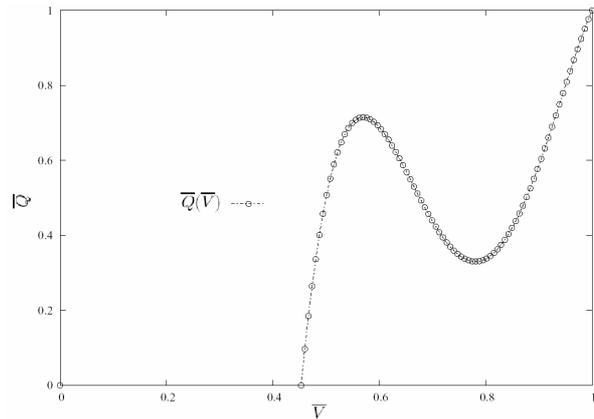


Рис. 5. Продувочная характеристика РК после идентификации

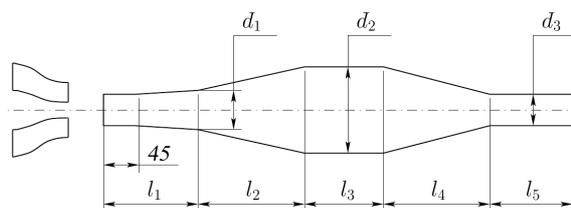


Рис. 6. Схема параметризации размеров настроенной выпускной трубы АПД-800

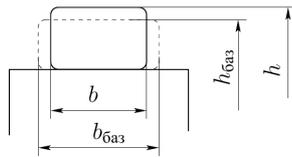


Рис. 7. Схема параметризации выпускных окон

В таблице приведены подобранные значения конструктивных параметров выпускной системы по результатам решения оптимизационной задачи.

Оптимальные размеры выпускной системы

Параметр	Минимум	Максимум	Оптимум
l_1 , мм	100	190	134,7
l_2 , мм	350	600	592,1
l_3 , мм	50	300	75,6
l_4 , мм	200	360	333,5
l_5 , мм	150	400	179,5
d_1 , мм	52	75	64,8
d_2 , мм	100	160	153,3
d_3 , мм	24	48	39,30
$\Delta h_{\text{вып}}$, мм	-2	-7	-0,20
$(b/b_{\text{баз}})_{\text{вып}}$	0,8	1,2	1,0929
$\Delta h_{\text{переп}}$, мм	0	-4	-3,54
$(b/b_{\text{баз}})_{\text{переп}}$	0,8	1,2	1,1339

Экстремуму целевой функции соответствовало равномерное протекание $N_i(n)$ по ВСХ в диапазоне высоких оборотов при 20% превышении значений N_i для «базового» ГВТ; цель оптимизации была достигнута, на рис. 8 показаны расчетные перспективные и измеренные для «базового» исполнения ГВТ значения $N_i(n)$ по ВСХ.

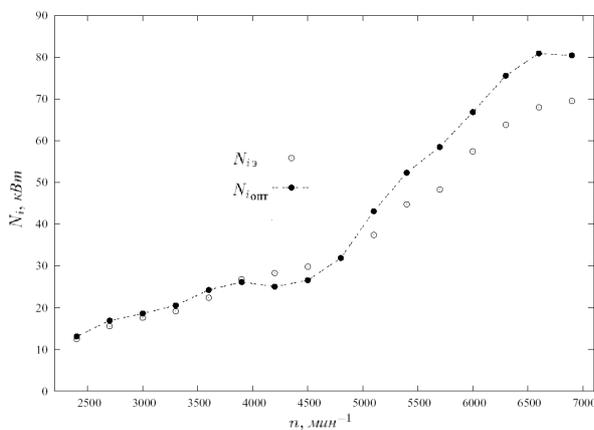


Рис. 8. Индикаторная мощность по ВСХ: измеренная и полученная в расчетной оптимизации профиля вып. трубы и газообменных окон

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе проведенного исследования была практически реализована методика моделирования процессов в ГВТ ДВС, позволяющая использовать наборы имеющихся данных, полученных при испытаниях ДВС, для повышения последующих прогнозных расчетов. Автоматизация процессов идентификации и параметрического синтеза позволяет ощутимо сократить временные затраты и повысить достоверность расчетных показателей ДВС.

Обеспечена возможность расчетной оценки разнообразных конструктивных схем ГВТ, в т. ч. с элементами, изменяемыми в зависимости от скоростного режима и т. д. Параметрический синтез по той же методике позволит (в первом приближении) подобрать параметры соответствующих программ регулирования.

Для проведения верификации методики потребуется провести сравнение расчетных и измеренных показателей двигателя АПД-800 с модифицированным («оптимальным») ГВТ.

ВЫВОД

Применение расчетно-экспериментальной методики, включающей применение автоматизированных методов идентификации модели и параметрического синтеза, позволяет эффективно и более обоснованно определять расчетами сочетания конструктивных параметры ДВС при их доводке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин Ю. А. Анализ и перспективы развития поршневых авиадвигателей: учеб. пособие. М.: ЦАГИ, 2000. 52 с.
2. Рудой Б. П. Прикладная нестационарная гидродинамика: учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1988. 184 с.
3. Система имитационного моделирования «Альбея» (ядро). Руководство пользователя. Руководство программиста: учеб. пособие / В. Г. Горбачев [и др.]. Уфа: УГАТУ, 1995. 112 с.
4. Рудой Б. П., Черноусов А. А. Определение коэффициентов гидравлических потерь в вычислительном эксперименте // Актуальные проблемы авиадвигателестроения: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 1998. С. 189–197.
5. Рудой Б. П., Черноусов А. А. Определение продувочных характеристик рабочих камер двигателей внутреннего сгорания вычислительным экспериментом // Актуальн. пробл. теор. и практ. совр. двигателестроения: сб. тр. Челябинск: ЮУрГУ, 2003. С. 133–140.
6. Черноусов А. А. Экспериментальная проверка модели взаимодействия волн конечной амплитуды с разветвлением канала // Ползуновский вестник: сб. науч. тр. Барнаул: АлтГУ, 2006. № 4. С. 182–186.

ОБ АВТОРАХ



Еникеев Рустэм Далилович, зав. каф. двиг. внутр. сгорания. Дипл. инж-мех. по ДВС (УАИ, 1981). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (УАИ, 1987). Иссл. в обл. систем газообмена, перспект. раб. проц. ДВС.



Нурмухаметов Вячеслав Файзрахманович, гл. инж. проекта ЦПР ОАО УМПО.



Иванов Владимир Юрьевич, зам. ген. дир. по иннов. и персп. прогр. ОАО УМПО. Канд. техн. наук.



Павлинич Сергей Петрович, техн. дир. ОАО УМПО. Д-р техн. наук. Засл. машиностроитель Респ. Башкортостан. Лауреат Гос. премии Респ. Башкортостан в обл. науки и техники.



Михайлов Владимир Сергеевич, асп. каф. двиг. внутр. сгорания. Магистр техн. и технологии по энергомашиностроению (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. газообмена ДВС.



Черноусов Андрей Александрович, доц. каф. двиг. внутр. сгорания. Дипл. инж-мех. по ДВС (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. числ. моделир. газообмена и раб. проц. ДВС, выч. гидрогазодинамики.