

Судовые энергетические установки и их элементы

Научная статья

УДК 621.892.096:629.3

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/55-69>

Г.П. Кича, А.В. Надежкин, С.А. Огай, М.А. Серебряков, Г.Б. Горелик

КИЧА ГЕННАДИЙ ПЕТРОВИЧ – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания, <https://orcid.org/0000-0001-8298-9956>, kicha@msun.ruНАДЕЖКИН АНДРЕЙ ВЕНИАМИНОВИЧ – д.т.н., профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, nadezkin@msun.ruОГАЙ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ – д.т.н., доцент, профессор кафедры теории и устройства судна, ogay@msun.ruСЕРЕБРЯКОВ МАКСИМ АНАТОЛЬЕВИЧ – аспирант, goryn76@yandex.ruГОРЕЛИК ГЕННАДИЙ БЕНЦИАНОВИЧ – д.т.н., профессор, с.н.с. учебно-научной лаборатории междисциплинарных прикладных исследований транспортных систем управления (отдела) научно-исследовательской и инновационной деятельности, ggorelik@mail.ru*Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского*
Владивосток, Россия

Повышение эффективности функционирования саморегенерирующихся фильтров в смазочных системах судовых среднеоборотных дизелей

Аннотация. Сообщается о методах совершенствования очистительной и регенерационной способности автоматизированных фильтров, используемых в смазочных системах судовых дизелей. Цель исследований состоит в повышении эффективности рабочих процессов саморегенерирующихся фильтров в смазочных системах судовых тронковых дизелей для обеспечения ресурсосберегающего маслоиспользования при их работе на низкосортных топливах. Показаны возможности тканых фильтровальных сеток полотняного переплетения улучшенной поровой структуры в сравнении с известными фильтровальными материалами. Оптимизацией параметров поровой структуры фильтровальных сеток достигнут наиболее приемлемый баланс между пропускной способностью и регенерируемостью тканых материалов. Определена геометрия переплетения, при которой возрастает роль наружного фильтровального участка с накоплением легко смываемых отложений на поверхности сеток. По результатам моделирования идентифицировано влияние на коэффициент регенерации гидродинамической интенсивности промывного потока, адгезионной активности отложений и дисперсного состава загрязнений. Показана эффективность снижения «грязевой» нагрузки на фильтр и повышения автономности его работы центробежным сепарированием моторного масла с пропускной способностью, регулируемой в зависимости от дисперсности загрязнителя. Приводятся результаты натурных испытаний разработанных автоматизированных маслоочистительных комплексов в судовых дизельных двигателях 6ЧН40/46 и 8ДН32/65. Проведено сравнение со штатными системами эффективности новых автоматизированных комплексов тонкой очистки моторного масла по их влиянию на старение смазочного продукта, показатели изнашивания и нагарообразования среднеоборотных дизелей.

Ключевые слова: среднеоборотный дизель, смазка двигателя, моторное масло, очистка смазочного масла, саморегенерирующийся фильтр, фильтровальные сетки, сепарирование масла

Для цитирования: Кича Г.П., Надежкин А.В., Огай С.А., Серебряков М.А., Горелик Г.Ю. Повышение эффективности функционирования саморегенерирующихся фильтров в смазочных системах судовых среднеоборотных дизелей // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 3(56). С. 55–69.

Введение

В настоящее время для очистки смазочных материалов на судах наблюдается всё более широкое применение саморегенерирующихся фильтров (СРФ) [3, 4]. Одной из причин этой

тенденции является наличие у таких очистителей способности к длительному функционированию без вскрытия и замены фильтрующих элементов (ФЭ). Это обстоятельство создаёт условия для реализации такими фильтрами немаловажного преимущества: они по сравнению с очистителями других конструкций способны работать в автоматическом режиме без обслуживания и вывода из эксплуатации гораздо более продолжительное время. Высокая автономность работы СРФ без обслуживания достигается постоянным восстановлением фильтрующей способности их очистительных элементов, то есть регенерацией ФЭ обратным потоком промывной жидкости или механическим удалением отложений.

Наиболее остро вопрос очистки моторного масла (ММ) поставлен в среднеоборотных дизелях из-за их высокой форсировки и использования низкосортных топлив [5]. При мощности двигателей более 2 тыс. кВт применяемые в них полнопоточные фильтры тонкой очистки масла с ФЭ из нетканых материалов из-за своей громоздкости не могут конкурировать с СРФ [5]. Поэтому системы смазки мощных тронковых двигателей этого класса оснащаются фильтрами саморегенерирующегося типа с механизированной промывкой ФЭ фильтруемой жидкостью. Наибольшее распространение для решения этой задачи получили фильтры СРФН и СРФП соответственно с непрерывным и периодическим режимами регенерации [3].

Большинство СРФ, применяемых на судах, обеспечивают тонкую очистку ММ с номинальной тонкостью отсева $\Delta_{0,95} = 40\text{--}90$ мкм. В качестве фильтровального материала (ФМ) используют металлические или синтетические сетки квадратного плетения низкой прочности, так как достичь вышеуказанной величины $\Delta_{0,95}$ проволоками диаметром более 80 мкм невозможно [4]. Из-за низкой прочности фильтровальных сеток с квадратными ячейками (ФСКЯ) увеличить регенерируемость их повышением скорости промывного потока проблематично. Такие ФМ не позволяют эффективно удалять отложения с ФЭ обратным высокоскоростным потоком промывной жидкости. При скорости противоточной регенерации 2–3 см/с сетки деформируются и разрушаются.

Фильтрующие элементы СРФ проволоочно-целелевого типа имеют низкую пропускную способность, малое значение коэффициента «живого» сечения фильтровальной перегородки. Тонкость отсева их по показателю $\Delta_{0,95}$ превышает 90 мкм. Эти ФЭ имеют низкие грязеемкость и срок необслуживаемой работы [3].

Наиболее приемлемы для использования в автоматизированных полнопоточных фильтрах смазочных систем двигателей внутреннего сгорания (ДВС) фильтровальные сетки (ФС) полотняного переплетения, которые в широком диапазоне тонкости отсева обеспечивают довольно качественную очистку и неплохо регенерируются [1]. Однако из-за стремления к реализации их высокой прочности и технологичности изготовления при стабильных параметрах структуры (тонкости отсева) получить удовлетворительное сочетание основных функциональных свойств у этих ФМ до настоящего времени не удалось. Серийно выпускаемые ФС полотняного переплетения имеют либо высокую задерживающую способность по отфильтровыванию загрязнений при низкой грязеемкости и регенерируемости, либо плохо отсеивают механические примеси при хорошей пропускной и регенерирующей характеристике [4]. Эти материалы весьма перспективны для исследования, так как возможности фильтрования их поровой структуры полностью не реализованы.

Применяемые для большинства СРФ схемы восстановления функциональных свойств (регенерации) ФЭ обратным потоком промывной жидкости не имеют должного обоснования. Параметры процесса, который изучен недостаточно полно, задаются произвольно. Поэтому СРФ либо неэффективно очищают суспензии от механических примесей при удовлетворительной промывке их ФЭ или интенсивно забиваются отложениями и плохо поддаются регенерации.

Следует отметить, что процессы фильтрования и регенерации взаимосвязаны [1, 2]. Поэтому их необходимо рассматривать и исследовать совместно, улучшая одновременно не только фильтровальную, но и регенерационную способность ФМ. Важно при этом обосновании приемлемых для них режимов регенерации учитывать характеристики отфильтровываемых

загрязнений, гидродинамические режимы прямого (фильтрация) и обратного (регенерация) процессов. Настала необходимость уточнения (дальнейшего развития) действующих режимов регенерации для возможности управления ими и обеспечения задаваемого срока автономной работы СРФ между переборками и химическими чистками их ФЭ.

Уточнённая идентификация процесса регенерации даёт возможность управлять работой СРФ и в целом позволит повысить их функциональные характеристики, что особенно важно для совершенствования фильтров современного типа с непрерывным и периодическим режимами регенерации [2, 4]. Особенно актуальна оценка эксплуатационной эффективности модернизированных вариантов этих фильтров, предназначенных для очистки ММ в смазочных системах судовых форсированных среднеоборотных дизелей средней и большой мощности, работающих на топливах глубокой перегонки нефти.

Существенно важно при работе СРФ в тяжёлых условиях показать возможности снижения на них «грязевой» нагрузки, переключая её в комбинированных системах очистки ММ на центробежный сепаратор (ЦС). При этом весьма важным является выбор пропускной способности ЦС, так как от неё в значительной мере зависит интенсивность очистки $Q_{сфс}$ масла от нерастворимых примесей [4]. В свою очередь, этот показатель определяется дисперсностью нерастворимых загрязнений и сказывается на работе СРФ, в частности, частоте регенераций. Поэтому необходима увязка функционирования СРФ с режимами сепарирования масла, при которых уровень загрязнения масла механическими примесями будет минимальным.

Сравнение фильтровальных сеток полотняного переплетения оптимизированной структуры с серийно выпускаемыми тканями материалами

Повышение эффективности функционирования СРФ достигалось усовершенствованием ФС нового поколения путём оптимизации их поровой структуры. Варьированием параметрами переплетения при довольно высокой эффективности отсева нерастворимых примесей достигается хорошая пропускная способность и регенерируемость сеток. Созданные на их базе ФЭ имеют высокую грязеемкость и длительный срок работы между химическими мойками и «ручной» чисткой.

Данный подход позволил улучшить такие характеристики ФС, как тонкость и полнота отсева, грязеемкость и регенерируемость. Изготовленные на их основе ФЭ могут способствовать значительному увеличению времени необслуживаемой работы СРФ.

Геометрия пор ФС полотняного переплетения (рис. 1) характеризуется шагом T_0 и диаметром d_0 проволоки основы, а также диаметрами d_y проволоки утка. Перечисленные параметры формируют поровую структуру фильтровальной перегородки и определяют её задерживающую способность. Необходимо добиться таких значений варьируемых параметров T_0 , d_0 и d_y , чтобы соотношения между пропускной и регенерирующей способностями, а также полнотой отсева и грязеемкостью сеток находились в приемлемых размерах. При этом очень важно увеличение общей (интегральной) эффективности тканых материалов.

Загрязнённая суспензия проходит через наружный отсеивающий участок прямоугольной формы и фильтруется с тонкостью отсева Δ_n . Входя во внутреннюю полость поры, поток раздваивается и проходит через сужения (каналы) в форме криволинейного треугольника ABC . Абсолютная тонкость отсева Δ каждого из двух (внутренних задерживающих участков) определяется максимальным диаметром шара, способного проникнуть в зазор, формируемый двумя проволоками утка при их скрещивании и обхватывании проволоки основы.

Расчет основных параметров фильтрации K_n , m , ξ_Δ и других тканых ФС полотняного прямого и обратного переплетения приведён в работах [1, 4]. Анализ влияния этих параметров на пропускную способность (проницаемость) ν_ϕ , регенерируемость Φ_r , грязеемкость g_ϕ и суммарный показатель $\mathcal{E}_{сфс}$ сетки показал возможность оценки их совместного действия через критерий эффективности K_ϕ [1]:

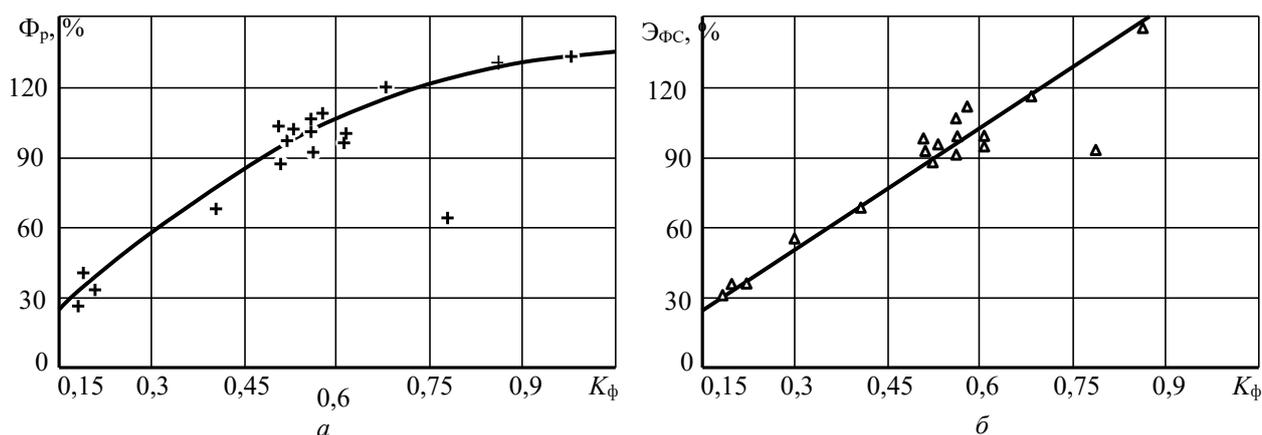


Рис. 2. Зависимость функциональных характеристик ФС от критерия K_ϕ

Анализ основных расчетных выражений для функциональной характеристики ФС показывает, что она является нелинейной функцией параметров d_y , d_o , T_o геометрии сетки. При оптимизации поровой структуры ФС следует учесть, что на них накладываются ограничения, диктуемые возможностями технологии изготовления сеток:

$$d_y' < d_y < d_y''; d_o' \leq d_o; T_o' < T_o < T_o''.$$

Область допустимых значений оптимизирующих факторов задается также исходя из ограничений по тонкости отсева и соблюдения условий прочности ФС. Существенным аспектом при оптимизации параметров сетки является выбор формы переплетения – прямого или обратного. В свою очередь, от формы и величин d_o , d_y , T_o зависит соблюдение точности задания параметров переплетения, что указывает на необходимость при оптимизации структуры ФС учитывать возможности технологии ткачества сеток.

Строение формул для расчета тонкости отсева, коэффициента проницаемости, пористости, гидравлического радиуса и числа пор на единицу поверхности тканых ФС и в целом представления критерия эффективности K_ϕ может классифицироваться как задача нелинейного программирования. Её можно решить методом штрафных функций [6]. На основе этого подхода поставленную задачу с ограничениями предлагается преобразовать в задачу безусловной минимизации с построением следующей функции цели [1]:

$$F = -K_\phi + (\mu_k \{ (\Delta - \Delta_d)^2 + [\max(0, d_o - d_o')]^2 + [\max(0, d_y - d_y', d_y'' - d_y)]^2 + [\max(0, T_o - T_o', T_o'' - T_o)]^2 \}),$$

где Δ_d – допустимое технологическое ограничение по тонкости отсева, мкм; μ_k – коэффициент (весовой) функции штрафа.

Полученная функция цели F имеет оптимум, который находили методом последовательной безусловной оптимизации [6] с использованием библиотеки стандартных процедур ЭВМ.

Анализ полученных результатов оптимизации позволил выдвинуть следующие предложения по повышению эффективности работы ФС полотняного переплетения:

- увеличить стабильность показателей тонкости и полноты отсева, что достигается подключением двухступенчатого фильтрования – последовательным формированием наружного и внутреннего фильтровальных участков с одинаковыми параметрами очистки;
- повысить отсеивающую способность ФС от крупнодисперсных частиц загрязнений приближением самого узкого сечения фильтровальных каналов к поверхности сетки с увеличением числа пор на единицу ее площади;
- способствовать возрастанию значимости отсеивающей способности внутреннего задерживающего участка при отфильтровывании мелкодисперсного загрязнителя путем рационального баланса пропускной способности и регенерируемости сетки.

Фильтровальные сетки полотняного переплетения оптимизированной структуры типа ПВ с внутренним задерживающим участком при номинальной тонкости отсева 30 мкм имеют коэффициент проницаемости $K_n = 78 \text{ мкм}^2$ и гидравлический радиус $l_c = 25 \text{ мкм}$ [4]. При числе пор $N_n = 5000$ на единице поверхности (см^2) и пределе прочности $P_\sigma = 9 \text{ Н/мм}$ они обеспечивают полноту отсева $\varphi_\phi = 45\%$ суспензии с удельной поверхностью $0,56 \text{ м}^2/\text{г}$. Для сеток ПВ характерно высокое значение критерия эффективности K_ϕ , достигающее до значений 0,98, что указывает на их высокие функциональные свойства. Эти ФС очень прочны и обладают большой пропускной способностью. Так как при фильтровании мелкодисперсной суспензии в этих сетках осадок образуется в основном внутри пор, то для его удаления необходим более мощный промывной импульс.

Сетки типа ПН с наружным задерживающим участком при той же тонкости отсева имеют более низкие по сравнению с ПВ проницаемость и прочность: $K_n = 19 \text{ мкм}^2$, $l_c = 11 \text{ мкм}$, $P_\sigma = 3,5 \text{ Н/мм}$. Однако у них больше число пор ($N_n = 13500 \text{ см}^{-2}$) и выше полнота отсева ($\varphi_\phi = 52\%$) от стандартного загрязнителя. При более низких значениях критерия эффективности ($K_\phi = 0,58$) сетки хорошо себя зарекомендовали при очистке суспензий с повышенной концентрацией крупных частиц механических примесей. Осадок у фильтровальных материалов типа ПН формируется на поверхности сеток, поэтому при регенерации легко удаляется промывным потоком низкой интенсивности. Двухступенчатое отфильтровывание нерастворимых продуктов этими поровыми структурами очень важно для очистки ММ с высокими диспергирующе-стабилизирующими свойствами, загрязнённых крупными частицами механических примесей [8].

Испытания ФС нового поколения с оптимизированными поровыми структурами, проведённые в лаборатории химмотологии Морского государственного университета имени адм. Г.И. Невельского (г. Владивосток), подтвердили способность этих сеток к хорошей регенерируемости, работе в тяжёлых режимах фильтрования при высокой грязевой нагрузке.

Подбором структуры и параметров переплетения тканых ФС можно добиться увеличения регенерируемости и грязеемкости рассматриваемых материалов. Эти преимущества обеспечиваются за счёт формирования ячеек таких форм и размеров, при которых загрязнения будут накапливаться на поверхности фильтровальной сетки и не проникать внутрь неё, забивая поры.

Показатели, определяющие основные свойства ФС, были получены посредством расчётно-экспериментального моделирования. Форма внутренних поровых структур влияет на такие свойства ФМ, как регенерируемость, пропускная способность и грязеемкость каналов. Уменьшение значения коэффициента формы пор не только улучшает регенерируемость и грязеемкость материалов, но и повышает их пористость и гидравлическую проницаемость.

Поровые структуры новых тканых ФМ с улучшенными функциональными характеристиками были сформированы оптимизацией по критерию K_ϕ шага и диаметра нитей (проволок) основы и диаметра проволок утка. Последние при прямом полотняном переплетении располагаются вплотную. Если реализуется обратное переплетение, то с шагом располагаются (ткуются) более толстые проволоки утка. В таком варианте тонкие нити (проволоки) основы находятся в натяжении и при ткани охватывают толстые проволоки утка.

Для сравнения функциональных характеристик тканых ФМ разного класса были подобраны сетки (табл. 1) саржевого и полотняного (серийного и оптимизированного) переплетения. Кроме того, были рассмотрены ФСКЯ с анализом их основных показателей. Обобщённый показатель каждого из вариантов сравнения был скорректирован с учётом приведения самого высокого усреднённого его значения в исследуемых типах ФС к 100%. Сравнимые материалы имели номинальную тонкость отсева в пределе 30–50 мкм и предназначались для очистки смазочного масла в ДВС.

Сравнение характеристик тканых ФС, %

Характеристика	ФС саржевого переплетения	ФС, ГОСТ 3187-76	ФС оптимизированной структуры	ФСКЯ, ГОСТ 3584-79
Прочность	100	67	82	22
Пропускная способность	35	64	86	100
Грязеемкость	28	47	100	74
Регенерируемость	49	82	100	97
Стоимость	68	100	77	58
Обобщенный показатель	63	81	100	79

Разработанные ФС полотняного переплетения оптимизированной структуры нашли широкое применение в системах маслоочистки судовых дизелей. Эти материалы полностью удовлетворяют требованиям СРФ, установленных на судах новостроя. На их основе комплектуются современные комбинированные очистительные модули смазочных систем высокой эффективности.

Расчётно-экспериментальное моделирование процесса противоточной регенерации СРФ и его анализ

На втором этапе исследований по восстановлению функциональных характеристик маслоочистителей в период их работы были выявлены главные факторы, формирующие процесс регенерации СРФ обратным потоком фильтруемой жидкости [2]. Эффективность его обычно оценивают коэффициентом регенерации φ_r , который представляет собой отношение массы смываемых, то есть удаляемых при регенерации отложений, к их количеству, накапливаемому на ФЭ за цикл фильтрования. Однако при малых значениях величин отфильтровываемых и смываемых отложений за рабочий цикл фильтра определение φ_r для СРФ, функционирующих в режиме частых регенераций, даёт большую погрешность. Поэтому при эксплуатации автоматизированных фильтров с периодическим восстановлением их функциональных свойств эффективность промывки рабочих элементов оценивают суммарным коэффициентом $\varphi_{r\Sigma}$ регенерации за n циклов, который с большой точностью может характеризовать остаточные явления по отложениям на ФЭ. При допущении постоянства φ_r на каждом цикле регенерации значение $\varphi_{r\Sigma}$ соответствует φ_r^n .

Характерной особенностью функционирования СРФ смазочной системы ДВС является высокое значение коэффициента регенерации в каждом отдельном цикле «фильтрование – промывание ФЭ». Поэтому необходимо проведение большого числа циклов, чтобы зафиксировать остаточные явления на элементах и рост перепада давлений на фильтре, вызываемый не полностью удаляемыми отложениями. На судах контроль состояния СРФ чаще всего фиксируют, когда перепад давлений на ФЭ после $n = \Sigma$ циклов регенерации становится выше в 2–5 раз исходного перепада, характерного для незагрязнённого фильтра. Обычно это наблюдается при отработке СРФ в автономном режиме в течение 3 тыс. ч без вскрытия и химической мойки ФЭ. Это состояние загрязнённого ФЭ принято считать стандартным для характеристики суммарного значения $\varphi_{r\Sigma}$. Для такого периода работы СРФ характерна хорошая корреляция между суммарными коэффициентами регенерации, определяемыми весовым и гидравлическим (по перепаду давления) методами [2].

Исследование регенерационного процесса проводилось в лабораторной установке (ГОСТ Р ИСО 4548-11-2009), полностью имитирующей работу СРФ в эксплуатационных условиях [2]. Она позволяет в широком диапазоне варьировать параметрами факторов, определяющих эффективность этого процесса. Обеспечивалась полная возможность контроля и поддержания основных показателей фильтрования и регенерации, которые характерны для автоматизированных фильтров, функционирующих в системах смазки судовых дизелей.

Особенность лабораторных ускоренных испытаний состояла в интенсификации «забивания» поровой структуры тканых ФС, используемых в ФЭ модельной установки, до состояния, соответствующего уровню остаточного загрязнения СРФ за 3 тыс. ч его работы в судовых условиях при очистке ММ. Используемые методы интенсификации процесса накопления остаточных не удаляемых обратной промывкой отложений [2] позволяют за 10 рабочих циклов лабораторной установки получить значения $\varphi_{p\Sigma}$, тождественного среднему состоянию СРФ при проведении его химической чистки.

Суммарный коэффициент регенерации при модельных испытаниях определялся гидравлическим методом по соотношению разницы перепадов давлений в последнем фильтровальном цикле до включения промывки Δp_p и после её завершения $\Delta p_{\varphi\Sigma}$ к разнице этих же величин на незагрязнённом ФЭ:

$$\varphi_{p\Sigma} = \frac{\Delta p_p - \Delta p_{\varphi\Sigma}}{\Delta p_p - \Delta p_{\varphi 0}},$$

то есть гидравлическим методом имитируется накопление на элементе остаточных отложений.

На первом этапе экспериментальной работы были выделены главные факторы, влияющие на эффективность регенерации. Основным фактором, формирующим $\varphi_{\varphi\Sigma}$, признан гидравлический режим регенерации, который задавался через критерий Рейнольдса Re_p с определяющим размером $\Delta_{0,95}$ (номинальной толщиной отсева), с учётом вязкости и скорости промывной жидкости. Сходимость результатов эксперимента по определению $\varphi_{p\Sigma}$ возрастает, если Re_p задавать в долях от числа Рейнольдса Re_φ при фильтрации. Этот критерий зависит от скорости фильтрации, что сказывается на характере отложений и месте их расположения в порах. В лабораторном эксперименте гидродинамический режим регенерации изменялся в пределах $Re_p/Re_\varphi = 1-5$.

Продолжительность τ_p действия промывного потока на отложения ФЭ оказывает значительное влияние на коэффициент регенерации. Влияние этого фактора зависит не только от τ_p , но и времени τ_φ фильтрования между регенерациями, когда идет формирование осадка. Степень уплотнения последнего определяется по удельной приходящейся на единицу объёма фильтруемой жидкости интенсивности $c\varphi_\varphi$ осаждения дисперсной фазы (ДФ), которая зависит от концентрации загрязнителя c и коэффициента φ_φ полноты его отсева. Численно продолжительность регенерации относительно режима фильтрования находилась в пределах $\bar{\tau}_p = \tau_\varphi c\varphi_\varphi / \tau_p = 10^{-3} - 2$.

Удаляемость Φ_p загрязнений существенным образом зависит от прилипания их к ФМ. Адгезия отложений тесным образом связана с наличием смол и асфальтенов в фильтруемых ММ. Она также зависит от природы частиц загрязнителя и волокон (проволок), из которых состоит ФМ. Удаляемость (антипод адгезии) ДФ загрязнителя оценивалась по вероятности смыва отложений (в нашем случае она определялась на рабочем стенде) от подложки ФС под действием стандартного потока, что соответствовало величине 0,2–1. В первом случае ($\Phi_p = 0,2$) загрязнитель плохо удалялся из пор ФС, так как имел высокую адгезионную активность, во втором при низкой его адгезии ($\Phi_p=1$) – легко.

При регенерации важно соотношение размеров пор ФМ и ДФ загрязнителя. В эксперименте оно задавалось через номинальную толщину отсева $\Delta_{0,95}$ сетки и средний размер m_d частиц загрязнителя. Этот показатель менялся в пределах $\Delta_w/m_d = 10-60$.

На вымываемость отложений значительно влияет поровая структура ФМ. Для ФС плотняного переплетения, которые нашли широкое применение в СРФ, этот процесс можно характеризовать критерием эффективности K_φ . Его определение дано ранее и соответствовало значениям 0,2–1.

Гидравлика ФЭ в режиме как фильтрования, так и регенерации в значительной мере зависит также от коэффициента «живого» сечения f_φ внутреннего каркаса ФЭ, на который опирается ФС. Его изменяли в пределах 0,3–0,9.

Используя априорную информацию, эксперимент по моделированию зависимости $\varphi_{p\Sigma}$ от перечисленных выше факторов проводили по плану 2^{6-3} [4, 6]. Предварительно при обработке опытов переменные (факторы x_i) были приведены к безразмерному виду. В целях получения выражения для $\varphi_{p\Sigma}$ в упрощенном виде в форме позинома функцию отклика $\varphi_{p\Sigma}$ представляли через промежуточную переменную $\alpha_{p\Sigma}$. Обработка большого числа экспериментальных данных дала возможность найти связь между коэффициентом регенерации $\varphi_{p\Sigma}$ и показателем регенерации $\alpha_{p\Sigma}$ в виде экспоненциальной зависимости $\varphi_{p\Sigma} = 1 - \exp(\alpha_{p\Sigma})$, что позволяет расширить рабочий диапазон новой функции отклика и увеличить масштаб моделирования и точность её аппроксимации. Кроме того, расчёт $\varphi_{p\Sigma}(x_i)$ через промежуточную функцию $\alpha_{p\Sigma}(x_i)$ позволяет при любом сочетании факторов получать суммарный коэффициент регенерации в диапазоне, не переходя предела 1.

Матрица планирования эксперимента с оценкой $\alpha_{p\Sigma}$ через $\varphi_{p\Sigma}$ посредством выражения $\alpha_{p\Sigma} = -\ln(1 - \varphi_{p\Sigma})$ с расчётом коэффициентов уравнения (модели), дисперсий воспроизводимости и адекватности позволила получить без учета эффекта взаимодействия между факторами выражение для $\ln \alpha_{p\Sigma}(x_i)$ в кодированных переменных. После подстановки натуральных значений факторов, потенцирования и последующих преобразований уравнение для суммарного коэффициента регенерации имеет следующий вид:

$$\varphi_{p\Sigma} = 1 - \exp \left[-3 \frac{\left(\frac{Re_p}{Re_\phi} \right)^{0,23} \Phi_p^{0,35} K_\phi^{0,2} f_{\phi\Delta}^{0,18}}{\left(\frac{\tau_\phi c \varphi_\phi}{\tau_p} \right)^{0,072} \left(\frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{0,26}} \right]. \quad (1)$$

Адекватность модели (1) доказана по критерию Фишера [4]. Расчетное значение его $F_{p\alpha} = 5,1$ при уровне значимости 0,05 оказалось намного ниже табличного. Этот факт указывает на удовлетворительную аппроксимацию экспонентой на основе позинома $\alpha_{p\Sigma}(x_i)$ экспериментальных данных по суммарному коэффициенту регенерации.

Из полученного уравнения (1) видно, что на $\varphi_{p\Sigma}$ больше всего влияет Re_p/Re_ϕ . Немного ниже действие на суммарный коэффициент регенерации Φ_p и τ_p и m_d . Критерий эффективности сеток K_ϕ также является весомым фактором, влияющим на регенерацию ФЭ. В рассматриваемом процессе роль $f_{\phi\Delta}$ менее ощутима.

Проверка модели регенерации (1) в конструкциях СРФ, эксплуатируемых на судах, показала ее работоспособность для широкой гаммы очистителей масла [2, 3]. Отклонение результатов натуральных опытов, приведенных с помощью полученной зависимости к центру плана лабораторных исследований (все факторы, кроме варьируемого, принимали среднее значение), от данных расчета по модели (1) не превышало 15%. В среднем оно составляло 4–12%, что не выше погрешности судового эксперимента. Наибольшую погрешность показали опыты при варьировании показателей $\tau_\phi c \varphi_\phi / \tau_p$ и Φ_p , особенно с СРФ фирмы Vokes, Skam, функционирующих при низких значениях Re_p/Re_ϕ .

В процессе эксплуатации СРФ по мере старения используемых в ДВС смазочных масел и при наличии остаточных явлений на ФЭ, когда отложения удаляются не полностью, коэффициент регенерации уменьшается, что приводит к необходимости химической чистки фильтров. При эффективной системе регенерации даже значительный рост адгезионной активности ДФ из-за появления в фильтруемой среде (масле) оксикислот и смол не приводит к снижению периодичности химической мойки ФЭ менее 3 тыс. ч.

По результатам данного исследования разработаны методы интенсификации процесса регенерации. Они достигались турбулизацией промывного потока путём увеличения его скорости и пульсаций. Высокие значения $\varphi_{p\Sigma}$ даёт промывка ФЭ двухфазным потоком с обеспечением пробкового режима течения газо-жидкостной смеси.

По результатам моделирования предложены регенерирующие устройства СРФ, обеспечивающие $\varphi_{p\Sigma} = 0,7-0,9$. С их использованием созданы фильтровальные установки типа СРФН-120 с непрерывным и СОФП-100 – с периодическим режимами регенерации. Основные характеристики их приведены в работе [4].

Расчет периодичности $\tau_{\text{СРФ}}$ обслуживания СРФ необходимо вести с учетом значений верхнего (допустимого) перепада давления фильтрования $\Delta p_{\text{фд}}$ в начале цикла фильтрования на номинальном температурном режиме ММ, который у большинства конструкций находится в диапазоне 40–60 кПа. В таком случае периодичность химической чистки $\tau_{\text{х.ч}}$ и период автономной работы $\tau_{\text{СРФ}}$ фильтров рассчитывается по формуле

$$\tau_{\text{СРФ}} = \tau_{\text{х.ч}} = 3000 \frac{\Delta p_{\text{фд}}}{\Delta p_{\text{ф}\Sigma}} \left(\frac{P_{\tau}}{\bar{P}} \right)^{0,85} \left(\frac{\bar{N}_{\Gamma}}{N_{\Gamma\tau}} \right)^{1,24}, \quad (2)$$

где P_{τ} , \bar{P} – текущая (на судах) и стандартная по данным ускоренных испытаний концентрация в смазочном масле многофункциональных присадок, отн. ед.; $N_{\Gamma\tau}$, N_{Γ} – содержание грубодисперсных механических примесей в период работы СРФ между химическими чистками на судах и при стендовых испытаниях, мл^{-1} ; $\Delta p_{\text{фд}}$, $\Delta p_{\text{ф}\Sigma}$ – допустимый и рассчитываемый через $\varphi_{p\Sigma}$ перепад давлений на фильтре, МПа.

Остаточные явления на фильтре из-за не удаляемых при его регенерации отложений на ФЭ вызывают рост перепада давлений, который после Σ -го цикла составит

$$\Delta p_{\text{ф}\Sigma} = \Delta p_{\text{фр}} (1 - \varphi_{p\Sigma}) + \Delta p_{\text{ф}0\varphi_{p\Sigma}},$$

где $\Delta p_{\text{ф}0}$, $\Delta p_{\text{фр}}$ – перепад давлений на незагрязненном фильтре в начале цикла фильтрования и при включении процесса регенерации, МПа.

Зависимость (2) получена по результатам обработки данных судового эксперимента методами множественного корреляционного анализа. Зависимость справедлива как для конструкций СРФ с высокой регенерирующей способностью, например Boll und Kirch, так и для СРФ, работающих при низких значениях $\Delta p_{\text{фр}}$.

Результаты сравнительных моторных испытаний новых и серийных СРФ в системах смазки судовых среднеоборотных дизелей

Эксплуатационные испытания СРФ осуществляли на судах в смазочных системах дизелей 6РС2Н-400 (6ЧН40/46) и 8М35ВФ-62 (8ДН35/62). Результативность разработок по усовершенствованию ФЭ маслоочистителей (МО) СРФН-120 и СОФП-100 оценивали в сравнении с эффективностью агрегатов штатных систем очистки (ШСО) ММ, включающих саморегенерирующийся фильтр FA32C400 фирмы «Реллумикс» (дизель 6ЧН40/46) и СОФ БМЗ (8ДН35/62).

Моторные испытания новых, с улучшенными функциональными характеристиками, и штатных фильтров в дизеле 6ЧН40/46 вели при его работе на флотских мазутах (ГОСТ 10585-2013) и масле М-10ДЦЛ20 (ГОСТ 12337-2020). Дизель 8ДН35/62 работал на малосернистом моторном топливе ДТ (ГОСТ 1667-68) и масле М-10Г₂ЦС (ГОСТ 12337-2020). Центробежные сепараторы масла при работе с опытными СРФ дополнительно оснащались регуляторами выбора оптимальной пропускной способности этих МО [4].

Новизна подхода к оптимизации режимов сепарирования ММ состояла в использовании СРФ (а.с. № 1201537) для задания такой пропускной способности ЦС, при которой наблюдалась самая высокая интенсивность очистки, а уровень загрязнения масла нерастворимыми продуктами (НРП) минимизирован. Такой режим сепарирования ММ облегчает функционирование СРФ, так как снижает «грязевую» нагрузку на СРФ.

Очистка масла сепаратором как при высокой, так и низкой пропускной способности неэффективна, так в общих случаях интенсивность очистки $Q_{\text{сфс}}$ будет ниже оптимального режима $Q_{\text{оптфmax}}$, который зависит от дисперсности загрязнителя. В свою очередь, частота N_p регенераций СРФ также зависит от этого показателя. Поэтому N_p может служить управляющим

сигналом к выбору Q_{opt} сепаратора. Схема подключения самонастраивающегося поискового регулятора системы смазки дизеля для выбора оптимального режима сепарирования приведена в монографии [4].

Испытания проводили в соответствии с ОСТ 24.060.09-86. Состояние масла оценивали по ГОСТ 11362-96 (щелочность, кислотность, водородный показатель). Концентрации НРП (общих и зольных) определяли центрифугированием по методике ЦНИДИ (ГОСТ 20684-75). Степень срабатывания присадок фиксировали по содержанию активного компонента методом инфракрасной спектроскопии. Для этого же использовали диализ. Срабатывание присадок, имеющих высокую зольность, определяли по зольности или щелочности фугата. Глубину окисления масла представляли через отношение интегральной интенсивности поглощения карбонилсодержащих соединений – C=O (область поглощения 1650–1850 см⁻¹) к аналогичному показателю группы C=C (1550–1650 см⁻¹) ароматических ядер.

Износ деталей (поршневых колец, вкладышей подшипников) определяли по изменению их массы путём взвешивания до и после испытаний на аналитических весах. Износ втулок цилиндров и шеек коленчатого вала оценивали методом искусственных баз с помощью приборов УПОИ-6 и УПОИВ-2. Нагаро- и лакообразование определяли по системе 344Т (ОСТ 24.060.09-86).

Роль МО в улучшении состоянии ММ огромна [4, 7]. Особенно значительно это проявилось в снижении НРП. К моменту отработки маслом М-10ДЦЛ20 и М-10Г₂ЦС 2 тыс. ч в системах смазки с опытными очистителями концентрация НРП была в 1,4–2,5 раза ниже (табл. 2). Меньше всего падение нерастворимых примесей (особенно по зольной составляющей) наблюдалось при переходе на новую систему очистки в двигателях 6ЧН40/46.

Таблица 2

Влияние систем очистки масла (штатной / опытной) на состояние ММ и дизеля

Показатель	Двигатель 6ЧН40/46	Двигатель 8ДН32/65
Концентрация нерастворимых продуктов, %: общих зольных	2,2 ± 0,4 / 0,7 ± 0,2 0,37 ± 0,07 / 0,28 ± 0,05	2,3 ± 0,3 / 1,2 ± 0,2 0,46 ± 0,06 / 0,25 ± 0,04
Щелочность, мг КОН/г	7 ± 2 / 12 ± 3	3,5 ± 0,4 / 6,2 ± 0,8
Кислотность, мг КОН/г	3,1 ± 0,8 / 2,5 ± 0,5	4,1 ± 0,5 / 2,7 ± 0,4
Глубина окисления, %	13,5 ± 2,3 / 8,6 ± 1,2	10,1 ± 1,4 / 9,8 ± 1,2
Интенсивность очистки от НРП, кг/ч: общих зольных	2,8 ± 0,5 / 5,2 ± 1,1 0,7 ± 0,1 / 1,5 ± 0,2	1,24 ± 0,12 / 5,88 ± 0,26 0,25 ± 0,02 / 1,62 ± 0,08
Интенсивность срабатывания присадок, кг/ч	0,39 ± 0,06 / 0,18 ± 0,03	3,1 ± 0,18 / 1,2 ± 0,05
Надежность защиты подшипников от попадания частиц $d = 40$ мкм, %	24 / 98	20 / 96
Периодичность химической чистки СРФ, тыс. ч	1,3 ± 0,4 / 4,9 ± 0,4	1,6 ± 0,3 / 5,1 ± 0,8
Трудоемкость обслуживания системы очистки ММ, чел. ч/(1000 ч)	3,9 ± 0,7 / 1,5 ± 0,2	6,1 ± 0,8 / 1,6 ± 0,2
Скорость изнашивания: комплект поршневых колец, г/(1000 ч) цилиндровая втулка, мкм/(1000 ч) детали ЦПГ (общая оценка), % вкладыши подшипников, мг/(1000 ч) шейки коленчатого вала, мкм/(1000 ч) детали КШМ (общая оценка), %	15,6 ± 3,6 / 10,4 ± 2,1 38,6 ± 5,2 / 23,1 ± 4,5 100 / 63 174 ± 35 / 81 ± 10 17,8 ± 2,3 / 6,3 ± 1,1 100 / 41	18,3 ± 2,3 / 12,8 ± 1,2 15,4 ± 2,1 / 10,1 ± 0,8 100 / 68 – / – 9,2 ± 0,8 / 5,6 ± 0,5 100 / 61
Нагаро- и лакообразование, балл	16,4 ± 2,1 / 9,2 ± 1,7	20,2 ± 2,1 / 14,2 ± 1,7

По интенсивности очистки модернизированные системы превосходили штатные в 2–6,7 раз (см. табл. 2). Эффективное удаление зольных продуктов, катализирующих окисление,

сказалось не только на интенсивности срабатывания присадок, но и на глубине окисления масла. Относительная концентрация карбонилсодержащих продуктов в ММ модернизированных систем составляла 63–96% их концентрации при использовании штатных МО. Интенсивность срабатывания присадок при применении опытных систем очистки масла была в 2,2–2,7 раза ниже.

Преимущество модернизированных маслоочистительных комплексов во влиянии на старение масла проявилось и по таким показателям, как щелочность и кислотность. При использовании новых МО они были лучше в 1,3–1,7 раза. Хорошо проявляют себя новые усовершенствованные системы очистки масла и в таком направлении, как защита пар трения от опасных крупных частиц, которые могут вызывать задиры. При использовании СРФН-120 этот показатель в сравнении с очистителем FA32C400 улучшен в 3,9 раза. При переходе с СОФ БМЗ на СОФП-100 надежность защиты подшипников дизеля 8ДН32/65 от частиц $d = 40$ мкм возросла в 4,7 раза.

Очень высокая (3,8–6,2 чел.ч/(1000 ч) работы) трудоемкость обслуживания ШСО вызвана частой (в среднем через 1,5 тыс. ч) химической чисткой штатных СРФ. С доверительной вероятностью 90% продолжительность необслуживаемой работы их составляла 1,2–1,6 тыс. ч. Как показали эксплуатационные испытания, по влиянию на состояние ММ опытные системы очистки превосходили штатные значительно. Их преимущество проявилось не только в удалении механических примесей, но и почти по всем, за исключением вязкости и температуры вспышки, показателям ММ.

Анализ основных направлений старения ММ при использовании различных МО позволяет сделать заключение, что глубокая очистка его способствует переводу масла М-10ДЦЛ20 в разряд долгорботающего. Интенсификация очистки способствует стабилизации основных показателей масла на доброковочном уровне. Штатные системы этих условий не создают, что зафиксировано по скорости срабатывания присадок и глубине окисления ММ. Расчеты показывают, что бесменная работа рассматриваемого масла в дизелях обоих типов реальна.

Моторный эксперимент позволил выявить роль МО как в торможении старения, так и в стабилизации противоизносных свойств масла. Эффективное удаление нерастворимых продуктов карбонизации масла и неполного сгорания топлива существенно сказывается на изнашивании основных деталей ДВС (см. табл. 2). Эксплуатация дизелей с модернизированной очисткой масел ведется при повышенном содержании многофункциональных присадок, что не только стабилизирует нейтрализующую способность ММ на высоком уровне, предотвращая коррозионные процессы, но и в целом уменьшает загрязнение деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) углеродистыми отложениями. Использование комбинированной очистки облегчает функционирование МО, работающих в тяжелых условиях, обеспечивая тонкое фильтрование всего потока масла, поступающего во внутреннюю распределительную магистраль.

Наибольшее влияние модернизированной системы очистки ММ проявилось на износе вкладышей подшипников и шеек коленчатого вала. Это объясняется надежной защитой этих пар трения от опасных крупных частиц при установке на полном потоке СРФ с тонкостью отсева 30 мкм. Полнопоточная тонкая очистка ММ по сравнению с грубой, $\Delta_{0,95}$ которой составляет 63–180 мкм, снижает скорость изнашивания деталей трибосопряжения «шейка вала – вкладыш» в среднем в 2 раза (см. табл. 2). Опытная система очистки надежно защищает детали кривошипно-шатунного механизма (КШМ) от износа. При ее использовании скорость изнашивания подшипников и шеек коленчатого вала снижается в 1,7–2,4 раза.

Влияние МО на скорость изнашивания деталей ЦПГ проявляется в меньшей степени. Очистка масла с использованием СРФН-120 и СОФП-100 улучшает этот показатель в среднем на 30%. Следует отметить, что самыми чувствительными к качеству очистки ММ деталями ДВС являются маслосъемные кольца. Менее всего от ее эффективности зависит износ верхних компрессионных колец. Отказ от сепарирования ММ значительно ухудшает рассматриваемые показатели. При этом скорость изнашивания деталей ЦПГ возрастает в гораздо большей мере.

Перевод двигателей на новую систему очистки масла уменьшает нагаро- и лакообразование поршня на 30–44% (см. табл. 2). На загрязнении доньшка поршня и его головки это мероприятие практически не сказывается, что указывает на малое поступление масла в камеру сгорания. Углеродистые отложения на указанных частях поршней обусловлены в основном качеством применяемых топлив и их распылом форсунками. Зависимость загрязнений на доньшке поршней от моюще-диспергирующих и термоокислительных свойств ММ проявляется только при применении масел низких моторных групп и при угаре масла более 4 г/(кВт·ч). По этой причине данная составляющая не была принята во внимание при оценке нагарообразования деталей ЦПГ.

По результатам сравнительных испытаний разных МО в судовых дизелях можно отметить, что очистка ММ полнопоточным фильтрованием с применением саморегенерирующихся агрегатов и байпасным сепарированием на оптимальных (по пропускной способности) режимах довольно эффективна. Применение присадки МАСК в коллоидно-дисперсной форме при высоких диспергирующе-стабилизирующих свойствах масел М-10ДЦЛ20 и М-10Г₂ЦС не вызывает значительного удаления ее в процессе фильтрования и сепарирования, что не приводит к смещению процесса окисления в область образования окискилот и асфальтенов, снижающих работоспособность СРФ и ухудшающих их регенерацию. Это дало возможность увеличить период между химическими мойками этих фильтров до 5 тыс. ч.

Испытания усовершенствованных систем очистки ММ, проведенные на действующих судах морского флота, показали их преимущество над ШСО у форсированных дизелей, работающих на тяжёлых топливах, по многим показателям, что привело к замедлению старения и увеличению срока службы масла, способствовало сохранению его угара на уровне 1,6–2,8 г/(кВт·ч).

Выводы

1. Моделированием поровых структур ФС полотняного переплетения и процесса противоточной регенерации ФЭ выявлены пути улучшения функциональных характеристик СРФ при очистке ММ в судовых дизельных двигателях. Результаты исследований тканых ФМ различных классов и форм переплетения позволили выявить преимущество по обобщенному показателю оптимизированных фильтровальных сеток ПВ и ПН. Они значительно превосходят все сравниваемые варианты по грязеемкости и регенерируемости и лишь на 15–22% уступают ФС саржевого переплетения – по прочности, ФСКЯ – по пропускной способности, современным тканым ФМ – по стоимости.

2. Предложенная модель регенерации использована для повышения конструктивных и эксплуатационных параметров СРФ. На основе анализа результатов моделирования сделан вывод о том, что взаимосвязь процессов фильтрования и регенерации имеет большое значение при разработке высокоэффективных регенерирующих устройств. Повышение эффективности регенерации может быть достигнуто путём подбора соотношения размеров пор ФМ и частиц ДФ для уменьшения количества задерживаемых на ФЭ частиц мелкодисперсной фазы и увеличения отсева крупнодисперсных примесей. На эффективность регенерации также влияют гидродинамические режимы фильтрования и регенерации.

3. Эффективность систем очистки масла для автоматизированных СДЭУ, включающих СРФ, подтверждена моторными испытаниями. Продолжительность функционирования без обслуживания таких систем увеличилась в 2–5 раз, при этом автономность работы модернизированных конструкций при совместном использовании их с центробежными сепараторами доведена до 5 тыс. ч. Как показал судовой эксперимент, комбинированные маслоочистительные комплексы смазочных систем на основе СРФН-120 и СОФП-100 в сочетании с ЦС самоочищающегося типа способны обеспечить ресурсосберегающее маслоиспользование в среднеоборотных дизелях средней и большой мощности при работе их на ММ групп Г₂ и Д при сжигании дистиллятных и высоковязких топлив. При этом срок эксплуатации ДВС между вскрытиями цилиндров и проведением моточистки может превышать 12 тыс. ч.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кича Г.П., Надежкин А.В., Бойко С.П. Оптимизация поровой структуры тканых фильтровальных сеток судовых саморегенерирующихся очистителей топлива и масла // Транспортное дело России. 2016. № 3. С. 132–139.
2. Кича Г.П., Надежкин А.В., Бойко С.П. Расчет параметров регенерации самоочищающихся фильтров смазочных систем судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т.2, № 1(47). С. 123–130.
3. Кича Г.П., Пак Н.К. Новые инженерные решения в конструкциях саморегенерирующихся фильтров для очистки топлив и смазочных материалов на судах // Морские интеллектуальные технологии. 2013. № 1(19). С. 54–59.
4. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях: монография. Владивосток: Изд-во Мор. гос. ун-та, 2011. 372 с.
5. Микутенок Ю.А., Шкаренко В.В., Резников В.Д. Смазочные системы дизелей. Ленинград: Машиностроение, 1986. 125 с.
6. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. Москва: Наука, 1983. 393 с.
7. Смазочные масла для поршневых ДВС (по материалам конгресса CIMAC) // Двигателестроение. 2021. № 2(284). С. 36–44.
8. Цветков О.Н., Максимов А.Л. Тенденции развития смазочных материалов в России // Мир нефтепродуктов. 2020. № 5. С. 6–18.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 3/56

Ship Power Plants and Their Elements

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

DOI: <http://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/55-69>

Kicha G., Nadezkin A., Ogay S., Serebryakov M., Gorelik G.

GENNADIY P. KICHA, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Marine Internal Combustion Engines, kicha@msun.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8298-9956>

ANDREY V. NADEZHKIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Marine Internal Combustion Engines, nadezkin@msun.ru

SERGEY A. OGAY, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Theory and Vessel Construction, ogay@msun.ru

MAKSIM A. SEREBRYAKOV, Postgraduate Student, goryn76@yandex.ru

GENNADY B. GORELIK, Doctor of Engineering Sciences, Professor, senior research fellow of Educational and scientific laboratory of interdisciplinary applied research of transportation systems of research and innovation management, ggorelik@mail.ru

Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy
Vladivostok, Russia

Improving the efficiency of self-regenerating filters in the lubrication systems of marine medium-speed diesel engines

Abstract. It is reported on the methods of improving the cleaning and regeneration efficiency of filters used in the lubrication systems of marine diesel engines. The purpose of the research is to increase the efficiency of the working processes of self-regenerating filters in the lubrication systems of marine trunk diesel engines to ensure resource-saving oil use when they operate on low-grade fuels. The possibilities of woven filter meshes of plain weave with an optimized pore structure are shown in comparison with known filter materials. By

optimizing the parameters of the pore structure of filter meshes, the most acceptable balance between throughput and regenerability of woven materials has been achieved. The interlacing geometry is determined, in which the role of the external filter area increases with the accumulation of easily washed deposits on the surface of the grids. Based on the simulation results, the influence of the hydrodynamic intensity of the washing flow, the adhesive activity of deposits and the dispersed composition of contaminants on the regeneration coefficient was identified. The effectiveness of reducing the "mud" load of the filter and increasing the autonomy of its operation by centrifugal separation of engine oil with a throughput adjusted depending on the dispersion of the pollutant is shown. The results of field tests of the developed automated oil cleaning systems in marine diesel engines 6CHN40/46 and 8DN32/65 are presented. The efficiency of new automated systems for fine cleaning of engine oil was compared in terms of their effect on the aging of the lubricant product, wear and carbon formation indicators of medium-speed diesel engines.

Keywords: medium-speed diesel, engine lubrication, engine oil, lubricating oil cleaning, self-regenerating filter, filter meshes, oil separation

For citation: Kicha G., Nadezkin A., Ogai S., Serebryakov M., Gorelik G. Improving the efficiency of self-regenerating filters in the lubrication systems of marine medium-speed diesel engines. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(3):55–69. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Kicha G.P., Nadezkin A.V., Boiko S.P. Optimization pore structure filter cloth grids ship cleaners self-recovering fuel and oil. *Transport case of Russia*. 2016;(3):132–139. (In Russ.)
2. Kicha G.P., Nadezkin A.V., Boiko S.P. The calculation regeneration parameters of self-cleaning filters for lubricant systems of ship diesels. *Marine intellectual technologies*. 2020;2(1/47):123–130. (In Russ.)
3. Kicha G.P., Pak N.K. New engineering approaches in the design of self-generative filters for cleaning fuels and lubricants on board the ships. *Marine intellectual technologies*. 2013;(1):54–59. (In Russ.)
4. Kicha G.P., Perminov B.N., Nadezhkin A.V. Resource-saving oil use in marine diesel engines: monograph. Vladivostok, Publishing House of the Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy, 2011. 372 p. (In Russ.).
5. Mikutenok Yu.A., Shkarenko V.V., Reznikov V.D. Diesel lubrication systems. Leningrad, Mechanical Engineering. 1986. 125 p. (In Russ.).
6. Pontryagin L.S., Boltyansky V.G., Mishchenko E.F. Mathematical theory of optimal processes. Moscow, Nauka. 1976. 392 p. (In Russ.).
7. Lubricating oils for reciprocating internal combustion engines (based on the materials of the CIMAC Congress). *Engine building*. 2021;(2):36–44. (In Russ.)
8. Tsvetkov O.N., Maksimov A.L. Development trends of lubricants in Russia. *World of petroleum products*. 2020;(5):6–18. (In Russ.).