

УДК 621.436.2

БЕЗМОТОРНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОЛОВОК ЦИЛИНДРОВ ДИЗЕЛЕЙ НА НАДЕЖНОСТЬ

¹Гоц А.Н., ¹Клевцов В.С., ²Прыгунов М.П.

¹ФБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: hotz@mail.ru, ehanic2221@rambler.ru;

²Владимирский автоцентр КАМАЗ, e-mail: kamaz33@inbox.ru

Статья посвящена обзору и анализу безмоторных стендов для ускоренных испытаний на надежность головок цилиндров дизелей. На стадии доводки поршневого двигателя вместо длительных и дорогостоящих эксплуатационных испытаний надежность отдельных узлов и деталей определяется при ускоренных испытаниях. Ускоренные испытания характеризуются коэффициентами ускорения. Проведен обзор и анализ конструкций созданных в России стендов для ускоренных испытаний на термодинамическую прочность головок цилиндров поршневых двигателей. В результате анализа выявлены достоинства и недостатки установок, которые влияют на достоверность результатов исследований. Предложена конструкция стенда, сочетающая наибольшее количество описанных достоинств и наименьшее количество недостатков, что приведет к высокой достоверности результатов исследования, но минимальным техническим и материальным затратам при создании установки.

Ключевые слова: ускоренные испытания, коэффициент ускорения, трещина, усталостное разрушение

NON-MOTOR STANDS FOR RELIABILITY RESEARCHING OF DIESEL CYLINDER HEADS

¹Gots A.N., ¹Klevtsov V.S., ²Prygunov M.P.

¹Federal Budget Educational Institution of Higher Education «Vladimir State University named after Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs», Vladimir, e-mail: hotz@mail.ru, ehan-ic2221@rambler.ru;

²Vladimir Autocentre KAMAZ, Vladimir, e-mail: kamaz33@inbox.ru

This article provides an overview and analysis of non-motorized stands for accelerated reliability testing of cylinder heads-diesels. At the stage of finishing of the piston engine instead of long and doro-gostoyaschih operational reliability tests of individual components and parts determined by us-the root test. Accelerated tests are characterized by the acceleration coefficients. A review and analysis of designs created in Russia stands for the accelerated tests termotsikliche-ical strength of the piston engine cylinder head. The analysis identified advantages and disadvantages settings that affect the accuracy of test results. A stand design that combines the greatest number of advantages described and the smallest quantity of limitations, leading to high reliability of research results, but the minimum technical and material costs while creating the installation.

Keywords: accelerated testing, acceleration factor, crack, fatigue failure

При разработке опытного образца поршневого двигателя большое внимание уделяется конструированию и расчету наиболее нагруженных деталей, в частности головки цилиндра (ГЦ), которая должна обладать малой массой, быть технологичной, иметь низкую стоимость, а самое главное – обеспечивать требуемые показатели долговечности и надежности. Это вызвано тем, что оценка надежности и принятие решения о ее достаточности могут быть осуществлены лишь по истечении весьма длительного времени эксплуатации двигателя, на который будет установлена ГЦ. В случае необходимости повышения надежности ГЦ требуется не только устранить причину отказа, но и снова провести цикл длительных испытаний [1]. Этот процесс называется доработкой и, как правило, бывает многоцикловым. Доработка часто продолжается несколько лет.

Для ускоренного определения надежности ГЦ необходимо интенсифицировать причины появления отказов, то есть провести ускоренные испытания посредством увеличения скорости или количества нагружений в единицу времени. И хотя режимы ускоренных испытаний принципиально отличаются от реальных режимов эксплуатации, при их выборе необходимо прежде всего обеспечить качественное подобие реальных и смоделированных процессов, определяющих возникновение отказов, а также отсутствие отказов, не встречающихся в эксплуатации.

Коэффициенты ускорения при таких испытаниях – величины статистические, зависящие от рассеяния показателей надежности испытуемого изделия. Точность их определения, как и точность прогнозов эксплуатационной долговечности и безотказности по результатам ускоренных

испытаний, зависит от объема имеющейся информации о надежности двигателей в эксплуатации и при испытаниях [1].

Таким образом, задачу определения надежности спроектированной ГЦ можно решить путем проведения ускоренных испытаний на безмоторном стенде (БС).

Цель – провести анализ разработанных в России стендов для ускоренных испытаний ГЦ дизелей.

Анализ стендов для ускоренных испытаний

По типу создаваемого напряженно-деформированного состояния в сечениях ГЦ БС можно разделить на температурные (нагружение происходит за счет создания температурных перепадов в плоскости и по глубине днища ГЦ), механические (нагружение происходит за счет изменения давления в объеме камеры сгорания) и комбинированные (сочетающие первые два способа). По типу источника теплоты БС можно разделить на электрические (в качестве нагревателя используются ТЭНы, галогенные лампы, индукторы, графитовые стержни и т.д.) и химические (нагрев осуществляется с помощью сжигания топлива).

Для определения ресурса, или времени наработки ГЦ, методом ускоренных испытаний наиболее предпочтительными являются комбинированные стенды, так как они позволяют создавать напряженно-деформированное состояние, переменное во времени, тем самым приводя условия воздействия на ГЦ близкие к реальным. Однако, по данным исследований [2], наибольшие напряжения в ГЦ создает именно температурное нагружение, а не механическое. Так, для ГЦ двигателя 4ЧН 10,5/12 (Д-145Т) на

номинальном режиме интенсивность напряжений в межклапанной перемычке от воздействия монтажной и температурной нагрузок составила 108 МПа [2], в то время как от монтажной нагрузки и имитации давления газов составила 31,1 МПа (рис. 1).

То есть, интенсивность напряжений от температурного нагружения оказывается почти в 3,5 раза выше, чем от механического. К тому же сочетание этих двух типов нагружения приводит к высокой трудоемкости разработки, сборки и обслуживания стендов данной категории.

Таким образом, создавая установку для ускоренных испытаний ГЦ можно исключить систему, имитирующую давление рабочего тела на ГЦ, при сохранении достоверности результатов прогнозируемой надежности.

Для исследования термоусталостной прочности ГЦ был разработан БС [3], принцип работы которого заключается в нагреве днища исследуемой ГЦ с помощью графитовых пластин, через которые проходит электрический ток. Стенд позволяет проводить испытания с ускорением по наработке. Недостатком данной установки является использование в качестве испытуемого образца только днища ГЦ (верхняя часть головки срезается). Но, как известно, ГЦ представляет из себя сложную пространственную деталь, в которой поперечное сечение постоянно изменяется и при нагреве тепловое состояние днища целой ГЦ будет отличаться от состояния только днища ГЦ из-за различий теплопередачи в окружающую среду. Также нагрев днища осуществляется только через клапанную перемычку, в то время как на реальном двигателе нагрев происходит по всему днищу или по проекции камеры

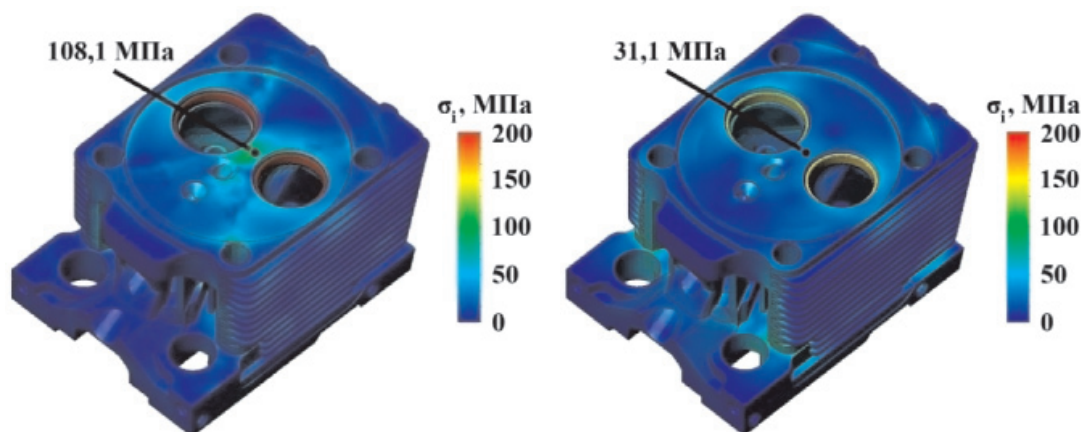


Рис. 1. Распределение интенсивности напряжений при действии монтажной нагрузки и температур (слева) и при действии монтажной нагрузки и сил давления газов (справа)

сгорания в поршне на днище ГЦ. По этим причинам происходит трудность с достижением идентичных разрушений.

В ЦНИИ МПС [5] был разработан и построен тепловой БС, в котором используется радиационно-конвективный тип нагревателя. В отличие от предыдущего стенда в этой установке производится нагрев всей ГЦ, а не только днища. Нагревательное устройство БС ЦНИИ МПС состоит из корпуса, охлаждаемого водой, двух панелей из асбоцементных плит, предназначенных для установки токопроводящих пружин патронов, и ламп марки КГ220-2000-4. Корпус нагревателя изготовлен из алюминиевого сплава марки АМг, имеющего отражательные свойства, близкие к серебру, и отполирован. В нем установлены лампы общей мощностью 42 кВт, расположенные в два ряда (первый ряд 11 ламп, второй 10 ламп) и ориентированные параллельно друг другу, что значительно упростило конструкцию нагревательного устройства и уменьшило его размеры. Нагревательное устройство имеет возможность передвигаться в горизонтальной плоскости по направляющим (для осмотра и протирки ламп) и в рабочем состоянии прижимается к торцу рубашки водяного охлаждения при помощи четырех винтов-фиксаторов. Для контроля за тепловым состоянием корпуса нагревателя в нем установлены 12 термопар. Нагревательное устройство и испытываемая деталь устанавливаются на подставку, образованную четырьмя стойками, жестко соединенными между собой. БС имеет водяную систему охлаждения корпуса нагревателя и ГЦ. Испытания

на данном стенде проходят с ускорением по времени и наработке.

В НИКТИДе был создан БС [4], источником термоциклического нагружения которого является высокочастотная установка типа И32-100/8, имеющая кольцевой индуктор, который с помощью ТВЧ нагревает днище ГЦ. Температура нагрева поддерживается с помощью системы автоматического регулирования путем включения-отключения высокочастотной установки. Охлаждение головки осуществляется водой и воздухом, пропускаемыми соответственно по водяным и воздушным каналам ГЦ.

Исследование ГЦ проводится в два этапа. Первый – экспериментальное исследование теплонапряженного состояния ГЦ на двигателе в реальных условиях, которое проводится для определения граничных условий нагружения. Это позволяет достигнуть соответствия между реальным и лабораторным нагружениями. Второй – проведение термоциклических испытаний ГЦ на безмоторном стенде.

При испытаниях на термоциклическую прочность определяется зависимость числа циклов до возникновения трещин малоциклового усталости от максимальной температуры цикла и амплитуды температур в цикле.

Исходный термоцикл (рис. 2, график (б)) [4] определяется по условиям испытаний головок цилиндров на дизеле в режиме максимальной мощности. В первом приближении этот цикл характеризуется максимальной температурой, равной 250°C, минимальной температурой равной 100°C, амплитудой 150°C.

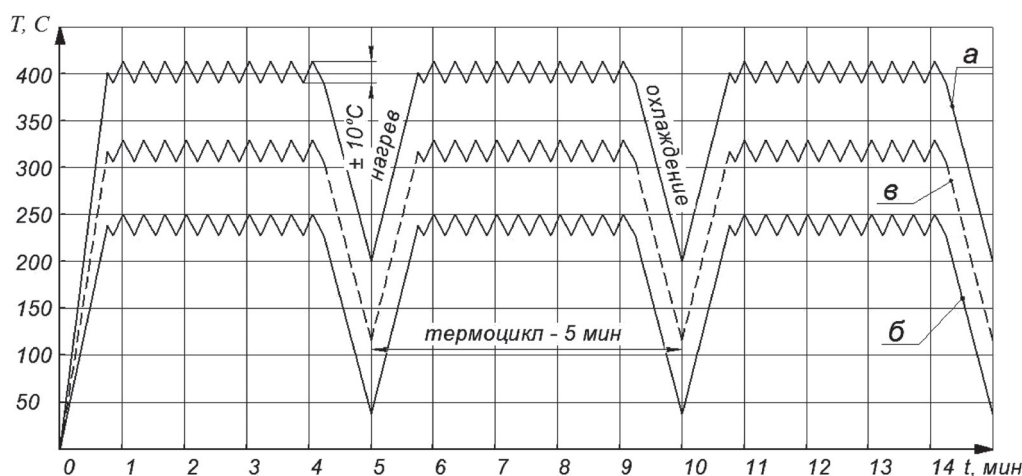


Рис. 2. Диаграмма термоциклического нагружения головки цилиндра:
а – предельный цикл нагружения; б – базовый цикл нагружения;
в – промежуточный цикл нагружения

Предельный термоцикл (рис. 2, график (а)) [4] имеет максимальную температуру $400 \pm 10^\circ\text{C}$, а минимальную $200 \pm 10^\circ\text{C}$ при той же длительности периода поддержания максимальной температуры (принята равной 3 мин) и периода «охлаждения-нагрева» (принята равной 1 мин).

Минимальная температура 100°C определяется по предельной температуре охлаждающей жидкости в дизеле. К этой температуре может приблизиться температура днища головки цилиндров на режиме максимальных оборотов холостого хода двигателя. Максимальная температура 400°C определяется как предельная температура, при которой чугун еще сохраняет свои механические свойства. В данном случае все температуры приводятся для чугуновых ГЦ.

Промежуточный цикл (рис. 2, график (в)) [4] уточняется в ходе испытаний и является наиболее приближенным к циклу реального разрушения.

По результатам испытаний на двух уровнях напряжений, соответствующих предельному и промежуточному термоциклам, строится кривая малоциклового термической усталости днища ГЦ и определяется реальный цикл разрушения.

Испытания проводятся до образования трещин размером 5...10% от толщины днища ГЦ, определяемых визуально или с помощью оптических средств. Испытания на данном стенде проходят с ускорением по времени и наработке.

Во Владимирском государственном университете был создан стенд [6] для анализа теплового напряженно-деформированного состояния (ТНДС).

Стенд позволяет создавать произвольный по продолжительности режим термоциклического нагружения ГЦ. При этом исследуемая ГЦ подвергается неизотермическому термоциклическому нагружению. Нагрев ГЦ со стороны огневого днища осуществляется тепловым потоком, создаваемым галогенными лампами, а охлаждение осуществляется с помощью обдува воздухом. Трехмерная модель БС приведена на рис. 3. Стенд устроен следующим образом: на жестком основании 1 с помощью четырех шпилек смонтирована нижняя плита 2, корпус 3 с ложементом для галогенных ламп 4, а также верхняя плита 5. Плита 2, корпус 3 и плита 5 во время работы охлаждаются проточной водой. Галогенные лампы 4 КГ230-2000-5 общей мощностью 30 кВт уложены продольно в два ряда, причем в верхнем ряду расположено девять ламп, а в нижнем шесть. В плите 5 сделано отверстие, через которое тепло, излучаемое лампами, поступает на исследуемую деталь. При этом для использования отраженного света отверстие выполнено коническим. Верхняя крышка плиты 2 выполнена из алюминиевого сплава и отполирована для лучшего отражения потока излучаемого лампами. На плите 5 установлено проставочное кольцо 6, опорный бурт которого по форме полностью повторяет бурт гильзы цилиндра двигателя. Для создания градиента между центральной и периферийной зоной головки цилиндра внутри кольца 6 проложена медная трубка 7, которая охлаждается проточной водой. Исследуемая головка цилиндра 8 установлена на плите 5 с помощью четырех шпилек, момент затяжки гаек которых равен $110 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Место контакта трубки 7 и днища головки 8 покрывалось теплопроводной пастой КПТ-8. Стенд обладает следующими недостатками:

• из-за наличия галогенных ламп испытание ГЦ с жидкостным охлаждением становится невозможным, так как в случае возникновения трещины, соединяющей днище ГЦ и полости охлаждения, – все лампы будут уничтожены;

• возникает перегрев верхних ламп нижними, а также боковыми, что приводит к их вздутию и выходу из строя, следовательно, испытания с длительной выдержкой по температуре будут недоступны;

• лампы имеют большую длину, чем диаметр днища ГЦ, что снижает КПД установки;

• требуется постоянный осмотр, очистка от нагара и пыли и замена ламп.

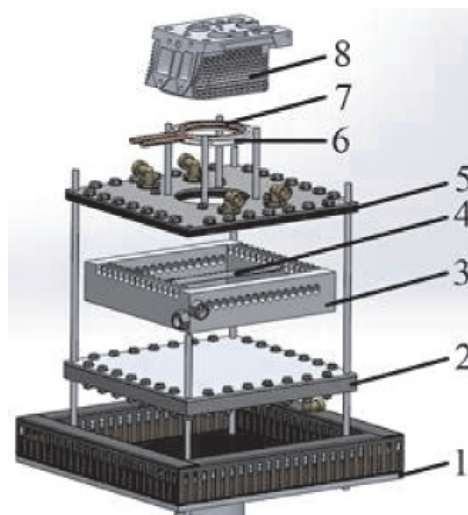


Рис. 3. Трехмерная модель безмоторного теплового стенда:

1 – жесткое основание; 2 – нижняя плита;
3 – корпус; 4 – галогенные лампы;
5 – верхняя плита; 6 – промежуточное кольцо;
7 – медная трубка; 8 – головка цилиндра

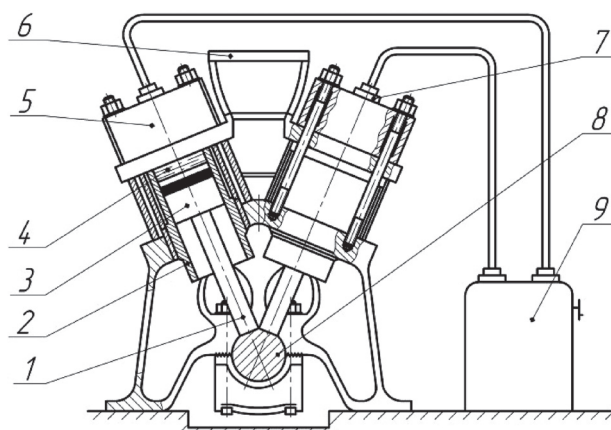


Рис. 4. Схема БС для определения монтажных напряжений и напряжений от сил давления газа:
1 – шатун; 2 – гильза цилиндра; 3 – поршень; 4 – масло; 5 – ГЦ; 6 – блок цилиндров;
7 – форсунка; 8 – коленчатый вал; 9 – насосная установка

Испытания проходят до появления трещин размером 0,2 мм и более, определяемых невооруженным глазом или с помощью микроскопа. Ускорение испытаний производится по времени и наработке.

Для определения монтажных напряжений и напряжений от механической нагрузки давления газов был разработан стенд [7] (рис. 4), имитирующий давление газов на днище ГЦ с помощью давления масла от насоса высокого давления.

Стенд состоит из блока цилиндров 6, в котором располагаются, шатун 1, гильза 2, поршень 3, коленчатый вал 8. Снаружи к блоку с помощью шпилек притягивается ГЦ 5. С помощью этих же шпилек создается монтажная нагрузка. Имитация давления газов достигается путем создания насосом

высокого давления 9 масла 4 в камере сгорания. Для герметизации КС со стороны поршня 3 используются резиновые кольца в двух первых канавках, а со стороны клапанов герметизация достигалась применением клея на посадочных фасках седел клапанов. Недостатком этого стенда является отсутствие термоциклической составляющей нагружения. И это может привести к тому, что стендовое разрушение будет отличаться от эксплуатационного. Ускорение испытаний в данном случае происходит по наработке.

На Владимирском тракторном заводе [8] был создан комбинированный БС для исследования ГЦ и цилиндров воздушного охлаждения, конструкция которого представлена на рис. 5.

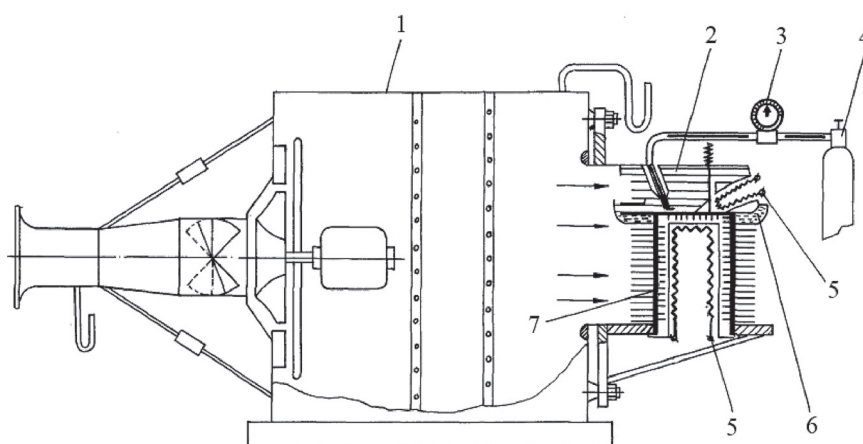


Рис. 5. Схема БС для исследования ГЦ и цилиндров:
1 – аэродинамическая камера; 2 – ГЦ; 3 – манометр; 4 – баллон со сжатым воздухом;
5 – нагревательный элемент; 6 – масляная ванна; 7 – цилиндр

Стенд имеет системы, регулирующие интенсивность охлаждения ГЦ 2 и цилиндра 7 за счет изменения расхода воздуха и масла. В качестве источников теплоты использовались электронагреватели 5, установленные внутри цилиндра 7, а также в выпускном канале ГЦ 2. Имитация давления газа внутри цилиндра 7 достигалась подачей воздуха из баллона со сжатым воздухом через форсуночное отверстие. Данный БС позволяет с высокой точностью имитировать стационарные тепловые и механические нагрузки. Однако вследствие большой тепловой инерционности электронагревателей 5 моделирование переходных процессов на данной установке не представляется возможным. Ускорение испытаний на данной установке происходит по времени и наработке.

Выводы

Проведенный анализ разработанных стендов для ускоренных испытаний ГЦ показывает, что они обладают существенными недостатками. Наиболее приемлемым был бы стенд, который:

- производил нагрев ГЦ сгорающим сжиженным газом, т.к. он недорогой, обладает низким содержанием сажи при сгорании и его продукты сгорания будут подобны газам в цилиндре двигателя, что позволит получить сходство с реальными условиями работы ГЦ и получить высокую достоверность результатов;
- не имел систему имитации давления газов, что немного снизит достоверность результатов, но ощутимо увеличит простоту изготовления и обслуживания;
- обладал автоматической системой управления для смены циклов нагрева и охлаждения – среднее увеличение трудоемкости изготовления взамен простоты эксплуатации и однообразия картины нагружения;
- обеспечивал создание монтажной нагрузки на ГЦ, так как без этого условия проводить термическое нагружение вообще не имеет смысла.

Также объектом исследования должна служить полноразмерная ГЦ, а не только днище, потому, что характер теплопередачи целой ГЦ и днища сильно различаются. В добавок к вышесказанному, для соблюдения подобия работы, необходимо подводить теплоту не только к днищу ГЦ, но и к выпускному каналу.

Список литературы

1. Гоц А.Н. Машиностроение. Энциклопедия. Двигатели внутреннего сгорания. Т. IV-14 / под общ. ред. А.А. Александрова, Н.А. Иващенко. – М.: Машиностроение. 2013. – С. 657–661.
2. Гоц А.Н., Иванченко А.Б., Прыгунов М.П., Французов И.В. Моделирование теплонпряженного состояния головки цилиндра тракторного дизеля воздушного охлаждения // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6–5. – С. 1061–1067.
3. Захаров А.А. Повышение долговечности головок блока цилиндров дизелей при восстановлении путем применения деконцентраторов напряжений: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 – Саратов, 2005. – 207 с.
4. Методика ускоренных испытания на термодинамическую прочность головок цилиндров тракторных и комбайновых двигателей / НИКИД / РД 23.3 84-88. – Владимир, 1988. – 50 с.
5. Насыров Р.А., Иващенко Н.А., Тимохин А.В. Статические тепловые стенды для исследования поршней и цилиндров крышек дизелей // ДВС: Реф. сб. НИИинформтязмаш. – 1978. – С. 14–17.
6. Стенд для исследования теплонпряженного состояния головки цилиндров двигателя внутреннего сгорания / Гоц А.Н., Прыгунов М.П., Французов И.В., Клевцов В.С., Сысоев С.Н. / Патент России № 142963. 2014. Бюл. № 19.
7. Сальников М.А. Оценка долговечности крышек цилиндров тепловозных дизелей в зависимости от уровня теплонпряженности: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02: 01.02.06 – Коломна, 1984. – 212 с.
8. Эфрос В.В. Развитие научных основ конструирования тракторных дизелей с воздушным охлаждением: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02 – Владимир, 1977. – 475 с.

References

1. Gots A.N. Mashinostroyeniye. Jenciklopediya. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. T. IV-14 // Pod obshh. red. A.A. Aleksandrova, N.A. Ivashhenko. M.: Mashinostroyeniye. 2013. pp. 657–661.
2. Gots A.N., Ivanchenko A.B., Prygunov M.P., Francuzov I.V. Modelirovaniye teponaprazhennogo sostoyaniya golovki cilindra traktornogo dizelja vozdušnogo ohlazhdeniya // Fundamentalnye issledovaniya. 2013. no. 6–5. pp. 1061–1067.
3. Zaharov A.A. Povysheniye dolgovechnosti golovok bloka cilindrov dizelej pri vosstanovlenii putem primeneniya dekoncentratorov naprazhenij: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.20.03 Saratov, 2005. 207 p.
4. Metodika uskorennyh ispytaniya na termociklicheskuju prochnost golovok cilindrov traktornyh i kombajnovykh dvigatelej / NIKTID / RD 23.3 84-88 Vladimir, 1988.
5. Nasyrov R.A., Ivashhenko N.A., Timohin A.V. Staticheskie teplovyje stendy dlja issledovaniya porshnej i cilindrov kryshek dizelej // DVS: Ref. sb. NIInformtjzhmash. 1978. pp. 14–17.
6. Stend dlja issledovaniya teponaprazhennogo sostoyaniya golovki cilindrov dvigatelja vnutrennego sgoraniya / Goc A.N., Prygunov M.P., Francuzov I.V., Klevcov V.S., Sysoev S.N. / Patent Rossii no. 142963. 2014. Bjul. no. 19.
7. Salnikov M.A. Ocenka dolgovechnosti kryshek cilindrov teplovoznnykh dizelej v zavisimosti ot urovnja teponaprazhennosti: Dis...kand. tehn. nauk: 05.04.02: 01.02.06 Kolomna, 1984. 212 p.
8. Jeffros V.V. Razvitie nauchnyh osnov konstruirovaniya traktornykh dizelej s vozdushnym ohlazhdeniem: Dis. ... dok. tehn. nauk: 05.04.02 Vladimir, 1977. 475 p.