

На правах рукописи

Герман Евгений Альфредович

УЛУЧШЕНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА ДВУХТАКТНОГО ЛОДОЧНОГО
МОТОРА

05.04.02 – Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2006

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова (АлтГТУ)».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Балашов Андрей Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кукис Владимир Самойлович

кандидат технических наук, доцент
Юренков Валерий Николаевич

Ведущая организация: Новосибирская государственная академия
водного транспорта

Защита состоится « » декабря 2006 г. в часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.03, действующего при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46 (тел\факс (3852) 260-516; E-mail: D21200403@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять в двух экземплярах по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « » ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета к.т.н., доцент

А.Е. Свистула

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С изобретением в 1909 г. Оле Эвинрудом первого подвесного лодочного мотора (ПЛМ) началось бурное развитие рекреационного флота во всем мире. В настоящее время более 80% всего маломерного флота в мире составляют моторные лодки, т.е. лодки, оснащенные подвесными лодочными моторами. В состав ПЛМ обычно входит двухтактный карбюраторный двигатель с кривошипно-камерной продувкой (ДК ДВС). В отличие от 4-х тактных бензиновых двигателей ДК ДВС имеют более простую конструкцию, меньший вес и габариты, высокую удельную мощность и меньшую стоимость. Условия эксплуатации моторных лодок весьма разнообразны. Зарубежный опыт показывает, что для удовлетворения спроса широкого круга потребителей ведущие мировые компании выпускают целый ряд унифицированных двигателей. Так например, продукция итальянской компании «Selva» насчитывает более 80 модификаций 2-х тактных ПЛМ, мощностью от 3,5 до 100 л.с. В нашей стране с начала 70-х годов прошлого века разрабатывалось и производилось немало новых моделей лодочных моторов. Некоторые из них так и оставались на стадии разработки, другие производились в серийных количествах. Тяжелая экономическая ситуация, сложившаяся в России с начала 90-х годов, привела к значительному сокращению всего машиностроительного производства страны. Выпуск многих ПЛМ был прекращен. Таким образом, в настоящее время линейка отечественных лодочных моторов представлена всего несколькими моделями мощностью от 8 до 32 л.с.

В России почти все города и поселки расположены вблизи рек и озер. На внутренних водных путях, общей протяженностью более 100 тыс. км эксплуатируются около 30 тыс. самоходных судов, принадлежащих различным акционерным обществам, судоходным компаниям, частным владельцам, государственным предприятиям и организациям. Поэтому, разработка новых образцов двухтактных двигателей для подвесных моторов и модернизация существующих является весьма актуальной задачей для российского машиностроения.

Сравнительный анализ технических характеристик современных ПЛМ показывает, что российские моторы по мощностным и весовым показателям не уступают зарубежным аналогам, однако удельный расход топлива отечественных двигателей в среднем на 10% выше. Многочисленные исследования, проведенные как в нашей стране, так и за рубежом, показывают, что процесс газообмена оказывает значительное влияние на мощностные и экономические показатели ДК ДВС, при этом конструкция органов газораспределения (размеры, аэродинамическое сопротивление) определяет характер и эффективность протекания процесса. Необходимо отметить, что создание двухтактных двигателей с непосредственным впрыском топлива тесно связано с работой по совершенствованию органов газораспределения, основная цель которой повышение наполнения цилиндра свежим зарядом и уменьшение количества остаточных газов.

Цель работы заключается в поиске наиболее эффективных путей улучшения расходных характеристик газоздушного тракта для повышения мощностных и экономических показателей двухтактного двигателя в составе ПЛМ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ конструктивных мероприятий, направленных на повышение мощностных, экономических и экологических показателей ДК ДВС в составе ПЛМ.
2. Разработана и настроена математическая модель рабочего процесса двухтактного карбюраторного двигателя с кривошипно-камерной продувкой с учетом специфики его конструкции.
3. Разработана методика обработки результатов статической продувки газоздушного тракта ПЛМ, с помощью которой был выполнен сравнительный анализ аэродинамической эффективности его отдельных элементов.
4. Спроектированы и изготовлены стенды для моторных испытаний и статической продувки газоздушного тракта подвесного лодочного мотора.
5. Проведен анализ влияния расходных характеристик органов газообмена на показатели ДК ДВС.

Объект исследования: двухтактный двигатель 3Д 7,2\6,0 лодочного мотора «Бийск-45» с клапанным впуском свежей смеси, 3-мя карбюраторами и выпуском отработавших газов через ступицу винта.

Методы исследований. В работе нашли применение теоретические методы, базирующиеся на основных законах термодинамики и газовой динамики, а также экспериментальные исследования. Достоверность результатов достигнута выбором методов и средств измерений, соблюдением стандартов, периодической проверкой и тарировкой приборов, анализом и контролем погрешностей, а для теоретических исследований – принятием обоснованных исходных данных и сопоставлением результатов расчёта и эксперимента.

Научная новизна работы:

1. Получены и термодинамически обоснованы новые зависимости для приращения энтропии ΔS , коэффициентов газодинамического сопротивления ξ и расхода μ .
2. С использованием вновь полученных зависимостей разработана методика обработки результатов статической продувки, которая позволяет провести сравнительный анализ аэродинамической эффективности отдельных элементов газоздушного тракта двигателя.
3. На базе разработанной методики предложен способ косвенного определения коэффициента расхода продувочных окон двухтактного двигателя, позволяющий исключить непосредственное измерение давления в выходном сечении окон.
4. Разработана математическая модель рабочего процесса двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой, учитывающая особенности его конструкции; осуществлена настройка математической модели по полученным экспериментальным данным.

5. Получены экспериментальные данные о влиянии дейдвудной части выпускного тракта мотора на эффективные показатели двигателя.
6. Получены экспериментальные данные об аэродинамической эффективности отдельных элементов газовоздушного тракта ПЛМ.
7. Проведен анализ расчетного влияния расходных характеристик отдельных элементов газовоздушного тракта на индикаторные показатели двигателя.

Практическое значение работы:

1. Разработанная методика обработки результатов статической продувки позволяет оценить аэродинамическую эффективность отдельных элементов исследуемого канала, а его общее сопротивление определить расчетным путем. Это значительно сокращает время при доводочных работах, а также позволяет осуществить экспресс контроль качества изготовления элементов системы газообмена на производстве.
2. Проведено ранжирование отдельных элементов газовоздушного тракта по величине аэродинамического сопротивления и степени влияния на мощностные и экономические показатели двигателя.
3. Предложена программа расчета рабочего процесса двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой, которая позволяет на любой стадии проектирования и доводки двигателя значительно уменьшить объем трудоемких и дорогостоящих экспериментальных работ.

Экспериментальная часть выполнена на спроектированных и изготовленных стендах с двигателем ЗД 7,2\6,0 в лаборатории кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова при непосредственном участии автора.

Результаты работы использованы при выполнении ОК и НИР кафедры для АНПМК «Конвейер» г. Бийск и в учебном процессе АлтГТУ. Разработанные методики и программы используются аспирантами и студентами при выполнении лабораторных работ и дипломном проектировании.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на: - IX международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей», Владимир, 2003; - Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения», Челябинск, 2006; - Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Двигатели внутреннего сгорания – современные проблемы, перспективы развития», Барнаул, 2006, а также на научно-практических конференциях студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ, Барнаул, 1995-2006.

Публикации. Содержание материалов диссертации опубликовано в 11 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении приведены данные о современном уровне и основных направлениях развития двухтактных двигателей, работающих в составе ПЛМ. Отмечено, что на мировом рынке среди ПЛМ малой и средней мощности в основном преобладают ДК ДВС из-за высокой удельной мощности, малого веса, простоты обслуживания и относительно низкой цены. Наиболее важной проблемой, с которой сталкиваются производители подобных двигателей, следует признать их высокий удельный эффективный расход топлива – в среднем $450\div 500 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$. В нашей стране накоплен значительный опыт конструирования и доводки лодочных моторов. Исследования в области двухтактных ДВС проводились А.С. Орлиным, М.Г. Кругловым, И.Я. Райковым, С.В. Камкиным, Б.П. Рудоем, Ю.А. Гришиным, В.В. Эфросом, В.И. Абрамовым, М.Г. Акимовым, В.В. Беловым, Ю.С. Григорьевым, В.М. Кондрашовым, В.В. Пановым, Н.В. Лобовым, С.Ю. Иваницким, П.С. Герзоном, Р.Р. Силлатом и др. Разработаны методы экспериментального исследования и математические модели расчета процессов.

Во введении обоснована актуальность и важность выбранного научного направления, сформулирована цель работы, которая заключается в поиске наиболее эффективных путей модернизации газозоообменного тракта двигателя ЗД 7,2\6,0 в составе ПЛМ «Бийск-45», основываясь на анализе влияния его расходных характеристик на рабочий процесс в целом. Перечислены новые научные результаты, полученные при реализации указанной цели, которые выносятся на защиту.

В первой главе рассмотрены основные направления повышения мощностных и экономических показателей двухтактных двигателей с кривошипно-камерной продувкой. Особое внимание в ДК ДВС уделяется вопросам повышения качества газообмена, в частности, впуска и наполнения кривошипной камеры, продувки и наполнения цилиндра, выпуска отработавших газов (ОГ).

Исследование процесса газообмена проводится с использованием теоретических и экспериментальных методов, причем наилучшие результаты получают при их совместном применении. В настоящее время основным направлением теоретического изучения реальных процессов в двигателе является создание математических моделей. В основу их положены системы дифференциальных уравнений, для решения которых предлагаются различные методы. Для расчета изменения параметров газа в цилиндре двигателя часто используют квазистационарные модели, основанные на уравнениях первого закона термодинамики для открытых систем и состояния идеального газа. Изменения параметров газа в смежных с цилиндром объемах, как правило, не моделируются, а задаются в виде граничных условий, полученных экспериментальным путем. Квазистационарные методы широко используются в практике проектирования двигателей. Их отличает простота расчета и хорошая

сходимость с экспериментальными данными. В настоящее время, в связи с резко возросшей производительностью вычислительных машин, практическое применение находят двух- и трехмерные нестационарные модели течения идеального газа, которые позволяют определить параметры и структуру потока газа в цилиндре двухтактного двигателя. Для точного расчета расходных характеристик органов газораспределения необходимо использовать модель вязкого теплопроводного газа, так как только такая модель позволяет наиболее полно описать процесс диссипации кинетической энергии потока газа в тепловую. Однако получение численного решения соответствующих дифференциальных уравнений является сложной задачей. Поэтому, во многих нестационарных моделях разной размерности течение газа через окна описывается как одномерное квазистационарное с местным сопротивлением. В качестве поправочных коэффициентов при определении действительного расхода газа используют, как правило, коэффициент расхода μ или коэффициент газодинамического сопротивления ξ , определенные экспериментально.

Из методов экспериментального исследования газообмена можно выделить методы физического моделирования и непосредственного эксперимента на двигателе. Исследования на физической модели значительно проще и дешевле, чем на двигателе. Иногда это является единственным возможным способом экспериментального изучения газодинамических процессов. Для оценки аэродинамической эффективности и доводки уже существующих газоздушных трактов широкое распространение получил метод статической продувки, в котором реализуется стационарное течение газа через исследуемый элемент. В настоящее время он является самым распространенным, дешевым, наименее трудоемким и наиболее приемлемым для практики методом. Эксперимент проводится на макете или непосредственно на натурном образце. По результатам испытаний определяют количественные параметры: коэффициент газодинамического сопротивления ξ , коэффициент расхода μ , эффективное проходное сечение μf и др., которые позволяют оценить степень аэродинамического совершенства исследуемых каналов, а также используют их при моделировании процесса газообмена. В зависимости от поставленных задач статическая продувка может быть использована и для определения газодинамической структуры потока в цилиндре ДК ДВС.

Тщательная отработка конструкции органов газораспределения является одним из важнейших путей повышения мощности и снижения расхода топлива двухтактных двигателей. Особое внимание при этом уделяется повышению аэродинамической эффективности каналов впуска, продувки и выпуска. Работа эта кропотливая и длительная, поэтому очень важно иметь данные о степени влияния расходных характеристик отдельных элементов газоздушного тракта на показатели двигателя. В конце первой главы были определены указанные выше цели и основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели рабочего процесса ДК ДВС. Математическое моделирование рабочего процесса двухтактного двигателя связано с проблемой выбора рациональной степени аппроксимации моделью действительности. Очевидно, что в настоящее время

еще невозможно создать модели, описывающие с одинаковой точностью все процессы, происходящие в двигателе. Выбор тех или иных допущений связан с поставленной целью исследований. При создании модели были приняты следующие допущения: процессы в цилиндре и кривошипной камере рассматриваются квазистационарно с равномерным распределением давления, температуры и состава газа по объему; в качестве рабочего тела во всех расчетах принимается идеальный газ, подчиняющийся уравнению $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$; рабочее тело представляет собой смесь свежего заряда и продуктов сгорания, относительное содержание которых определяется процессами сгорания и газообмена; процессы сжатия и расширения в рассматриваемых объемах проходят при постоянной массе рабочего тела; течение газа через впускные, продувочные и выпускные окна принимается одномерным, квазистационарным, адиабатным с учетом газодинамического сопротивления окон.

Расчетная модель газообмена построена на базе сочетания гипотез о послойном вытеснении продуктов сгорания и полном смешении газов, что характерно для контурной схемы продувки. Соотношение времени продувки по той или иной гипотезе подбирается таким образом, чтобы расчетный коэффициент продувки соответствовал экспериментально определенному.

Система дифференциальных уравнений, описывающая процессы в кривошипной камере, в настоящей модели представлена в следующем виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{p_{\kappa}} \cdot \frac{dp_{\kappa}}{d\varphi} &= \frac{1}{C'_V \cdot T_{\kappa} \cdot m'_{\kappa}} \cdot \left(i_{\text{ВП}}^* \cdot \frac{dm_{\text{ВП}}}{d\varphi} - i_{\text{ПР}}^* \cdot \frac{dm_{\text{ПР}}}{d\varphi} \right) - \frac{k'}{V_{\kappa}} \cdot \frac{dV_{\kappa}}{d\varphi}; \\ \frac{1}{T_{\kappa}} \cdot \frac{dT_{\kappa}}{d\varphi} &= \frac{1}{p_{\kappa}} \cdot \frac{dp_{\kappa}}{d\varphi} + \frac{1}{V_{\kappa}} \cdot \frac{dV_{\kappa}}{d\varphi} - \frac{1}{m'_{\kappa}} \cdot \frac{dm'_{\kappa}}{d\varphi}; \\ \frac{dm'_{\kappa}}{d\varphi} &= \frac{dm_{\text{ВП}}}{d\varphi} - \frac{dm_{\text{ПР}}}{d\varphi}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Система дифференциальных уравнений, описывающая изменение параметров рабочего тела в цилиндре двигателя

$$\begin{aligned} \frac{1}{p_{\text{ц}}} \cdot \frac{dp_{\text{ц}}}{d\varphi} &= \frac{1}{C'_V \cdot T_{\text{ц}} \cdot m} \cdot \left(i_{\text{ПР}}^* \cdot \frac{dm_{\text{ПР}}}{d\varphi} - i_{\text{ВЫП}}^* \cdot \frac{dm_{\text{ВЫП}}}{d\varphi} \right) - \\ &- \frac{k}{V_{\text{ц}}} \cdot \frac{dV_{\text{ц}}}{d\varphi} + \frac{1}{C'_V \cdot T_{\text{ц}} \cdot m} \cdot \left(\frac{dQ_{\text{Т}}}{d\varphi} - \frac{dQ_{\text{W}}}{d\varphi} - \frac{dQ_{\text{Д}}}{d\varphi} \right); \\ \frac{1}{T_{\text{ц}}} \cdot \frac{dT_{\text{ц}}}{d\varphi} &= \frac{1}{p_{\text{ц}}} \cdot \frac{dp_{\text{ц}}}{d\varphi} + \frac{1}{V_{\text{ц}}} \cdot \frac{dV_{\text{ц}}}{d\varphi} - \frac{1}{m} \cdot \frac{dm}{d\varphi}; \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_{\text{пр}}}{d\varphi} - \frac{dm_{\text{вып}}}{d\varphi}; \quad \frac{dm'_y}{d\varphi} = \frac{dm_{\text{пр}}}{d\varphi}; \quad \frac{dm''}{d\varphi} = -\frac{dm_{\text{вып}}}{d\varphi} -$$

при послойном вытеснении продуктов сгорания;

$$\frac{dm'_y}{d\varphi} = \frac{dm_{\text{пр}}}{d\varphi} - g' \cdot \frac{dm_{\text{вып}}}{d\varphi}; \quad \frac{dm''}{d\varphi} = (g' - 1) \cdot \frac{dm_{\text{вып}}}{d\varphi} -$$

при полном смешении газов.

Для реализации математической модели исходные системы дифференциальных уравнений (2.1) и (2.2) дополнены расчетом расходных характеристик окон газораспределения (см. глава 3), уравнениями кинематики кривошипно-шатунного механизма, функциональной зависимостью теплоемкости газов от текущей температуры и состава смеси, законами выгорания топлива (по *Вибе*), отвода тепла в стенки цилиндра (на основании уравнения *Ньютона-Рихмана*) и на диссоциацию продуктов сгорания. Реализация модели была осуществлена на алгоритмическом языке «Турбо-Паскаль».

Для настройки рассмотренной математической модели на двигатель ЗД 7,2\6,0 «Бийск-45» были использованы результаты экспериментальных исследований (см. гл. 5). Протекание процесса продувки моделировалось подбором соотношения послойного вытеснения и полного смешения газов. Для этого введен коэффициент $k_{\text{посл}}$, представляющий отношение времени послойного вытеснения к общему времени продувки цилиндра.

В третьей главе приведен теоретический анализ изотропного и адиабатного процессов истечения идеального газа, на основании которого разработана методика обработки результатов статической продувки. Для физического моделирования одномерного стационарного адиабатного процесса истечения идеального газа в инженерной практике наибольшее распространение получила статическая продувка исследуемого канала воздухом. Сущность метода заключается в следующем: входное сечение исследуемого канала соединяют с ресивером большого объема, в котором определяют температуру T^* и давление p_1^* заторможенного потока. Используя счетчик газа или другое расходомерное устройство определяют объемный расход Q_B , а по параметрам воздуха перед счетчиком рассчитывают массовый расход воздуха G_B . Выходное сечение канала соединяют со спрямляющим патрубком для выравнивания профиля скорости потока, в котором с помощью дренажных отверстий в стенке определяют среднее по периметру сечения значение статического давления p_2 . По результатам продувки последовательно рассчитывают параметры в выходном сечении канала: статическую температуру T_2 , критерий *Маха* M_2 , давление заторможенного потока p_2^* , коэффициент газодинамического сопротивления ζ и действительную скорость потока ω_2 .

$$\begin{aligned}
T_2 &= \frac{\sqrt{1 + 4 \cdot B \cdot T^* - 1}}{2 \cdot B}, & \text{где } B &= \frac{k-1}{2 \cdot k} \cdot \left(\frac{G}{f_2} \right)^2 \cdot \frac{R}{p_2^2}; \\
M_2 &= \sqrt{\frac{2}{k-1} \cdot \left(\frac{T^*}{T_2} - 1 \right)}; & \frac{p_2^*}{p_2} &= \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_2^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}; \\
o &= \frac{\ln \left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)}{\ln \left(\frac{p_2}{p_2^*} \right)}; & u_2 &= \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T^* \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1^*} \right)^{\frac{k-1}{k \cdot (o+1)}} \right]}.
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Сравнивая значения ξ , полученные для различных каналов, делают вывод относительно их аэродинамической эффективности. Подобным образом (методом сравнения) оценивают влияние вносимых конструктивных изменений на величину газодинамического сопротивления канала. Для определения действительного расхода воздуха при математическом моделировании процесса газообмена в ДВС используют коэффициент расхода μ , как поправочный множитель в выражении для теоретического расхода.

При решении практических задач направленных на повышение аэродинамической эффективности газовоздушного тракта ДВС важно знать влияние его отдельных элементов на общее газодинамическое сопротивление. Определение общего аэродинамического сопротивления канала по результатам продувки его отдельных элементов путем непосредственного суммирования коэффициентов ξ или μ , собственно как и решение обратной задачи, невозможно, так как ξ и μ не обладают свойством аддитивности. Помимо этого необходимо иметь численное значение коэффициентов расхода этих элементов (в частности впускных, продувочных и выпускных окон двухтактного двигателя) для использования в математической модели процесса газообмена. На практике провести статическую продувку некоторых элементов газовоздушного тракта технологически сложно (например, продувочные окна 2-х тактного двигателя). Проблема заключается в определении статического давления в выходном сечении продувочных окон при различной площади их открытия (а именно, в изготовлении и установке отборника статического давления). Часто подобную задачу решают с использованием комбинированного приемника статического и полного давлений. Однако при отклонении оси трубки приемника от направления вектора скорости потока значительно увеличивается погрешность измерения давлений. Продувочные окна имеют углы наклона в плане и к оси цилиндра, обеспечивая движение воздуха во время продувки по траектории в форме «петли» для очистки полости цилиндра от продуктов сгорания. Изменение площади открытия окон приводит

к изменению направления движения воздуха в них. Для снижения погрешности при применении комбинированного приемника необходимы предварительные сведения о направлении движения воздуха, которые возможно получить в ходе дополнительных исследований (например, визуализация потока). В данной работе предлагается менее трудоемкий, но обладающий достаточной для прикладных задач точностью, метод проведения и обработки результатов статической продувки, который позволяет дать оценку аэродинамической эффективности газоздушного тракта ДВС в целом, а также определить газодинамическое сопротивление и коэффициенты расхода его отдельных элементов косвенно, т.е. расчетным путем, не прибегая к непосредственному измерению параметров потока в выходном сечении этих элементов. Для решения поставленной задачи необходимо ввести дополнительный параметр, который был бы критерием оценки газодинамического сопротивления рассматриваемого канала и одновременно с этим обладал свойством аддитивности (т.е. общая характеристика всего канала может быть получена непосредственным суммированием характеристик его отдельных элементов). В адиабатном потоке изменение энтропии ΔS между двумя контрольными сечениями может служить мерой газодинамического сопротивления. Энтропия, подобно работе и теплоте процесса, пропорциональна массе термодинамической системы и является экстенсивной (аддитивной) величиной. Таким образом, методика обработки результатов статической продувки (3.1) может быть дополнена следующими выражениями

$$\Delta S = C_p \cdot \ln \left(\frac{2}{2 - o \cdot M_2^2 \cdot [k - 1]} \right); \quad m = e^{\frac{\Delta S}{C_p \cdot (k-1)}} \cdot \sqrt{\frac{l}{o + 1}}. \quad (3.2)$$

Выполняя продувку канала при различных перепадах давления между ресивером и окружающей средой, определяем расходную характеристику исследуемого канала (зависимость ΔS от массового расхода воздуха G_B). Сопоставив расходные характеристики отдельных каналов, составляющих газоздушный тракт двигателя, можно дать количественную оценку их газодинамического сопротивления при различных режимах течения воздуха.

Следует подчеркнуть, что данный метод разработан в ходе развития общепринятого метода статической продувки и позволяет решать более широкий круг задач, связанный с повышением аэродинамической эффективности отдельных элементов газоздушного тракта двигателя.

В четвертой главе приводится описание экспериментальных установок (для стендовых испытаний и статической продувки двигателя ЗД 7,2\6,0), оснащенных комплексом измерительной аппаратуры. Программа стендовых испытаний включала обкатку двигателя, снятие регулировочных характеристик по составу смеси и углу опережения зажигания, определение механических потерь методом прокрутки, а также снятие внешних скоростных характеристик двигателя отдельно и в составе ПЛМ. Программа статической продувки газоздушного тракта ПЛМ «Бийск-45» предусматривала поэлементную продувку впускной системы, цилиндра двигателя и выпускного тракта мотора.

Заключительный раздел главы посвящен оценке погрешности измерений и обработки опытных данных. Для исключения случайных ошибок все параметры, полученные в результате прямых измерений с помощью приборов (расход воздуха, расход топлива, давление и т.д.), измерялись многократно.

Пятая глава посвящена анализу результатов экспериментальных исследований и математического моделирования рабочего процесса двигателя ЗД 7,2/6,0 в составе ПЛМ «Бийск-45».

При работе двигателя на номинальном режиме $n=5000\pm 100$ мин⁻¹ наиболее оптимальным, с точки зрения мощности и экономичности, является состав топливовоздушной смеси $\alpha=0,92\div 0,98$. Для этого в штатный карбюратор необходимо устанавливать топливный жиклер главной дозирующей системы с пропускной способностью $Q=262\pm 5$ см³/мин. Подвесные лодочные моторы до 80% времени работают на режимах близких к номинальному, поэтому угол опережения зажигания возможно оставлять фиксированным. Для двигателя «Бийск-45» оптимальным является угол $27^\circ\pm 1$ до ВМТ.

Максимальная мощность ПЛМ «Бийск-45» на валу двигателя составляет $N_e=24,8$ ($N_i=31,4$) кВт при $n=5200$ мин⁻¹, что практически на 25% меньше расчетного значения, указанного заводом изготовителем в паспортных данных. Удельный расход топлива на этом режиме $g_e=530$ ($g_i=419$) г/(кВт·ч) (рис. 5.1). Дальнейшее форсирование двигателя без изменения конструкции газозооного тракта невозможно по причине высокого противоавления в дейдвуде и низкого напoлнения кривошипной камеры $\eta_{v.k}=0,56$ при $n=5600$ мин⁻¹. Значительное снижение коэффициента напoлнения кривошипной камеры с увеличением частоты вращения указывает на высокое аэродинамическое сопротивление обратного пластинчатого клапана ОПК.

Снижение противоавления на выпуске до значения близкого к атмосферному позволяет повысить мощность и крутящий момент двигателя в среднем на 20% и уменьшить удельный расход топлива на 10% (рис. 5.2). Необходимо учитывать, что эксплуатация ПЛМ с выпуском ОГ в атмосферу в большинстве случаев невозможна по причине высокого аэродинамического шума выхлопных газов.

Настройка впускной системы позволяет увеличить коэффициент напoлнения кривошипной камеры до $\eta_{v.k}=1$ и более, тем самым, перекрывая высокое аэродинамическое сопротивление ОПК. Не согласованность расходных характеристик органов газораспределения и частоты вращения вала двигателя может снизить напoлнение цилиндра из-за роста прямых потерь свежего заряда при продувке даже при высоком напoлнении кривошипной камеры. При $n=2000$ мин⁻¹ и $\eta_{v.k}=1,12$ крутящий момент двигателя составляет 62,8 Н·м, а при $n=3200$ мин⁻¹ и коэффициенте напoлнения кривошипной камеры $\eta_{v.k}=0,94$ $M_e=74,4$ Н·м.

Режим работы двигателя, размеры органов газораспределения, а также их газодинамическое сопротивление определяют динамику изменения давлений в цилиндре и смежных с ним системах в процессе газообмена, от чего в конечном итоге зависят мощностные и экономические параметры двигателя.

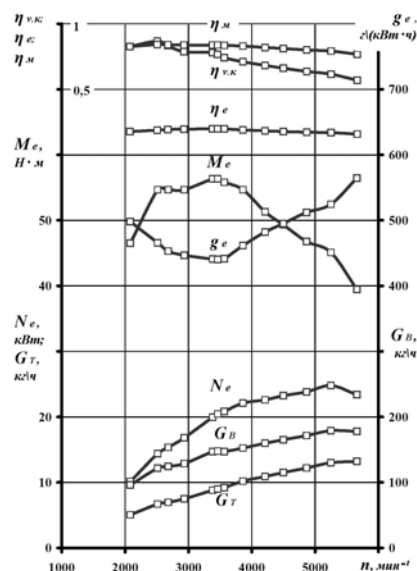


Рисунок 5.1 – Внешняя скоростная характеристика двигателя 3Д 7,2\6,0 «Буйск-45» (выпуск ОГ через ступицу винта)

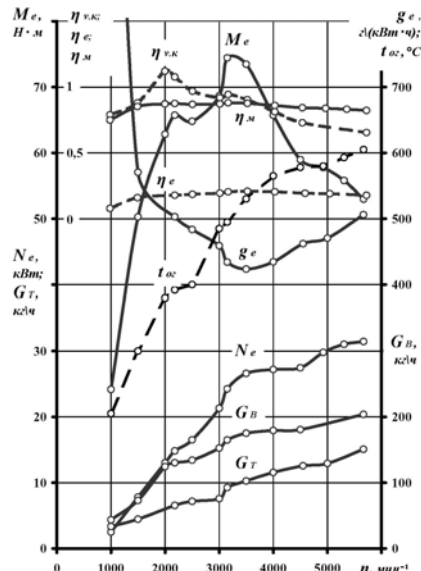


Рисунок 5.2 – Внешняя скоростная характеристика двигателя 3Д 7,2\6,0 «Буйск-45» (выпуск ОГ в атмосферу)

Выбор оптимальных размеров органов газораспределения в процессе проектирования, с точки зрения получения максимальной мощности и приемлемой экономичности, является весьма трудоемкой задачей. Причина этого – взаимосвязь большого количества факторов, определяющих характер протекания рабочего процесса и процесса газообмена в частности. Наиболее рациональным способом решения данной задачи следует признать проведение численного эксперимента с использованием математической модели рабочего процесса двухтактного бензинового двигателя с кривошипно-камерной продувкой.

Для повышения мощности и экономичности двигателя за счет увеличения наполнения цилиндра и снижения прямых потерь топливовоздушной смеси в выпускной коллектор необходимо оценить влияние конструкции и размеров органов газораспределения на показатели двигателя. Проведение статической продувки газовоздушного тракта ПЛМ «Буйск-45» позволяет определить расходные характеристики его отдельных элементов, влияние вносимых изменений в их конструкцию, а также использовать полученные данные для настройки математической модели. На рисунке 5.3 представлены расходные характеристики основных элементов газовоздушного тракта лодочного мотора «Буйск-45». Самое высокое аэродинамическое сопротивление у системы впуска, а выпускные окна имеют наименьшие потери.

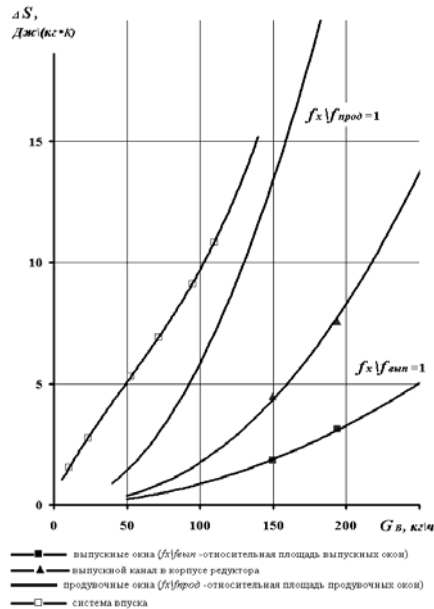


Рисунок 5.3 – Сравнение расходных характеристик основных элементов газоздушного тракта двигателя 3Д 7,2\6,0 «Бийск-45»

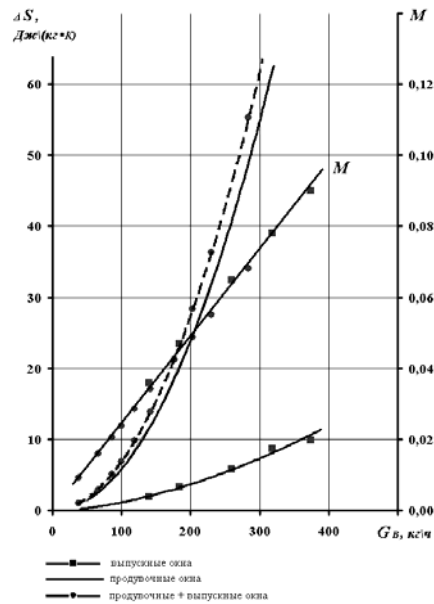


Рисунок 5.4 – Зависимость ΔS и критерия Маха M выпускных и продувочных окон от расхода воздуха при положении поршня в НМТ ($\varphi=180^\circ$ п.к.в.)

В среднем по расходу воздуха сопротивление выпускных окон в 4 раза меньше продувочных окон и в 6 раз меньше системы впуска. Основным лимитирующим звеном системы впуска является ОПК, на долю которого приходится 70% от общих потерь системы. Основная причина повышенного давления газов в дейдвуде при работе двигателя на высоких частотах вращения – недостаточная площадь проходного сечения канала, выполненного в корпусе редуктора гребного винта. Аэродинамические потери на этом участке практически сопоставимы с потерями в системе впуска.

Параметры, характеризующие аэродинамическое сопротивление продувочных окон при различных режимах течения воздуха и площади открытия, были получены расчетным путем, т.е. не прибегая к непосредственному измерению статического давления в продувочных окнах (рис. 5.4, 5.5). Для удобства использования данных статической продувки при математическом моделировании полученные значения коэффициентов расхода были аппроксимированы полиномами второй степени:

$$\begin{aligned} \mu'_{\text{vyp}} &= 0,2082 \cdot (f_x/f_{\text{vyp}})^2 - 0,3582 \cdot (f_x/f_{\text{vyp}}) + 0,8174, & \text{достоверность} \\ & \text{аппроксимации } 0,89; \\ \mu'_{\text{prod}} &= -0,0561 \cdot (f_x/f_{\text{prod}})^2 - 0,1289 \cdot (f_x/f_{\text{prod}}) + 0,5527, & \text{достоверность} \\ & \text{аппроксимации } 0,92; \end{aligned}$$

$\mu_{вп} = -90,956 \cdot (p_0/p_i^*)^2 + 171,3 \cdot (p_0/p_i^*) - 80,335$, достоверность аппроксимации 0,991. При $p_0/p_i^* < 0,94$ коэффициент расхода системы выпуска принимает значение $\mu_{вп} = 0,31$ (рис. 5.6).

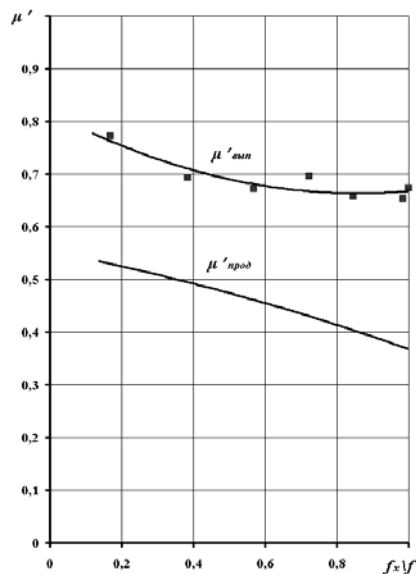


Рисунок 5.5 – Зависимость коэффициентов расхода воздуха выпускных и продувочных окон от относительной площади

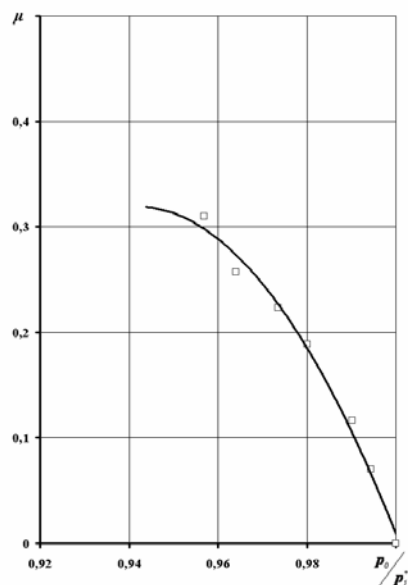


Рисунок 5.6 – Зависимость коэффициента расхода $\mu_{вп}$ системы выпуска от отношения давлений

Моделирование работы двигателя на номинальном режиме показало удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных – погрешность определения индикаторных показателей не превышает 10%.

Аэродинамическое сопротивление продувочных и выпускных окон в меньшей степени оказывает влияние на индикаторные показатели двигателя. Изменение мощности и удельного расхода топлива при увеличении среднего коэффициента расхода окон от 0,4 до 1 лежит в пределах погрешности моделирования. Изменение фаз газораспределения (в допустимых пределах) не существенно влияет на показатели двигателя. Отклонение от оптимальных значений приводит к снижению мощности и росту удельного расхода топлива. Оптимальные характеристики окон двигателя 3Д 7,2\6,0 находятся в пределах: продувочные окна – полное эффективное проходное сечение $\mu f_{прод} = 4,84 \div 6,12 \text{ см}^2$, высота окон $h_{прод} = 11 \div 14 \text{ мм}$; выпускные окна – $\mu f_{вып} = 5,57 \div 6,32 \text{ см}^2$ и $h_{вып} = 15 \div 17 \text{ мм}$.

Снижение противодавления на выпуске до атмосферного $p_i = 100 \text{ кПа}$ при постоянной продолжительности послышного вытеснения продуктов сгорания

$k_{\text{пол}}=0,32$ ведет к увеличению наполнения кривошипной камеры на 8% и снижению количества остаточных газов в цилиндре на 23% (рис. 5.7).

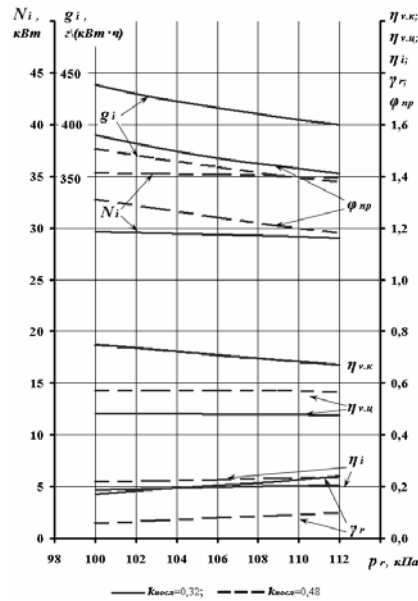


Рисунок 5.7 – Расчетное влияние противодавления на выпуске на показатели двигателя ЗД 7,2\6,0 «Бийск-45», при $n=5000 \text{ мин}^{-1}$

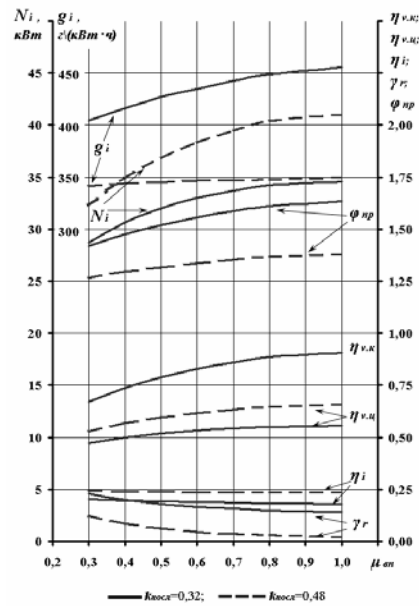


Рисунок 5.8 – Расчетное влияние коэффициента расхода системы выпуска на показатели двигателя ЗД 7,2\6,0 «Бийск-45», при $n=5000 \text{ мин}^{-1}$

Вместе с тем, на 7,7% возрастают прямые потери свежего заряда в выпускной коллектор, в результате рост мощности не превышает 2%, а удельный расход топлива возрастает на 8,8%. При одновременном увеличении продолжительности послойного вытеснения до $k_{\text{пол}}=0,48$ прямые потери топлива сокращаются на 6,9%, удельный расход топлива – 5,8%, а индикаторная мощность возрастает на 17,8%.

Наиболее значительное расчетное влияние на индикаторные показатели двигателя оказывают степень наполнения кривошипной камеры свежим зарядом и продолжительность послойного вытеснения продуктов сгорания при продувке цилиндра (рис. 5.8). Наполнение кривошипной камеры с ОПК на впуске определяется его аэродинамическим сопротивлением. Снижение аэродинамического сопротивления на впуске в 2 раза позволяет при прочих равных условиях на 20% повысить наполнение кривошипной камеры и на 15% увеличить индикаторную мощность двигателя. Однако удельный расход топлива при этом возрастает в среднем на 7% из-за роста прямых потерь топлива при продувке. Увеличение продолжительности послойного вытеснения способствует повышению мощности при одновременном снижении расхода

топлива. Обеспечение наполнения кривошипной камеры до $\eta_{v.k}=0,91$ и коэффициента продувки $\phi_{np}=1,38$ позволяет увеличить индикаторную мощность двигателя при $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ до 41,1 кВт и снизить удельный расход топлива до $g_i=350 \text{ г/(кВт·ч)}$.

Заключение. По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Отечественные двухтактные подвесные лодочные моторы по своим технико-экономическим показателям в целом не уступают аналогичным ПЛМ зарубежного производства, в то же время предлагаемая на рынке линейка моторов ограничена мощностью 32 л.с. Разработанный бийскими конструкторами лодочный мотор «Бийск-45» имеет в своей конструкции много передовых технических решений и может стать базовым при разработке унифицированного ряда ПЛМ средней мощности.
2. Выбор тех или иных конструктивных мероприятий, направленных на повышение технико-экономических показателей ДК ДВС в значительной степени определяется назначением двигателя, особенностью его конструкции и условиями эксплуатации.
3. Разработана и настроена по результатам экспериментальных исследований математическая модель рабочего процесса ДК ДВС. Погрешность синтеза индикаторных показателей не превышает 10%, что позволяет использовать модель для предварительной оценки конструктивных мероприятий.
4. Разработана методика обработки результатов статической продувки, с помощью которой был проведен сравнительный анализ аэродинамической эффективности отдельных элементов газозвдушного тракта ПЛМ «Бийск-45» и получены данные для настройки математической модели.
5. Проведен анализ протекания внешней скоростной характеристики двигателя ЗД 7,2\6,0 отдельно и в составе ПЛМ.
6. Проведена оценка расчетного влияния размеров и аэродинамического сопротивления органов газораспределения на индикаторные показатели двигателя ЗД 7,2\6,0.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Герман Е.А. Методика расчета процесса газообмена двухтактного карбюраторного двигателя /Е.А. Герман, А.А. Балашов // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: тезисы докладов. - Владимир, 1995.
2. Сеницын В.А. Проблемы и результаты модификации, конструкции малоразмерных ДК ДВС для средств малой механизации /В.А. Сеницын, А.А. Балашов, А.Г. Кузьмин, Е.А. Герман // Математическое моделирование и исследование процессов в ДВС: учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1997.
3. Балашов А.А. Статическая продувка газозвдушного тракта двухтактного лодочного мотора «Бийск-45» /А.А. Балашов, Е.А.

- Герман, В.А. Синицын, А.Г. Кузьмин // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: материалы IX международной научно-практической конференции. – Владимир, 2003.
4. Синицын В.А. Снижение аэродинамических потерь в газоздушном тракте лодочного мотора – важнейший фактор увеличения мощности и улучшения экологических качеств /В.А. Синицын, А.А. Балашов, Е.А. Герман, А.Г. Кузьмин // Исследование, моделирование и управление в технических системах и природной среде / Ползуновский вестник. – 2003. - № 1-2.
 5. Балашов А.А. Методика обработки результатов статической продувки каналов двигателя /А.А. Балашов, Е.А. Герман // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей /Под ред. д.т.н., профессора, академика РАТ А.Л. Новоселова; Российская академия транспорта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004.
 6. Кузьмин А.Г. Исследование рабочего процесса двухтактного карбюраторного двигателя /А.Г. Кузьмин, Е.А. Герман, Д.А. Зонов // Наука и молодежь. 1-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: тезисы докладов. - Барнаул, 2004.
 7. Герман Е.А. Стендовые испытания подвесного лодочного мотора «Бийск-45» /Е.А. Герман, А.В. Шашев, А.А. Балашов, А.Г. Кузьмин // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей РАТ. – Барнаул, 2005.
 8. Герман Е.А. Расчетно-экспериментальный метод определения коэффициента расхода продувочных окон двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой /Е.А. Герман, А.А. Балашов, А.Г. Кузьмин // Ползуновский альманах. – 2005. - № 4.
 9. Балашов А.А. Статическая продувка выпускной системы ДВС /А.А. Балашов, Е.А. Герман, А.Г. Кузьмин, Е.М. Калюжный // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: труды международной научно-практической конференции. – Челябинск, 2006.
 10. Балашов А.А. Адиабатное течение с потерями /А.А. Балашов, Е.М. Калюжный, А.Г. Кузьмин, Е.А. Герман // Двигатели внутреннего сгорания – современные проблемы, перспективы развития: материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием/ Ползуновский вестник. – 2006. - № 4.
 11. Балашов А.А. Определение параметров адиабатного процесса расширения газа в потоке /А.А. Балашов, А.Г. Кузьмин, Е.А. Герман, Е.М. Калюжный // Двигатели внутреннего сгорания – современные проблемы, перспективы развития: материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Ползуновский вестник. – 2006. - № 4.