

Научная статья
УДК 621.436.05

Сравнительный анализ методов повышения стабильности теплового состояния базовых теплонапряженных деталей (узлов) форсированных среднеоборотных дизелей

Николай Дмитриевич Чайнов¹, Андрей Николаевич Краснокутский²,
Роман Владимирович Панфилов³

^{1, 2, 3} Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹ ndchainov@yandex.ru

² krasnokutsky07@mail.ru

³ pnfltk@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается повышение герметичности газового стыка форсированного среднеоборотного дизеля (СОД) с подвесной конструкцией втулки цилиндра. Цель работы – оценить эффективность различных вариантов дополнительного охлаждения крышки цилиндров и провести сравнительный анализ данных вариантов. В результате трёхмерного конечно-элементного анализа получены поля температур рассматриваемого узла «крышка-втулка» цилиндра, включая зону газового стыка. Проведено сравнение различных методов охлаждения зоны повышенного нагрева и сделаны выводы о рациональности применения того или иного метода. Приведены рекомендации по снижению температуры в зоне газового стыка и повышению его работоспособности в условиях форсирования двигателя. Дополнительно выполнена оценка влияния конструктивных изменений системы охлаждения на распределение температурных градиентов в теплонапряженных элементах цилиндрического узла. Рассмотрены особенности формирования локальных зон перегрева, определяющих уровень термических деформаций и снижение надежности уплотнения газового стыка. Определены наиболее эффективные направления интенсификации теплоотвода, обеспечивающие уменьшение максимальных температур и повышение ресурса базовых деталей двигателя без существенного усложнения конструкции и увеличения эксплуатационных затрат. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации форсированных среднеоборотных дизелей различного назначения с целью повышения их надежности и долговечности.

Ключевые слова: шпилька, газовый стык, прокладка, тепловое состояние, охлаждение, крышка-втулка

Для цитирования: Чайнов Н. Д., Краснокутский А. Н., Панфилов Р. В. Сравнительный анализ методов повышения стабильности теплового состояния базовых теплонапряженных деталей (узлов) форсированных среднеоборотных дизелей // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 2 (48).

© Чайнов Н. Д., Краснокутский А. Н., Панфилов Р. В., 2026

№ 2(48)
июнь 2026

Original article

Comparative Analysis of Methods for Enhancing the Thermal State Stability of Critical Thermally Loaded Components in High-Boost Medium-Speed Diesel Engines

Nikolai D. Chainov¹, Andrey N. Krasnokutsky², Roman V. Panfilov³

^{1,2,3} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ ndchainov@yandex.ru

² krasnokutsky07@mail.ru

³ pnfltk@yandex.ru

Abstract. The paper addresses the improvement of gas-joint sealing performance in a turbocharged medium-speed diesel engine featuring a suspended cylinder liner design. The objective of the study is to evaluate the effectiveness of various additional cylinder head cooling configurations and to perform a comparative analysis of their performance. Three-dimensional finite element analysis was employed to obtain temperature distributions within the cylinder head–liner assembly, including the gas-joint region. Different cooling approaches for the area subjected to elevated thermal loading were compared, and conclusions regarding the applicability and effectiveness of each method were drawn. Recommendations aimed at reducing the temperature in the gas-joint region and improving its serviceability under engine boosting conditions are presented. In addition, the influence of design modifications to the cooling system on the distribution of temperature gradients within thermally stressed components of the cylinder assembly was assessed. Particular attention was paid to the formation of local overheating zones, which contribute to thermal deformation and reduced reliability of the gas-joint seal. The most effective approaches to heat-transfer enhancement were identified, providing a reduction in peak temperatures and an increase in the service life of critical engine components without significant design complexity or additional operating costs. The obtained results can be applied in the design and modernization of high-output medium-speed diesel engines for improved reliability and durability.

Keywords: stud, gas joint, gasket, thermal state, cooling, cylinder head-cylinder liner

For citation: Chainov N.D., Krasnokutsky A.N., Panfilov R.V. Comparative Analysis of Methods for Enhancing the Thermal State Stability of Critical Thermally Loaded Components in High-Boost Medium-Speed Diesel Engines. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. № 2 (48).

Введение

Цилиндровые крышки относятся к числу наиболее сложных и одновременно теплонапряжённых элементов современных четырёхтактных среднеоборотных дизелей. В полной мере сказанное справедливо

применительно к крышке цилиндров отечественных среднеоборотных дизелей семейства Д49, разработанных на Коломенском заводе на базе типоразмерного ряда ЧН26/26. В рамках данного семейства создано свыше 60 модификаций, включая прежде всего тепловозные двигатели, а также судовые двигатели и другие модификации. При этом конструкция двигателей указанного типоразмерного ряда построена по модульному принципу с высокой степенью унификации основных узлов, в частности цилиндровых комплектов.

Использование модульного подхода в сочетании с унификацией позволяет снизить себестоимость производства, одновременно повышая качество изделия и сокращая сроки разработки новых модификаций. Это приобретает особую значимость в условиях постоянного повышения степени форсирования среднеоборотных дизелей по параметрам рабочего процесса, таким как среднее эффективное давление и максимальное давление цикла.

В связи с этим представляет интерес анализ путей повышения прочностной надёжности цилиндрового комплекта двигателей с подвесной втулкой [1, 2], включая обеспечение герметичности газового стыка, формируемого крышкой цилиндра, втулкой и прокладкой, при возрастании нагрузок. Характерной особенностью таких конструкций является то, что уплотнение газового стыка осуществляется не основными силовыми шпильками, расположенными по углам крышки, а специальными крепёжными элементами, как правило, шестью шпильками меньшего диаметра, размещёнными по окружности и ввёрнутыми в бурт подвесной втулки цилиндра (рисунок 1). Данные шпильки проходят через внутренние каналы крышки, причём одна из них расположена в зоне выпускного тракта, что приводит к её интенсивному нагреву. В условиях форсирования двигателя это вызывает локальное повышение температуры шпильки и, как следствие, ухудшение герметичности газового стыка в данной области [3].

Цель исследования заключается в установлении закономерностей формирования теплового состояния газового стыка цилиндрического узла форсированного среднеоборотного дизеля и определении эффективности различных конструктивных решений, направленных на снижение локальных температурных нагрузок в наиболее теплонапряженных зонах крышки цилиндра и втулки.

Научная **новизна** работы состоит в сравнительной оценке влияния различных вариантов дополнительного охлаждения цилиндрического узла на температурное состояние зоны газового стыка на основе трехмерного конечно-элементного моделирования. Получены новые данные о распределении температур и температурных градиентов в сопряжении крышки цилиндра и втулки при различных схемах охлаждения, выявлены наиболее эффективные способы локальной интенсификации теплоотвода, обеспечивающие снижение максимальных температур и повышение работоспособности газового стыка в условиях форсирования двигателя.

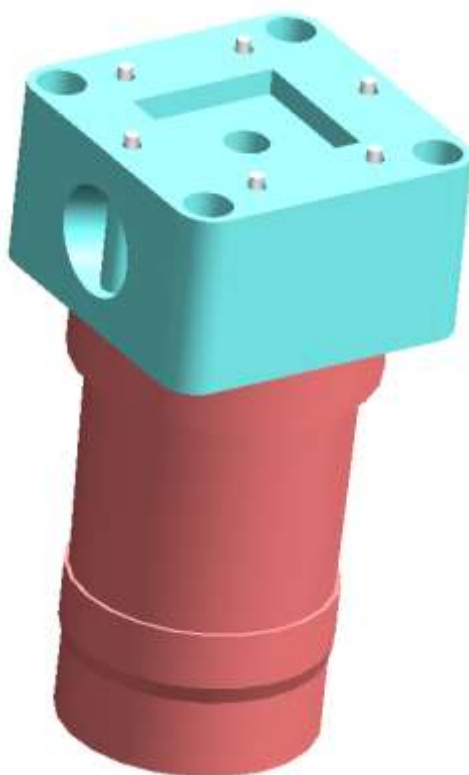


Рис. 1. «Твердотельная» модель сборки втулки с крышкой цилиндра

Конструкция исследуемого узла СОД

В рассматриваемой конструкции (рисунок 1) наиболее нагревается шпилька, расположенная в зоне выпускного канала, испытывающая существенный нагрев за счёт теплообмена с элементами крышки, омываемыми горячими газами. Температура шпильки достигает значений, при которых заметно снижается предел текучести ее материала, и падает усилие затяжки нагретой шпильки [4]. В результате происходит локальное снижение уплотняющего усилия на прокладке между огневым днищем крышки и фланцем втулки цилиндра, что приводит к потере герметичности газового стыка двигателя.

С помощью программного комплекса ANSYS при использовании объемных конечно-элементных моделей выполнены расчеты теплового состояния цилиндрического модуля двигателя ЧН26/26 с различными вариантами локального охлаждения. В работе [5] представлены подробные данные о математической модели и граничных условиях теплообмена при выполнении расчетов с помощью метода конечных элементов.

Первоначально были выполнены расчеты температурных полей цилиндрического модуля на режиме максимальной мощности двигателя. Особое внимание было уделено контактными поверхностям, в том числе зонам резьбовых соединений. На рисунке 2 показана «твердотельная» модель сборки втулки с крышкой цилиндра и цилиндрической полостью локального охлаждения диаметром 17 мм.



Рис. 2. «Твердотельная» модель сборки втулки с крышкой цилиндра и локальной полостью охлаждения

На рисунке 3 представлена конечно-элементная модель полноразмерной крышки цилиндров. Модель состоит из 81294 тетраэдральных конечных элементов и содержит 22651 узел.

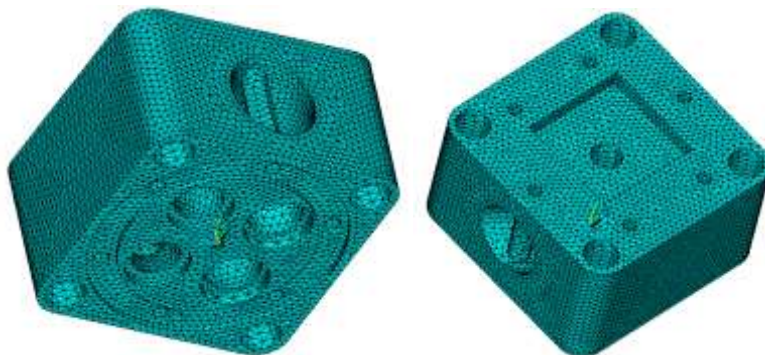


Рис. 3. Конечно-элементная модель полноразмерной крышки цилиндра

На рисунке 4 представлена конечно-элементная модель втулки цилиндра в сборе с шпильками, обеспечивающими герметичность газового стыка двигателя.

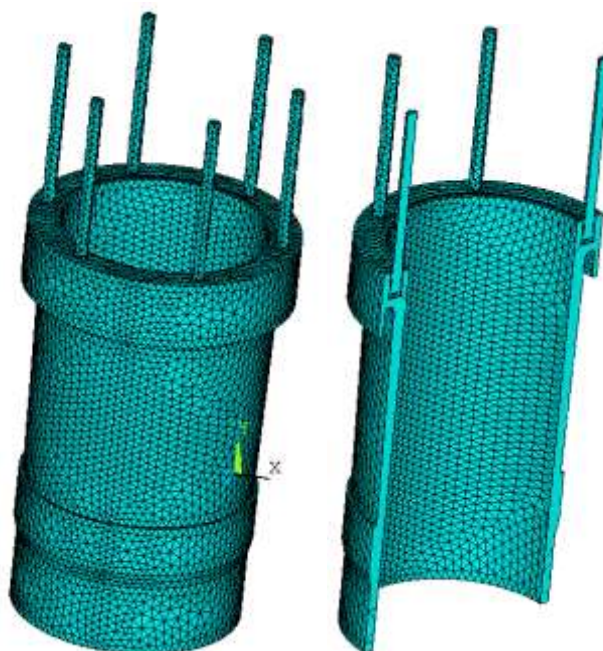


Рис. 4. Конечно-элементная модель втулки с шпильками

Расчеты теплового состояния узла СОД с различными способами охлаждения

На рисунке 5 представлены результаты расчета теплового состояния узла СОД «крышка-втулка» без применения каких-либо методов охлаждения

зоны перегрева. Видно, что из-за высокой температуры газов в выпускном канале крышки происходит значительный нагрев стенок полости, в которой находится «горячая» шпилька, вследствие чего происходит ее существенный перегрев – максимальная температура доходит до $+340\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате этого падает усилие затяжки «горячей» шпильки и происходит раскрытие газового стыка [6]. В данной работе рассмотрены следующие способы снижения температуры «горячей» шпильки:

- введение дополнительной локальной полости охлаждения;
- подвод сжатого наддувочного воздуха после холодильника в полость расположения шпильки;
- установка тонкостенного экрана вокруг шпильки, снижающего лучистый теплообмен между шпилькой и горячими стенками канала, в котором находится шпилька.

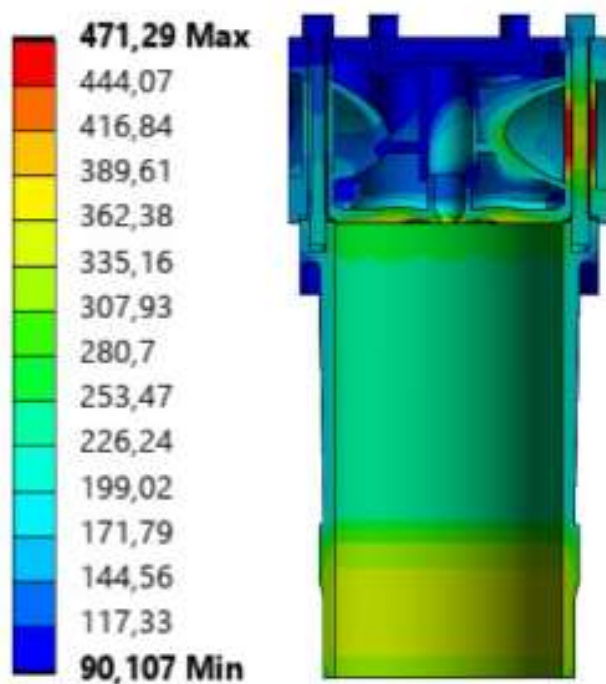


Рис. 5. Поля температур узла СОД «крышка-штулка» без применения дополнительного охлаждения

На рисунке 6 показано распределение температур по «горячей» шпильке узла без применения дополнительного локального охлаждения.

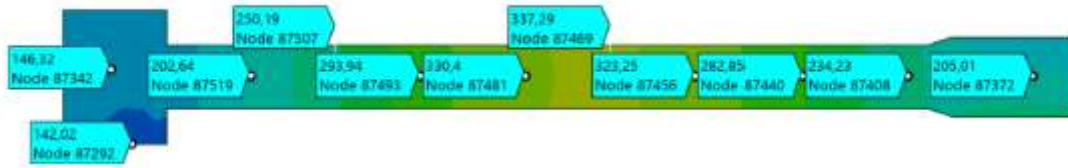


Рис. 6. Поля температур «горячей» шпильки узла без применения дополнительного охлаждения

На рисунке 7 представлены результаты численного моделирования теплового состояния узла с внедрением локальной полости охлаждения (диаметр – 17 мм, протяжённость – 175 мм) в зону расположения «горячей» шпильки.

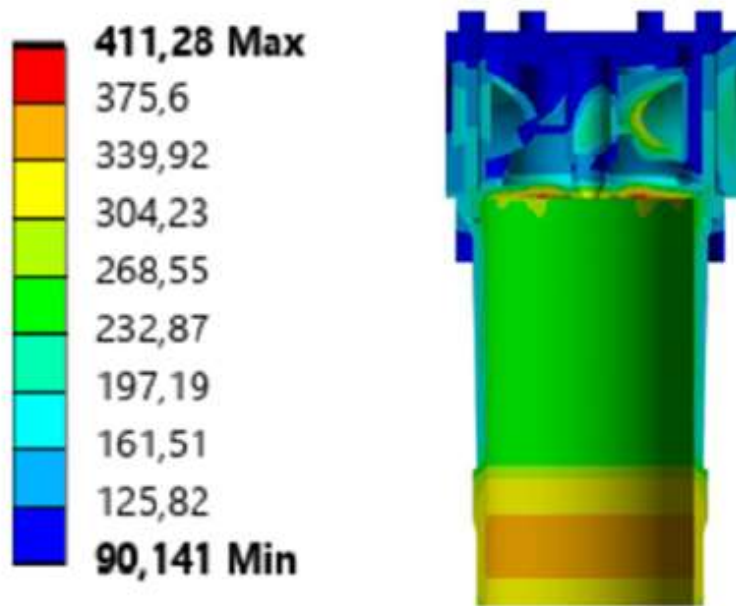


Рис. 7. Поля температур узла СОД «крышка-втулка» с локальной полостью охлаждения

На рисунке 8 визуализированы температурные поля шпильки. Реализация указанного конструктивного решения позволила снизить температуру в центральной области шпильки до $+166^{\circ}\text{C}$. Отмечено существенное снижение температуры шпильки и выравнивание температурных полей по шпилькам, обеспечивающим уплотнение газового стыка.



Рис. 8. Поля температур «горячей» шпильки узла при введении локальной полости охлаждения

Еще одним вариантом охлаждения «горячей» шпильки является установка тонкостенного стального экрана вокруг нее в зазор между стенкой и шпилькой [7]. На рисунке 9 приведены результаты расчета теплового состояния узла при установке экрана в зазор между шпилькой и стенкой полости.

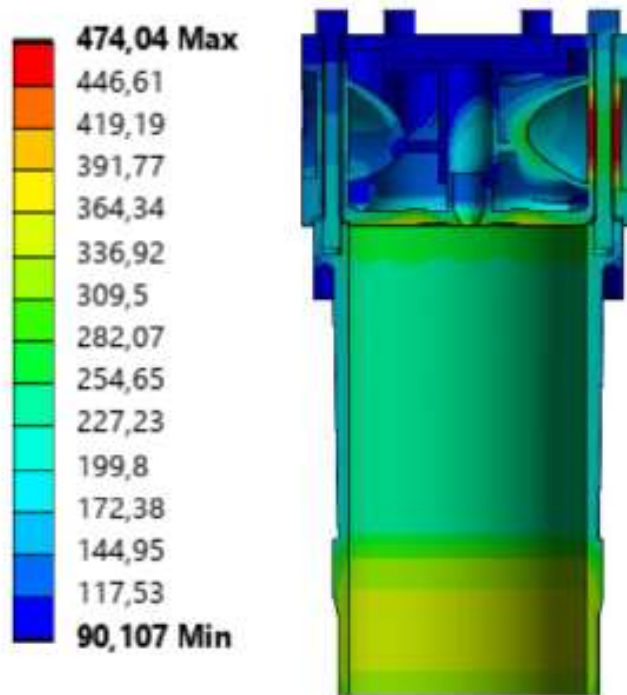


Рис. 9. Поля температур узла СОД «крышка-втулка» со стальным экраном

На рисунке 10 показаны поля температур шпильки при охлаждении данным методом.



Рис. 10. Поля температур «горячей» шпильки узла при установке стального экрана в зазор между шпилькой и стенкой полости

Результаты проведенного расчёта демонстрируют, что реализуемое охлаждение шпильки не обеспечивает требуемого снижения температуры: в центральном сечении фиксируется значение $+264\text{ }^{\circ}\text{C}$, что превышает

допустимый уровень для гарантированного сохранения герметичности газового стыка. Оптимизация теплового состояния узла возможна посредством внедрения локальной полости охлаждения (диаметр – 10 мм, глубина – 175 мм), обеспечивающей целенаправленное охлаждение стенки полости. Соответствующие результаты расчёта теплового состояния конструктивного узла с указанной полостью охлаждения представлены в ранее опубликованной работе [5].

Одним из возможных путей снижения температуры «горячей» шпильки является подвод в канал её расположения охлажденного наддувочного воздуха. На рисунке 11 представлены результаты расчета температурных полей, а на рисунке 12 – температуры шпильки.

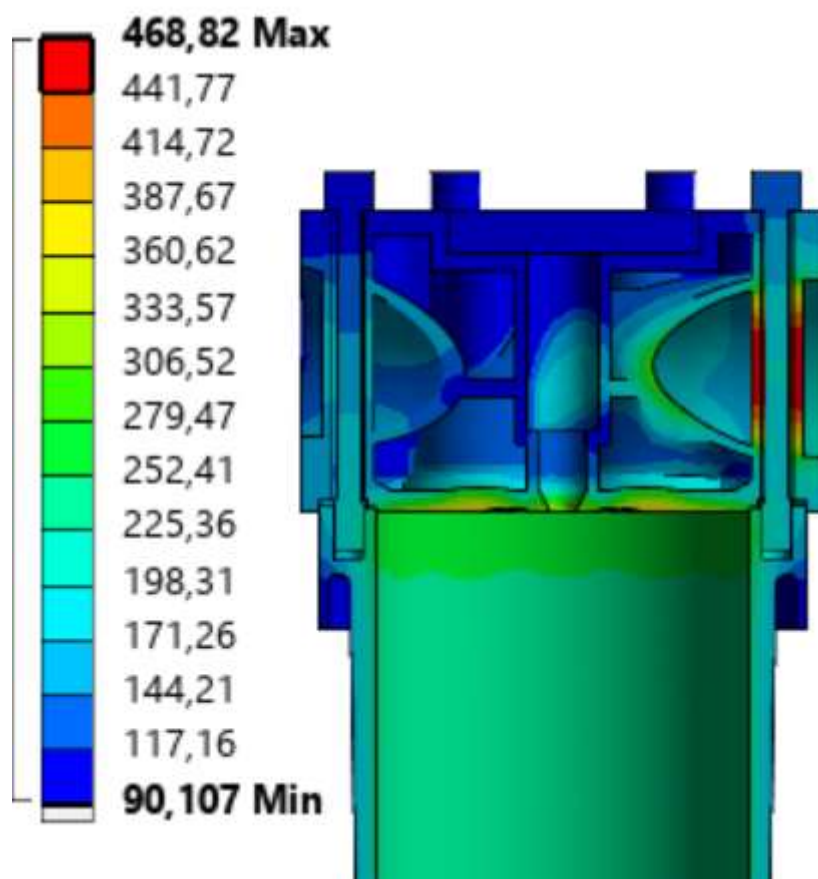


Рис. 11. Поля температур узла СОД «крышка-тулка» при охлаждении воздухом

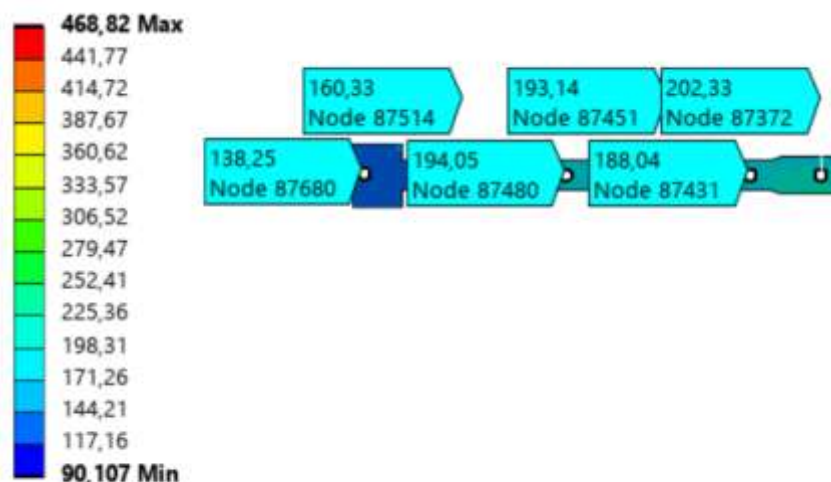


Рис. 12. Поля температур «горячей» шпильки узла при охлаждении воздухом после холодильника

Следует отметить, использование данного способа охлаждения «горячей» шпильки требует организации подвода сжатого воздуха в верхнюю часть полости расположения шпильки [8]. Выход воздуха внизу полости расположения шпильки имеется в самой крышке.

Выводы

В рамках исследования предложены конструктивные решения, направленные на предотвращение разгерметизации стыка «крышка – втулка цилиндра», которая возникает вследствие локального перегрева одной из шпилек, обеспечивающих уплотнение газового стыка. Выбор конкретного метода охлаждения «горячей» шпильки остаётся в компетенции разработчика конструкции крышки цилиндра. Установлено, что наиболее надёжного результата позволяет достичь комбинация двух конструктивных мероприятий: внедрение локальной полости охлаждения диаметром 10 мм в зоне перегрева стенки канала и шпильки, а также установка тонкостенного экрана в зазор между шпилькой и стенкой канала.

Список источников

1. Чайнов, Н. Д. Оценка работоспособности и повышение герметичности газового стыка форсированных среднеоборотных дизелей / Н. Д. Чайнов, А. Н. Краснокутский, А. В. Капшуков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 6(687). – С. 51-57. – DOI 10.18698/0536-1044-2017-6-51-57. – EDN YUQQIP.

2. Конструирование двигателей внутреннего сгорания. Учебник / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков. – Москва : Машиностроение, 2011. – 504 с. – ISBN 978-5-94275-575-1. – EDN RAYEDB.
3. Панфилов, Р. В. Повышение работоспособности деталей в форсированных среднеоборотных дизелях, подвергающихся высокому тепловому воздействию / Р. В. Панфилов, Н. Д. Чайнов, А. Н. Краснокутский // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – № 4(46). – EDN LECCNO.
4. Романов, Н. Н. Основы теории теплообмена / Н. Н. Романов, А. А. Кузьмин, Е. Ф. Харитоновна. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2017. – 116 с. – EDN ZAEUDJ.
5. Чайнов, Н. Д. Повышение работоспособности базовых теплонапряженных деталей форсированных среднеоборотных дизелей / Н. Д. Чайнов, А. Н. Краснокутский, Р. В. Панфилов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 7(784). – С. 95-101. – EDN QLICQS.
6. Прокопенко, Н. И. Экспериментальные исследования двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие / Н. И. Прокопенко. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 592 с. – ISBN 978-5-8114-1047-7.
7. Балагин, О. В. Учебно-методическое пособие к выполнению практических работ при изучении дисциплины «Локомотивные энергетические установки»: учебно-методическое пособие / О. В. Балагин, Д. В. Балагин. – Омск: ОмГУПС, 2022. – 32 с.
8. Хорош, А. И. Дизельные двигатели транспортных и технологических машин: учебное пособие / А. И. Хорош, И. А. Хорош. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 704 с. – ISBN 978-5-8114-1278-5.

References

1. Chainov N.D., Krasnokutskii A.N., Kapshukov A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2017, no. 6(687), pp. 51–57, doi 10.18698/0536-1044-2017-6-51-57.
2. Chainov N.D., Ivashchenko N.A., Krasnokutskii A.N., Myagkov L.L. *Konstruirovaniye dvigatelei vnutrennego sgoraniya* (Design of Internal Combustion Engines). Moscow, Mashinostroenie, 2011, 504 p., ISBN 978-5-94275-575-1/
3. Panfilov R.V., Chainov N.D., Krasnokutskii A.N. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*, 2025, no. 4(46).
4. Romanov N.N., Kuzmin A.A., Kharitonova E.F. *Osnovy teorii teploobmena* (Fundamentals of Heat Transfer Theory), Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy universitet Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy, 2017, 116 p.

5. Chainov N.D., Krasnokutskii A.N., Panfilov R.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2025, no. 7(784), pp. 95-101.
6. Prokopenko N.I. *Eksperimentalnye issledovaniya dvigatelei vnutrennego sgoraniya* (Experimental Research of Internal Combustion Engines). Saint Petersburg, Lan', 2022, 592 p., ISBN 978-5-8114-1047-7.
7. Balagin O.V., Balagin D.V. *Uchebno-metodicheskoe posobie k vypolneniyu prakticheskikh rabot pri izuchenii distsipliny «Lokomotivnye energeticheskie ustanovki»* (Educational and Methodological Guide for Practical Training in the Discipline “Locomotive Power Plants”). Omsk, OmGUPS, 2022, 32 p.
8. Khorosh A.I., Khorosh I.A. *Dizelnye dvigateli transportnykh i tekhnologicheskikh mashin* (Diesel Engines of Transport and Technological Machines). 2nd ed. Saint Petersburg, Lan', 2022, 704 p.

Рецензент: В.А. Марков, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки», МГТУ им. Н. Э. Баумана

Информация об авторах

Чайнов Н. Д. – д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва;

Краснокутский А. Н. – доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва;

Панфилов Р. В. – аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Information about the authors

Chainov N. D. – Doctor of Sciences (Technical), professor, BMSTU, Moscow;

Krasnokutsky A. N. – associate professor, BMSTU, Moscow;

Panfilov R. V. – Postgraduate, BMSTU, Moscow.

Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 30.06.2026.

The article was submitted 30.04.2026; approved after reviewing 25.05.2026; accepted for publication 30.06.2026.