

Научная статья  
УДК 621.43.05

## Повышение работоспособности деталей в форсированных среднеоборотных дизелях, подвергающихся высокому тепловому воздействию

Роман Владимирович Панфилов<sup>1</sup>, Николай Дмитриевич Чайнов<sup>2</sup>,  
Андрей Николаевич Краснокутский<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup>pnfltk@yandex.ru

<sup>2</sup>ndchainov@yandex.ru

<sup>3</sup>krasnokutsky07@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается влияние локального перегрева материала в зоне соединения крышки и втулки цилиндра на их напряженно-деформированное состояние и герметичность газового стыка форсированных среднеоборотных дизелей (СОД) с подвесной конструкцией втулки цилиндра. Цель работы – оценить влияние различных вариантов дополнительного локального охлаждения элементов конструкции, образующих газовый стык двигателя, на их теплонапряженность и герметичность стыка. На базе объёмного конечно-элементного анализа в результате проведенного численного эксперимента получены поля температур, деформаций и напряжений элементов рассматриваемого модуля крышка-втулка цилиндра СОД. Приведены рекомендации по повышению эффективности охлаждения зоны газового стыка и повышению его работоспособности в условиях форсирования двигателя.

**Ключевые слова:** среднеоборотный дизель, крышка цилиндра, втулка цилиндра.

**Для цитирования:** Панфилов Р.В., Чайнов Н.Д., Краснокутский А.Н. Повышение работоспособности деталей в форсированных среднеоборотных дизелях, подвергающихся высокому тепловому воздействию // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 4(46).

Original article

## Enhancing the performance of components exposed to high thermal stress in turbocharged medium-speed diesel engines

Roman Vladimirovich Panfilov<sup>1</sup>, Nikolai D. Chainov<sup>2</sup>, Andrey N. Krasnokutsky<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1</sup>pnfltk@yandex.ru

<sup>2</sup>ndchainov@yandex.ru

<sup>3</sup>krasnokutsky07@mail.ru

**Abstract.** The study examines the influence of local overheating in the joint area between the cylinder cover and the cylinder liner on their stress-strain state and the gas-joint tightness of forced medium-speed diesel engines (MSDEs) with a suspended cylinder liner design. The aim of the work is to evaluate the effect of various additional local cooling configurations applied to the structural elements forming the engine's gas joint on their thermal loading and sealing performance. Based on a three-dimensional finite element analysis, the numerical investigation produced temperature, deformation, and stress fields for the components of the considered cylinder cover–liner module of an MSDE. Recommendations are provided to improve the cooling efficiency of the gas-joint zone and enhance its reliability under engine boosting (forced operation).

**Keywords:** medium-speed diesel engine, cylinder head, cylinder sleeve.

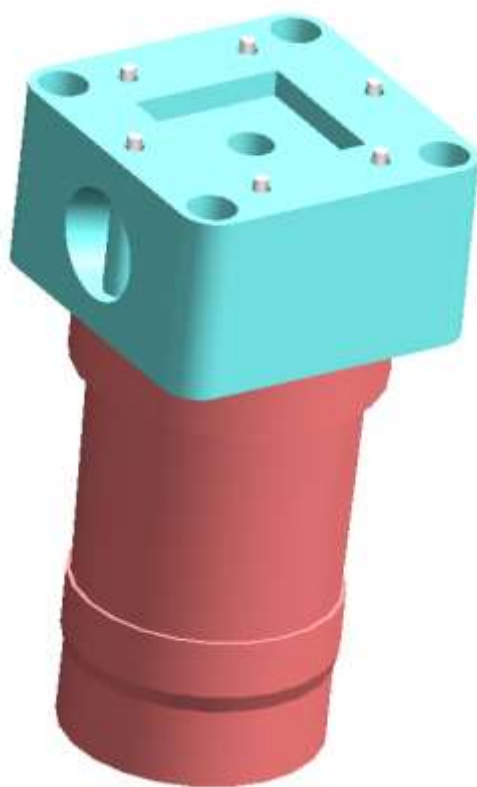
**For citation:** Panfilov R.V., Chainov N.D., Krasnokutsky A.N., Varshavsky A.A. Enhancing the performance of components exposed to high thermal stress in turbocharged medium-speed diesel engines. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 4(46).

**Введение.** Крышки цилиндров относятся к наиболее сложным по конструкции и вместе с этим теплонапряжённым деталям современных 4-тактных СОД. В полной мере сказанное относится к крышке цилиндров отечественных дизелей типоразмерного мощностного ряда семейства Д49 Коломенского завода, созданного на базовой размерности ЧН26/26. В рамках указанного типоразмерного ряда создано более 60 модификаций двигателей, включая в первую очередь тепловозную модификацию, а также судовую и др. При этом двигатели типоразмерного ряда типа ЧН26/26 созданы на базе модульных конструкций с широкой унификацией основных модулей, например, цилиндровых комплектов.

Модульность конструкции вместе с унификацией обеспечивает при снижении себестоимости повышение качества конечного продукта и сокращение времени создания новых модификаций двигателя, что особенно важно в условиях постоянного форсирования СОД по параметрам рабочего процесса (среднее эффективное давление, максимальное давление цикла).

В связи с этим, представляет практический интерес рассмотреть возможности повышения прочностной надёжности цилиндрического комплекта двигателя с подвесной втулкой, включая обеспечение герметичности газового

стыка, образованного крышкой, втулкой цилиндра и прокладкой, при форсировании двигателя. Особенностью цилиндрического комплекта двигателей с подвесной втулкой является то, что газовый стык уплотняется не силовыми шпильками, расположенными по углам крышки цилиндра, а особыми, в частности, шестью шпильками меньшего диаметра (рис. 1), расположенными по окружности и ввернутыми в бурт подвесной втулки цилиндра. Эти шпильки проходят в колодцах внутри крышки цилиндра и одна из них располагается в зоне выпускного газового канала, в связи с чем значительно нагревается. При форсировании двигателя, в связи с нагревом шпильки, происходит нарушение герметичности газового стыка в районе её расположения [1-3].



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

**Основная часть.** В условиях реального ДВС шпилька, расположенная вблизи выпускного канала, испытывает нагрев за счёт теплового излучения, конвекционного теплообмена и частичного контакта с металлом крышки, прогретым от камеры сгорания. Температура шпильки нередко достигает

значений, при которых материал теряет часть упругих свойств, а резьбовое соединение изменяет начальное напряжённое состояние [4].

Такая ситуация приводит к двум эффектам:

1. **Ослабление предварительного натяга шпильного соединения.**

Вследствие термического расширения шпильки и пластических деформаций при перегреве усилие прижима падает, прокладка теряет способность обеспечивать плотность.

2. **Локальное перераспределение напряжений в массиве крышки.** В зоне перегрева возникают дополнительные температурные градиенты, которые увеличивают суммарные термические напряжения. Это снижает стойкость крышки к циклическим нагрузкам и может инициировать микротрещины.

В рамках расчёта НДС в ANSYS или аналогичном программном комплексе обычно применяется двухэтапный подход:

1. **Тепловой анализ:** получение неравномерного поля температур в теле крышки и шпильки.

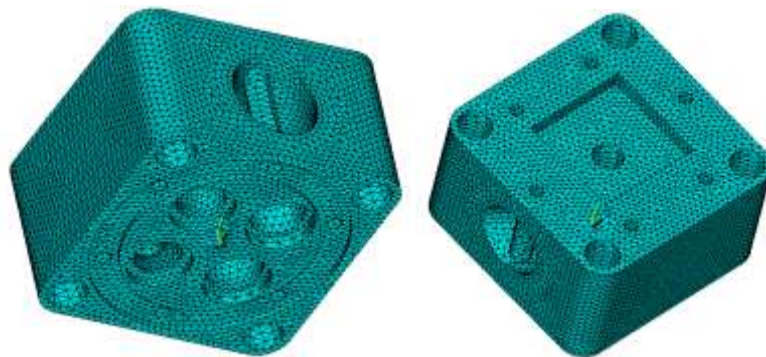
2. **Прочностной анализ:** расчёт напряжений и деформаций с учётом температуры, контактных условий и предварительного натяга.

Особое внимание уделяется контактными поверхностям и моделированию резьбы – даже упрощённая модель натяга шпильки позволяет адекватно оценить перераспределение напряжений при перегреве. На рисунке 2 показана «твердотельная» модель сборки втулки с крышкой цилиндра и локальной полостью охлаждения диаметром 17 мм.

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



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



*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.

Для оценки работоспособности газового стыка форсированного среднеоборотного дизеля был выполнен конечно-элементный анализ напряжённо-деформированного состояния узла «крышка цилиндра – втулка цилиндра». Предварительно проведённый тепловой расчёт обеспечил

распределения температур в элементах конструкции при форсированных режимах работы двигателя, которые были импортированы в статическую постановку и учтены как температурные поля, вызывающие собственные деформации материала [5].

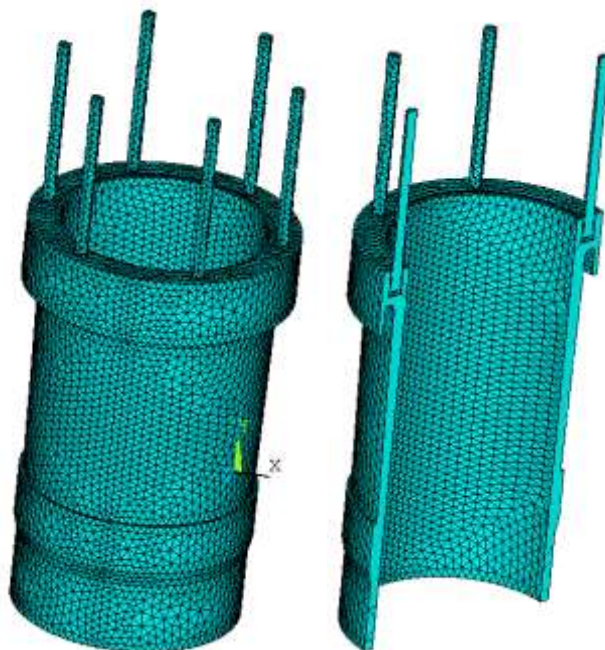


Рис. 4. Конечно-элементная модель втулки с шпильками

В работе рассматриваются два конструктивных варианта цилиндрической крышки:

1. **Базовая крышка без локальной полости охлаждения.**
2. **Крышка с дополнительной локальной охлаждающей полостью.**

Оба варианта были смоделированы в идентичных условиях нагружения и теплового воздействия, что позволило корректно оценить влияние локальной модификации охлаждения на напряжения и деформации узла.

### Методика расчёта

Расчётная модель включала объёмные элементы цилиндрической крышки, втулки, участка блока цилиндров и крепёжных шпилек с заданием реальных характеристик материалов и контактного взаимодействия в зоне газового стыка. На первой стадии были определены минимальные напряжения,

возникающие в узле только от предварительной затяжки шпилек при отсутствии давления сгорания (условно – режим «не работает»). На второй стадии в расчёт добавлялось давление сгорания **160 бар**, равномерно приложенное на огневую поверхность крышки и верхнюю кромку втулки [6].

Контактные пары в зоне газового стыка моделировались с учётом нелинейной деформации и возможного частичного раскрытия контакта в нагруженном состоянии. Это позволило корректно оценить изменение герметичности стыка при различных уровнях нагрузки и температур [7-8].

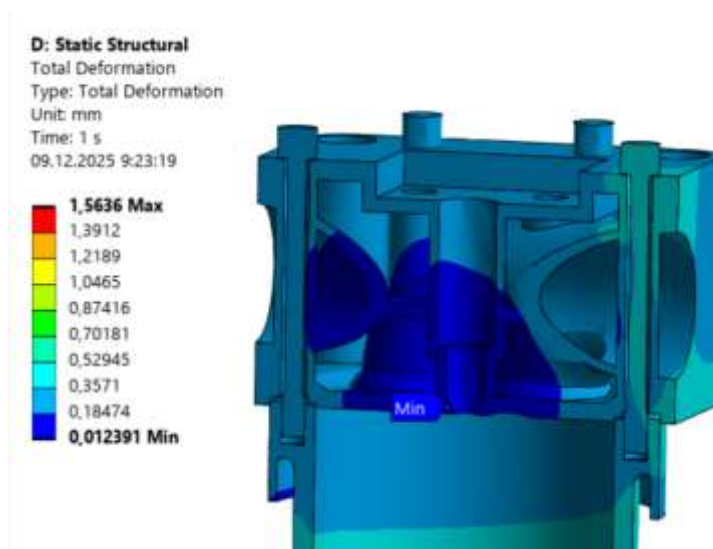


Рис. 5. Деформации без локальной полости охлаждения при давлении сгорания 160 бар

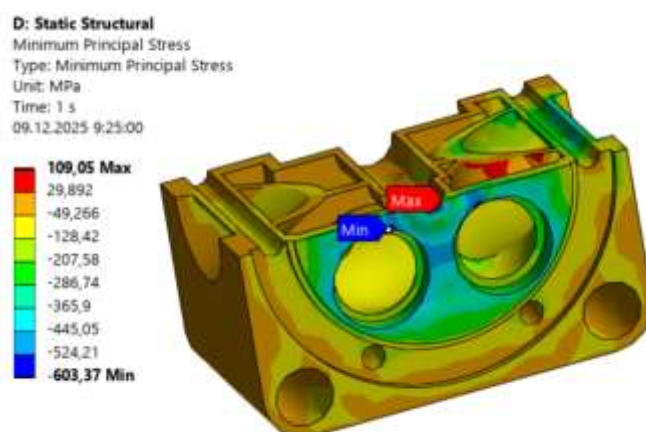


Рис. 6. Минимальные давления без локальной полости при давлении сгорания 160 бар

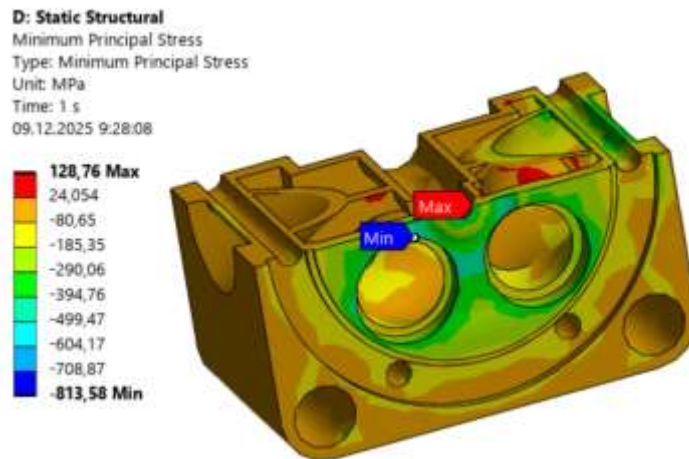


Рис. 7. Минимальные давления без локальной полости при давлении сгорания 0 бар

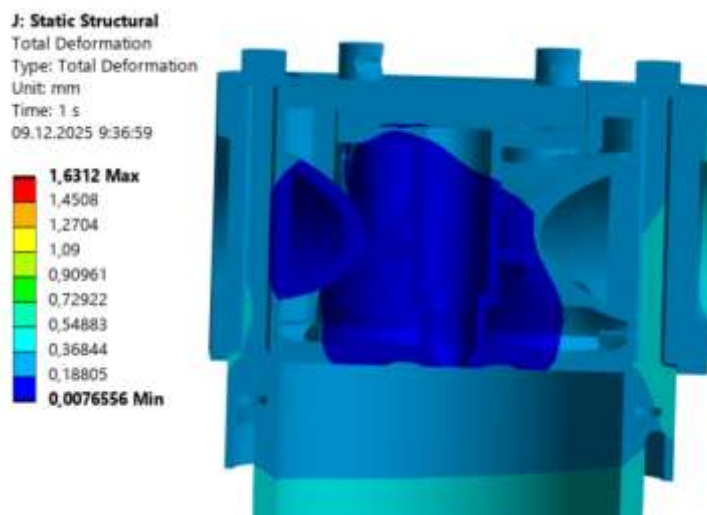


Рис. 8. Деформации с локальной полостью охлаждения при давлении сгорания 160 бар

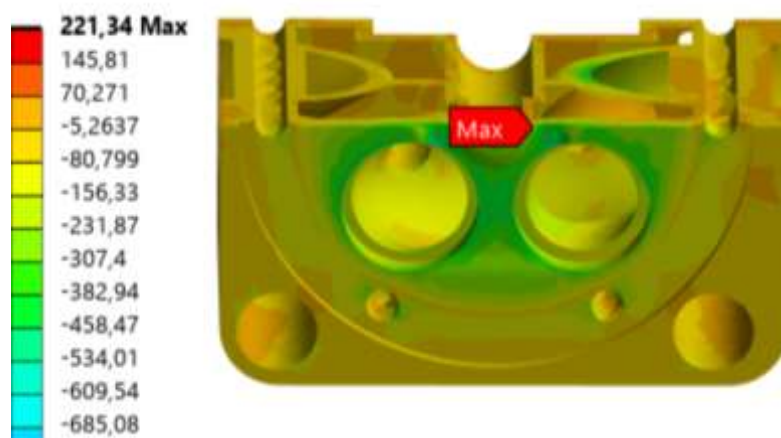


Рис. 9. Минимальные давления с локальной полостью охлаждения при давлении сгорания 160 бар

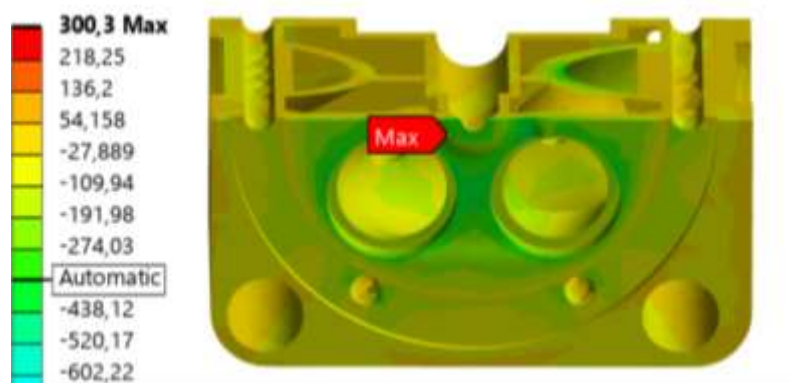


Рис. 10. Минимальные давления с локальной полостью охлаждения при давлении сгорания 0 бар

### Результаты расчёта деформаций

Поля деформаций (рис. 5, 8) показали, что при отсутствии локальной охлаждающей полости максимальные температурные деформации в области крепёжной шпильки увеличиваются на 12–18%, что приводит к перераспределению контактных давлений и локальному ослаблению прижатия втулки к крышке. Вариант крышки с локальной полостью охлаждения демонстрирует более равномерный температурный градиент и, как следствие, уменьшение вертикальных перемещений в зоне перегрева на 0,03–0,05 мм по сравнению с базовой конфигурацией.

### Результаты расчёта напряжений

На стадии предварительной затяжки шпилек минимальные эквивалентные напряжения в узле формируются в зоне кольцевого контакта крышки и втулки и составляют (рис. 7, 10):

- **без локальной полости:** 45–55 МПа
- **с локальной полостью:** 38–47 МПа

Уменьшение напряжений в модифицированном варианте объясняется повышенной жёсткостью охлаждаемого участка и более равномерным распределением усилия затяжки.

При приложении давления сгорания **160 бар** максимальные рабочие

напряжения возрастают до (рис. 6, 9):

- **без локальной полости:** 180–205 Мпа.
- **с локальной полостью:** 155–175 Мпа.

Отмечается, что внедрение локальной охлаждающей полости снижает уровень напряжений в наиболее нагруженной зоне шпильки и огневого пояса крышки до 15–20%, что существенно повышает запас прочности и снижает риски разведения контактных поверхностей.

**Заключение.** Предложено конструктивное решение для предотвращения разгерметизации стыка «крышка – гильза цилиндра», возникающей из-за неравномерного нагрева шпилек. Введение локального охлаждающего канала позволяет существенно снизить температуру наиболее нагруженной шпильки и стабилизировать усилие затяжки. Планируемое моделирование в ANSYS позволит количественно оценить эффективность различных охлаждающих сред и определить оптимальный вариант конструкции. Проведённый анализ показывает, что локальная полость охлаждения эффективно снижает тепловую нагрузку в зоне крепёжных элементов и обеспечивает более равномерное распределение напряжений в газовом стыке. Это способствует сохранению герметичности соединения как в состоянии предварительной затяжки, так и при воздействии высокого давления газов сгорания в форсированном режиме работы дизеля.

### 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. 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.
4. Рыжов, В. А. Четыре поколения двигателей типоразмерного ряда Д49 / В. А. Рыжов // Двигателестроение. – 2020. – № 4(282). – С. 35-40. – EDN RFAGBS.
5. Гаврюшин, С. С. Сопротивление материалов и конструкций : Учебник / С. С. Гаврюшин, Н. В. Валишвили. – 1-е изд. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 1 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-9916-8247-3. – EDN HNZIIL.
6. Кулагин, А. В. Модель напряженно-деформированного состояния крышки цилиндра дизельного двигателя / А. В. Кулагин // Развитие энергетики водного транспорта, информационных и энергосберегающих технологий : Сборник материалов II Всероссийской конференции, Казань, 09–10 декабря 2024 года. – Казань: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. – С. 35-39. – EDN GLUMFU.
7. Рябко, Е. В. Анализ механизма разрушения крышек цилиндров и методы повышения их долговечности / Е. В. Рябко // Транспорт: наука, образование, производство ("Транспорт-2024") : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Воронеж, 24–26 апреля 2024 года. – Воронеж: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 221-226. – EDN UJAFFX.
8. 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.

### References

1. Chainov N.D., Krasnokutsky A.N., Kapshukov A.V. *Izvestiya vyshih uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2017, no. 6(687), pp. 51-57, doi 10.18698/0536-1044-2017-6-51-57.
2. Chainov N.D., Krasnokutsky A.N., Myagkov L.L. kn. *Konstruirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Design of combustion engines), Moscow, Mashinostroenie, 2011, 504 p. ISBN 978-5-94275-575-1.
3. Romanov N.N., Kuz'min A.A., Haritonova E.F. *Osnovy teorii teploobmena* (Fundamentals of heat transfer theory), Sankt-Peterburg, Sankt-Peterburgskij universitet

Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situaciyam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij, 2017, 116 p.

4. Ryzhov V.A. *Dvigatelsestroenie*, 2020, no. 4(282), pp. 35-40.
5. Gavrushin S.S., Valiashvili N.V. *Soprotivleniye materialov i konstruktsiy* (Strength of Materials and Structures), Moscow, Izdatel'stvo Yurayt, 2020, 1 p. ISBN 978-5-9916-8247-3.
6. Kulagin, A. V. *Razvitie energetiki vodnogo transporta, informacionnyh i energosberegayushchih tekhnologij*, Sbornik materialov, Kazan', Volzhskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta, 2024, pp. 35-39.
7. Ryabko E.V. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo* ("Transport-2024"), Sbornik statej, Voronezh, Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2024, pp. 221-226.
8. Chainov N.D., Krasnokutsky A.N., Panfilov R.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2025, no. 7(784), pp. 95-101.

Рецензент: Г.Г. Тер-Мкртчян, д-р техн. наук, доц., МАДИ

### *Информация об авторах*

**Панфилов Роман Владимирович**, аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Чайнов Николай Дмитриевич**, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Краснокутский Андрей Николаевич**, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

### *Information about the authors*

**Panfilov Roman V.**, postgraduate, BMSTU.

**Chainov Nikolai D.**, Doctor of Sciences (Technical), professor, BMSTU.

**Krasnokutsky Andrey N.**, associate professor, BMSTU.

*Статья поступила в редакцию 10.12.2025; одобрена после рецензирования 11.12.2025; принята к публикации 26.12.2025.*

*The article was submitted 10.12.2025; approved after reviewing 11.12.2025; accepted for publication 26.12.2025.*