

УДК 621.436:621.4.001.57

Анализ методов повышения термостойкости поршней тракторных дизелей
Analysis of methods for improvement of thermal stability of pistons of tractor diesel engines**А. Н. ГОЦ, д-р техн. наук**
С. А. ГЛИНКИН, канд. техн. наук**Владимирский государственный университет**
имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
Владимир, Россия, hotz@mail.ru**A. N. GOTS, DSc in Engineering**
S. A. GLINKIN, PhD in Engineering**Aleksandr and Nikolay Stoletov**
Vladimir State University,
Vladimir, Russia,
hotz@mail.ru

Рассмотрены применяемые методы повышения термической прочности поршней двигателей внутреннего сгорания. Для тракторных дизелей с камерой сгорания в поршне характерны наибольшие скорости изменения температуры при набросе и сбросе нагрузки, а также наибольшие значения температурных градиентов. Наибольшие тепловые нагрузки возникают у поршней с полукрытой камерой сгорания. Периодические тепловые нагрузки с высоким значением температурного градиента приводят к термоусталостным разрушениям. Такие разрушения могут начинаться с появления трещин на кромке камеры сгорания. Наличие даже небольшой трещины на кромке камеры сгорания приводит к ее дальнейшему росту, что может стать причиной разрушения поршня. К основным причинам образования трещин на кромке камеры сгорания относятся: переменные напряжения, вызванные воздействием переменного давления газов в цилиндре в течение рабочего цикла; низкочастотные колебания температуры поршня, связанные со сменой режимов работы двигателя; высокочастотные циклические термические колебания, обусловленные изменением температуры материала в поверхностном слое камеры сгорания в течение каждого рабочего цикла. Наиболее распространенные конструкционные и технологические решения, направленные на повышение термической прочности поршней: изменение радиуса закругления кромки горловины камеры сгорания; армирование кромки камеры сгорания более термостойкими материалами; использование материалов для изготовления поршней с повышенной термостойкостью; искусственная теплоизоляция поршня или его охлаждение маслом. К недостаткам использования галерейного масляного охлаждения можно отнести ускорение процессов старения масла. Альтернативное решение — ограничение подвода тепла к стенкам камеры сгорания с помощью теплозащитных покрытий, наносимых на днище газоплазменным, детонационным или электродуговым способом. Наиболее простой способ повышения термической прочности поршня дизеля при полукрытой камере сгорания — конструкционные изменения.

Ключевые слова: термочувствительность; градиент температур; защитные покрытия; алюминиевые сплавы.

The article considers the applied methods for improving the thermal strength of pistons of internal combustion engines. Tractor diesels with combustion chamber in the piston have the greatest rate of temperature change at load rise and release, as well as the highest values of temperature gradients. The highest thermal loads occur in pistons with a semi-open combustion chamber. Periodic thermal loads with high value of temperature gradient lead to thermal fatigue fractures. Such fractures may begin with the appearance of cracks on the edge of combustion chamber. The presence even of a small crack on the edge of combustion chamber leads to its further growth, which can cause the destruction of piston. The main causes of cracks formation on the edge of combustion chamber are the alternating stresses induced from alternating gas pressure in cylinder during the working cycle; the low-frequency oscillations of the piston temperature arising from the changing of operation modes of engine; the high-frequency cyclical thermal oscillations caused by the temperature change of material in the surface layer of combustion chamber for each working cycle. The most common design and technology solutions improving the thermal strength of pistons are the following ones: the change of the edge radius of combustion chamber throat; the reinforcement of combustion chamber edge with more heat-resistant materials; the use of materials with high thermal stability for manufacture of pistons; the artificial heat insulation of piston or its cooling by oil. The disadvantage of use of cooling oil gallery is the acceleration of oil aging process. The alternative solution is to limit the heat supply to the walls of combustion chamber by means of heat protection coating applied by gas-flame, detonation or electric-arc way. The easiest way to improve the thermal strength of diesel piston with a semi-open combustion chamber is the design change.

Keywords: thermal strength; gradient of temperatures; protection coatings; aluminium alloys.

Введение

Рассмотрим применяемые в настоящее время методы повышения термической прочности поршней с целью увеличения их долговечности при работе двигателя на неустановившихся режимах.

Как известно, для тракторных дизелей с камерой сгорания (КС) в поршне характерны наибольшие скорости изменения температуры при набросе и сбросе нагрузки (в пределах $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$), а также наибольшие значения температурных градиентов ($3\text{--}7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$). Наибольшие тепловые нагрузки возникают у поршней с полукрытой КС (типа ЦНИДИ).

Периодические тепловые нагрузки с высоким значением температурного градиента приводят к термоусталостным разрушениям. Такие разрушения могут начинаться с появления трещин на кромке КС. Наличие даже небольшой трещины на кромке КС приводит к ее дальнейшему росту, что может стать причиной разрушения поршня. Например, во время ресурсных испытаний на Владимирском тракторном заводе двигателя МД-5 возник ряд отказов, один из которых — разрушение поршня по трещине, произошедшее после наработки 840 ч. Как показывает опыт эксплуатации дизелей, часть отказов поршней с полукрытой КС связана именно с возникновением трещин на кромке.

К основным причинам образования трещин на кромке КС относятся:

— переменные напряжения, вызываемые воздействием переменного давления газов в цилиндре в течение рабочего цикла;

— низкочастотные колебания температуры поршня, связанные со сменой режимов работы двигателя;

— высокочастотные циклические термические колебания, обусловленные изменением температуры материала в поверхностном слое КС в течение каждого рабочего цикла.

Для снижения температуры головки поршня и его теплового состояния в целом используют термическую защиту, продлевающую срок службы поршней.

Цель исследования

Цель исследования — провести анализ применяемых методов защиты поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) от разрушения в результате действия переменных тепловых нагрузок.

Материалы и методы

Под термином "термическая защита" следует понимать комплекс мер, которые независимо от температурных перепадов за период рабочего цикла приводят к снижению уровня температуры или градиентов температуры на поверхности поршня. Несмотря на то, что Г. Вошни экспериментально доказал несостоятельность идеи адиабатного двигателя (т.е. ДВС без системы охлаждения и отвода теплоты в атмосфере-

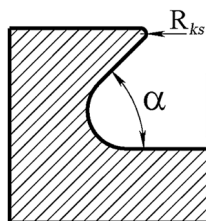


Рис. 1. Условная схема с геометрическими параметрами кромки поршня

ру), исследования в этом направлении внесли существенный вклад в изучение влияния теплоизоляции КС на рабочий процесс и экологические показатели поршневого двигателя [1].

Отметим, что для кромки КС поршня, изготовленного из алюминиевого сплава, допускаемые максимальные температуры $t_{\text{пр}} = 300\text{--}375\text{ }^{\circ}\text{C}$, а перепад температур $\Delta t = 90\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]. Если при работе двигателя хотя бы одно из этих значений температур превышает, то наблюдаются такие характерные виды отказов, как оплавление кромки КС, прогорание днища поршня, залегание колец. Кроме того, на кромках КС появляются трещины.

Как известно, на стадии технического проекта проводят разработку конструктивных решений двигателя и его основных частей, обеспечивающих показатели надежности, установленные в техническом задании и предшествующих стадиях разработки. С этой же целью анализируют предлагаемые технологические мероприятия. Наиболее распространенные конструктивные и технологические решения, направленные на повышение термической прочности поршней:

— изменение радиуса R_{ks} закругления кромки горловины КС (рис. 1);

— армирование кромки КС более термостойкими материалами (например керамикой);

— использование материалов с повышенной термостойкостью;

— мероприятия по снижению подвода теплоты или искусственная теплоизоляция (с помощью защитных покрытий) и увеличение отвода теплоты (использование галерейного масляного охлаждения поршней или днища поршня).

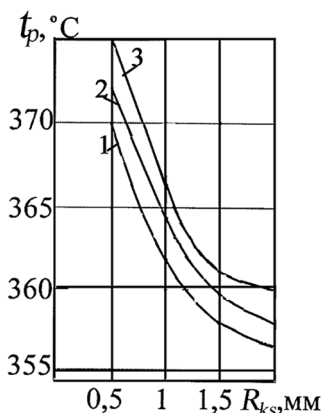


Рис. 2. Влияние радиуса скругления кромки КС на тепловое состояние кромки:

1 — $R_{ks} = 1,5$ мм; 2 — $R_{ks} = 1$ мм; 3 — $R_{ks} = 0,5$ мм

По данным исследований Д. В. Рожанского и Г. М. Кухаренка [3], изменение угла α наклона боковой стенки КС и радиуса R_{ks} закругления кромки КС (см. рис. 1) позволяет снизить тепловое состояние (перепад температур ΔT) в этой области, а также существенно уменьшить склонность материала к образованию трещин (рис. 2).

По результатам экспериментальных исследований, образование трещин в поршнях с $R_{ks} = 1$ мм происходит в течение 1000–1200 ч, а в поршнях с $R_{ks} = 1,5$ мм — через 4500–5000 ч. Изменение угла α наклона боковой поверхности позволяет замедлить образование трещин и уменьшить скорость их распространения. Слишком большой угол α приводит к ухудшению экономических показателей двигателя [4], так как при этом нарушается тороидальное течение потока.

По данным Д. Р. Пospelова и Е. П. Ершова [5], использование армирующей вставки из термостойких материалов (чугун, сталь) не всегда позволяет увеличить долговечность поршня, так как вставка по сравнению с основным материалом (алюминий) подвержена более высокому перегреву вследствие низкого коэффициента теплопроводности. Изменение характерных температур алюминиевого и составного поршней показано на рис. 3.

При умеренном форсировании обычно нет необходимости применять специальные методы охлаждения поршней. При увеличении уров-

ня форсирования до поршневой мощности $N_{II} \geq (22...30) \cdot 10^2$ кВт/м² или при уровне теплонапряженности поршневой группы по критерию Костина $q_{II} \geq 7$, как правило, используют принудительное охлаждение поршней маслом, которое через специальные форсунки подается струей на внутреннюю поверхность днища поршня или в кольцевую полость (галерею) в головке поршня [3].

В масляную галерею масло подводится через вертикальный канал конического сечения, в который входит неподвижная форсунка при подходе поршня к нижней мертвой точке. Масло сливается из галереи через аналогичный канал на диаметрально противоположной стороне поршня. В случае применения первого варианта принудительного охлаждения поршней температура

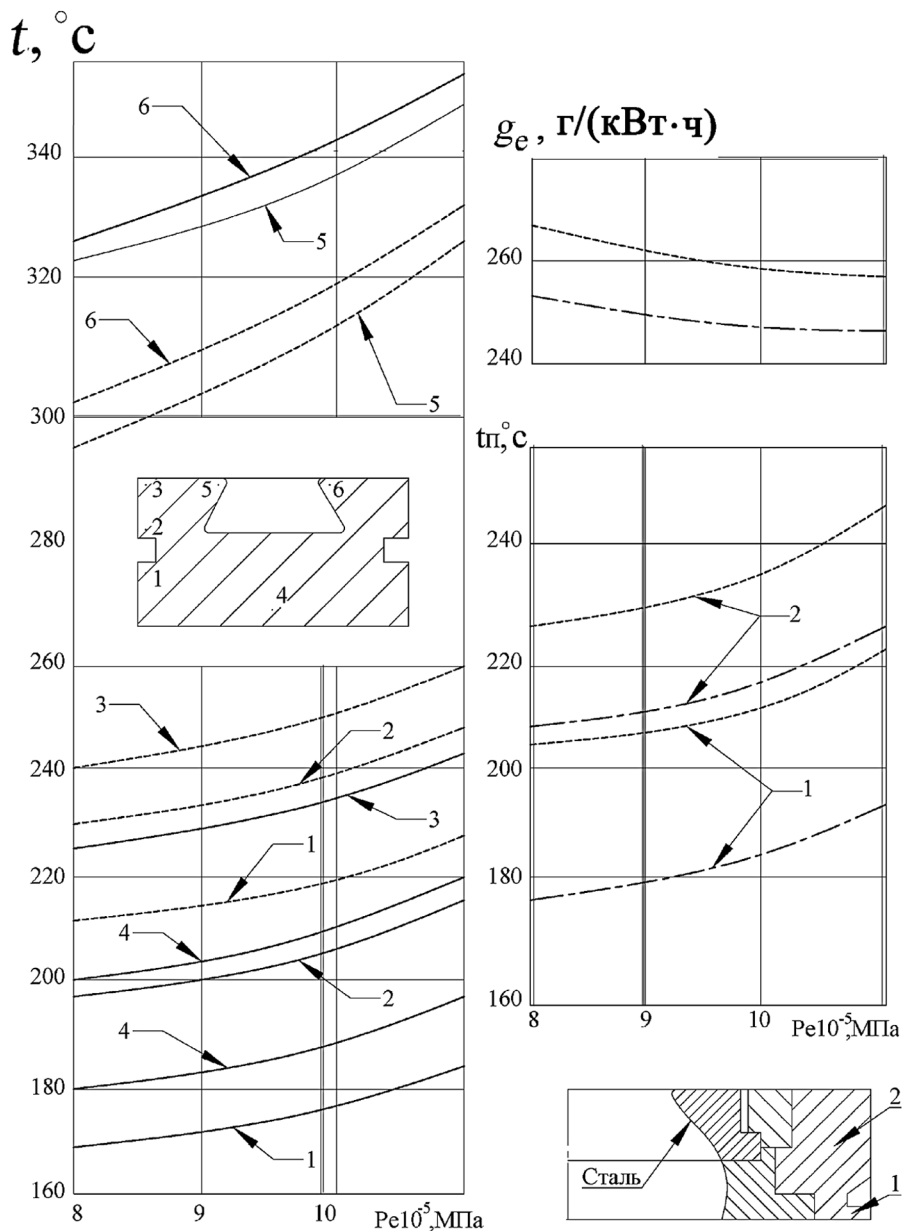


Рис. 3. Изменение характерных температур поршня:

a — в зависимости от среднего эффективного давления при $n = 1800$ мин⁻¹:
 ---- — алюминиевый поршень; — — составной поршень (КС во вставке из алюминия);
 b — в зоне верхнего компрессионного кольца, а также изменение удельного расхода топлива в зависимости от среднего эффективного давления при $n = 1700$ мин⁻¹:
 ---- — алюминиевый поршень; — — составной поршень (КС во вставке из стали)

днища поршня может быть снижена на 25–30 °С в зависимости от уровня форсирования. Применение галерейного масляного охлаждения позволяет снизить температуру наиболее нагретых точек поршня на 60–80 °С.

Расход масла на охлаждение одного поршня составляет не менее 2 л/мин, что требует увеличения эффективности теплоотвода от масляных радиаторов на 6–8 %. Галерейное масляное охлаждение снижает абсолютное значение температуры в характерных точках поршня, однако перепад температур по направлению к кромке КС остается большим (для кромки КС $\Delta t = 50$ °С при масляном охлаждении и $\Delta t = 39$ °С, когда масло отсутствует). В связи с этим напряжения и деформации поршня остаются большими.

Наиболее распространенный метод снижения температуры поршня — применение галерейного масляного охлаждения. Согласно исследованиям [6, 7], с введением охлаждающей полости, которая должна иметь определенную форму и ориентацию по отношению к поверхности КС, температурное поле поршня характеризуется уменьшением плотности теплового потока. При этом расстояние от поверхности масляной полости до поверхности поршня должно быть равномерным, так как это позволяет улучшить теплообмен между огневой поверхностью КС и маслом в полости, что снижает вероятность появления трещин в кромке КС поршня.

С помощью такого способа удастся снизить температуру в области кромки горловины КС на ~23 °С, верхнего компрессионного кольца на ~34 °С, сечения торцевой кромки днища на ~40 °С, днища КС на ~27 °С. Анализ температурных полей в поршне показывает, что галерейное масляное охлаждение обеспечивает снижение максимальных температур на кромке КС и в зоне первого компрессионного кольца до рекомендуемых значений.

В то же время отсутствие масла в галерее приводит к превышению допустимых пределов температур. Это объясняет отказы дизеля при незначительной наработке из-за оплавления кромки КС. Отказ может произойти при понижении давления

масла в смазочной системе или из-за неправильно установленной форсунки: струя масла только частично попадает в вертикальный канал, не заполняя полностью галерею.

Результаты и их обсуждение

Введение охлаждаемых полостей ослабляет сечение поршня в районе его головки в зависимости от формы поперечного сечения полости охлаждения. Помимо снижения температур поршня, достигаемого при введении полостей охлаждения, применение галерейного охлаждения влечет за собой увеличение температурных напряжений, которые существенно зависят от формы КС. К недостаткам использования галерейного масляного охлаждения можно отнести ускорение процессов старения масла.

Альтернативное решение — ограничение подвода тепла к стенкам КС. Ограничение подвода тепла к поршню с помощью теплозащитных покрытий, наносимых на днище газоплазменным, детонационным или электродуговым способом, — одно из направлений повышения термостойкости поршней [8].

Теплоизолирующие материалы должны обладать малой теплопроводностью, хорошей жаростойкостью и сцеплением с материалом детали, способностью выдерживать механические и тепловые удары. К таким материалам относят двуокись циркония, окись алюминия, окись магния.

На кафедре ДВС Ленинградского политехнического института с помощью технологии ЦНИДИ и при использовании плазменной установки УМП4-64 исследована эффективность теплопроводных покрытий. При толщине теплоизоляционного покрытия 0,5 мм обеспечивалось по-

нижение максимальной температуры на 10 %, а температурного перепада в осевом направлении — на 18 %. Проблема этого метода заключается в обеспечении прочного сцепления теплоизолирующего материала с основным материалом.

Кроме того, увеличение температуры стенок КС при их теплоизоляции способствует выгоранию сажи и окислению СО, что приводит к увеличению выхода окислов азота [9]. Для дизелей в качестве тепловоспринимающей поверхности и естественной теплоизоляции характерно образование нагара. Нагар по сравнению с металлами имеет очень низкий коэффициент теплопроводности. Например, слой нагара в 1 мм по теплофизическим свойствам равен приблизительно 400 мм стали [1].

Еще один способ повышения термостойкости поршней — применение новых материалов. К наиболее распространенным материалам поршней ДВС относятся сплавы системы Al—Si—Cu—Ni, такие как АК4, АК4-1, АЛ25, АЛ30, АК21М2 и др. [2, 10].

В настоящее время качество литых алюминиевых поршней заметно ухудшилось, что подтверждают проведенные исследования [11]. Основные выявленные дефекты: несоблюдение химического состава поршневых сплавов; высокая ликвация легирующих элементов в отливках поршней; некачественная модификация и дегазация поршневых сплавов.

Прочностные свойства алюминиевых сплавов могут быть повышены с помощью циклической обработки температурой [2, 10, 11]. Такая обработка представляет собой закалку, в которой выдержка при высокой температуре заменена циклическими нагревами и охлаждениями

Результаты испытаний поршней на термостойкость

Номер испытаний	Поршни из алюминиевого сплава с содержанием кремния 16–18 %	Количество термоциклов до появления трещин	Примечание
1	Штампованный	1020	Механическая и термическая обработка выполнены по одинаковой технологии
2	Литой	655	
3	Штампованный	1302	
4	Штампованный с галерейным охлаждением	4053	
5	Литой	621	

в определенном интервале температур. Таким образом, можно достичь значительного увеличения количества циклов до появления трещин [10, 11].

Технология изготовления во многом определяет физико-механические свойства материалов, поэтому при подборе материалов поршней для соответствующих условий работы необходимо учитывать способ изготовления.

Проведенные в Университете машиностроения (МАМИ) ускоренные испытания поршней на термостойкость на автоматизированной установке, состоящей из поршня, индуктора и элементов системы охлаждения, еще раз подтверждают преимущества поршней, изготовленных с помощью изотермической штамповки. При нагреве до 350 °С и охлаждении до 20 °С трещины на литых образцах возникают через меньшее количество термостойких циклов (см. таблицу) [10].

Для изготовления поршневой группы перспективно применение углепластиков — композиционных материалов с полимерной матрицей и наполнителем из углеродного волокна. По удельной жесткости они в 3,5 раза превосходят стеклопластики. Наиболее важное достоинство углепластиков как конструкционного материала — высокий предел выносливости. После 10⁷ циклов знакопеременных нагрузок углепластик сохраняет 80 % исходной прочности против 30 % для стеклопластика, 52 и 55 % соответственно для титановых и алюминиевых сплавов. Конструкционное применение углепластиков вместо алюминиевых сплавов обеспечивает в среднем снижение массы на 25—30 % и повышение ресурса работы деталей в 1,5—3 раза при значительном сокращении трудоемкости изготовления [11].

Исследования термостойкости поршней путем определения числа циклов термоциклического нагружения (от 350 до 20 °С) до появления сквозной трещины в днище показали, что по термостойкости штампованные поршни в 3 раза превосходят литые. Введение в матрицу поршневого алюминиевого сплава дискретного волокнистого наполнителя

позволяет повысить термостойкость поршней в 4—5 раз [4].

При серийном производстве поршней тракторных дизелей с КС типа ЦНИДИ часто используется поршневой сплав АЛ25, полученный с помощью литья в землю, поскольку это один из самых доступных и простых по технологии способов изготовления.

Выводы

Обзор методов повышения термической прочности поршней дизелей с КС в поршне показал, что наиболее простой способ — конструкционное изменение угла наклона боковой стенки КС и радиуса закругления кромки, которое обеспечивает также повышение экономических показателей дизеля. Кроме того, одно из наиболее эффективных мероприятий — использование новых материалов.

Литература и источники

1. **Олссон Г., Пиани Д.** Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с.
2. **Дзыбал Л. Т., Леховицер М. А., Платонов В. Н.** и др. Внедрение жидкостампованных поршней из сплава АЛ25 для дизелей 6Ч 12/14 и 6ЧН 12/14 // Двигателестроение. 1985, № 6. С. 43—47.
3. **Дизели:** Справочник / Под общ. ред. В. А. Ваншейдта, Н. Н. Иванченко, Л. К. Коллерова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1977. 480 с.
4. **Иванченко Н. Н., Семенов Б. Н., Соколов В. С.** Рабочий процесс дизелей с камерой в поршне. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1972. 232 с.
5. **Поспелов Д. Р., Ершов Е. П.** О теплонагруженности составного поршня с камерой сгорания в днище // Тракторы и сельхозмашины. 1982, № 1. С. 11—12.
6. **Гоц А. Н., Папонов С. В., Фомин В. К.** и др. Поршень двигателя внутреннего сгорания. Авторское свидетельство СССР № 1560759, 1990.
7. **Гоц А. Н., Фомин В. К., Папонов С. В.** и др. Повышение надежности поршня дизеля с воздушным охлаждением // Двигателестроение. 1988, № 10. С. 40—43.
8. **Донченко А. С., Морганюк В. С., Аверченков Е. А.** и др. Расчет напряженно-деформированного состояния поршня тракторного дизеля при циклическом нагружении // Проблемы прочности. 1983, № 3. С. 39—44.
9. **Донченко А. С.** К расчету диаграммы неизоотермического деформирования поршневого сплава АЛ25 // Проблемы прочности. 1985, № 3. С. 103—107.

10. **Зарубин В. С., Станкевич И. В.** Расчет теплонапряженных конструкций. М.: Машиностроение, 2005. 352 с.

11. **Белов В. П.** Расчетно-экспериментальная оценка термостойкости поршней формованных автомобильных и тракторных двигателей: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1986. 230 с.

References

1. Olsson G., Piani D. *Tsifrovyye sistemy avtomatizatsii i upravleniya* [Digital automation and control systems]. Saint Petersburg, Nevskiy Dialekt Publ., 2001, 557 p.
2. Dzybal L. T., Lkhovitsler M. A., Platonov V. N., Prozorov V. P. Implementation of liquid forged pistons made of AL25 alloy for 6CH 12/14 and 6CHN 12/14 diesel engines. *Dvigatelistroenie*, 1985, no. 6, pp. 43—47 (in Russ.).
3. *Dizeli: Spravochnik* [Diesel engines: Handbook]. Under the editorship of V. A. Vansheydt, N. N. Ivanchenko, L. K. Kollerov. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad branch, 1977, 480 p.
4. Ivanchenko N. N., Semenov B. N., Sokolov V. S. *Rabochiy protsess dizeley s kameroy v porshne* [Work process of diesel engines with bowl-in-crown piston]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad branch, 1972, 232 p.
5. Pospelov D. R., Ershov E. P. On the thermal stress of a composite piston with combustion chamber in the bottom. *Traktory i sel'khozmashiny*, 1982, no. 1, pp. 11—12 (in Russ.).
6. Gots A. N., Paponov S. V., Fomin V. K., Balyuk B. K. *Porshen' dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Piston of internal combustion engine]. USSR inventor's certificate no. 1560759, 1990.
7. Gots A. N., Fomin V. K., Paponov S. V., Balyuk B. K. Improving the reliability of piston of air-cooled diesel engine. *Dvigatelistroenie*, 1988, no. 10, pp. 40—43 (in Russ.).
8. Donchenko A. S., Morganyuk V. S., Averbchenkov E. A., Kharchenko V. K., Isaev E. V. Calculation of stress-strain state of piston of tractor diesel engine under cyclic loading. *Problemy prochnosti*, 1983, no. 3, pp. 39—44 (in Russ.).
9. Donchenko A. S. To the calculation of diagram of nonisothermal deformation of the AL25 piston alloy. *Problemy prochnosti*, 1985, no. 3, pp. 103—107 (in Russ.).
10. Zarubin V. S., Stankevich I. V. *Raschet teplonapryazhennykh konstruktсий* [Calculation of heat-stressed constructions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 352 p.
11. Belov V. P. *Raschetno-eksperimental'naya otsenka termostoykosti porshney formirovannykh avtomobil'nykh i traktornykh dvigateley* [Calculation and experimental evaluation of the heat resistance of pistons of formed automobile and tractor engines]. PhD in Engineering thesis. Moscow, 1986, 230 p.