

Условия нагружения поршней двигателей внутреннего сгорания и причины образования трещин на кромке камеры сгорания

Loading conditions of pistons of internal combustion engines and causes of crack formation on combustion chamber edge

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

Для разработки методов оценки долговечности поршней тракторных дизелей необходимо исследовать причины отказов в эксплуатации, в частности появления трещин на кромке камеры сгорания. Тракторные дизели эксплуатируются на неустановившихся режимах в связи с периодическими изменениями положения органа управления и момента сопротивления при выполнении машинно-тракторным агрегатом сельскохозяйственных, трелевочных и других работ. На неустановившихся режимах напряженно-деформированное состояние поршня меняется во времени, что приводит к появлению усталостных трещин на кромке камеры сгорания. Проведен обзор исследований закономерностей изменения скорости развития усталостных трещин на кромке камеры сгорания тракторного дизеля. Пиковые значения тепловых потоков через тепловоспринимающую поверхность днища на неустановившихся режимах в 2,5 раза превосходят те же значения на установившихся режимах. По данным исследований, для тракторного дизеля 4ЧН 11/12,5 интенсивность напряжений в кромке камеры сгорания, вызванных температурными градиентами, составляет 92–98 МПа и более чем в 2 раза превосходит напряжения, вызванные силами давления газов в цилиндре (38–42 МПа). С увеличением форсирования двигателя кромка камеры сгорания становится локальным концентратором температурных напряжений, что приводит к появлению упругопластических деформаций циклического характера и микродефектов. Напряжения, возникающие в кромке камеры сгорания при резкой смене режима нагрузки, как правило, превышают значения предела текучести материала поршня. Это приводит к тому, что в кромке камеры сгорания возникают пластические деформации. Анализ причин образования трещин в кромке камеры сгорания поршня тракторного дизеля показывает, что при оценке долговечности поршня необходимо учитывать целый комплекс показателей и параметров двигателя.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; переходные процессы; поршень; камера сгорания; температурные градиенты; тепловая напряженность; напряжения; трещина.

In order to develop the methods for assessment of durability of pistons of tractor diesel engines, it is necessary to conduct the research of causes of failures in their operation, in particular crack formation on the edge of combustion chamber. Tractor engines operate in transient regimes due to periodic changes of control organ position and resisting moment when tractor performs agricultural, logging and other works. In transient regimes, the stress-strain state of piston varies in time, which leads to the formation of fatigue cracks on the edge of combustion chamber. The paper reviews the studies on regularities of change in the rate of propagation of fatigue cracks on the edge of combustion chamber of tractor diesel engine. The peak values of heat flows passing through the heat-absorbing surface of piston head in transient regimes exceed by 2.5 times the same values in steady-state regimes. According to the researches, for the 4ChN 11/12.5 tractor diesel engine stress intensity on the edge of combustion chamber caused by temperature gradients equals to 92–98 MPa, and exceeds more than by 2 times the stresses caused by gas pressure forces in cylinder (38–42 MPa). With the increase of engine forcing, the edge of combustion chamber becomes a local concentrator of thermal stresses, that leads to elastic-plastic deformations of cyclical pattern and microdefects. Stresses appearing on the edge of combustion chamber under rapid change of loading modes typically exceed the values of yield stress of piston material. This leads to the appearance of plastic deformations on the edge of combustion chamber. The analysis of causes of crack formation on the edge of combustion chamber of piston of a tractor diesel engine shows that when assessing the durability of piston, the whole range of indicators and parameters of the engine should be taken into account.

Keywords: internal combustion engine; transients; piston; combustion chamber; temperature gradients; thermal stress; stresses; crack.

Введение

Разработка методов оценки долговечности поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) предполагает исследование условий загруженности деталей двигателей и выяснение причин отказов в эксплуатации. Тракторные дизели большую часть времени эксплуатируются на неустановившихся режимах из-за изменений положения органа управления и момента сопротивления при выполнении машинно-тракторным агрегатом сельскохозяйственных, трелевочных и других работ. Колебания нагрузки на валу тракторного двигателя вызваны различными факторами: зоной эксплуатации агрегатов и почвенно-климатическими условиями, периодом года, видом работ, принятой технологией производства, свойствами агрегата и его энергетической установки,

требованиями охраны труда и окружающей среды, субъективными факторами, связанными с оператором, и др.

Поскольку ДВС эксплуатируются на неустановившихся режимах в широком диапазоне частоты вращения коленчатого вала, угловая скорость и момент на валу двигателя непрерывно изменяются во времени [1–3]. Переходные процессы, возникающие на эксплуатационных режимах в цилиндре ДВС, в частности тракторных дизелей (движение трактора с заглублением плуга, с прицепом, перегрузки при переключении передач), наиболее неблагоприятны для деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ). На неустановившихся режимах напряженно-деформированное состояние (НДС) поршня меняется во времени, что приводит к появлению усталостных трещин на кромке его камеры сгорания (КС).

В связи с этим актуален обзор исследований скорости развития трещин с целью прогнозирования долговечности при их наличии.

Цель исследования

Цель статьи — обзор исследований закономерностей изменения скорости развития усталостных трещин в зависимости от эксплуатационных и конструктивных факторов.

Материалы и методы

Непрерывное чередование циклов, в течение каждого из которых изменяются в широких пределах давление и температура газов в цилиндре, скорость перемещения поршня и активная поверхность теплообмена, создает чрезвычайно сложные условия нагружения поршня. Экспериментальные исследования, выполненные кафедрой ДВС Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1980-е гг. на двигателе ЯМЗ-238, показали, что пиковые значения тепловых потоков через теплопринимающую поверхность днища на неустановившихся режимах в 2,5 раза превосходят те же значения на установившихся режимах. Аналогично изменению тепловых потоков изменялись температурные градиенты и напряжения [1].

Высокий уровень форсирования современных дизелей определяет тепловые и механические нагрузки, действующие на поршень, что приводит к его преждевременному разрушению. По данным исследования [3], форсирование двигателя ЯМЗ-240 по мощности свыше 30 % с помощью газотурбинного наддува первоначально привело к массовому выходу поршней из строя по причине образования трещин на кромке КС. Длина трещин составляла от 5 до 18 мм, глубина — от 3 до 10 мм. Наблюдалось несколько трещин порядка 25 мм.

Для тракторных дизелей с 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 ($3\text{--}7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$). На рис. 1 приведено распределение температур и напряжений в поршне дизеля 4ЧН 11/12,5 (Д-240) на режиме номинальной мощности, полученное при оценке НДС [4]. Отмечен высокий уровень температур на кромке КС.

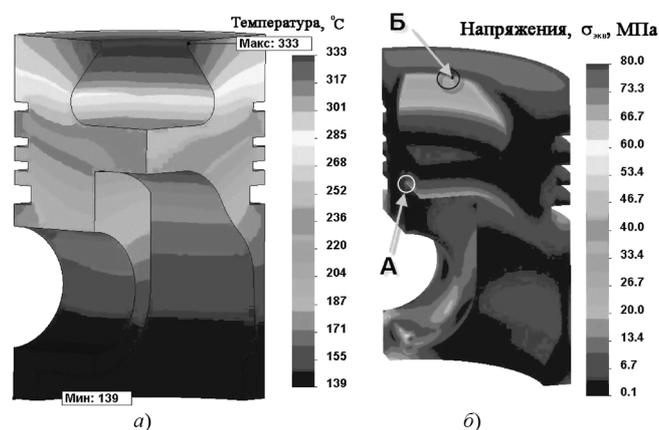


Рис. 1. Распределение температур t , $^{\circ}\text{C}$, (а) и напряжений, МПа, (б) в поршне дизеля 4ЧН 11/12,5 на режиме номинальной мощности



Рис. 2. Расположение трещин в кромке КС поршня тракторного дизеля

Термические (термоусталостные) разрушения обусловлены воздействием тепловых нагрузок. Такие разрушения могут проявляться в виде трещин на кромке КС (область Б на рис. 1, б). Наличие даже небольшой трещины на кромке КС может стать причиной разрушения поршня вследствие ее дальнейшего роста. Например, во время испытаний на Владимирском тракторном заводе двигателя МД-5 на фактический ресурс возник ряд отказов, один из которых — разрушение поршня по трещине после наработки 840 ч. Как показывает опыт эксплуатации дизелей, часть отказов поршней с полуоткрытой КС связана именно с возникновением трещин на кромке, развитие которых показано на рис. 2 [4, 5].

Разрушения в поршнях могут быть обусловлены действием механического и термического нагружений. Механическое нагружение представляет собой действие инерционных и газовых сил. Давление газов может привести к возникновению трещин в области А, показанной на рис. 1, б.

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 сменной режимов работы двигателя;
- высокочастотные циклические термические колебания, обусловленные изменением температуры материала в поверхностном слое КС в течение каждого рабочего цикла.

Напряжения в кромке КС, вызванные температурными градиентами, выше напряжений, вызванных силами давления газов в цилиндре [5, 6]. Максимальные значения напряжений от воздействия температуры и силы давления газов отстают друг от друга на несколько градусов поворота коленчатого вала (ПКВ, а в английском переводе degrees crank): $5\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{DC}$. Это объясняется протеканием зависимости характеристики тепловыделения $dX/d\varphi = f(\varphi, ^{\circ}\text{DC})$, которая показана на диаграмме, характерной для четырехтактного ДВС (рис. 3).

Экстремумы зависимостей давления газов $p_z = f(\varphi, ^{\circ}\text{DC})$ и температуры $T = f(\varphi, ^{\circ}\text{DC})$ также не совпадают. Температура рабочего тела возрастает в процессе сгорания и достигает максимального значения после момента достижения максимального давления.

Для подтверждения того, что напряжения от действия температуры выше, чем напряжения от давления газов, проведен расчет НДС. Распределение интенсивности напряжений в поршне с полуоткрытой КС на номинальном режиме приведено на рис. 4. Результаты расчета показали, что именно температурное состояние поршня определяет его долговечность.

По данным кафедры ДВС ЛПИ, проводившей исследования влияния конструкционных факторов на НДС поршня высокофорсированного дизеля типа ЧН 21/21, значения тепловых напряжений в 2–3 раза выше, чем механических [1].

Согласно большому числу исследований, проведенных Н. Д. Чайновым, Н. А. Иващенко, А. В. Тимохиным, А. Б. Иванченко, Е. А. Лазаревым [7–9], с увеличением форсирования двигателя кромка КС становится локальным концентратором температурных напряжений, что приводит к появлению упругопластических деформаций циклического характера и микродефектов [10–12].

Оценивая долговечность при высоких температурах нагружения, также необходимо учитывать изменение прочностных свойств алюминиевых сплавов. Согласно работе [15], изменение температуры алюминиевого сплава с 20 до 350 °С приводит к снижению предела текучести материала со 150 до 22 МПа, а модуль упругости снижается практически вдвое.

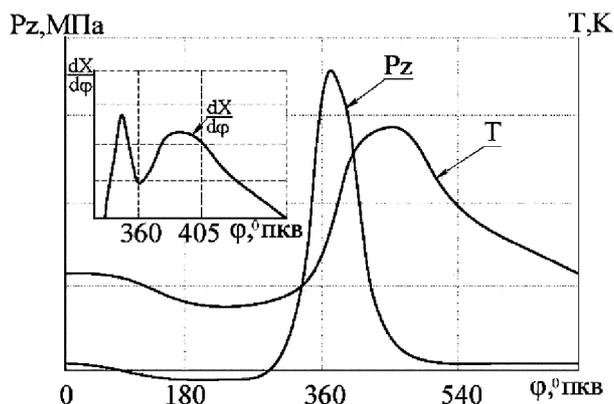


Рис. 3. Типичные диаграммы изменения максимального давления сгорания p_z и температуры T в цилиндре четырехтактного ДВС

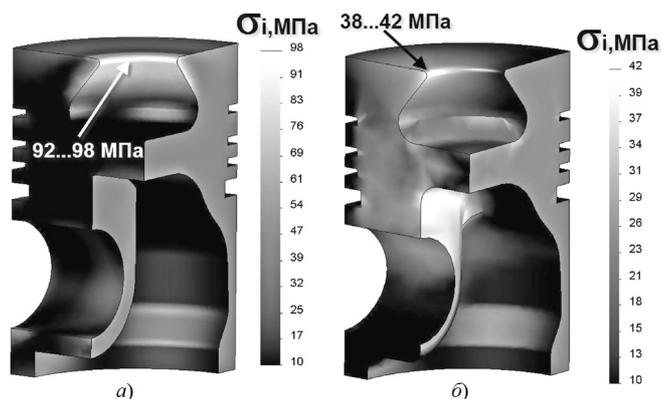


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений при действии температурной нагрузки (а) и газовых сил (б)

Низкочастотные колебания температуры поршня, связанные со сменой режимов работы двигателя, вызывают перепады температур порядка 50–150 °С [5, 8, 10, 13–15]. Кроме того, колебания температуры рабочего тела в течение цикла приводят к локальному нагреву поверхностного слоя кромки КС.

Результаты и их обсуждение

Согласно исследованиям [12, 14], высокочастотные колебания температуры в поверхностных слоях материала кромки КС (0–1 мм от поверхности) имеют, как правило, амплитуду 5–20 °С. Практически оценить величину таких колебаний не всегда удается, поскольку для этого требуются малоинерционные датчики температуры, а с технологической точки зрения выполнить монтаж средств измерения сложно. По мнению некоторых исследователей, игнорирование составляющей тепловой нагрузки при моделировании теплового состояния поршня может вносить 10–20 %-ную ошибку в конечные результаты [15].

Длительность переходных процессов, по результатам исследований, составляет 5–15 с [5]. Температура поршня стабилизируется в течение 3–4 мин после выхода на определенный режим. Кромка КС поршня с переменным сечением становится концентратором напряжений, что приводит к возникновению термоусталостных трещин.

В работе [12] отмечается случай, когда после незначительного проникновения термоусталостных трещин вглубь поверхности поршня их развитие приостанавливается. Однако более достоверный факт по количеству экспериментальных данных — то, что при наличии наряду с циклическими теплосменами хотя бы небольшой механической нагрузки поверхностные трещины с накоплением циклов теплосмен углубляются в толщину материала вплоть до сквозного разрушения. При появлении трещины механическая нагрузка начинает играть большую роль.

Развитие термоусталостных разрушений не всегда идет от поверхности. Иногда оно начинается внутри детали из-за каких-либо структурных несовершенств или технологических дефектов.

Образование трещин связано с нестационарными режимами работы двигателя. При переходе с режима холостого хода на режим номинальной мощности резко изменяются температура газов, коэффициент теплоотдачи и, как следствие, теплофизические процессы, проходящие на кромке КС. Поршень нагревается неравномерно, что приводит к возникновению температурных градиентов. Поскольку материал в поверхностных слоях расширяется интенсивнее, чем в толщине поршня, кромка КС испытывает сжимающие напряжения. При дальнейшей работе двигателя эти напряжения уменьшаются, так как температурное поле поршня выравнивается. При переходе с номинального режима работы на режим холостого хода в кромке КС происходят обратные процессы. Напряжения, возникающие в кромке КС при резкой смене режима нагрузки, как правило, превышают значения предела текучести материала поршня. Это приводит к тому, что в кромке КС возникают пластические деформации. Их величина накапливается с каждой сменой режима работы двигателя.

Причинами образования трещин могут быть параметры и показатели, которые, по сути, характеризуют рабочий цикл двигателя и его тепловое состояние. Так, увеличение зазоров в ЦПГ как следствие износа вызывает нарушение теплоотдачи от поршня к цилиндру, что влечет за собой повышение температуры поршня и рост температурных градиентов в кромке КС. По данным Коломенского тепловозостроительного завода, увеличение зазоров между поршнем и зеркалом цилиндра привело к заметному росту температуры алюминиевого неохлаждаемого поршня двигателя ЧН 26/26 [14]. При номинальном режиме работы дизеля максимальная температура поршня (рис. 5) возросла примерно на 8 % (с 232 до 250 °С), а над компрессионным кольцом — на 16 % (со 185 до 225 °С). В роли такого параметра также может выступать, например, угол опережения подачи топлива, который определяет характер тепловыделения в процессе сгорания топлива и распределение тепловых потоков по поверхностям ЦПГ [14].

Отказы поршней, возникающие при работе двигателей, можно разделить на следующие группы [13]:

— конструкторские отказы, возникающие из-за неучета в процессе конструирования местных концентраторов напряжений;

— производственно-технологические отказы, возникающие из-за низкого качества изготовления деталей (усадочные раковины, пористость, межкристаллические трещины, волосовины и др. [14]);

— эксплуатационные отказы как следствие неправильной регулировки топливной аппаратуры, установки нерациональных фаз газораспределения, работы двигателя с трещиной термической усталости.

Эксплуатационные отказы могут быть вызваны довольно большим перечнем факторов [15]. Например, их причиной может стать неэффективная ориентация канала галерейного охлаждения в поршне, что приводит к повышению температурного режима работы поршня и увеличивает напряженность в кромке КС [14]. Все это отражается на долговечности поршня. Так, отказ системы терморегулирования тракторного дизеля воздушного охлаждения 8ДВТ-330 привел к оплавлению днища поршня и задиру его боковой поверхности через 550 ч наработки [7–9].

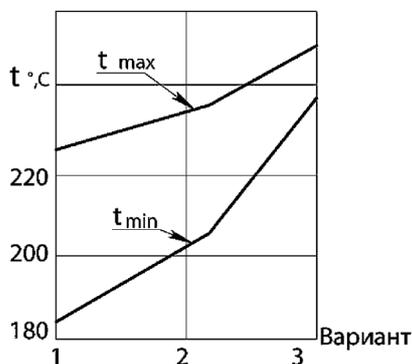


Рис. 5. Изменение максимальной температуры днища поршня над верхним уплотнительным кольцом и в верхнем поясе втулки цилиндра:

1 — новые кольца и гильза цилиндра; 2 — новые кольца, износ гильзы 0,8 мм; 3 — износ гильзы цилиндра 0,8 мм; зазор в замке верхнего уплотнительного кольца 3–4 мм

Срок службы основных элементов ЦПГ тракторных дизелей

Деталь ЦПГ	$T_{cp} \cdot 10^{-3}$, ч
Поршень	0,8–4
Поршневые кольца	0,5–2
Поршневой палец	1–5

Отметим, что если срок службы поршневых колец и поршневого пальца определяется износом этих элементов, то срок службы поршня зависит от количества трещин и их длины. Для сравнения в таблице приведены средние сроки службы деталей ЦПГ [15].

Выводы

Анализ причин образования трещин в кромке КС поршня тракторного дизеля показывает, что при оценке долговечности поршня необходимо учитывать целый комплекс показателей и параметров двигателя:

- уровень форсирования по литровой или поршневой мощности;
- конструкцию поршня и КС, условия работы энергетической установки, на которую установлен дизель;
- наличие охлаждения (струйного или галерейного);
- изменение свойств алюминиевого сплава, из которого изготовлен поршень, и т.д.

Литература и источники

1. Брук М. А., Вискман А. С., Левин Г. Х. Работа дизеля в нестационарных условиях. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. 208 с.
2. Иващенко А. Б. Методика оценки термоусталостной прочности поршней форсированных дизелей: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1995. 174 с.
3. Колмаков В. И. Повышение работоспособности поршней форсированных автомобильных дизелей путем интенсификации их охлаждения: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1985.
4. Иващенко А. Б., Глинкин С. А. Прочностной анализ поршня перспективного дизеля типа ЧН 10,5/12 // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: Мат-лы X Междунар. науч.-практ. конф. Владимирский ГУ, 2005. С. 73–74.
5. Шалай А. Н. Как повысить долговечность поршня? // Двигателестроение. 1996, № 2. С. 51–52.
6. Дьяченко Н. Х., Дашков С. Н., Костин А. К. и др. Теплообмен в двигателях и теплонапряженность их деталей. Харьков: Машиностроение, 1969. 248 с.
7. Лазарев Е. А., Иващенко Н. А., Перлов М. Л. Особенности теплового и напряженно-деформированного состояния поршней тракторного дизеля // Двигателестроение. 1988, № 7. С. 3–5.
8. Лазарев Е. А., Иващенко Н. А., Перлов М. Л. и др. Напряженно-деформированное и тепловое состояние охлаждаемого поршня тракторного дизеля при различном расположении поперечного сечения полости охлаждения // Двигателестроение. 1989, № 2. С. 7–10.
9. 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.
10. Шеховцов А. Ф., Абрамчук Ф. И., Пылев В. А. Ползучесть и релаксация при растяжении алюминиевого сплава АЛ25 // Двигателестроение. 1986, № 11. С. 45–47.
11. Чайнов Н. Д., Тимохин А. В., Петров В. Б. Модель расчета температурного поля осесимметричных деталей цилиндра

ропоршневой группы дизелей // Известия вузов. Машиностроение. 1986, № 9. С. 77–91.

12. Шеховцов А. Ф. Математическое моделирование теплопередачи в быстроходных дизелях. Харьков: Вища школа, 1978. 153 с.

13. Иванченко Н. Н., Семенов Б. Н., Соколов В. С. Рабочий процесс дизелей с камерой в поршне. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1972. 232 с.

14. Либовиц Г. Расчет конструкций на хрупкую прочность. Т. 5. М.: Машиностроение, 1977. 452 с.

15. Семенов Б. Н., Иванченко Н. Н. Задачи повышения топливной экономичности // Двигателестроение. 1990, № 11. С. 3–7.

References

1. Bruk M. A., Viksman A. S., Levin G. Kh. *Rabota dizelya v nestatsionarnykh usloviyakh* [Diesel operation in non-stationary conditions]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad branch, 1981, 208 p.

2. Ivanchenko A. B. *Metodika otsenki termoustalostnoy prochnosti porshney forsirovannykh dizeley* [Methods of assessment of thermal fatigue strength of pistons of forced diesel engines]. PhD in Engineering thesis. Moscow, 1995, 174 p.

3. Kolmakov V. I. *Povysheniye rabotosposobnosti porshney forsirovannykh avtomobil'nykh dizeley putem intensivatsii ikh okhlazhdeniya* [Increasing the performance of pistons of forced automobile diesel engines by intensifying their cooling]. PhD in Engineering thesis. Moscow, 1985.

4. Ivanchenko A. B., Glinkin S. A. Strength analysis of piston of prospective diesel of ChN 10.5/12 type. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovershenstvovaniya porshnevykh dvigateley. Mat-ly X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Fundamental and applied problems of improving the piston engines. Proc. of the X Int. sci. and pract. conf.]. Vladimir, Vladimir State University, 2005, pp. 73–74 (in Russ.).

5. Shalay A. N. How to improve the durability of piston? *Dvigatelistroenie*, 1996, no. 2, pp. 51–52 (in Russ.).

6. D'yachenko N. Kh., Dashkov S. N., Kostin A. K., Burin M. M. *Teploobmen v dvigatelyakh i teplotnapryazhennost' ikh detaley* [Heat exchange in engines and heat density of their parts]. Kharkiv, Mashinostroenie Publ., 1969, 248 p.

7. Lazarev E. A., Ivashchenko N. A., Perlov M. L. Features of thermal and stress-strain state of tractor diesel engine pistons. *Dvigatelistroenie*, 1988, no. 7, pp. 3–5 (in Russ.).

8. Lazarev E. A., Ivashchenko N. A., Perlov M. L., Bondarev A. A. Stress-strain and thermal state of cooled piston of tractor diesel engine at different positions of cross section of a cooling chamber. *Dvigatelistroenie*, 1989, no. 2, pp. 7–10 (in Russ.).

9. Donchenko A. S., Morganyuk V. S., Averchenkov 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.).

10. Shekhovtsov A. F., Abramchuk F. I., Pylev V. A. Creep and relaxation under tension of AL25 aluminum alloy. *Dvigatelistroenie*, 1986, no. 11, pp. 45–47 (in Russ.).

11. Chaynov N. D., Timokhin A. V., Petrov V. B. Model for calculating the temperature field of axially symmetric parts of the cylinder-piston group of diesel engines. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1986, no. 9, pp. 77–91 (in Russ.).

12. Shekhovtsov A. F. *Matematicheskoe modelirovaniye teplopere-dachi v bystrokhodnykh dizelyakh* [Mathematical modeling of heat transfer in high-speed diesel engines]. Kharkiv, Vishcha shkola Publ., 1978, 153 p.

13. 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.

14. Libovits G. *Raschet konstruktсий na khrupkuyu prochnost'* [Calculation of constructions on brittle strength]. Vol. 5. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 452 p.

15. Semenov B. N., Ivanchenko N. N. Problems of fuel efficiency improvement. *Dvigatelistroenie*, 1990, no. 11, pp. 3–7 (in Russ.).