

Использование частичной теплоизоляции камеры сгорания с целью повышения эксплуатационных характеристик дизельных двигателей, применяемых в горнодобывающей промышленности

A.M. Балашов ✉

Новосибирский государственный педагогический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉ Ltha1@yandex.ru

Резюме: В настоящее время дизельные двигатели остаются одними из наиболее востребованных силовых агрегатов благодаря своей высокой топливной экономичности и надежности. Однако существует ряд проблем, связанных с тепловыми потерями, снижающими общий КПД двигателей внутреннего сгорания. В данной статье рассмотрено и проанализировано влияние частичной теплоизоляции камеры сгорания на процессы сгорания топлива и основные характеристики дизельных двигателей. На основе проведенного анализа можно заключить, что основные достоинства двигателей с частичной теплоизоляцией камеры сгорания – это улучшение процессов сгорания топлива, повышение топливной экономичности и улучшение пусковых качеств. Однако их широкое распространение на данный момент сдерживается вследствие большей стоимости и невысокой надежности материалов теплоизоляции, а также недостаточностью исследования рабочих процессов и влияния на них различных конструктивных, режимных и регулировочных факторов. Автором сделаны выводы о перспективах практического использования полученных рекомендаций и возможных направлениях дальнейших исследований.

Ключевые слова: теплоизоляция, дизельный двигатель, поршень, процессы сгорания, тепловые потери

Для цитирования: Балашов А.М. Использование частичной теплоизоляции камеры сгорания с целью повышения эксплуатационных характеристик дизельных двигателей, применяемых в горнодобывающей промышленности. *Горная промышленность*. 2025;(4):130–133. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-130-133>

The use of partial thermal insulation of the combustion chamber in order to improve the performance of diesel engines used in the mining industry

A.M. Balashov ✉

Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russian Federation

✉ Ltha1@yandex.ru

Abstract: Diesel engines currently remain one of the most sought-after powertrains due to their high fuel efficiency and reliability. However, there is a number of problems associated with heat losses that reduce the overall efficiency of internal combustion engines. This article examines and analyzes the effect of partial thermal insulation of the combustion chamber on the fuel combustion processes and the main characteristics of diesel engines. Based on the analysis performed, it can be concluded that the main advantages of the engines with partial thermal insulation of the combustion chamber are enhancement of the fuel combustion processes, increased fuel efficiency and improved engine start-up properties. However, their widespread use is currently restricted by the high cost and low reliability of thermal insulation materials, as well as insufficient research into their operating processes and the influence of various design, operational and regulatory factors. The author makes conclusions on the prospects for practical application of the recommendations provided and possible directions for further research.

Keywords: thermal insulation, diesel engine, piston, combustion processes, heat losses

For citation: Balashov A.M. The use of partial thermal insulation of the combustion chamber in order to improve the performance of diesel engines used in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):130–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-130-133>

Введение

В настоящее время дизельные двигатели остаются одними из наиболее востребованных силовых агрегатов благодаря своей высокой топливной экономичности и надежности. Данные двигатели широко применяются для привода горнодобывающей, дорожно-строительной техники и различного технологического оборудования. Однако существует ряд проблем, связанных с тепловыми потерями, снижающими общий КПД двигателей внутреннего сгорания. По данным работы [1] около 25% тепловой энергии, выделяющейся при сгорании топлива в дизельном двигателе, теряется в системе охлаждения. Из-за таких значительных тепловых потерь снижается КПД и увеличивается удельный расход топлива, а также требуется наличие развитой системы охлаждения, на функционирование которой затрачивается определенная мощность. Следовательно, резервы снижения тепловых потерь и повышения КПД у современных дизельных двигателей имеются.

В связи с этим в двигателестроении рассматривается множество различных способов повышения эффективности ДВС [2]. Например, ведущими моторостроительными компаниями многих стран мира проводятся исследовательские работы по уменьшению отвода тепла в охлаждающую жидкость (систему охлаждения). Одним из перспективных направлений повышения эффективности является использование теплоизоляционных материалов внутри камеры сгорания дизельных моторов. Такие возможности появились в последнее время благодаря успехам в создании новых конструкционных и теплоизоляционных материалов, в том числе и на керамической основе. В связи с вышеизложенным проблемы дальнейшего совершенствования дизельных двигателей в настоящее время являются весьма актуальными.

Результаты

Одним из перспективных направлений улучшения показателей топливной экономичности дизелей является применение частичной теплоизоляции камеры сгорания, реализация которой позволяет улучшить рабочий процесс и тем самым повысить эффективные и экологические показатели двигателя. В связи с широким распространением дизельных двигателей успешное решение данных задач может дать существенный эффект в сфере ресурсосбережения и повышения технико-экономической эффективности.

Частичная теплоизоляция предполагает нанесение специальных покрытий или установку термоизоляционных вставок непосредственно на поверхности камеры сгорания – днище поршня, стенки цилиндра и головку блока цилиндров. Основная суть данного метода состоит в следующем: традиционные дизельные двигатели характеризуются значительным теплообменом между горячими продуктами сгорания и стенками камеры сгорания, и этот теплообмен приводит к потерям тепла, снижению температуры и давления в конце процесса сгорания, а также к ухудшению эффективности [3]. Частичная теплоизоляция камеры сгорания направлена на уменьшение этих потерь, с сохранением при этом возможности эффективного охлаждения деталей двигателя. Основная цель такой модификации заключается в снижении потерь тепла от рабочего тела в охлаждающую жидкость и окружающую среду, что позволяет повысить эффективность преобразования тепловой энергии топлива в механическую работу.

Для теплоизоляции камеры сгорания существуют различные способы, в частности, использование различных

теплоизолирующих накладок. Например, в работе [4] для теплоизоляции центральной части днища поршня применяется керамическая накладка, которая изготовлена в виде перевернутого конуса. При этом избыточное напряжение, действующее на керамическую накладку, частично поглощается слоем волокнистого металла, находящегося между вкладышем и поршнем [4].

Известен также способ теплоизоляции днища поршня посредством механического соединения между керамическим вкладышем и поршнем [5]. Поршни большинства дизельных двигателей в настоящее время изготавливают из алюминиевых сплавов. В таком случае механическое соединение осуществляется заполнением пор, имеющихся в керамической части, материалом поршня, происходящим в процессе формовки с подпрессовкой. Несмотря на привлекательность вышеперечисленных способов изготовление таких поршней имеет значительную трудоемкость [6]. Известны и другие способы теплоизоляции камер сгорания ДВС.

Помимо требуемых теплофизических характеристик, теплоизоляционные материалы должны обладать достаточной прочностью при рабочих температурах, жаростойкостью, износостойчивостью, долговечностью, хорошей адгезией с основным материалом и невысоким коэффициентом линейного расширения. Кроме того, материалы должны быть устойчивы к химическим воздействиям продуктов сгорания топлива, а также сохранять свои свойства при многократных циклах нагрева и охлаждения. Полностью всем вышеперечисленным требованиям не может удовлетворить ни один из существующих материалов, поэтому необходим подбор материала с наиболее оптимальным сочетанием свойств и характеристик.

В целом, использование частичной теплоизоляции камеры сгорания в дизельных двигателях – это перспективный подход, направленный на улучшение их технико-экономических параметров. Основные преимущества частичной теплоизоляции камеры сгорания:

1. Снижение тепловых потерь в стенки: изоляция позволяет уменьшить количество тепла, уходящего через стенки камеры сгорания (поршень, головка блока цилиндров, цилиндр), тем самым повышая термический КПД двигателя.
2. Увеличение температуры газов в цилиндре: более высокая температура газов способствует болееному сгоранию топлива и увеличению давления в цилиндре, что приводит к увеличению мощности и снижению удельного расхода топлива.
3. Снижение выбросов вредных веществ: более полное сгорание может способствовать снижению выбросов оксида углерода CO, углеводородов и сажи. В то же время из-за большей температуры в цилиндре может увеличиваться количество выбросов оксидов азота NOx, которые тоже относятся к вредным загрязняющим веществам.
4. Ускорение прогрева двигателя: в условиях холодного запуска теплоизолированные участки камеры сгорания помогут быстрее достичь рабочей температуры, что снижает износ и выбросы на ранних этапах работы.
5. Возможность использования дизельных топлив с более низким цетановым числом: повышенная температура в цилиндре может позволить использовать топливо более низкого качества, что также будет способствовать снижению затрат на топливо.

Таблица 1

Эффективные показатели исследуемых дизельных двигателей на различных режимах работы

Table 1

Effective indicators of the studied diesel engines at different operating modes

Частота вращения коленчатого вала n , об/мин	Дизель 1Ч 12/9,6 (базовый вариант)			Дизель 1Ч 12/9,6 (вариант с теплоизолирующей втулкой)		
	Эффективная мощность N_e	Коэффициент избытка воздуха α_b	Удельный расход топлива g_e	Эффективная мощность N_e	Коэффициент избытка воздуха α_b	Удельный расход топлива g_e
1500	4,73	2,24	209	4,85	1,76	204
2800	8,0	1,5	230	8,23	1,36	224

Источник: [7, табл. 1].

Source: [7, Table 1].

Наличие сильно нагретых поверхностей в камере сгорания способствует повышению температуры воздушного заряда в конце такта сжатия и, следовательно, сокращению периода задержки самовоспламенения топлива. Это, с одной стороны, способствует улучшению пусковых качеств дизеля (что очень важно для двигателей, используемых в условиях Сибири и Крайнего Севера, где находится большое число российских горнодобывающих предприятий), а с другой стороны, для достижения большей эффективности сгорания топлива требует изменения параметров рабочего процесса двигателя. К параметрам, влияющим на процесс сгорания топлива, относятся угол опережения подачи топлива, давление впрыска, тонкость распыла топлива, конструктивные особенности форсунок и другие. Эти особенности необходимо учитывать при исследовании характеристик и оптимизации параметров конструкции таких ДВС.

Несмотря на очевидные преимущества внедрение теплоизоляции сопряжено с рядом сложностей и рисков:

1. Высокий уровень сложности производства и установки качественных теплоизолирующих элементов требует значительных финансовых вложений и увеличивает трудоемкость изготовления.
2. Необходимость тщательной проверки совместимости используемых материалов с материалами конструкции двигателя.
3. Сложность обеспечения надежной адгезии: обеспечение хорошего сцепления теплоизоляционного материала с металлической основой является сложной задачей, особенно при действии высоких температур и вибрациях.
4. Возникновение локальных перегревов и деформаций отдельных элементов, что может привести к ускоренному износу и выходу из строя узлов и механизмов.
5. Необходимость оптимизации геометрии и расположения теплоизоляции: эффективность теплоизоляции зависит от геометрии и расположения изоляционных материалов. Требуется тщательная оптимизация.
6. Сложность выбора оптимального материала: подбор материала с учетом удовлетворения всем основным требованиям и условиям эксплуатации является сложной инженерной задачей.
7. Потенциальное увеличение выбросов оксидов азота NO_x : более высокая температура в цилиндрах двигателя может способствовать образованию оксидов азота NO_x , которые являются вредными загрязняющими веществами. В этом случае возникает необходимость введения дополнительных мер для снижения выбросов NO_x , что ведет к усложнению конструкции двигателя.

В качестве подтверждения вышеизложенного можно привести результаты экспериментальных исследований

особенностей рабочего процесса базового двигателя и его модификации с установленными керамическими вставками на поршне и гильзе цилиндра для частичной изоляции камеры сгорания, проведенные авторами работы [7]. Исследования произведены на специально изготовленном одноцилиндровом четырехтактном дизеле 1Ч 12/9,6, поршневая группа которого была заимствована у тракторного двигателя СМД-14. Сравнительные результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы сравнительных экспериментальных исследований, использование частичной теплоизоляции обеспечивает на номинальной частоте вращения повышение эффективной мощности на 2,9% и снижение удельного расхода топлива на 2,6%. Аналогичная картина наблюдается и при работе на частичных режимах, например, при частоте вращения $n = 1500$ об/мин это тоже способствует улучшению данных показателей и позволяет повысить эффективную мощность двигателя почти на 3% и снизить удельный расход топлива тоже на 2,6%.

Следовательно, повышение температуры газов в цилиндре, вызванное теплоизолирующей вставкой, повышает полноту сгорания топлива, тем самым увеличивая эффективный КПД двигателя [7]. В то же время данные результаты достигаются только при определенных регулировочных, конструктивных и других параметрах. Поэтому текущие инженерные подходы должны быть нацелены на поиск оптимальных значений для конструктивных, режимных и регулировочных параметров двигателей с теплоизоляцией камеры сгорания.

Кроме того, согласно данным табл. 1 в варианте двигателя с теплоизоляцией происходит снижение коэффициента избытка воздуха, и особенно заметно это на частичных режимах работы. Это объясняется небольшим повышением температуры на такте впуска из-за наличия более горячих поверхностей в камере сгорания, что несколько ухудшает наполнение цилиндра воздухом.

Значительные величины удельного расхода топлива (см. табл. 1) для базового варианта дизеля и дизеля с теплоизоляцией объясняются тем, что для экспериментальных исследований использовался одноцилиндровый вариант дизельного двигателя, поршневая группа которого имеет разделенную (вихревую) камеру сгорания [8]. При этом наличие дополнительной камеры приводит к добавочным потерям при перетекании воздуха из дополнительной камеры сгорания в основную и при истечении продуктов сгорания. Возникающие при этом гидравлические и тепловые потери повышают удельный расход топлива на 15...20% [9]. В связи с этим в настоящее время более широкое распространение получили, в том числе и в горнодобывающей промышленности, дизельные двигатели с полуразделенной камерой сгорания, которые характеризуются меньшим удельным расходом топлива. Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку оптимальных

конструктивных решений по частичной теплоизоляции, а также на изучение влияния ее на технико-экономические показатели дизельных двигателей такого типа.

Заключение

Частичная теплоизоляция камеры сгорания дизельных двигателей – это многообещающий метод повышения их технико-экономических характеристик. Однако его внедрение требует комплексного подхода, учитывающего выбор подходящих материалов, обеспечение надежности конструкции, оптимизацию параметров и управление выбросами. Развитие новых материалов, совершенствование технологий нанесения покрытий и оптимизация конструкций позволят в будущем более широко применять этот подход.

На основе проведенного анализа можно заключить, что

основные достоинства двигателей с частичной теплоизоляцией камеры сгорания – это улучшение процессов сгорания топлива, повышение топливной экономичности и улучшение пусковых качеств. Однако их широкое распространение на данный момент сдерживается вследствие большей стоимости и невысокой надежности материалов теплоизоляции, а также недостаточностью исследования рабочих процессов и влияния на них различных конструктивных, режимных и регулировочных факторов. В связи с перспективностью данного направления совершенствования ДВС дальнейшее направление работы может быть связано с экспериментальными исследованиями характеристик современных дизельных двигателей с полуразделенными камерами сгорания при оснащении их теплоизолирующими элементами.

Список литературы / References

1. Закалин Е.Н., Русин А.П. Улучшение процесса сгорания топливной смеси в дизеле с ограниченным теплоотводом. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2009;(S1):130–134.
Zakalin E.N., Rusin A.P. Improvement of process of combustion of the fuel mix in the diesel engine with the limited heat-conducting pat. *Vestnik of Don State Technical University*. 2009;(S1):130–134. (In Russ.)
2. Фомин В.М. Пути совершенствования эколого-экономических показателей дизелей. В кн.: Тер-Мкртичян Г.Г. (ред.) *Автомобильные и тракторные двигатели: межвуз. сб. науч. тр.* Вып. 16. М.: Азбука; 1999. С. 23.
3. Балашов А.М. Влияние частичной теплоизоляции камеры сгорания на основные технико-экономические параметры дизельного двигателя. *Тенденции развития науки и образования*. 2021;(74-8):152–154. <https://doi.org/10.18411/lj-06-2021-331>
Balashov A.M. The influence of partial thermal insulation of the combustion chamber on the main technical and economic parameters of a diesel engine. *Tendentsii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya*. 2021;(74-8):152–154. (In Russ.) <https://doi.org/10.18411/lj-06-2021-331>
4. Mitchell H.R., Rice H.H. *Ceramic insulated engine pistons*. United States Patent No. US4245611A. Jan. 20, 1981. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4245611A/en> (accessed: 23.02.2025).
5. Mahrus D., Afonso A. *Piston*. United States Patent No. US4735128A. Apr. 5, 1988. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4735128A/en> (accessed: 23.02.2025).
6. Меркулов С.Б. Способ теплоизоляции рабочей поверхности поршня двигателя внутреннего сгорания. Патент Российской Федерации №RU2054129C1. 13 июня 1991. Режим доступа <https://patents.google.com/patent/RU2054129C1/ru> (дата обращения: 23.02.2025).
7. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А., Кадыров С.М., Арипджанов М.М. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2011;(4):83–102.
Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelentsov A.A., Kadyrov S.M., Aripdzhanov M.M. Computational and experimental study of influence of piston's and sleeve's thermal insulation on formation of nitrogen oxides in combustion products of high-speed diesel. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2011;(4):83–102. (In Russ.)
8. Раниев А.В. *Двигатели внутреннего сгорания строительных и дорожных машин*. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа; 1977. 352 с.
9. Кавтарадзе Р.З. *Теория поршневых двигателей: специальные главы*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2008. 720 с.

Информация об авторе

Балашов Алексей Михайлович – кандидат экономических наук, доцент кафедры информационных систем и цифрового образования, Новосибирский государственный педагогический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4264-2592>; e-mail: Ltha1@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.05.2025
Поступила после рецензирования: 10.06.2025
Принята к публикации: 17.06.2025

Information about the author

Aleksey M. Balashov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department Information Systems and Digital Education, Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4264-2592>; e-mail: Ltha1@yandex.ru

Article info

Received: 22.05.2025
Revised: 10.06.2025
Accepted: 17.06.2025