

На правах рукописи

ПЛАТОНОВ Константин Юрьевич



УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
БЫСТРОХОДНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
ПОВЫШЕНИЕМ СТАБИЛЬНОСТИ ГЕОМЕТРИИ ЦИЛИНДРА

Специальность 05.04.02-Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Тульский государственный университет".

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Хмелев Роман Николаевич.

Официальные оппоненты: Путинцев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, «МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор;
Дойкин Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, доцент.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Защита состоится «28» декабря 2021 г. в 16:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.271.12, созданного на базе ФГБОУ ВО ТулГУ по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТулГУ и на сайте www.tsu.tula.ru.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ТулГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.271.12.

Автореферат разослан «27» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Хмелев Роман Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основной задачей отечественного двигателестроения является создание конкурентоспособных поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС), не уступающих зарубежным аналогам и отвечающих современным требованиям. Такие двигатели должны обладать рядом свойств, среди которых можно выделить надежность, ресурс, экономичность, экологичность, материалоемкость, простоту изготовления и обслуживания. Несмотря на существующее в настоящее время многообразие конструкций поршневых двигателей внутреннего сгорания, в любом двигателе цилиндропоршневая группа (ЦПГ) является ключевым элементом. Именно на ЦПГ приходятся основные потери на трение. Величина деформаций цилиндра и стабильность его геометрии существенным образом влияют на продолжительность обкатки ПДВС, уровень механических потерь, вероятность натира и задира деталей ЦПГ на стадии обкатки и способность достижения двигателем заданных характеристик.

Среди многообразия конструкций ПДВС особое место занимают малоразмерные быстроходные дизельные двигатели воздушного охлаждения, которые широко применяются в сельскохозяйственной, строительной технике, дизель-генераторных установках и малых судах.

Как известно, установка отдельно стоящих ребренных цилиндров на блок двигателей указанного выше типа осуществляется чаще всего при помощи силовых анкерных либо, реже, фланцевых шпилек, что неизбежно приводит к монтажной деформации стенок цилиндра. Кроме того, свой негативный вклад в напряженно-деформированное состояние цилиндров вносит органически присущая воздушному охлаждению неравномерность распределения температуры по высоте и окружности этих деталей.

Цель исследования состоит в разработке комплекса научно обоснованных технических решений, обеспечивающих значимое снижение монтажных деформаций цилиндра и, как следствие, минимизацию продолжительности обкатки двигателя и удельного эффективного расхода топлива.

Для достижения поставленной цели предусматривается решение следующих **задач**:

1. Анализ причин возникновения монтажных деформаций и способов их уменьшения.
2. Математическое моделирование деформации цилиндра от монтажных усилий.
3. Экспериментальные исследования изменения геометрии цилиндра на стадии сборки.
4. Разработка математической модели работы двигателя с учетом изменения расхода картерных газов (КГ).
5. Сравнительные моторные испытания серийного и опытного цилиндров.

Научная новизна работы заключается в:

- разработке математических моделей изменения геометрии цилиндра при сборке и функционировании ПДВС;

- установлении взаимосвязи геометрии стенки цилиндра с эксплуатационными показателями двигателя.

Методы исследования:

- математическое моделирование рабочих процессов ПДВС и напряженно-деформированного состояния цилиндров;

- высокоточные метрологические измерения цилиндров;

- обкаточные и стендовые моторные испытания дизелей.

Достоверность результатов исследования базируется на:

- использовании фундаментальных уравнений механики, а также современных численных методов реализации соответствующих математических моделей;

- корреляции и удовлетворительном совпадении результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на базе АО «АК «Туламашзавод», при исследовании натурных объектов.

Практическая ценность результатов работы состоит в:

- разработке расчетной программы «Динамическая модель быстроходного дизеля с воздушным охлаждением»;

- опытной конструкции цилиндра дизеля-объекта исследования 1С9,5/8,0;

- техничко-технологических решениях, обеспечивших сокращение продолжительности обкатки дизеля 1С9,5/8,0с 21 до 13 ч;

- методике прогнозирования показателей работы двигателя по геометрическим параметрам цилиндра.

Апробация результатов. Результаты исследований доложены и обсуждены на:

- научно-технической конференции «Инновационные наукоемкие информационные технологии», Тула, ТулГУ, 2017 г., 2018 г.;

- 4-й Международной молодежной научно-практической конференции «Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование». Курск, 2017 г.;

- Международной научно-технической конференции «Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта». Тула, ТулГУ, 2017 г.;

- Всероссийской научно-практической конференции «Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (Трансэнергоком-2018)». Саратов, СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2018 г.;

- Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем-2018». Волгоград, ВолгГТУ, 2018 г.;

- Международной научно-технической конференции «Двигатель-2018». МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва. 2018 г.;

- Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности». Могилев, МГТУ, 2018 г.;

-X Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство», Белгород, БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018 г.;

-Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг-2019, 2020»;

-Международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании», Новосибирск, 2020.

Положения, выносимые на защиту:

-включенные в перечень положений научной новизны работы математические модели и закономерности, связывающие расход КГ и способы обработки цилиндров с показателями работы ПДВС;

-техничко-технологические решения, обеспечившие сокращение продолжительности обкатки дизеля 1Ч9,5/8,0;

-методика определения выходных показателей работы ПДВС по геометрическим параметрам цилиндра.

Личный вклад автора в разработку положений и результаты исследования состоит в:

-выполнении критического анализа конструкций, схем крепления на блоке и расчетных моделей напряженно-деформированного состояния цилиндров быстроходных дизелей с воздушным охлаждением;

-получении и статистической обработке результатов измерений геометрии цилиндров;

-разработке математических моделей функционирования ПДВС и деформации цилиндра при сборке;

-выявлении закономерностей изменения геометрии цилиндра от действия монтажных усилий и предложении на этой основе опытной конструкции цилиндра;

-проведении экспериментальных исследований изменения показателей работы дизелей на стадии обкатки.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 печатных работы, из них 2 в изданиях по списку ВАК РФ, 3 в изданиях базы Scopus; получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Содержит 129 страницы текста, включающего 44 рисунка, 11 таблиц и список литературы из 142 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, изложена научная новизна и практическая полезность, выбраны методы исследования.

В первой главе рассмотрено состояние проблемы обеспечения стабильности геометрии цилиндров быстроходных дизелей с воздушным охлаждением. Проанализированы основные причины деформации цилиндра (таблица 1).

Таблица 1–Основные причины деформации цилиндра

Причины деформаций	Авторы, труды которых посвящены исследованиям причин деформаций цилиндров
Конструкционные	Агеев А.Г., Симдянкина А.А., Чугунов Г.П., Макаренков А.А., Иванова Н.С., Мелещенко Н.Г., Чайнов Н. Д., Семенов В.С. и др.
Технологические	Леонов С. Л., Вагабов Н.М., Вердиева М.Г., Саркарова Т.Э. и др.
Эксплуатационные	Чайнов Н. Д., Семенов В.С. и др.

Выполнен анализ известных методов повышения стабильности геометрии цилиндра вышеуказанных ДВС. Установлено, что для цилиндра дизеля-прототипа наиболее рациональным способом повышения стабильности геометрии цилиндра при сборке является хонингование в сборе, т.к. обработкой в предварительно деформированном состоянии полностью либо частично компенсируются практически все виды искажений макрогеометрии (конусность, овальность, огранка, волнистость, седлообразность, бочкообразность) внутренней поверхности цилиндра.

В итоге обзора сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе проведены экспериментальные исследования механических свойств материала цилиндра дизеля-прототипа и анализ результатов серии измерений диаметра внутренней стенки цилиндра.

Для определения механических свойств материала цилиндра дизеля-прототипа был проведен ряд испытаний на разрывной машине. Для этого из цилиндра вырезались призматические заготовки, из которых токарной обработкой изготавливались цилиндрические образцы по ГОСТ 9651-84. Эксперименты проводились в Тульском государственном университете на машине Instron серии 5982 с компьютерным управлением, тяжелой рамой и рабочей нагрузкой 100 кН. Испытания образцов на статическое растяжение были выполнены в диапазоне температур от 20 до 800 °С. Растяжение осуществлялось при скорости деформирования 5 мм/мин.

По результатам сравнительной оценки механических свойств материала цилиндров установлено, что марка применяемого для изготовления серийных цилиндров чугуна наиболее близка к СЧ 20. Однако из-за неоднородности свойств отливки прочностные свойства могут соответствовать марке СЧ 10. Справочные значения характеристик данного материала, дополненные экспериментально полученными значениями, использовались для задания свойств материала цилиндра при расчетах в третьей главе.

Для определения характера деформации и участков поверхности цилиндра с наибольшим изменением диаметра проведена серия измерений геометрических параметров внутренней поверхности цилиндра.

Экспериментальные исследования проводились с использованием изготовленного приспособления - картриджа, имитирующего верхнюю часть

картера дизеля и головку цилиндра и позволяющего выполнять измерения внутренней поверхности цилиндра в собранном, т.е. напряженно-деформированном, состоянии указанных деталей (рисунок 1).



Рисунок 1 –Фото и эскиз цилиндра в картридже

Максимальный момент затяжки гаек составлял 35 Н·м и контролировался динамометрическим ключом. Измерения проводились в термоконстантной комнате двигательного производства АО «АК «Туламашзавод» на координатно-измерительной машине (КИМ) с погрешностью контроля линейных размеров не более ± 5 мкм по стандартной программе в четырех сечениях и восьми поясах цилиндра (рисунок 2).

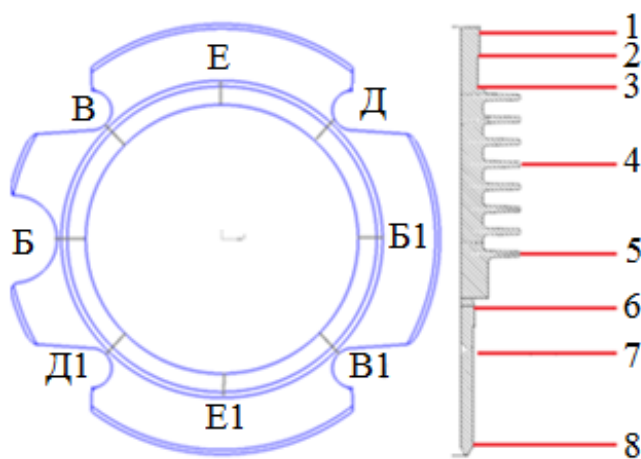


Рисунок 2 –Расположение сечений и поясов замеров на цилиндре

Методика измерений цилиндров включала следующие основные этапы: 1. Измерения в свободном состоянии; 2. Сборка картриджа; 3. Измерение в сборе с учетом действия монтажных усилий; 4. Разборка; 5. Измерения в свободном состоянии после снятия монтажных усилий; 6. Анализ полученных результатов.

При проведении многократных измерений цилиндров диаметром 85 мм и 95 мм было отмечено устойчиво повторяющееся восстановление после сжатия первоначальной формы внутренней поверхности цилиндра. Этот факт также подтвердился после длительной выдержки цилиндров в сжатом состоянии. Максимальная разница диаметров исследуемых цилиндров составила не более 7 мкм.

Измерениями обнаружено значимое влияние на геометрию внутренней поверхности цилиндра медной прокладки, устанавливаемой между торцевой

поверхностью цилиндра и головкой: разница значений диаметра достигает максимального значения в верхнем поясе и составляет 45 мкм. При этом диаметр цилиндра в верхних поясах в сжатом состоянии без прокладки во всех сечениях меньше диаметра цилиндра с прокладкой, что позволяет сделать вывод, о том, что наличие медной прокладки обеспечивает более равномерную деформацию цилиндра в верхних поясах.

Отмеченный факт, вместе с выявленными упругими свойствами материала цилиндра (восстановлением его первоначальной формы), позволяет сделать вывод о целесообразности хонингования цилиндров дизеля с диаметром цилиндра 95 мм в картриджах (в сборке) с целью уменьшения монтажных деформаций, сокращения числа размерных групп при сборке и последующего уменьшения продолжительности наработки дизеля перед предъявительскими испытаниями.

Полученный характер деформаций цилиндра дизеля 1С9,5/8,0 во многом объясняется наличием области асимметрии, предназначенной для установки трубки, внутри которой проходят штанги толкателей ГРМ, а также уменьшенной жесткостью конструкции за счет лишнего оребрения развитого верхнего пояса цилиндра.

В третьей главе выполнено математическое моделирование деформации цилиндра от монтажных усилий, а также разработаны математическая модель работы двигателя с учетом изменения расхода КГ и методика прогнозирования показателей ПДВС на основе оценки геометрии его цилиндра.

Математическое моделирование деформации цилиндра дизеля от действия монтажных усилий выполнялось с помощью программного комплекса ANSYS. Использовалась изотропная постановка задачи термоупругости, которая предполагает наличие и ввод экспериментальных данных в отношении модуля упругости материала исследуемой детали.

При моделировании операции затяжки шпилек использовались прогрессивные 3D-модели цилиндра и сопряженных с ним деталей. Для всех объектов в модели генерировалась сетка конечных элементов (рисунок 3).

Максимальное качество сетки применено для цилиндра, как представляющего наибольший интерес в данном исследовании.

Для каждого сопряжения тел в сборке («головка-прокладка»; «прокладка цилиндр»; «цилиндр-блок») на основе результатов выполненных на разрывной машине экспериментов были заданы соответствующие граничные условия по материалам, типу контакта и значениям статического коэффициента трения.

Для исследования влияния температуры на геометрию внутренней поверхности цилиндра последняя разбивалась на 7 поясов, отличающихся типом граничных условий. Каждому типу условий соответствует координата поршня. Выделено 5 типов граничных условий для следующих зонцилиндра: 1) - огневой пояс; 2) 1-е поршневое кольцо; 3) 2-е поршневое кольцо; 4) юбка поршня; 5) подпоршневое пространство. Вычислено общее за рабочий цикл дизеля на номинальном режиме его работы время действия каждого типа граничных условий в каждом поясе цилиндра (таблица 2).

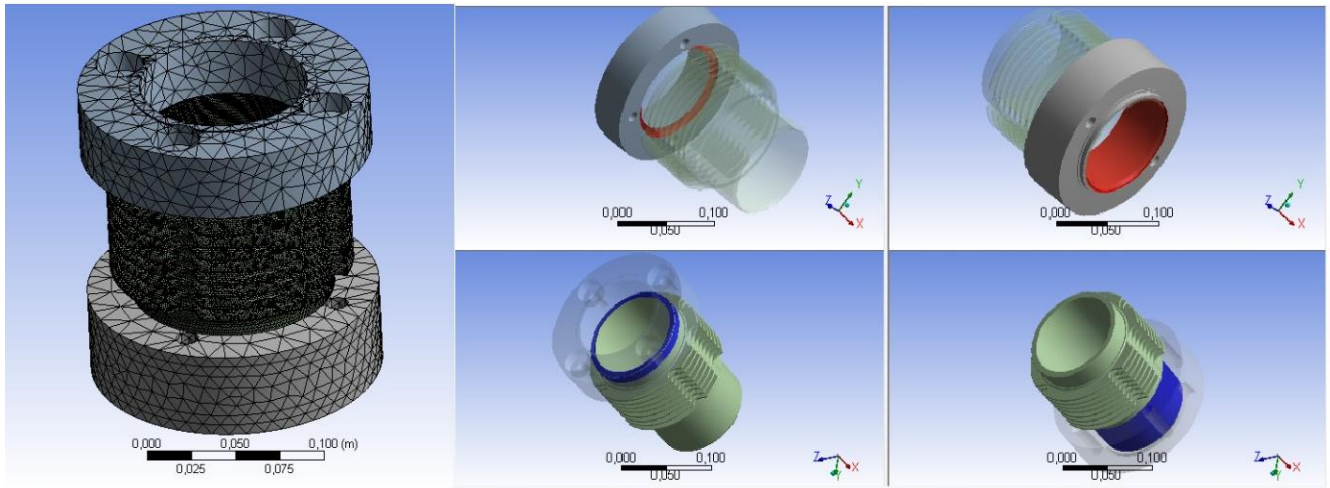


Рисунок 3 –Расчетная модель и ее элементы

Таблица 2 –Действие граничных условий

№ п/п	Координаты пояса	Время действия граничных условий (с)				
		Огневой пояс	1-е кольцо	2-е кольцо	Юбка поршня	Пространство под поршнем
1	0-8	0,006	0	0	0	0
2	9-14	0,005	0,005	0	0	0
3	15-77	0,019	0,018	0,021	0,021	0
4	78- 92	0,013	0,006	0,005	0,026	0,010
5	93-100	0	0,010	0,005	0,020	0,013
6	101-105	0	0	0,009	0,022	0,014
7	106-153	0	0	0	0,025	0,029

В итоге моделирования были получены результаты, позволившие связать момент затяжки гаек анкерных шпилек с радиальными перемещениями точек внутренней поверхности цилиндра, которые, как оказалось, имеют несимметричный характер распределения (рисунок 4).

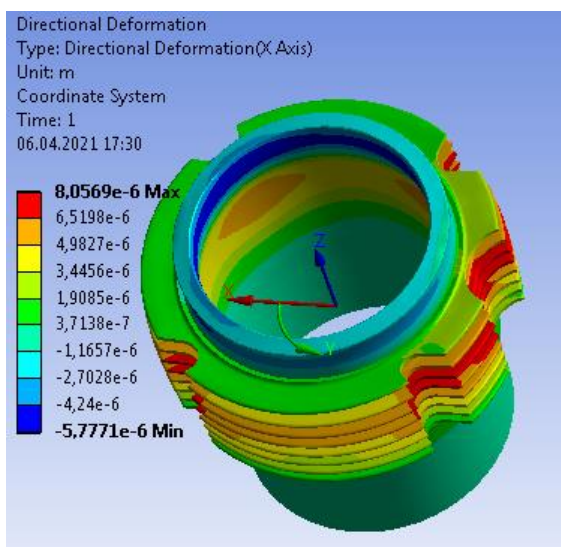


Рисунок 4 – Характер радиальных перемещений образующей внутренней поверхности цилиндра

Полученные результаты имеют качественное соответствие с результатами серии измерений (рисунок 5). Наблюдается уменьшение диаметра цилиндра на 5-10 мкм в верхней части цилиндра, примыкающей к головке.

Было установлено, что факт и характер асимметрии деформации зависят

от наличия и формы выемок в оребрении, которые выполнены для установки шпилек и штанг толкателей. Выявлены области изменения геометрии в месте крепления шпилек и технологического разрыва пояса оребрения.

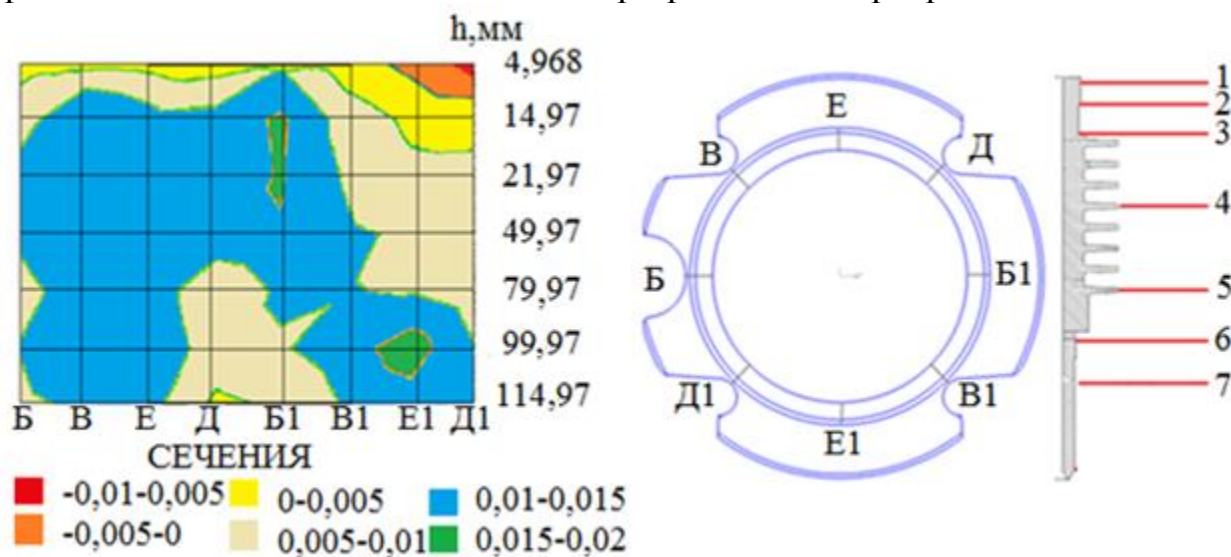


Рисунок 5 – Изменение геометрии стенки цилиндра (мм)

Для устранения выявленных недостатков в результате проведенных вычислительных экспериментов было выполнено сравнение монтажных деформаций нескольких вариантов конструкции цилиндров, приведенных на рисунке 6, различающихся количеством ребер охлаждения и их размерами.

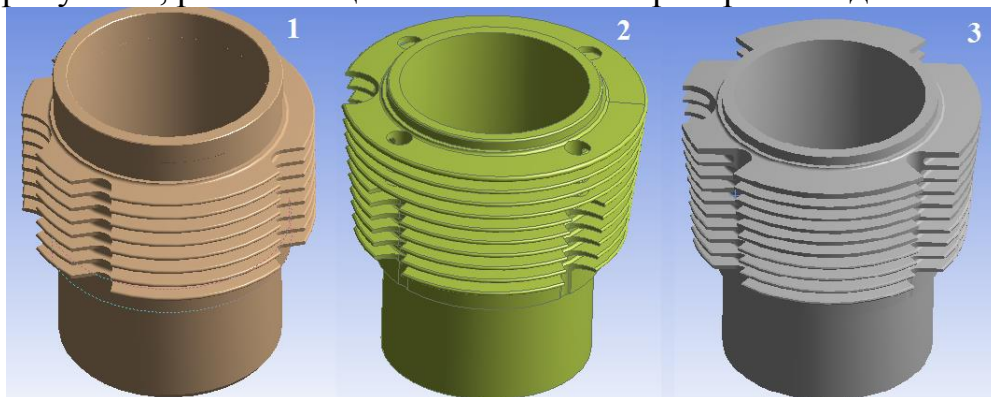


Рисунок 6 –
Варианты
конструкции
цилиндра: 1-
существующая;
2- 3 опытные

В
качестве

критериев оценки конструкции исследуемых цилиндров были приняты характер и величина деформаций, технологичность конструкции.

Конструкция цилиндра 2 отличается от существующей большим числом ребер охлаждения и увеличением их длины от нижней части цилиндра к головке. Верхние ребра данного цилиндра вместо выемки для шпилек имеют сверления, что придает цилиндру большую жесткость, кроме этого улучшается эффективность охлаждения, вследствие увеличения площади. Данные изменения приводят к уменьшению величины перемещений на 14-16%. Однако изготовление цилиндра конструкции 2 технологически существенно усложняет процесс производства, ввиду наличия отверстий в ребрах охлаждения.

Конструкция цилиндра 3, совмещает положительные свойства рассматриваемых цилиндров. Данная конструкция также имеет пояс оребрения

с большим числом ребер охлаждения и увеличением их высоты от нижней части цилиндра в направлении головки. Для размещения шпилек, используются проточки вместо сверлений. Такая конструкция имеет более высокую эффективность охлаждения в верхней части цилиндра, благодаря дополнительным ребрам охлаждения и более технологична.

Как показали проведенные исследования, рассматриваемая трехмерная математическая модель является универсальным инструментом для исследования геометрии цилиндра одноцилиндрового двигателя и способна выявлять изменение геометрии цилиндра на микроуровне.

Для выявления связи геометрии стенки цилиндра и показателей работы двигателя на макроуровне разработана математическая модель функционирования ПДВС на переходных и установившихся режимах с учетом изменения расхода КГ.

Исходя из того, что геометрия внутренней стенки цилиндра влияет, кроме прочего, на комплекс μS (μ – безразмерный коэффициент расхода при течении среды; S – площадь сечения, через которое осуществляется течение), установлена корреляция данных параметров.

С помощью разработанной расчетной модели и соответствующей компьютерной программы выполнено комплексное моделирование установившихся и переходных режимов работы дизеля 1Ч 9,5/8,0 с учетом расхода КГ. Система уравнений математической модели базируется на законах сохранения энергии, массы, уравнениях движения твердых звеньев и включает дифференциальные уравнения скоростей изменения температуры и плотности рабочего тела в цилиндре и в картере ДВС, уравнение состояния идеального газа, а также дифференциальные уравнения изменения угловой скорости и угла поворота коленчатого вала двигателя.

С учетом общепринятых допущений использованные в расчетной модели дифференциальные уравнения скоростей изменения плотности и температуры рабочего тела в цилиндре приобрели следующий вид:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = \frac{1}{W} \left[G_{n1} + G_{n2} + G_{n3} - G_{p1} - G_{p2} - G_{p3} - \right. \\ \left. - \rho \cdot f_{\pi} \cdot \omega \cdot r_k \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \right];$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{c_v \cdot \rho \cdot W} \left[G_{n1}(i_{n1} - u) + G_{n2}(i_{n2} - u) + G_{n3}(i_k - u) - \right. \\ \left. - (G_{p1} + G_{p2} + G_{p3})(i - u) + Q_r - Q_t - \right. \\ \left. - p \cdot f_{\pi} \cdot \omega \cdot r_k \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \right].$$

Здесь τ – время; f_{π} – площадь поршня; W – текущий объем рабочего тела; $G_{n1}, G_{n2}, G_{n3}, G_{n4}$ – секундный массовый приход рабочего тела через впускной, выпускной клапаны, зазоры в ЦПГ и систему вентиляции картера, соответственно; $G_{p1}, G_{p2}, G_{p3}, G_{p4}$ – секундный массовый расход рабочего тела через впускной, выпускной клапаны, зазоры в ЦПГ и систему вентиляции картера, соответственно; T, ρ – температура и плотность рабочего тела в

цилиндре; ω и φ – угловая скорость и угол поворота коленчатого вала; u , i – удельная внутренняя энергия и энтальпия рабочего тела в цилиндре; u_k , i_k , – удельная внутренняя энергия и энтальпия рабочего тела в картере; p – давление рабочего тела; c_v , c_{vk} – удельная изохорная теплоемкость рабочего тела в цилиндре и картере соответственно; r_k – радиус кривошипа; $\dot{Q}_r$ – секундный приход энергии в форме теплоты при горении рабочей смеси; $\dot{Q}_t$ – секундный расход энергии в форме теплоты в результате теплообмена в цилиндре.

Картер ДВС моделировался как полость переменного объема W_k . Для описания изменения состояния газа в нем, использовались аналогичные дифференциальные уравнения:

$$\frac{d\rho_k}{d\tau} = \frac{1}{W_k} [G_{p3} - G_{n3} + G_{n4} - G_{p4}]$$

$$\frac{dT_k}{d\tau} = \frac{1}{c_{vk} \cdot \rho_k \cdot W_k} [G_{p3}(i - u_k) + G_{n3}(i_k - u_k) + G_{n4}(i_{n1} - u_k) - G_{p4}(i_k - u_k)].$$

Секундный расход КГ или утечки через зазоры в ЦПГ определяется следующим образом:

$$Q_{кг} = \mu S \psi p_{вх} \rho_{вх}. \quad (1)$$

Для интегральной оценки геометрии цилиндра вычислялись отклонения от цилиндричности и прямолинейности стенки цилиндра для всех сечений по формуле:

$$E_{кр,пр} = \frac{D_{max} - D_{min}}{2} \quad (2)$$

как максимальная полуразность между наибольшим D_{max} и наименьшим D_{min} измеренным диаметром цилиндра в каждом из сечений или направлении.

С целью математического описания влияния показателей $E_{кр}$ и $E_{пр}$ на величину μS для конкретного режима работы ПДВС в уравнении (1) предлагается использовать регрессионную зависимость вида:

$$\mu S = f(E_{кр}; E_{пр}) \quad (3)$$

Рассмотренная математическая модель используется для моделирования работы ПДВС во всем диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы двигателя.

Проверка адекватности математической модели осуществлялась путем сравнения результатов моделирования с результатами экспериментов на стенде технологической обкатки и испытаний дизелей (рисунок 7 и рисунок 8).

Максимальное расхождение значений сравниваемых контрольных величин на рисунке 7 и рисунке 8 не превысило 10 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

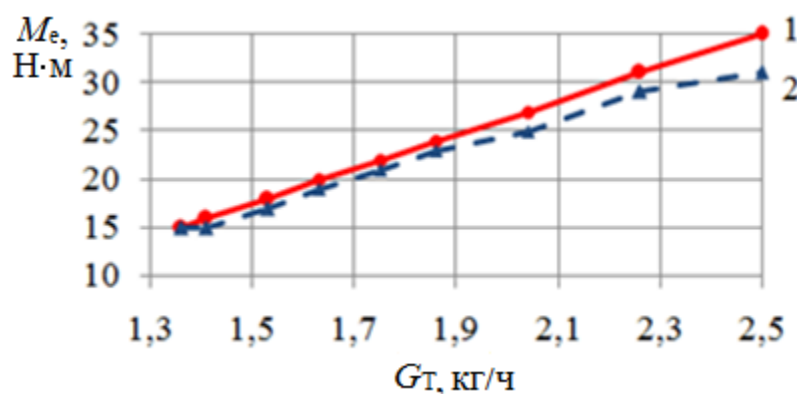


Рисунок 7 –
Сопоставление расчетной 1 и экспериментальной 2 зависимостей крутящего момента M_e от часового расхода топлива G_T

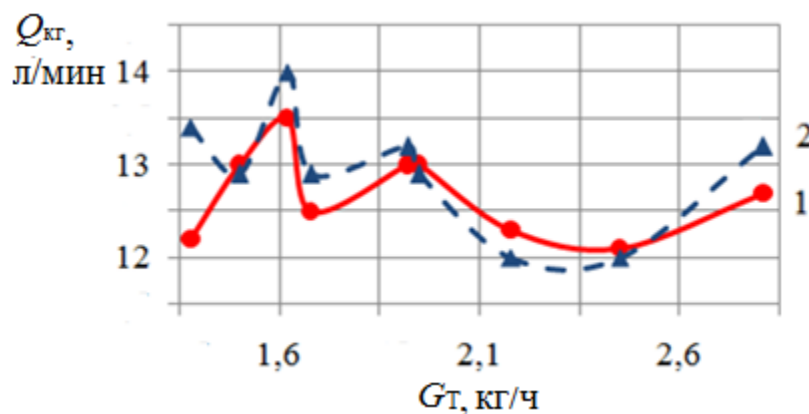


Рисунок 8 – Сравнение расчетной 1 и экспериментальной 2 зависимостей расхода картерных газов $Q_{кг}$ от часового расхода топлива G_T

Разработанное математическое описание может быть положено в

основу методики оценки качества цилиндра на этапе сборки и прогнозирования показателей ПДВС на основе оценки геометрии его цилиндра.

Предлагаемая методика проиллюстрирована на примере двигателя 1Ч 9,5/8,0 и включает следующие основные этапы:

1. Подготовительный этап. Накопление статистической информации по результатам измерений цилиндров и наработки двигателя. Построение регрессионной зависимости (3). Определение поля допусков цилиндров по показателям $E_{кр}$ и $E_{пр}$ (2).

2. Оценка качества цилиндра на этапе сборки. Измерение исследуемого цилиндра в предварительно деформированном состоянии и вычисление коэффициентов отклонения (2) от заданных размеров. Принятие решения о дальнейшем использовании цилиндра с учетом его попадания в поле допуска.

3. Прогнозирование показателей ПДВС на основе оценки геометрии его цилиндра. Расчет величины μS для конкретного режима работы ПДВС по регрессионной зависимости (3) и определение с помощью математической модели показателей работы ПДВС с рассматриваемым цилиндром.

Применение на практике предлагаемой методики позволяет на основе контроля основных геометрических показателей цилиндра после финишной механической обработки, сделать вывод о целесообразности дальнейшего использования объекта контроля с учетом прогнозируемых по модели показателей ПДВС и их соответствия паспортным данным. Таким образом, можно исключить значительную часть производственного цикла для тех цилиндров, которые не будут, в итоге, удовлетворять предъявляемым требованиям. Дополнительно методика позволяет ранжировать цилиндры с учетом их макрогеометрии.

В четвертой главе проведена экспериментальная оценка влияния предложенной технологии хонингования цилиндров в картриджах (в сборке) на процесс обкатки и эффективные показатели дизеля.

С учетом результатов, полученных в предыдущих главах, разработаны рекомендации по изменению конструкции, технологического процесса изготовления и сборки цилиндра дизеля. В итоге этих испытаний сформулированы улучшающие изменения существующей программы обкатки дизелей.

С целью уменьшения деформаций цилиндра, возникающих при его монтаже, и сокращения длительности циклов обкатки, а также с учетом выявленного эффекта восстановления формы внутренней поверхности цилиндра от действия монтажных усилий, проведены испытания дизеля с цилиндрами, хонингованными в сборке (в картриджах), в сравнении с серийной конструкцией, характеризуемой финишным хонингованием внутренней поверхности «свободного» цилиндра до его установки на блок.

Цель испытаний – проверка гипотезы об эффективности хонингования цилиндров в картриджах в сжатом состоянии под действием монтажных усилий и установление характера влияния режима хонингования цилиндра на показатели работы дизеля, а также продолжительность его обкатки.

Объект испытаний – дизель 1Ч9,5/8,0 с наработкой 30 часов. Испытательное оборудование – стенд технологической обкатки и испытаний дизелей АО «АК «Туламашзавод».

За основу была взята программа наработки перед предъявительскими испытаниями в объеме 21 ч (7 циклов по 3 ч). Методика сравнительных испытаний дополнительно включала: снятие внешней скоростной характеристики; разборку дизеля и дефектацию ЦПГ; микрометрирование цилиндров на КИМ; корректировку программы наработки и повторение испытаний опытных цилиндров по ряду пунктов методики.

Определенные в ходе анализа погрешностей доверительные интервалы значений рассматриваемых контрольных величин – эффективной мощности N_e , мощности механических потерь N_m , удельного эффективного расхода топлива g_e , расхода картерных газов $Q_{кг}$ и длительности обкатки t составили соответственно (в %) 2, 2, 4, 6 и 4.

Представленные в таблице 4 и на рисунке 8 результаты сравнительных испытаний показали, что после 13 часов наработки t в опытном дизеле достигаются и сохраняются минимальные значения контрольных величин, что являлось прямым указанием на завершение к указанному времени процессов приработки основных трущихся поверхностей деталей дизеля-объекта исследования. В качестве дополнительного доказательства факта завершения процесса приработки деталей получено, что на данном этапе значения температуры масла стабилизируются на минимальном уровне 85...90°C.

Таблица 4 – Результаты сравнительных испытаний дизеля 1С9,5/8,0 с серийным и опытным цилиндрами на скоростном режиме 3350 мин⁻¹

Тип цилиндра	N_e , кВт	g_e , г/(кВт·ч),	$Q_{кг}$, л/мин	N_m , кВт	t , ч
Серийный	11,82	296	12,7	5,8	21
Опытный	11,75	288	11,0	5,5	13

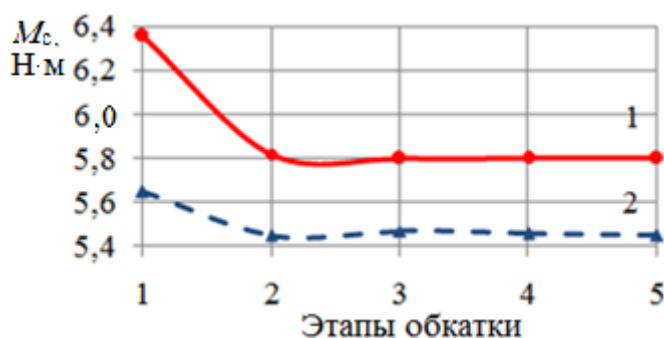


Рисунок 9 – Изменение механических потерь (момента сопротивления прокрутке M_c) дизеля с серийным 1 и опытным 2 цилиндрами от длительности (номера этапа) обкатки

Как следует из результатов, представленных в таблице 4 и на рисунке 9, применение предложенного в данной работе хонингования цилиндров в сборе позволило сократить время заводской приемочной обкатки дизелей с 21 до 13 моточасов при одновременном снижении расхода КГ с 12,7 до 11,0 л/мин (на 13%) и механических потерь с 5,8 до 5,5 кВт (на 5%).

Получение первого из указанных результатов (сокращение длительности обкатки) является прямым следствием снижения площади пластически деформируемых трущихся поверхностей цилиндра, вступающих в подвижный контакт с поршневыми кольцами. Второй результат – снижение расхода КГ – обусловлен улучшением прилегания компрессионных колец к поверхности цилиндра, имеющего минимальные отклонения от заданной геометрии. И, наконец, третий результат, связанный со снижением потерь на трение, объясняется проявлением известного эффекта одновременного подавления адгезионной и деформационной составляющих силы трения при достижении равновесной шероховатости поверхностей подвижно контактирующих деталей.

Поверхности цилиндра, обработанного в картридже, придают требуемые параметры, которые он воспроизводит при последующей сборке. Данное явление позволяет компенсировать монтажные деформации цилиндра.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Обзор состояния проблемы выявил актуальность разработки методов обеспечения стабильности геометрии внутреннего диаметра цилиндра малоразмерных дизелей с воздушным охлаждением и указал на целесообразность выбора в качестве наиболее эффективного подхода к решению этой проблемы учет и компенсацию монтажных деформаций на этапе финишной металлообработки трущейся поверхности цилиндра.

2. Исследование монтажных деформаций с помощью программ конечно-элементного анализа позволило спрогнозировать масштаб изменения исходной геометрии цилиндра на этапе сборки.

3. Проанализирован и успешно адаптирован к дизелю-прототипу прогрессивный способ повышения стабильности геометрии цилиндра путем хонингования цилиндров в сборе (с приложением монтажных усилий).

4. Разработана математическая модель работы дизеля, учитывающая изменение расхода КГ.

5. Сформулирована методика прогнозирования показателей ПДВС на основе оценки геометрии его цилиндра.

6. Установлены закономерности функционирования дизеля в процессе обкатки с учетом расхода КГ.

7. Предложенная реализация способа обеспечения стабильности геометрии цилиндра позволила сократить время заводской приемочной обкатки дизелей с 21 до 13 ч (на 38 %) при одновременном снижении расхода КГ с 12,7 до 11,0 л/мин (на 13%) и механических потерь с 5,8 до 5,5 кВт (на 5%).

Содержание диссертации отражено в 23-х публикациях, основными из которых являются:

Статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

1. Computational and Experimental Studies of Deformations of Air - Cooled Diesel Cylinders at Its Assembling I. E. Agureev, K. Yu. Platonov and R. N. Khmelev. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) Volume II, pp 261 – 271.

2. Using experience of the dynamic models of piston internal combustion engines I Agureev, M Elagin, R Khmelev, K Platonov and V Pyshnyi. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 786, International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019 (ISM - 2019) 12-13 September 2019 (Эл. сборник), Kazan, 2019.

3. I Agureev, R Khmelev, K Platonov. Analysis of the influence of installation deformations of the diesel cylinder on its operating indicators. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). pp 308-315.

Статьи в изданиях из перечня ВАК

4. Платонов К.Ю. Экспериментальные исследования влияния монтажных деформаций цилиндра дизеля на его эксплуатационные показатели/ И.Е. Агуреев, А.В. Груничев, К.Ю.Платонов А.А. Плешанов, Г.П. Рыбаков, Р.Н. Хмелев // Известия МГТУ «МАМИ».- 2020.- №1 (43). – С.2-7.

5. Платонов К.Ю. Математическое моделирование процесса функционирования одноцилиндрового дизеля с воздушным охлаждением с учетом расхода картерных газов/ Д.В. Павлов, К.Ю. Платонов, Р.Н. Хмелев// Известия МГТУ «МАМИ». –2020.- №3 (45). – С. 75-82.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020661037 Российская федерация, Динамическая модель быстроходного дизеля с воздушным охлаждением [Текст]/ Платонов К. Ю., Павлов Д. В., Хмелев Р.Н. 17.09.2020 г.

Подписано в печать 21.10.21. Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 004а.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95