

УДК 621.43.019.8:629.5.03
EDN SIHACN

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА ТОПЛИВА И ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗНОС ВЫПУСКНЫХ КЛАПАНОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

К.С. Мочалин, канд. техн. наук, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099 Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: mochalin@nsawt.ru

Д.С. Тельцов, ассистент кафедры, Сибирский государственный университетского водного транспорта, 630099 Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: telcov.dmitrii@mail.ru

А.А. Приваленко, доцент, Сибирский государственный университетского водного транспорта, 630099 Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: a.a.privalenko@nsawt.ru

Е.О. Ольховик, д-р техн. наук, доцент, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

Проведено комплексное экспериментальное исследование износа выпускных клапанов судовых дизельных двигателей при использовании различных видов топлива и защитных жаростойких покрытий. Работа сочетает натурные испытания на судах проекта ОТА-900 и лабораторные эксперименты на двигателе 6ЧН 18/22 в контролируемых условиях.

Методология включала сравнительный анализ дефектов клапанов после последовательных циклов эксплуатации на тяжелом мазуте (HFO), HFO с магниевыми присадками и легком дистиллятном топливе (MGO). Параллельно проводились лабораторные испытания по оригинальной схеме, исключающей влияние накопленных повреждений.

Результаты выявили существенную зависимость интенсивности износа от вида топлива. Наибольшая деградация наблюдалась при работе на HFO без присадок: язвенная коррозия, абразивный износ 120 — 150 мкм за 200 моточасов. Применение магниевых присадок снизило износ на 35 — 40 %, а переход на MGO — на 70 — 75 %. Защитные покрытия продемонстрировали стабильную эффективность, уменьшая износ приблизительно на 20 % независимо от типа топлива.

На основе экспериментальных данных разработаны концептуальные требования к методике ускоренных коррозионно-эрозийных испытаний, позволяющей количественно разделить вклад химической коррозии и механической эрозии. Показана перспективность комплексного подхода, сочетающего современные топлива, защитные покрытия и присадки для значительного увеличения ресурса выпускных клапанов.

Ключевые слова: выпускной клапан, судовой дизель, тяжелое топливо, защитные покрытия, коррозия, эрозия, статистическое планирование эксперимента.

Для цитирования: Мочалин К.С. Исследование влияния вида топлива и защитных покрытий на износ выпускных клапанов судовых дизелей / К.С. Мочалин, Д.С. Тельцов, А.А. Приваленко, Е.О. Ольховик // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 81. — С. 143 — 151. — EDN SIHACN.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF FUEL TYPE AND PROTECTIVE COATINGS ON THE WEAR OF MARINE DIESEL ENGINE EXHAUST VALVES

K.S. Mochalin, PhD, Siberian State University of Water Transport, 630099 Russia, Novosibirsk, Shchetinkina ul., 33, e-mail: mochalin@nsawt.ru

D.S. Teltsov, Assistant Professor, Siberian State University of Water Transport, 630099 Russia, Novosibirsk, Shchetinkina ul., 33, e-mail: telcov.dmitrii@mail.ru

A.A. Privalenko, Associate Professor, Siberian State University of Water Transport, 630099 Russia, Novosibirsk, Shchetinkina ul., 33, e-mail: a.a.privalenko@nsawt.ru

E.O. Olkhovik, DSc, Associate Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

A comprehensive experimental study of the wear of marine diesel engine exhaust valves using various types of fuel and protective heat-resistant coatings has been conducted. The work combines field tests on OTA-900 project vessels and laboratory experiments on a 6ChN 18/22 engine under controlled conditions.

The methodology involved a comparative analysis of valve defects after successive operating cycles on heavy fuel oil (HFO), HFO with magnesium additives, and marine gas oil (MGO). Laboratory tests were conducted in parallel using an original scheme that eliminated the influence of accumulated damage.

The results revealed a significant dependence of wear intensity on the type of fuel. The greatest degradation was observed when operating on HFO without additives — pitting corrosion, abrasive wear of 120 — 150 µm over 200 operating hours. The use of magnesium additives reduced wear by 35 — 40 %, while switching to MGO reduced it by 70 — 75 %. Protective coatings demonstrated consistent effectiveness, reducing wear by approximately 20 % regardless of the fuel type.

Based on the experimental data, conceptual requirements for a methodology of accelerated corrosion-erosion testing have been developed, allowing for the quantitative separation of the contributions of chemical corrosion and mechanical erosion. The promise of an integrated approach combining modern fuels, protective coatings, and additives for significantly increasing the service life of exhaust valves is shown.

Keywords: *exhaust valve, marine diesel engine, heavy fuel oil, protective coatings, corrosion, erosion, design of experiments.*

For citation: Mochalin K.S., Teltsov D.S., Privalenko A.A., Olkhovik E.O. Investigation of the influence of fuel type and protective coatings on the wear of marine diesel engine exhaust valves. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 81. P. 143 — 151. EDN SIHACN. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Выпускной клапан судового дизельного двигателя относится к числу наиболее нагруженных элементов газораспределительного механизма и в процессе эксплуатации подвергается совокупному воздействию высоких температур, переменных механических нагрузок и агрессивной химической среды продуктов сгорания топлива. Надежность и ресурс выпускного клапана в значительной степени определяют общую долговечность двигателя и безопасность эксплуатации судна, что обуславливает актуальность исследований механизмов его деградации и факторов, влияющих на интенсивность износа.

Современные судовые энергетические установки эксплуатируются на широком спектре топлив — от тяжелых высокосернистых мазутов до легких дистиллятных и альтернативных топлив. Тяжелые виды топлива содержат повышенные концентрации серы, ванадия, натрия и зольных компонентов, способствующих образованию кислотных конденсатов, ванадиевых шлаков и твердых частиц золы. Эти компоненты интенсифицируют коррозионное, эрозионное и абразивное разрушение поверхностей клапана, а также ускоряют развитие термоусталостных дефектов. В то же время переход на более экологичные и малосернистые топлива сопровождается ростом эксплуатационных затрат, что требует обоснованного выбора режима эксплуатации и применяемых защитных мер.

Одним из эффективных путей повышения ресурса выпускных клапанов является применение защитных жаростойких покрытий и присадок к топливу, направленных на нейтрализацию агрессивных компонентов и снижение интенсивности износа. Однако практическая эффективность таких решений зависит от конкретных условий работы двигателя, вида топлива и параметров теплового и нагрузочного режимов. Это обуславливает необходимость комплексных исследований, включающих как натурные испытания в реальных условиях эксплуатации судов, так и лабораторные эксперименты в контролируемых режимах.

С учетом изложенного, целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния вида судового топлива и защитных покрытий на износ выпускных клапанов судовых дизельных двигателей на основе сочетания натурных и лабораторных испытаний, а также формулирование требований к методике ускоренных коррозионно-эрозионных испытаний для дальнейших исследований.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

- 1) выполнить анализ основных эксплуатационных дефектов выпускных клапанов судовых дизелей и их связи с физико-химическими процессами при сгорании различных видов топлива;
- 2) провести натурные испытания на судах проекта ОТА-900 с последовательной эксплуатацией двигателя на тяжелом мазуте, мазуте с магниевыми присадками и легком дистиллятном топливе (MGO) с целью количественной оценки влияния вида топлива на характер и интенсивность износа выпускных клапанов, включая клапаны с защитными покрытиями и без них;
- 3) выполнить лабораторные исследования износа клапанов на дизеле 6ЧН 18/22 при параллельных испытаниях на различных видах топлива, обеспечивающих воспроизводимые условия нагружения, и сопоставить полученные результаты с данными натурных испытаний;
- 4) на основе анализа экспериментальных данных оценить эффективность защитных жаростойких покрытий и присадок к топливу в снижении износа выпускных клапанов и увеличении их ресурса;
- 5) сформулировать концептуальные требования и структуру подхода к методике ускоренных коррозионно-эрозионных испытаний выпускных клапанов в контролируемых условиях (с учетом разделения вкладов химической коррозии и механической эрозии), предназначенной для дальнейшего развития и валидации на базе полученных натурных и лабораторных данных.

ОСНОВНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ ВЫПУСКНОГО КЛАПАНА СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Эксплуатационная надежность выпускного клапана определяется комплексом взаимосвязанных дефектов, возникающих под воздействием экстремальных рабочих условий. Наиболее характерными из них являются коррозионное разрушение, вызванное воздействием агрессивных химических соединений (например, серной кислоты), образующихся при сгорании топлива. Эрозионный износ возникает вследствие воздействия высокоскоростного потока выхлопных газов, содержащих твердые частицы золы и сажи, в то время как абразивный износ является результатом прямого механического воздействия этих частиц на поверхность клапана. Значительную угрозу представляет термоусталостное разрушение, связанное с циклическими изменениями температуры, которое приводит к образованию и развитию микротрещин в материале, особенно при работе на топливах с низкой теплотворной способностью. Кроме того, локальный перегрев, вызванный неравномерным распределением температур или недостаточной эффективностью охлаждения, может привести к деформации и прогару седла клапана. Указанные дефекты носят кумулятивный характер, существенно сокращая ресурс данного критически важного элемента двигателя [1 — 3].

Влияние различных видов судовых топлив на дефекты выпускного клапана

Легкие дистиллятные топлива (Marine Gas Oil / Marine Diesel Oil) характеризуются низким содержанием серы, ванадия и других примесей. Использование таких топлив значительно снижает риск коррозионного и абразивного износа. Однако их применение связано с более высокими затратами.

Тяжелые мазуты (Heavy Fuel Oil) содержат значительное количество серы, ванадия, натрия и других металлов. При сгорании этих топлив образуются: серная кислота, вызывающая коррозию; ванадиевые шлаки, усиливающие термоусталостное разрушение; зольные отложения, вызывающие абразивный износ [4, 5].

Биодизель и синтетические топлива имеют низкое содержание серы и практически не содержат металлических примесей. Их использование позволяет существенно снизить коррозионный и абразивный износ. Однако такие топлива могут быть менее доступны для судовой индустрии.

Механизмы образования дефектов

Коррозионное разрушение начинается с химического взаимодействия материалов клапана с продуктами сгорания. Например, серная кислота вызывает точечную коррозию, которая распространяется по поверхности клапана. Ванадиевые шлаки, обладающие низкой температурой плавления, разрушают защитные оксидные слои на поверхности клапана [2].

Эрозионный износ происходит за счет механического воздействия высокоскоростного потока выхлопных газов. Твердые частицы, содержащиеся в газах, ускоряют процесс эрозии, особенно в зонах с повышенной температурой [6].

Абразивный износ вызывается трением твердых частиц о поверхность клапана. Этот процесс усиливается при использовании топлив с высоким содержанием золы и металлических примесей [3].

Термоусталостное разрушение связано с циклическими изменениями температуры клапана. Высокие термические нагрузки приводят к образованию микротрещин, которые со временем развиваются в крупные дефекты [7 — 9].

Для минимизации эксплуатационных дефектов выпускного клапана применяются следующие методы: улучшение материалов клапанов, применение присадок к топливу, оптимизация работы двигателя, переход на экологически чистые топлива.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения влияния различных типов топлива на образование дефектов на выпускных клапанах были проведены натурные испытания. Исследования осуществлялись на судах проекта ОТА-900, эксплуатирующихся в условиях Сибирского региона. Экспериментальный цикл проходил в июне 2025 г. с использованием судового среднеоборотного дизельного двигателя номинальной мощностью 225 кВт.

Параметры и процедура проведения экспериментов:

- объект исследования: выпускные клапаны судового дизельного двигателя;
- платформа для испытаний: суда проекта ОТА-900;
- географические и временные рамки: акватория Сибирского региона (реки Обь), навигационный период 2025 г.;
- мощность испытуемого двигателя: 225 кВт;
- типы испытуемых топлив:

тяжелый мазут (НФО) без каких-либо добавок;

НФО с добавлением магниевых присадок (цель: нейтрализация сернокислотной коррозии и связывание ванадиевых соединений);

легкое дистиллятное топливо (МГО).

Дополнительный аспект: часть клапанов была оборудована специальными жаростойкими покрытиями для оценки их защитных свойств.

Исследования проводились по следующему циклическому алгоритму:

1) начало навигации (базовый замер): перед началом испытаний был выполнен тщательный осмотр и замеры новых выпускных клапанов для фиксации исходного состояния;

2) первый эксплуатационный цикл (200 моточасов): двигатель работал на тяжелом мазуте (НФО) без присадок. По окончании цикла клапаны были демонтированы для проведения технического осмотра, фотографирования и измерения износа;

3) второй эксплуатационный цикл (200 моточасов): после профилактической обработки и установки клапанов двигатель эксплуатировался на тяжелом мазуте (НФО) с добавлением магниевых присадок. После цикла процедура осмотра и замера была повторена;

4) третий эксплуатационный цикл (200 моточасов): на заключительном этапе было использовано легкое дистиллятное топливо (МГО). Осмотр клапанов после этого цикла позволил получить данные для сравнения.

Для повышения достоверности результатов часть клапанов на всех этапах была оснащена защитными жаростойкими покрытиями.

Сравнительный анализ состояния выпускных клапанов, проводившийся после каждого цикла, наглядно показал зависимость интенсивности износа от вида используемого топлива. Количественные и качественные результаты представлены в табл. 1. Для визуальной оценки характера и степени деградации материалов на рис. 1 представлены фотографии клапанов, демонтированных после испытаний на различных видах топлива.

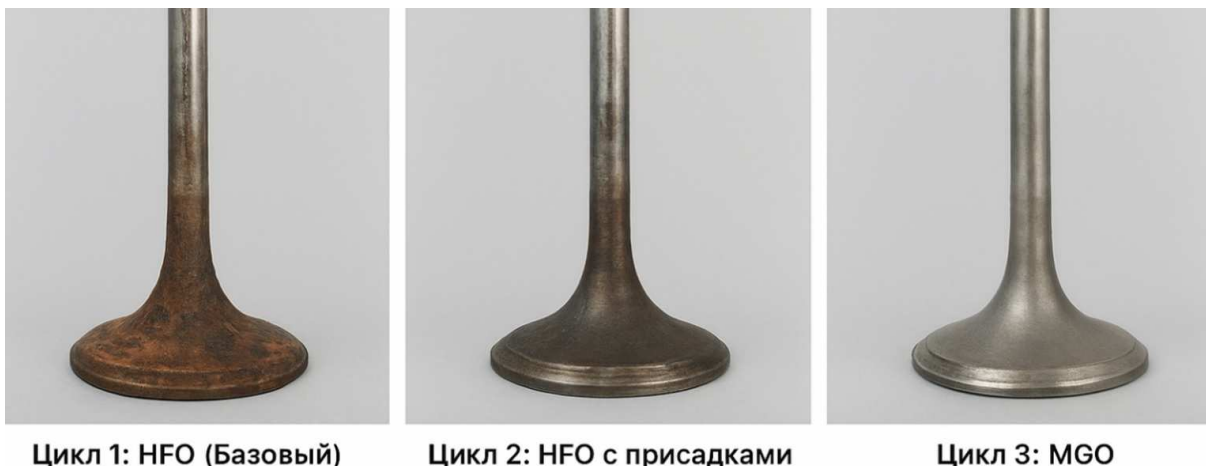


Рис. 1. Внешний вид выпускных клапанов после эксплуатационных испытаний

Таблица 1

Результаты анализа износа выпускных клапанов при работе на различных видах топлива в течение навигационного периода

Параметр/цикл	Цикл 1: НФО (базовый)	Цикл 2: НФО с присадками	Цикл 3: МГО
Вид топлива	Тяжелый мазут без присадок	Тяжелый мазут с магниевыми присадками	Легкое дистиллятное топливо (МГО)
Пробег, моточасы	200	200 (суммарно 400)	200 (суммарно 600)
Наблюдаемые дефекты (качественная оценка)	Ярко выраженная язвенная коррозия, значительный абразивный износ тарелки и стержня, начало образования термоусталостных микротрещин	Умеренная равномерная коррозия, снижение абразивного износа, микротрещины не прогрессируют	Незначительные следы износа, поверхностное окисление, дефекты визуально не выявлены
Износ, мкм (количественная оценка)	120 — 150 (принят за 100 % для расчета)	75 — 90 (снижение на 35 — 40 %)	30 — 40 (снижение на 70 — 75 %)
Эффективность защитного покрытия	Замедлило износ на 15 — 20 % по сравнению с непокрытыми клапанами	Замедлило износ на 18 — 22 % по сравнению с непокрытыми клапанами на том же топливе	Замедлило износ на ~ 20 % по сравнению с непокрытыми клапанами на том же топливе

Проведенные натурные испытания в условиях реальной эксплуатации на судах проекта ОТА-900 позволили установить количественную зависимость износа выпускных клапанов судового дизеля от вида используемого топлива. Сравнительный анализ, выполненный после циклов работы на тяжелом мазуте (НФО), НФО с магниевыми присадками и легком дистиллятном топливе (МГО), показал, что применение присадок снижает износ на 35 — 40 % относительно чистого НФО благодаря нейтрализации сернистых соединений и связыванию ванадия. Наиболее значительный эффект достигнут при использовании МГО, где износ уменьшился на 70 — 80 % благодаря минимальному содержанию агрессивных примесей. Дополнительное нанесение защитных покрытий продемонстрировало независимый положительный эффект, стабильно снижая износ примерно на 20 % для всех видов топлива. Полученные результаты подтверждают целесообразность комплексного подхода, сочетающего переход на качественные топлива с применением защитных покрытий для значительного увеличения ресурса выпускных клапанов.

Экспериментальная часть: лабораторные исследования износа выпускных клапанов на двигателе 6ЧН 18/22

Лабораторные исследования износа выпускных клапанов проводились параллельно с натурными испытаниями на судне проекта ОТА-900 в целях верификации данных в строго контролируемых условиях. Эксперимент был выполнен на базе университетской лаборатории с использованием судового дизельного двигателя 6ЧН 18/22 номинальной мощностью 150 кВт. В отличие от последовательной схемы натурных испытаний, в лаборатории был реализован параллельный метод: три группы клапанов (включая образцы с защитным покрытием и без него, представленные на рис. 2) одновременно тестировались на разных видах топлива — тяжелом мазуте (НФО), НФО с магниевыми присадками и легком дистиллятном топливе (МГО) — в течение 500 моточасов при стабильной нагрузке 75 — 85 % от номинала (план эксперимента см. в табл. 2).



Рис. 2. Вид клапана с покрытием и без покрытия

Таблица 2

План проведения лабораторных испытаний

Группа клапанов	Этап 1 (150 ч)	Этап 2 (150 ч)	Этап 3 (200 ч)	Наличие покрытия
Группа А	HFO	HFO + присадка	MGO	нет
Группа Б	HFO	HFO + присадка	MGO	да
Группа В	HFO	HFO	HFO	нет

Такой подход позволил исключить влияние накопленного усталостного повреждения и объективно сравнить влияние каждого топлива и защитного покрытия. После каждого этапа клапаны подвергались комплексному анализу, включавшему координатные измерения, СЭМ и ЭДС-анализ для выявления механизмов износа. На рис. 3 представлены характерные фотографии выпускных клапанов, демонстрирующие различную степень и характер износа после лабораторных испытаний в контролируемых условиях. Параллельное проведение экспериментов позволило получить сопоставимые с эксплуатационными данными результаты при более высокой повторяемости и детализации процессов деградации.

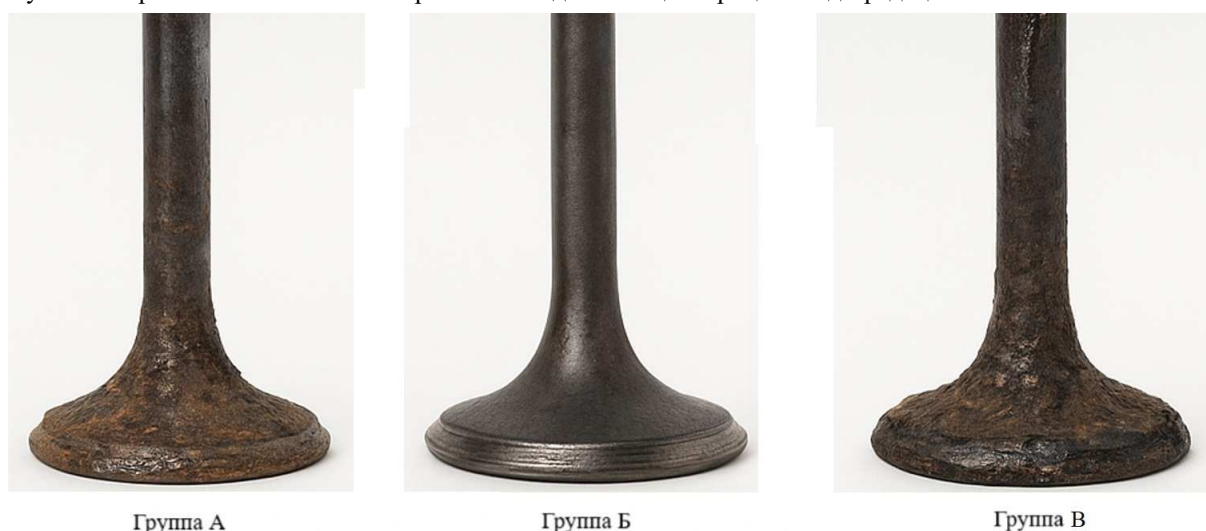


Рис. 3. Внешний вид выпускных клапанов после лабораторных испытаний

Результаты сравнения износа, приведенные на рис. 4, служат количественным подтверждением эффективности перехода на качественное топливо и применения защитных покрытий для снижения износа клапанов, причем действие этих мер является аддитивным.

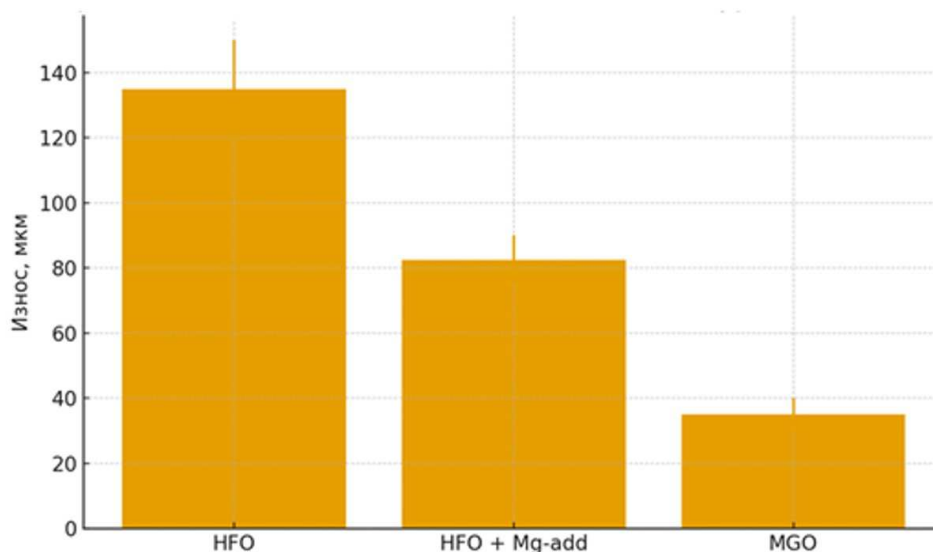


Рис. 4. Сравнение износа выпускных клапанов при натурных испытаниях для различных видов топлива

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный сравнительный анализ износа выпускных клапанов основан на количественной оценке деградации после последовательных циклов работы на различных видах топлива. Для интерпретации результатов использовалось допущение о линейной зависимости износа от наработки в пределах каждого 200-часового цикла, что визуализировано на рис. 5.

Данное упрощение является практичным инструментом для сравнительной оценки влияния различных факторов (вид топлива, наличие присадки, защитное покрытие) в идентичных условиях, что и являлось основной целью работы, а не точное прогнозирование ресурса на весь срок службы. Правомерность такого подхода подтверждается тем, что испытания проводились в квазистационарной фазе износа, когда для таких механизмов, как абразивный износ и равномерная коррозия, характерна близкая к линейной зависимость от времени. Кроме того, качественное изменение картины износа (от язвенной коррозии и абразива для HFO до незначительного окисления для MGO, согласно табл. 1 и рис. 1) согласуется с количественными данными о его интенсивности для каждого установившегося режима.

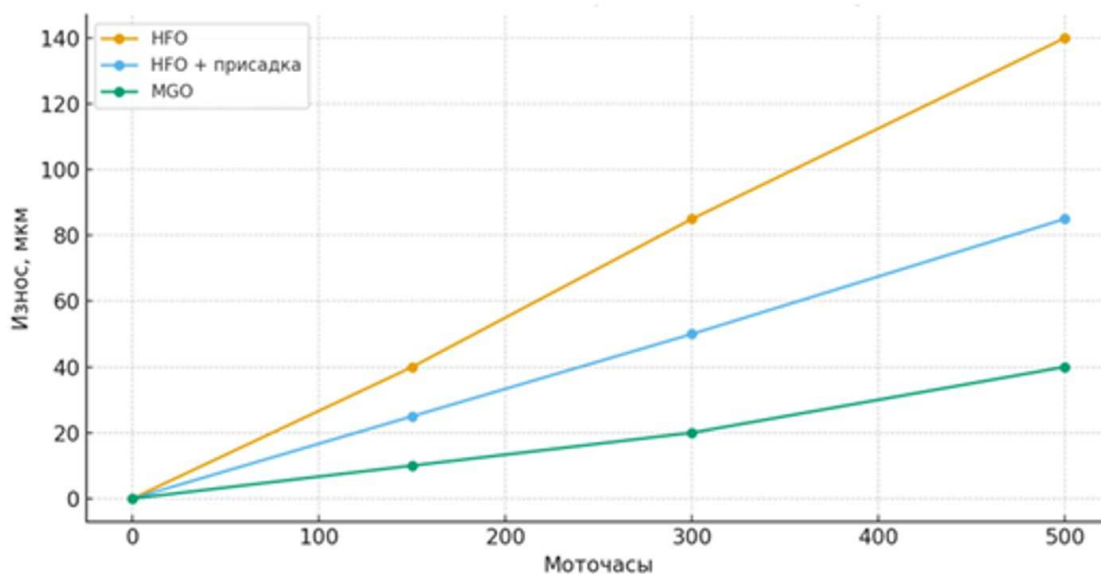


Рис. 5. Динамика износа выпускных клапанов в лабораторных испытаниях в зависимости от моточасов

Вместе с тем, нужно признать ограничения линейной модели. Реальный износ является результатом синергетического взаимодействия коррозии, эрозии и термоусталости, что может приводить к нелинейному, ускоряющемуся износу на больших интервалах из-за положительных обратных связей (например, коррозия ослабляет поверхность, ускоряя абразивный износ, который, в свою очередь, удаляет защитные оксидные пленки). Кроме того, развитие термоусталостных микротрещин (подчиняющееся, например, закону Пэриса) и инициирование язвенной коррозии носят принципиально нелинейный характер. Накопление повреждений в последовательной схеме испытаний также нарушает принцип аддитивности, заложенный в линейной модели.

Таким образом, принятая модель линейного износа является оправданным приближением для целей сравнительного анализа в рамках данного исследования, однако ее экстраполяция на весь срок службы клапана без учета нелинейных эффектов некорректна.

В качестве перспективного направления для более глубокого изучения механизмов износа и построения точных прогнозных моделей рекомендуется проведение ускоренных коррозионно-эрозионных испытаний в камере с контролем состава газов и твердых частиц в сочетании с методами статистического планирования эксперимента (DoE). Целью таких испытаний является количественное разделение вклада химической коррозии (кислотность, ванадий/натрий) и механической эрозии (пылевое воздействие, скорость потока) в совокупный износ, а также оценка эффективности присадок и покрытий (включая, например, комбинации интерметаллидных сплавов) в контролируемых условиях [10]. Метод предполагает использование камеры с нагревом до рабочих температур выпускного клапана (до 700 — 800 °C), пропуск контролируемых газовых смесей (SO_2 , SO_3 , водяной пар) и введение аэрозолей зольных частиц. Ключевыми факторами эксперимента являются температура поверхности, концентрация SO_x и твердых частиц, использование присадки и нанесение

защитного покрытия. Для сокращения числа испытаний рационально использовать дробный факторный план 2^k ($5-1$) с последующей валидацией ключевых точек. Критериями отклика будут скорость износа, глубина микротрещин (по СЭМ), состав отложений (EDS/XRF), утрата массы и изменение твердости поверхности. Полученные зависимости между управляемыми факторами (температура, концентрация SO_x и твердых частиц, применение присадок и покрытий) и износом клапанов могут быть интегрированы в перспективную многоуровневую систему обеспечения надежности [11] судовых механических систем. Такой подход позволит управлять коррозионно-эрозионной стойкостью критических компонентов на всех этапах их жизненного цикла — от проектирования и производства до эксплуатации и технического обслуживания. Анализ результатов с помощью ANOVA позволит выявить статистически значимые факторы и их взаимодействия, а сопоставление ускоренных скоростей износа с натурными данными обеспечит возможность предсказания ресурса клапанов при различных условиях эксплуатации, в том числе при использовании различных видов судового топлива и его экологической нагрузки [12]. Данный метод ускоряет исследования, позволяет управляемо моделировать агрессивные среды и формировать рекомендации по применению присадок [13] и покрытий с высокой достоверностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксплуатационные дефекты выпускного клапана судового дизельного двигателя напрямую зависят от качества используемого топлива. Основными факторами, ускоряющими дефекты, являются высокие температуры, коррозия, эрозия и абразивный износ. Для предотвращения дефектов необходимо комплексное решение, включающее использование качественных материалов и покрытий, оптимизацию работы двигателя и переход на экологически чистые топлива. Применение присадок и легких дистиллятных топлив также позволяет существенно уменьшить износ и продлить срок службы выпускного клапана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gandhi Y. Investigation of valve tip end wear mechanism of a four-cylinder automotive engine under high-speed application / Y. Gandhi, N. Pawar, N. Zolal et al. // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. — 2021. — Vol. 21. — P. 2098 — 2107. — DOI 10.1007/s11668-021-01256-x.
- Hadia M. Effect of coatings on the tribological performance of engine valve train: A review / M. Hadia, R.A. Mufti, R. Zahid, A. Raza // *International Journal of Engine Research*. — 2025. — Vol. 26, Issue 8. — P. 1171 — 1192. — DOI 10.1177/14680874241312566. URL <https://share.google/NTfTTxmHRAHVE4Hlq> (дата обращения 17.09.2025).
- Okokpujie I.P. Study of corrosion, wear, and thermal analysis of materials for internal combustion engines and their compatibility: A review / I.P. Okokpujie, A.O. Ojo, B. Adaramola, M. Oladimejli et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2024. — DOI 10.1088/1755-1315/1322/1/012007.
- Liu Y. Corrosion behaviors of Ni80A alloy valve within ammonia-rich environment / Y. Liu, G. Quan, Y. Yu, W. Ran, W. Xiong // *Materials*. — 2025. — Vol. 18, Issue 13. — P. 3006. — DOI 10.3390/ma18133006. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/13/3006> (дата обращения 20.09.2025).
- Qu S. Investigate the impact wear failure behavior of CoMoCr engine valve and valve seat pairs under harsh conditions / S. Qu, D. Li, J. Li, P. Sun et al. // *Engineering Failure Analysis*. — 2025. — Vol. 167, Part B. — P. 109052. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630724010987> (дата обращения 20.09.2025).
- Wang H. Erosion wear of high-pressure throttle valves: A review / H. Wang, S. Cai, Z. Zhang // *Corrosion*. — 2025. — Vol. 81, Issue 9. — P. 826 — 847. — DOI 10.5006/4756. — URL: <https://content.ampp.org/corrosion/article/81/9/826/106023/Erosion-Wear-of-High-Pressure-Throttle-Valves-A> (дата обращения 17.09.2025).
- Тимохова О.М. Анализ воздействия коррозионного износа на работоспособность деталей лесных машин / О.М. Тимохова, О.Н. Бурмистрова // *Лесотехнический журнал*. — 2016. — № 3. — С. 183 — 188. — URL: http://lestchjournal.ru/sites/default/files/journal_pdf/183-188_0.pdf (дата обращения 17.09.2025).
- Ali M.K.A. Effect of lubricant contaminants on tribological characteristics during boundary lubrication reciprocating sliding / M.K.A. Ali, F. M.H. Ezzat, K.A. Abd El-Gawwad, M.M.M. Salem. — 2017. — [Электронный ресурс] URL: <https://arxiv.org/abs/1710.04448> (дата обращения 17.09.2025).
- Галиев И.Р. Влияние формы впускного клапана на характеристики воздушного вихря в цилиндре судового двигателя / И.Р. Галиев, Д.С. Максимов // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2024. — № 76. — С. 96 — 105. — EDN IFYSSY.
- Kuznetsov R. Investigation of the causes of inlet valve destruction of forced marine engines / R. Kuznetsov, E. Ol'khovik, B. Palagushkin // *Proceedings of the II International scientific conf. on advances in science, engineering and digital education (ASEDU-II 2021)*, Krasnoyarsk, 28 October 2021. Vol. 2647 A. — Krasnoyarsk: AIP Publishing, 2022. — P. 60014. — DOI 10.1063/5.0104203. — EDN ZGACEE.
- Мосейко Е.С. Многоуровневая система обеспечения надежности судовых механических систем на этапах жизненного цикла / Е.С. Мосейко, Е.О. Ольховик, В.Ю. Рудь // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. — 2024. — Т. 16, № 5. — С. 775 — 783. — DOI 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783.

12. Реуцкий А.С. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги // А.С. Реуцкий, В.В. Якимов, А.А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87 — 95. — EDN ICJSDQ.
13. Петров В.М. Особенности износа ответственных пар трения шарового крана судовой запорной арматуры, выполненных из полимерных композиционных материалов / В.М. Петров, А.В. Федосов, К.Н. Шония, Г.Я. Кремлёв, А.А. Буцанец // Транспортное дело России. — 2023. — № 3. — С. 243 — 248. — DOI 10.52375/20728689_2023_3_243. — EDN JWYAUUK.

REFERENCES

1. Gandhi Y., Pawar N., Zol N. et al. Investigation of Valve Tip End Wear Mechanism of a Four-Cylinder Automotive Engine Under High-Speed Application. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2021. Vol. 21. P. 2098 — 2107. DOI: 10.1007/s11668-021-01256-x.
2. Hadia M., Mufti R.A., Zahid R., Raza A. Effect of coatings on the tribological performance of engine valve train: A review. *International Journal of Engine Research*. 2025. Vol. 26, Issue 8. P. 1171 — 1192. DOI 10.1177/14680874241312566. URL <https://share.google/NTfTTxmhRAHVE4Hlq> (accessed 17.09.2025).
3. Okokpujie I.P., Ojo A.O., Adaramola B., Oladimeji M. et al. Study of corrosion, wear, and thermal analysis of materials for internal combustion engines and their compatibility: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. DOI: 10.1088/1755-1315/1322/1/012007.
4. Liu Y., Quan G., Yu Y., Ran W., Xiong W. Corrosion behaviors of Ni80A alloy valve within ammonia-rich environment. *Materials*. 2025. Vol. 18, Issue 13. P. 3006. DOI 10.3390/ma18133006. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/13/3006> (accessed 20.09.2025).
5. Qu S., Li D., Li J., Sun P. et al. Investigate the impact wear failure behavior of CoMoCr engine valve and valve seat pairs under harsh conditions. *Engineering Failure Analysis*. 2025. Vol. 167, Part B. P. 109052. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630724010987> (accessed 20.09.2025).
6. Wang H., Cai S., Zhang Z. Erosion wear of high-pressure throttle valves: A review. *Corrosion*. 2025. Vol. 81, Issue 9. P. 826 — 847. DOI 10.5006/4756. URL: <https://content.amp.org/corrosion/article/81/9/826/106023/Erosion-Wear-of-High-Pressure-Throttle-Valves-A> (accessed 17.09.2025).
7. Timokhova O.M., Burmistrova O.N. Analysis of corrosive wear impact on performance of parts for forestry machinery. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering Journal]*. 2016. No. 3. P. 183 — 188. URL: http://lestehjournal.ru/sites/default/files/journal_pdf/183-188_0.pdf (accessed 17.09.2025).
8. Ali M.K.A., Ezzat F.M.H., Abd El-Gawwad K.A., Salem M.M.M. Effect of lubricant contaminants on tribological characteristics during boundary lubrication reciprocating sliding. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1710.04448> (accessed 17.09.2025).
9. Galiev I.R., Maksimov D.S. Influence of the inlet valve shape on the air vortex characteristics in a marine engine cylinder. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 96 — 105. EDN IFYSSY. (In Russ.)
10. Kuznetsov R., Ol'khovik E., Palagushkin B. Investigation of the causes of inlet valve destruction of forced marine engines. *Proceedings of the II International scientific conf. on advances in science, engineering and digital education (ASEDU-II 2021)*. Krasnoyarsk, 28 October 2021. Vol. 2647 A. Krasnoyarsk: AIP Publishing, 2022. P. 60014. DOI 10.1063/5.0104203. EDN ZGACEE.
11. Moseyko E.S., Olkhovik E.O., Rud V.Yu. A multilevel system for ensuring the reliability of marine mechanical systems at the stages of the life cycle. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2024. Vol. 16, No. 5. P. 775 — 783. DOI 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783. (In Russ.)
12. Reutskii A.S., Yakimov V.V., Butsanets A.A. Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of a transport service. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 87 — 95. EDN ICJSDQ. (In Russ.)
13. Petrov V., Fedosov A., Shonia K., Kremlev G., Butsanets A. Features of wear of responsible friction couples of the ball valve of the shutoff valves made of polymer composite materials. *Transport Business in Russia*. 2023. No. 3. P. 243 — 248. DOI 10.52375/20728689_2023_3_243. EDN JWYAUUK. (In Russ.)