

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-23-32  
УДК 621.43.013:629.3

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СЕПАРИРОВАНИЯ МОТОРНОГО МАСЛА В КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ НА ИЗНАШИВАНИЕ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

*Н. С. Молоков, Г. П. Кича, А. В. Надежкин*

*Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского,  
Владивосток, Российская Федерация*

Проиллюстрирована рациональность комбинированной очистки моторного масла в судовых автоматизированных дизелях совместным использованием саморегенерирующегося фильтра и самоочищающегося центробежного сепаратора. Отмечено, что при таком сочетании достигается ресурсосберегающее маслоиспользование с минимальным изнашиванием дизеля, высоким сроком службы масел и автономностью работы агрегатов системы смазки. Установлена необходимость полнопоточного фильтрования масла в дизеле для надежной защиты его пар трения (подшипников) от абразивного изнашивания. Центробежное сепарирование способствует глубокой очистке рабочего тела смазочной системы от продуктов, интенсифицирующих старение и сокращающих срок службы масла. Экспериментальным моделированием в судовых дизелях определено минимальное значение индекса производительности сепаратора, при котором изнашивание основных деталей дизеля стабилизируется на самом низком уровне. Приведена зависимость изнашивания двигателя от качества применяемого топлива и интенсивности сепарирования масла, идентифицируемой удельным индексом производительности сепаратора. Вычислена дисперсия адекватности, адекватность найденной модели проверялась по критерию Фишера. Представлено планирование и проведена обработка эксперимента с использованием ортогонального центрального композиционного плана второго порядка. Выделена специфика полинома, когда точки экстремума характеризуют значения скорости изнашивания дизеля, при которых она стабилизируется без дальнейшего уменьшения при увеличении индекса производительности сепаратора. На основе полученной модели должна осуществляться комплектация систем смазки судовых форсированных дизелей средней и повышенной частоты вращения маслоочистителями.

**Ключевые слова:** дизель, система смазки, очистка масла, центробежное сепарирование, саморегенерирующийся фильтр, изнашивание двигателя.

**Для цитирования:** Молоков Н. С., Кича Г. П., Надежкин А. В. Влияние интенсивности центробежного сепарирования моторного масла в комбинированных системах очистки на изнашивание судового дизеля // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 23–32. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-23-32.

### Введение

В последние годы комбинированная тонкая очистка моторного масла (ММ) в судовых тронковых дизелях получила широкое распространение [1], что обусловлено необходимостью обеспечения ресурсосберегающего маслоиспользования при конвертировании двигателей внутреннего сгорания (ДВС) средней и повышенной частоты вращения высокого уровня форсирования по среднему эффективному давлению на использование низкосортных топлив глубокой переработки нефти, содержащих алюмосиликаты [2]. Являясь катализатором каталитического и термического крекинга нефти, эти высокодиспергированные абразивные продукты при сжигании в тронковых дизелях мазутов попадают в их смазочную систему (СС) и вызывают повышенное изнашивание деталей цилиндропоршневой группы [3].

Важным аспектом, способствующим применению в ДВС рассматриваемого класса комбинированной системы тонкой очистки масла (КСТОМ), является повышенная скорость старения ММ из-за высокой их форсировки и сжигания тяжелых топлив. При характерном для среднеоборотных дизелей низком угаре масла (0,7–1,5 г/(кВт·ч)) накопление высокодисперсных нерастворимых продуктов (НРП) в их СС значительно. Глубокую тонкую очистку масла от этих примесей полнопоточные системы автоматизированного фильтрования не обеспечивают [4], поэтому такие системы дополняются центробежными сепараторами (ЦС). Методика подбора этих агрегатов для СС дизелей не разработана.

Вышеобозначенный вопрос особенно актуален для автоматизированных двигателей средней и большой мощности, СС которых чаще всего комплектуется саморегенерирующимися фильтрами (СРФ) [5]. Как правило, КСТОМ этих дизелей оснащается СРФ и самоочищающимися ЦС, что позволяет их СС длительно функционировать без обслуживания и иметь значительный ресурс автономной работы [3].

Вопросы комплектации автоматизированных систем тонкой очистки масла нуждаются в доработке. Если по подбору СРФ в КСТОМ судовых дизелей имеются рекомендации по номинальной тонкости отсева и пропускной способности [6], то ЦС подбирают без должного обоснования. Чаще всего оставляют центробежный агрегат, который был установлен в системе грубой очистки ММ двигателя до модернизации его СС.

Оценка эффективности ЦС по пропускной способности, которая характерна для существующей методики, не достаточна для оценки глубокой очистки масла от НРП. Поэтому для комплектации КСТОМ современными агрегатами очистки на основе фильтрования и центрифугирования необходимо обоснование их функциональных характеристик, обеспечивающих ресурсосберегающую эксплуатацию дизеля. Параметры СРФ подбираются по методике [7] с учетом специфики его функционирования в комплексе «дизель – эксплуатация – топливо – масло – очистка» (ДЭТМО). Номинальная тонкость отсева автоматизированных фильтров для большинства ДВС соответствует 30–50 мкм. Удельная пропускная способность составляет 15–40 л/кВт. Комплектация СРФ осуществляется фильтрующими элементами (ФЭ) из тканых сеток полотняного переплетения с удельной поверхностью 8–20 см<sup>2</sup>/кВт [8, 9]. Такие фильтры, работая в полнопоточном режиме, надежно защищают подшипники дизеля и шейки коленчатого вала от абразивного изнашивания.

Глубокую очистку масла от НРП в среднеоборотных дизелях возлагают на ЦС. Его эффективность может быть оценена индексом производительности сепаратора  $\Sigma = FrF_T = (R_{cp} \omega^2/g)F_T$ , где  $R_{cp}$  – средний радиус тарелок, м;  $\omega$  – угловая скорость ротора, рад/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>. Индекс производительности равен произведению фактора разделения  $Fr$  на среднем радиусе тарелок  $R_{cp}$  ЦС на поверхность  $F_T$  осаждения загрязнений [9]. Чем выше этот показатель, тем интенсивнее будут удаляться из масла НРП, что создает предпосылки для снижения скорости изнашивания деталей двигателя и увеличения срока службы ММ. Для эффективного функционирования комплекса ДЭТМО необходимо обоснование величины  $\Sigma$  [10].

### Постановка задачи и методы исследования

Целью проводимого экспериментального моделирования было определение по скорости изнашивания основных деталей дизеля индекса производительности ЦС, обеспечивающего ресурсосберегающее маслоиспользование в комплексе ДЭТМО. Характеристики условий его функционирования задаются параметрами форсировки дизеля (звено Д) – средним эффективным давлением  $p_{me}$ . Корректировка этого параметра по величине среднестатистического значения в эксплуатации (звено Э) позволяет учитывать роль режимов работы в изнашивании двигателя. Действие звеньев Т (топливо) и М (масло) на дизель оценивается показателем  $K_T$  [5]. При общепринятом подходе этот показатель характеризует влияние на состояние ММ и двигателя качества топлива. Принято, что на состояние дизеля и старение масла влияние проявляется комплексно через систему «топливо – масло», когда  $K_T$  представляет уже не свойства топлива, а совместное действие на дизель звеньев Т и М.

Показатель  $K_T$  ранее был разработан для характеристики топлива. Он совокупно через коэффициенты весомости, одинаковые для всех составляющих его величин, формирует эксплуатационные свойства топлив. В относительных единицах, средневзвешенно через базовые значения таких параметров, как зольность, содержание серы, фракционный и групповой состав, характеризуются особенности топлива в воздействии продуктов его сгорания на старение масла, циркулирующего в СС дизеля.

В качестве пояснения следует отметить, что фракционный и групповой составы в показателе  $K_T$  представляются долей топлива, выкипающего при температуре выше  $350\text{ }^\circ\text{C}$ , и суммарным относительным содержанием асфальто-смолистых веществ и ароматической группы углеводородов соответственно [1].

Многочисленные исследования эффективности комбинированной очистки масла в судовых автоматизированных дизелях проиллюстрировали, что роль ЦС в их надежной ресурсосберегающей эксплуатации довольно высока [11]. Большой разброс параметра  $\Sigma$  в современных комплексах ДЭТМО указывает на необходимость обоснования минимального значения этого параметра, обеспечивающего ресурсосберегающее маслоиспользование. На данном этапе исследований рассматривался комплекс ДЭТМО, включающий тронковый дизель со средним эффективным давлением  $p_{me} = 0,8\text{--}2,2\text{ МПа}$  и частотой вращения  $n_d = 10\text{--}20\text{ с}^{-1}$ , способный работать как на дистиллятных, так и на остаточных тяжелых топливах. Режимы эксплуатации двигателя соответствовали средней нагрузке  $60\text{--}90\%$  от номинальной мощности при работе по винтовой и нагрузочной характеристикам.

Смазка дизелей осуществлялась унифицированными ММ (ГОСТ 12337-84) с щелочностью  $6\text{--}30\text{ мгКОН/г}$ . Комбинированная тонкая очистка масел состояла в их байпасном центрифугировании и полнопоточном фильтровании с номинальной тонкостью отсева  $30\text{--}50\text{ мкм}$  с использованием СРФ и фильтров масляных полнопоточных (ФМП) со сменными ФЭ [3]. Качество применяемых масел с позиций моторных (триботехнических, термоокислительных и моюще-диспергирующих) свойств соответствовало уровню форсировки дизеля и эксплуатационных свойств топлив.

Экспериментальное моделирование влияния центробежного сепарирования смазочного масла на состояние дизеля оценивалось скоростью изнашивания его основных деталей. Изнашивание вкладышей подшипников и поршневых колец контролировали по потере их массы за этап испытаний  $250\text{ ч}$ . Взвешивание деталей осуществляли на весах ВЛА-200. Изнашивание цилиндрических втулок измеряли на основе метода искусственных баз с использованием прибора УПОИ-6 [1].

Лунки на втулках наносили в пяти поясах (по высоте) и восьми образующих. Эксперимент проводили на дизеле 9L28/32A (9ЧН 28/32) со следующими параметрами:  $P_e = 2\ 205\text{ кВт}$ ;  $p_{me} = 1,95\text{ МПа}$ ;  $n_d = 12,5\text{ с}^{-1}$ . В качестве центробежного маслоочистителя использовался сепаратор СЦ-1,5 ( $\Sigma = 3\ 300\text{ м}^2$ ;  $n_c = 114\text{ с}^{-1}$ ). Сепаратор в СС подключается по частичнопоточной схеме. Регулирование индекса производительности сепаратора осуществляли заменой части тарелок на «глухие». При этом  $\Sigma$  регулировался в пределах  $0\text{--}1\ 400\text{ м}^2$  за счет изменения поверхности осаждения загрязнений (числа тарелок). При отключении ЦС очистка масла производилась только полнопоточным фильтром СРФ-60.

В эксперименте, осуществляемом по ОСТ 24.060.09-89, не только варьировали фактором  $\Sigma$ , но и использовали топлива с различными эксплуатационными свойствами. В качестве основного топлива применялся флотский мазут Ф-12 ( $K_T = 1$ ) (ГОСТ 10585-99). Легкий режим топливоиспользования предусматривал применение дистиллятного топлива СМТ ( $K_T = 0,2$ ) (ТУ38101567-87), тяжелый – сжигание топочного мазута М-40В ( $K_T = 1,8$ ) (ГОСТ 10585-99). Перечисленным топливам соответствовали масла М-14-Г<sub>2</sub> (цс), М-14-Д<sub>2</sub> (цл20) и М-14-Д<sub>2</sub> (цл30), т. е. они использовались в парных сочетаниях с топливами. Таким образом, маркировка  $K_T = 0,2; 1; 1,8$  обозначала соответствующее ей конкретное сочетание звеньев Т и М. Основными компонентами легирования масел были присадки МАСК и ПМС с массовой долей  $6\text{--}24\%$  и с содержанием активных компонентов, %: кальция –  $0,28\text{--}0,3$ ; цинка –  $0,045$ ; фосфора –  $0,04$ .

Рассмотрим уровни и интервалы варьирования факторов, принятых в моторном эксперименте. Удельный индекс производительности ЦС (фактор  $x_1$ ) принят в пересчете на среднюю мощность дизеля на каждом этапе испытаний. Интервал его варьирования составил  $0,3\text{ м}^2/\text{кВт}$ . Фактор  $K_T$  (в безразмерном обозначении  $x_2$ ) в натуральном виде на нижнем, основном (среднем) и верхнем уровнях представлен значениями (табл. 1).

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
Удельный индекс производительности ЦС $\sigma_c$ , $\text{м}^2/\text{кВт}$	$x_1$	0,3	0	0,3	0,6
Качество топлива $K_T$ , отн. ед.	$x_2$	0,8	0,2	1	1,8

Оценка эффективности звена О (очистка) и комплекса ДЭТМО в целом осуществлялась по критерию «скорость изнашивания дизеля». Последний представляет сумму износов вкладышей подшипников, поршневых колец и цилиндрических втулок на рассматриваемом цикле испытаний длительностью 250 ч относительно их значений на базовом (основном) этапе, взятых с одинаковыми коэффициентами весомости.

Для проведения эксперимента выбран ортогональный центральный композиционный план второго порядка, преимущество которого заключается в малом объеме вычислений, т. к. все коэффициенты регрессии определяются в нем независимо друг о друга. В ортогональных планах суммы построчных произведений элементов двух любых столбцов матрицы планирования должны быть равны нулю [12].

Для ортогонализации экспериментальных данных выбран «звездный» план, позволяющий произвести ортогонализацию всех столбцов матрицы. Для этого была осуществлена замена  $x_1^2$  и  $x_2^2$  новыми переменными  $x_1'$  и  $x_2'$ . После замены суммы построчных произведений столбцов стали равняться нулю. Замена была произведена следующим образом:  $x_1' = x_1^2 - 2/3$ ;  $x_2' = x_2^2 - 2/3$ . После замены  $x_i^2$  на  $x_i'$  суммы построчных произведений столбцов в матрице планирования (табл. 2) равны нулю. Она становится ортогональной при плече  $\alpha = 1$ .

Таблица 2

Матрица ортогонального центрального композиционного плана второго порядка

Содержание	№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_1^2(x_1')$	$x_2^2(x_2')$	$y_j$	$\hat{y}_j$	$(y_j - \hat{y}_j)^2$
План типа $2^2$	1	+	+	+	+	+1/3	+1/3	127,55	124,67	8,29
	2	+	-	+	-	+1/3	+1/3	225,51	226,67	1,35
	3	+	+	-	-	+1/3	+1/3	64,40	65,00	5,76
	4	+	-	-	+	+1/3	+1/3	110,58	112,22	2,69
«Звездные» точки с плечом $\alpha = 1$	5	+	+	0	0	+1/3	-2/3	85,72	91,00	27,88
	6	+	-	0	0	+1/3	-2/3	157,79	155,00	7,78
	7	+	0	+	0	-2/3	+1/3	162,27	164,00	2,99
	8	+	0	-	0	-2/3	+1/3	73,23	74,00	0,59
Нулевая точка	9	+	0	0	0	-2/3	-2/3	103,90	105,00	1,21
		103,30	2,89							
		107,80	7,84							
Коэффициенты регрессии $b_1$	$b'_0$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$S_E = \sum_{u=1}^3 (y_u - \bar{y}_u)^2 = 11,94$ ; $S_R = \sum_{j=1}^8 (y_j - \hat{y}_j)^2 = 57,33$		
	123	105	-36	45	-13	14	10			

Обработка результатов опыта была произведена по следующей схеме. Для вычисления дисперсии воспроизводимости  $s_y^2$  (табл. 2) было проведено три параллельных опыта в центре плана (нулевой точке). По результатам эксперимента была определена дисперсия воспроизводимости. Ее вычисляли по формуле

$$s_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \left[ \sum_{j=1}^N (y_u - \bar{y}_u)^2 \right] = \frac{11,94}{2} = 5,97,$$

где  $n_0$  – число параллельных опытов в нулевой точке;  $y_u$  – значение параметра оптимизации в  $u$ -м опыте;  $\bar{y}_u$  – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в  $n_0$  параллельных опытах.

Коэффициенты регрессии (приведены в табл. 2) были рассчитаны согласно рекомендациям [12] по выражению

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_{ij}}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер соответствующего столбца матрицы;  $j$  – номер опыта;  $x_{ij}$  – элементы соответствующего столбца матрицы;  $y_j$  – значение параметра оптимизации в  $j$ -м опыте.

Дисперсия коэффициентов регрессии определялась по формуле [12]

$$s^2 \{b_i\} = \frac{s_y^2}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}.$$

В табл. 3 приведены значения коэффициентов регрессии и представлены доверительные интервалы каждого из них, найденные через табличное значение критерия Стьюдента

$$\Delta b_i = \pm t_{\tau} s \{b_i\},$$

где  $t_{\tau}$  – табличное значение критерия Стьюдента [12].

Таблица 3

Дисперсия и доверительный интервал коэффициентов регрессии

Значение коэффициента	$b_i$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$	$b_{11}$	$b_{22}$
		105	-36	45	-13	14	10
Дисперсия	$s^2 \{b_i\}$	0,66	0,995	0,995	1,49	2,99	2,99
Доверительный интервал	$\Delta b_i$	3,50	4,29	4,29	5,25	7,43	7,43

При 5 %-м уровне значимости и числе степеней свободы 2 табличный критерий Стьюдента был принят равным 4,3. Значения дисперсий и доверительных интервалов для коэффициентов регрессии находятся в пределах 0,66–2,99 и 3,5–7,43 соответственно.

Все коэффициенты оказались статистически значимыми, т. к. их абсолютные величины больше, чем доверительный интервал каждого из них.

#### Результаты исследований и их анализ

На основе вычислений  $b_i$  по формуле (1) модель изнашивания дизеля можно представить в следующем виде:

$$y = 105 - 36x_1 + 45x_2 - 13x_1x_2 + 14x_1^2 + 10x_2^2.$$

По данным табл. 2 была вычислена дисперсия адекватности по формуле

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)} = \frac{57,33}{5} = 11,47,$$

где  $y_j$  – значение параметра оптимизации в  $j$ -м опыте;  $\hat{y}_j$  – значение параметра оптимизации, вычисленное по модели для условий  $j$ -го опыта;  $N$  – число опытов в эксперименте;  $k$  – число факторов (в данном случае  $k = 2$ ).

Адекватность найденной модели проверялась по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} = \frac{11,43}{5,97} = 1,92.$$

Табличное значение критерия Фишера  $F_{\tau}$  согласно рекомендациям [12] при 5 %-м уровне значимости и числе степеней свободы  $f_1 = 2$ ;  $f_2 = 5$  принято равным 19,3. Сопоставив рассчитанный критерий Фишера с его табличным значением можно сделать вывод о том, что  $F_p < F_{\tau}$ . В соответствии с вышеизложенным данную модель можно считать адекватной.

Анализ коэффициентов  $b_i$  из табл. 2 иллюстрирует, что наибольшее влияние на изнашивание судового дизеля оказывает фактор  $x_2$  ( $b_2 = 45$ ). Существенную роль в снижении изнашивания деталей дизеля играет индекс производительности сепаратора – фактор  $x_1$  ( $b_1 = -36$ ). Взаимодействие факторов  $x_1$  и  $x_2$  проявляется в усилении роли ЦС в снижении износа дизеля при ухудшении качества топлива.

Через соотношения  $x_1 = (\sigma_c - 0,3) / 0,3$  и  $x_2 = (K_{\tau} - 1) / 0,8$  осуществляли перевод факторов в натуральное выражение, что позволило представить модель изнашивания в следующем виде:

$$И = 100 - 159\sigma_c + 41K_{\tau} - 54\sigma_c K_{\tau} + 156\sigma_c^2 + 16K_{\tau}^2. \quad (2)$$

На рис. 1 проиллюстрировано влияние удельного индекса производительности сепаратора на интенсивность изнашивания деталей дизеля в зависимости от качества используемого топлива.

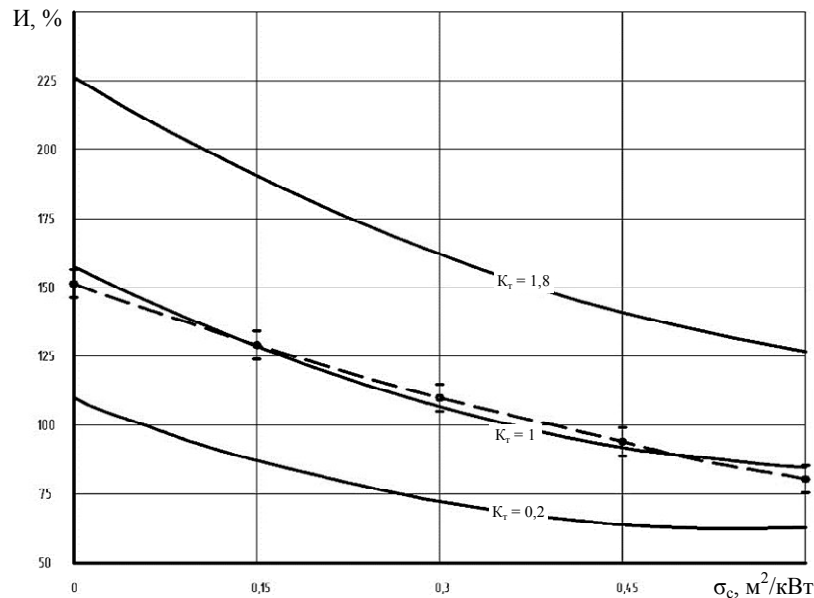


Рис. 1. Влияние удельного индекса производительности сепаратора на интенсивность изнашивания деталей дизеля

С ухудшением качества топлива влияние  $\sigma_c$  на И усиливается. Точки перегиба кривых являются точками минимума. В них И имеет наименьшее значение, т. е. изнашивание минимально. Две точки из трех, характеризующие  $I_{\min}$  и  $\sigma_{\min}$ , лежат за пределами факторного пространства.

При увеличении индекса производительности сепаратора выше значений  $\sigma_{c \min}$  скорость изнашивания деталей дизеля  $I_{\min}$  не снижается. Дальнейшее увеличение  $\sigma_c$  на скорость изнашивания двигателя влияния не оказывает, что подтверждается опытом эксплуатации комплекса ДЭТМО разного состава.

Наличие экстремума (минимума) в зависимости  $I(\sigma_c, K_T)$  обусловлено особенностями полученной модели, аппроксимированной полиномом второй степени. В однофакторном эксперименте при  $K_T = 1$  все значения И, определенные с доверительной вероятностью 95 %, для диапазона  $\sigma_c = 0 - \sigma_{\min}$  находятся в поле рассеяния экспериментальных данных. Вышеизложенное позволяет считать индекс производительности сепаратора в данных точках оптимальным ( $\sigma_{\text{opt}}$ ), т. к. он обеспечивает минимальное изнашивание дизеля при использовании соответствующего вида топлива. Оптимальное значение индекса производительности сепаратора  $\sigma_{\text{opt}}$  получено приравнением производной  $dI / d\sigma_c$ , найденной по выражению (2), нулю. Зависимость оптимального (минимального) индекса производительности сепаратора от качества используемого топлива можно представить следующим образом:

$$\Sigma_{\text{opt}} = 0,512 + 0,174K_T. \quad (3)$$

Соответствующее значение минимального изнашивания дизеля при этой интенсивности сепарирования масла находится по зависимости (2) при замене  $\sigma_c$  на  $\sigma_{\text{opt}}$ :

$$I_{\min} = 59,47 + 16,45K_T + 11,44K_T^2.$$

Согласно графику (см. рис. 1) при использовании дистиллятного топлива ( $K_T = 0,2$ ) оптимальный индекс производительности сепаратора равен  $0,546 \text{ м}^2/\text{кВт}$ . При работе двигателя на дизельном топливе такой индекс производительности обеспечит минимальное изнашивание деталей дизеля:  $I_{\min} = 63 \%$ . Стабилизация изнашивания деталей дизеля, работающего на топливах с показателем  $K_T = 1$ , наблюдается при  $\sigma_c = 0,686 \text{ м}^2/\text{кВт}$ . Величина  $I_{\min}$  при этом равна 84 %.

При использовании тяжелых топлив, таких как топочный мазут ( $K_T = 1,8$ ), необходимо выбирать сепаратор с удельным индексом производительности  $0,825 \text{ м}^2/\text{кВт}$ , что обеспечивает  $I_{\min} = 121 \%$ . Это обусловлено повышенным загрязнением ММ нерастворимыми продуктами сгорания топлива. Увеличение удельного индекса производительности выше оптимального не приводит к снижению интенсивности изнашивания деталей дизеля, но может способствовать продлению срока службы масла до замены и уменьшает частоту химических чисток СРФ, т. е. увеличивает автономность его работы.

Влияние качества топлива на И при различных индексах производительности ЦС (рис. 2) иллюстрирует интенсификацию изнашивания основных деталей дизеля при его конвертировании на сжигание низкосортных нефтепродуктов.

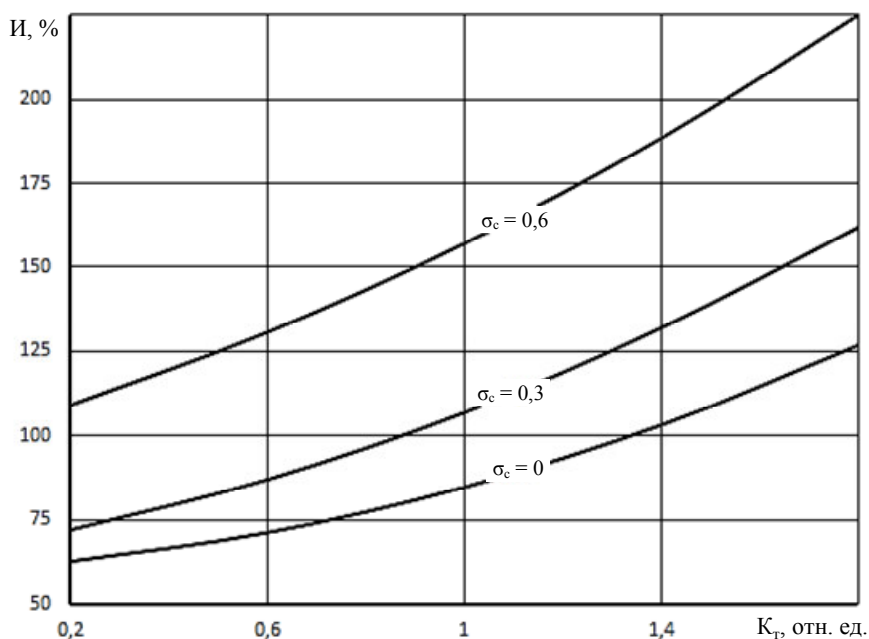


Рис. 2. Влияние качества топлива на интенсивность изнашивания деталей дизеля

В большей мере значительное увеличение И обусловлено ростом скорости изнашивания поршневых колец и цилиндрических втулок. Зависимость  $I(K_T)$  имеет параболический вид. В пределах увеличения показателя  $K_T$  от 0,2 до 1,8 без центробежного сепарирования масла ( $\sigma_c = 0$ ) И возрастает в 2,9 раза. При интенсивном его центрифугировании ( $\sigma_c = 0,6$ ) в том же режиме ужесточения топливоиспользования увеличение И составляет всего 65 %, что указывает на возрастающую роль ЦС в ресурсосберегающем маслоиспользовании при переводе дизелей на использование продуктов глубокой переработки нефти.

При работе двигателя на дистиллятных топливах эффект от интенсивного сепарирования масла состоит в снижении И на 50–60 %. Сжигание в дизелях низкосортных топлив позволяет сепарированием ММ снизить изнашивание их основных деталей почти в два раза (рис. 2). Рекомендации по выбору ЦС в соответствии с зависимостью (3) позволяют определить его индекс производительности, обеспечивающий ресурсосберегающее маслоиспользование, т. е. поддержание интенсивности изнашивания на минимально возможном уровне. Верхний уровень  $\sigma_c$  может быть выбран из условия достижения интенсивности сепарирования (произведения пропускной способности сепаратора на полноту отсева нерастворимых продуктов), обеспечивающей поддержание концентрации НРП в масле и содержания присадок в активной форме на доброковочном уровне [1]. Поправочный коэффициент для перехода от  $\sigma_{c \min}$  к  $\sigma_{c \max}$  находится в диапазоне 1,2–1,7. Его значение зависит от технического состояния, быстроходности и размеров цилиндров дизеля, скорости угара масла.

Выбранное по выражению (3) значение  $\sigma_{\text{opt}}$  ЦС обеспечивает срок службы ФЭ из целлюлозных материалов в полнопоточных фильтрах типа ФМП не менее 700 ч [1]. При сепарировании ММ с индексом производительности  $\sigma_{\text{opt}}$  срок автономной работы СРФ-60 и СРФД-120 без обслуживания автоматизированных фильтров составляет 3–5 тыс. ч [3]. Рекомендации по выбору ЦС проверены в судовых форсированных дизелях средней и повышенной частоты вращения при их эксплуатации на судах. Комплектование их СС сепараторами согласно зависимости (3) способствует ресурсосберегающему маслоиспользованию в ДВС на судах.

### Заключение

Экспериментальным моделированием по критерию «скорость изнашивания дизеля» установлена, в зависимости от качества сжигаемого топлива, оптимальная интенсивность центробежного сепарирования масла в комбинированных системах его очистки с использованием полнопоточных фильтров типа ФМП и СРФ. Выявлено, что при работе тронкового форсированного дизеля на дистиллятных топливах ( $K_T = 0,2-0,4$ ) для байпасной глубокой очистки масла от тонкодисперсных НРП необходим ЦС с минимальным значением удельного индекса производительности  $\sigma_c = 0,546 \text{ м}^2/\text{кВт}$ .

Работа на флотских мазутах и моторном топливе ( $K_T = 0,9-1,1$ ) требует использования ЦС со значениями  $\sigma_{\text{opt}}$  не менее  $0,686 \text{ м}^2/\text{кВт}$ . Сжигание топочных мазутов ( $K_T = 1,6-1,8$ ) возможно только при установке в СС сепаратора с удельным индексом производительности более  $0,825 \text{ м}^2/\text{кВт}$ . При условиях эксплуатации комплекса ДЭТМО, когда звено М соответствует качеству применяемого топлива (звену Т), ресурсосберегающее маслоиспользование возможно, когда ЦС выбирается с условием  $\sigma_c > \sigma_{\text{opt}}$  при котором достигается минимальное изнашивание основных деталей дизеля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кича Г. П., Перминов Б. Н., Надежкин А. В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях. Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2011. 372 с.
2. Тарасов В. В., Соболенко А. Н. Влияние эксплуатационных свойств регенерированного моторного масла на изнашивание судового дизеля при его работе на разных сортах топлива // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 71–81.
3. Кича Г. П., Надежкин А. В., Бойко С. П. Результаты эксплуатационных испытаний саморегенерирующегося фильтра в судовых дизелях в составе комбинированного маслоочистительного комплекса // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2019. № 4. Т. 2. С. 718–726.
4. Кича Г. П., Бойко С. П., Глушков С. В. Моделирование тонкости и полноты отсева саморегенерирующихся фильтров с ткаными сетками полотняного переплетения при очистке топлив и масел судовых энергетических установок // Мор. интеллектуал. технологии. 2016. № 3 (33). Т. 1. С. 152–158.
5. Кича Г. П., Глушков С. В., Тарасов В. В. Регенерирование отработанных моторных масел и восстановление их эксплуатационных свойств на судах // Мор. интеллектуал. технологии. 2016. № 3 (33). Т. 1. С. 126–132.
6. Кича Г. П., Артемьев А. К., Надежкин А. В., Шкаренко В. А. Опыт применения и перспективы развития самоочищающихся фильтров в смазочных системах ДВС // Двигателестроение. 1985. № 7. С. 35–38.
7. Кича Г. П., Артемьев А. К., Надежкин А. В. Оптимизация и выбор параметров тканых сеток топливных и масляных самоочищающихся фильтров // Двигателестроение. 1984. № 11. С. 28–31.
8. Кича Г. П., Надежкин А. В., Пак Н. К. Саморегенерирующийся фильтр новой конструкции для очистки топлив и смазочных масел на судах // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 203–207.
9. Кича Г. П., Пак Н. К. Новые инженерные решения в конструкциях саморегенерирующихся фильтров для очистки топлив и смазочных материалов на судах // Мор. интеллектуал. технологии. 2013. № 1. Т. 1. С. 54–59.
10. Средства очистки жидкостей на судах: справ. / под ред. И. А. Иванова. Л.: Судостроение, 1984. 272 с.
11. Кича Г. П. Эксплуатационная эффективность новых маслоочистительных комплексов в форсированных дизелях // Двигателестроение. 1987. № 6. С. 25–29.
12. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

Статья поступила в редакцию 30.04.2020



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Молоков Николай Сергеевич** — Россия, 690003, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; nikolaimolokov2014@mail.ru.

**Кича Геннадий Петрович** — Россия, 690003, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания; kicha@msun.ru.

**Надежкин Андрей Вениаминович** — Россия, 690003, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; nadezkin@msun.ru.



INFLUENCE OF LUBRICATING OIL CENTRIFUGAL  
SEPARATION INTENSITY IN COMBINED CLEANING SYSTEMS  
ON MARINE DIESEL ENGINE

*N. S. Molokov, G. P. Kicha, A. V. Nadezkin*

*Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,  
Vladivostok, Russian Federation*

**Abstract.** The article considers the rationality of combined lubricating oil cleaning system in the automatically operated marine diesel engines. The system includes a self-recovering filter and a self-cleaning centrifugal purifier. This combination is found to obtain resource-saving oil using coupled with minimum engine wear and increased reliability. The full-flow filtration of oil in a diesel engine lubricating system is necessary to protect its friction couples (bearings) from abrasive wear. Centrifugal separation contributes deep oil purification i.e. removal of insoluble impurities reducing lubricating oil service life. By means of experimental simulation there has been found a minimum value of centrifugal purifier capacity index, when engine wear reaches the lowest level and keeps stable. The dependence of engine wear on the fuel quality and centrifugal purification intensity represented by centrifugal purifier capacity index is displayed. The adequacy variance was calculated, the adequacy of the found model being checked by using Fisher criterion. The experimental design and processing of the results have been carried out using orthogonal central composite plan of the second order. Specificity of polynomial when all the points of extremum show the minimum value of engine wear was presented. The model is designed to select the proper oil purifier for forced marine diesel engines with average and increased revolutions.

**Key words:** diesel engine, lubricating system, lubricating oil purification, centrifugal separation, self-regenerating filter, engine wear.

**For citation:** Molokov N. S., Kicha G. P., Nadezkin A. V. Influence of lubricating oil centrifugal separation intensity in combined cleaning systems on marine diesel engine. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;3:23-32. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-23-32.

REFERENCES

1. Kicha G. P., Perminov B. N., Nadezhkin A. V. *Resursosberegaiushchee masloispol'zovanie v sudovykh dizeliakh* [Resource-saving oil use in marine diesel engines]. Vladivostok, Izd-vo MGU im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2011. 372 p.
2. Tarasov V. V., Sobolenko A. N. Vliianie ekspluatatsionnykh svoystv regenerirovannogo motornogo masla na iznashivanie sudovogo dizelia pri ego rabote na raznykh sortakh topliva [Influence of operational properties of regenerated engine oil on marine diesel engine wear during its operation on different grades of fuel]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2019, no. 4, pp. 71-81.

3. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Boiko S. P. Rezul'taty ekspluatatsionnykh ispytaniy samoregeneriruiushchegosia fil'tra v sudovykh dizeliakh v sostave kombinirovannogo masloochistitel'nogo kompleksa [Results of operational tests of diesel engine self-regenerating filter as part of combined oil refining complex]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2019, no. 4, vol. 2, pp. 718-726.
4. Kicha G. P., Boiko S. P., Glushkov S. V. Modelirovanie tonkosti i polnoty otseva samoregeneriruiushchikhsia fil'trov s tkanyami setkami polotnianogo perepleteniia pri ochildke topliv i masel sudovykh energeticheskikh ustanovok [Modeling thinness and completeness of screening of self-regenerating filters with woven linen nets for purifying fuels and oils of marine power plants]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2016, no. 3 (33), vol. 1, pp. 152-158.
5. Kicha G. P., Glushkov S. V., Tarasov V. V. Regenerirovanie otrabotannykh motornykh masel i vostanovlenie ikh ekspluatatsionnykh svoystv na sudakh [Regeneration of used motor oils and restoration of their operational properties on ships]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2016, no. 3 (33), vol. 1, pp. 126-132.
6. Kicha G. P., Artem'ev A. K., Nadezhkin A. V., Shkarenko V. A. Opyt primeneniia i perspektivy razvitiia samoochishchichaiushchikhsia fil'trov v smazochnykh sistemakh DVS [Application experience and development prospects of self-cleaning filters in ICE lubrication systems]. *Dvigatelistroenie*, 1985, no. 7, pp. 35-38.
7. Kicha G. P., Artem'ev A. K., Nadezhkin A. V. Optimizatsiia i vybor parametrov tkanykh setok toplivnykh i maslianykh samoochishchichaiushchikhsia fil'trov [Optimization and selection of woven net parameters for fuel and oil self-cleaning filters]. *Dvigatelistroenie*, 1984, no. 11, pp. 28-31.
8. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Pak N. K. Samoregeneriruiushchiisia fil'tr novoi konstruktсии dlia ochildki topliv i smazochnykh masel na sudakh [Newly designed self-regenerating filter for cleaning fuels and lubricants in ships]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2013, no. 1, pp. 203-207.
9. Kicha G. P., Pak N. K. Novye inzhenernye resheniia v konstruktсииakh samoregeneriruiushchikhsia fil'trov dlia ochildki topliv i smazochnykh materialov na sudakh [New engineering solutions in design of self-regenerating filters for cleaning fuels and lubricants on ships]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2013, no. 1, vol. 1, pp. 54-59.
10. *Sredstva ochildki zhidkosteii na sudakh: spravochnik* [Liquid purifiers on ships: reference book]. Pod redaktsiei I. A. Ivanova. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1984. 272 p.
11. Kicha G. P. Ekspluatatsionnaia effektivnost' novykh masloochistitel'nykh kompleksov v forsirovannykh dizeliakh [Operational efficiency of new oil cleaning systems in forced diesel engines]. *Dvigatelistroenie*, 1987, no. 6, pp. 25-29.
12. Spiridonov A. A. *Planirovanie eksperimienta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning experiment in studying technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.

The article submitted to the editors 30.04.2020

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Molokov Nikolai Sergeevich** – Russia, 690003, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Postgraduate Student of the Department of Ship Internal Combustion Engines; nikolaimolokov2014@mail.ru.

**Kicha Gennadiy Petrovich** – Russia, 690003, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Ship Internal Combustion Engines; kicha@msun.ru.

**Nadezhkin Andrei Veniaminovich** – Russia, 690003, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines; nadezhkin@msun.ru.

