

---

---

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СУДОВОЖДЕНИЯ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ

---

---

УДК 621.43.013:629.3

**С.П. Бойко<sup>1</sup>, П.П. Кича<sup>2</sup>, Н.С. Молоков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского,  
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

<sup>2</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РЕГЕНЕРАЦИИ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ФИЛЬТРОВ СМАЗОЧНЫХ СИСТЕМ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*Приведена методика расчета параметров регенерации автоматизированных фильтров, сформированных на базе модулей СРФ-60 и СРФД-120, позволяющая осуществлять выбор с учетом условий функционирования маслоочистителей гидродинамического режима и времени обратной промывки их фильтрующих элементов. Выделено влияние на эффективность регенерации фильтровального процесса, идентифицируемого удельной интенсивностью удаления нерастворимой дисперсной фазы из масла, гидродинамики (числа Рейнольдса) и относительного времени обратной промывки, адгезионных свойств отложений, особенностей конструкции фильтра, дисперсности загрязнений. Показана возможность расчета и корректировки срока автономной работы самоочищающегося фильтра в смазочных системах судовых дизелей с учетом их форсирования, качества применяемых горюче-смазочных материалов, интенсивности старения масла, срабатывания входящих в него присадок и уровня загрязнения крупнозернистыми механическими примесями.*

**Ключевые слова:** самоочищающийся фильтр, регенерация фильтра, очистка топлива и масла, промывка фильтрующих элементов.

**S.P. Boyko<sup>1</sup>, P.P. Kicha<sup>2</sup>, N.S. Molokov<sup>2</sup>**

## MODELING OF REGIME REGENERATION OF SELF-CLEANING FILTERS OF LUBRICANT SYSTEMS OF SHIP DIESELS

*A methodology for calculating the regeneration parameters of automated filters based on the SRF-60 and SRFD-120 modules is presented, which allows choosing, taking into account the operating conditions of the oil purifiers of the hydrodynamic mode and the backwash time of their filter elements. The influence on the efficiency of the regeneration of the filtering process, identified by the specific intensity of the removal of the insoluble dispersed phase from the oil, the hydrodynamics (Reynolds number) and the relative backwash time, the adhesive properties of the deposits, the filter design, the dispersion of the particles, are highlighted. The possibility of calculating and adjusting the autonomous life of the self-cleaning filter in the lubrication systems of marine diesel engines is shown taking into account their forcing, the quality of the used fuels and lubricants, the intensity of oil aging, the operation of additives included in it and the level of contamination with coarse-grained mechanical impurities.*

**Key words:** self-cleaning filter, regeneration of the filter, cleaning of fuel and oil, filtering, washing of the filtering elements.

Полная автоматизация судовых энергетических установок (СЭУ) без применения в системах смазки (СС) двигателей внутреннего сгорания фильтров с длительным сроком необслуживаемой работы невозможно. В СС таких СЭУ для очистки моторного масла (ММ) широкое распространение получили самоочищающиеся фильтры (СОФ) [13]. Рабочие процессы СРФ, особенно регенерация, слабо изучены [3]. При подборе СОФ в СС конкретного дизеля необходимо задавать режимы работы этого маслоочистителя для обеспечения эффективного функционирования с длительным сроком необслуживаемой работы. В настоящее время нет рекомендаций по выбору скорости промывочного потока и времени регенерации, чтобы СОФ надежно функционировали в течение необходимого срока работы с достижением требуемой автономности.

Для определения методики расчета показателей СОФ с позиции задания режима регенерации, когда автоматизированная промывка фильтрующих элементов восстанавливает функциональные характеристики маслоочистителя для эффективного функционирования в режиме фильтрования, был поставлен эксперимент, цель которого заключалась в исследовании закономерностей процесса регенерации [4]. В результате проведенного эксперимента была выявлена зависимость коэффициента регенерации от исследуемых факторов рассматриваемого процесса

$$\varphi_p = \left( \frac{Re_p}{Re_\phi} \right)^{0,087} \Phi_p^{0,1747} K_\phi^{0,1434} f_{\phi_3}^{0,053} \left( \frac{\tau_\phi c_x \Phi_\phi}{\tau_p} \right)^{-0,032} \left( \frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{-0,097} . \quad (1)$$

Экспериментальные данные, полученные в судовых условиях при оценке влияния различных факторов на  $\varphi_p$  показали хорошую сходимость с результатами моделирования. Аппроксимация экспонентами зависимостей  $\varphi_p(x_i)$  методом наименьших квадратов по экспериментальным точкам, снятых с СОФ, проработавшем 2 тыс. ч, показала хорошее совпадение с теоретическими зависимостями. Максимальное расхождение не превышало 12 %. Эксперимент проводился при факторах, засеченных на основном (нулевом) уровне.

Гидродинамический режим  $Re_p$  и продолжительность  $\tau_p$  цикла регенерации ФЭ, обеспечивающие заданные техническими условиями СОФ показатели его работы, рассчитываются уравнением следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} Re_p &= 0,0366 Re_\phi \Phi_p^2 K_\phi^{1,65} f_{\phi_3}^{0,61} \left( \frac{\tau_\phi c_x \Phi_\phi}{\tau_p} \right)^{-0,368} \left( \frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{-1,115} ; \\ \tau_p &= 1,246 \cdot 10^{-4} \tau_\phi c_x \Phi_\phi \left( \frac{Re_p}{Re_\phi} \right)^{-2,72} K_\phi^{-4,48} f_{\phi_3}^{-1,66} \left( \frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^3 . \end{aligned} \right\} . \quad (2)$$

Объединение уравнений системы (2) позволят сформировать промывочный индекс  $K_p$ , по которому можно подобрать СРФ, удовлетворяющий действующим нормативам по основным технико-экономическим показателям с соблюдением требований системы «дизель–эксплуатация–топливо–масло–очистка» (ДЭТМО). В общем виде выражение для промывочного индекса представляется следующим уравнением:

$$K_p = \frac{Re_p}{Re_\phi} \left( \frac{\tau_p}{\tau_\phi} \right)^{0,368} = 0,0167 \Phi_p^2 K_\phi^{-1,65} f_{\phi_3}^{-0,0609} (c_x \Phi_\phi)^{0,368} \left( \frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{1,115} . \quad (3)$$

Выбор параметров регенерации фильтра может осуществляться по промывочному индексу. Его значение, соответствующее конкретным условиям функционирования СРФ, выбираются по зависимости (3).

Она сформирована с учетом смываемости (адгезионных свойств) отложений. Показатель  $\Phi_p$  зависит от качества применяемых горюче-смазочных материалов, прежде всего, от моюще-диспергирующих свойств ММ и интенсивности его старения (карбонизации), наличия асфальто-смолистых продуктов в отложениях.

Как изменяется значение регенерационного индекса моделей СРФ-60 и СРФД-120 по мере ужесточения условий их функционирования иллюстрирует рис. 1. При его формировании учитывалось конструктивные особенности фильтров и условия функционирования их регенерационных устройств.

Градация факторов  $x_i$  зависимости (3) осуществлялась равномерно в диапазоне от нижнего значения (-1) до верхнего (+1). Уровни кодированных значений факторов приведены в работах [8, 13].

Для СРФ, функционирующих в СС судовых дизелей, рабочий диапазон  $K_p$  находится в пределах 0,5–2. Его формирование осуществлено при равномерном изменении всех факторов в кодированном виде от +0,5 до -0,25. Функционируя в этих условиях, модули СРФ-60 и СРФД-120 способны реализовать режим автономной (необслуживаемой) работы  $\tau_{\text{СРФ}}=3$  тыс. ч. Рабочая зона (рис. 1) комбинированных систем тонкой очистки масла (КСТОМ) большинства дизелей при использовании автоматизированных фильтров, созданных на базе модуля СРФ-60, статистически (наиболее часто) реализуется состоянием *A* ( $K_p=1,13$ ), а для конструкции СРФД-120 – состоянием *B* ( $K_p=2$ ).

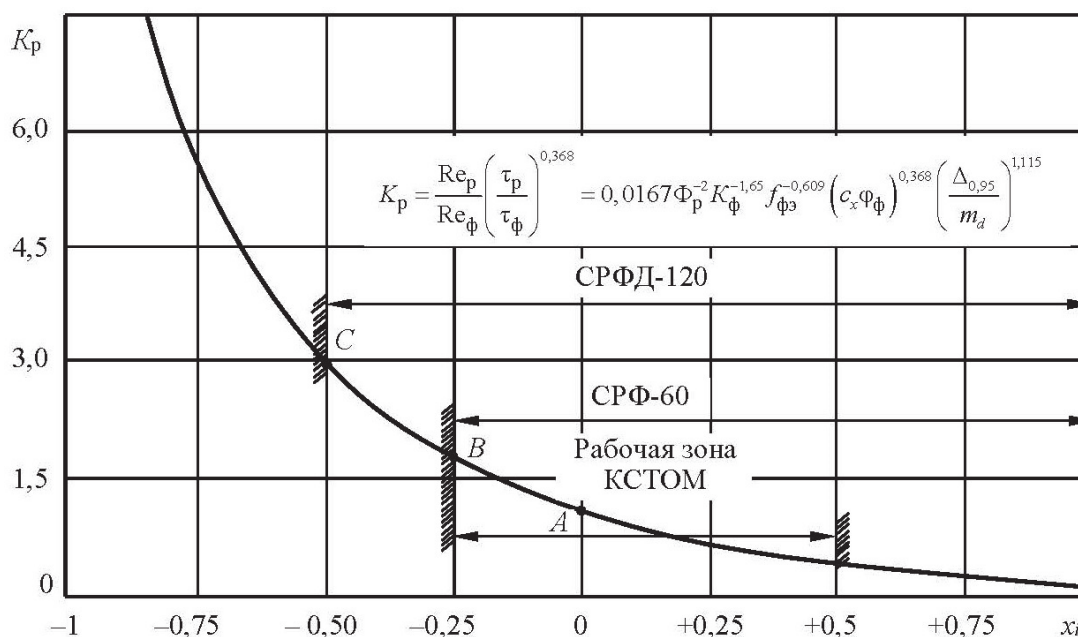


Рис. 1. Влияние на промывочный индекс фильтров основных факторов регенерационного процесса

Fig. 1. Influence of the main factors on the filter wash index the regeneration process

Зная значение промывочного индекса для заданных условий функционирования конкретного СРФ, по уравнению (3) можно выбрать основные компоненты его регенерационного процесса. Возможность варьирования компонентами  $\overline{Re}_p$  и  $\overline{\tau}_p$  для довольно жестких

условий работы модулей СРФ-60 (непрерывный режим регенерации) и СРФД-120 (периодический) показаны на рис. 2.

Наиболее рациональный режим регенерации для СРФ-60 при значении  $K_p=1,13$  возможен при непрерывном вращении регенерационного устройства с частотой  $0,1-2 \text{ мин}^{-1}$ . При использовании патента № 163757 на полезную модель переключение с одной фильтровальной камеры на другую осуществляется мгновенно без потерь времени на перемещение распределителя между ними. В этом случае при относительном времени регенерации  $\bar{\tau}_p=0,1$  процесс регенерации будет эффективен, если  $\bar{Re}_p$  будет выше 2,66, т.е. скорость промывки ФЭ должна превышать скорость фильтрации почти в 3 раза.

Для модуля СРФД-120 ( $K_p=3$ ) легко реализуем режим промывки  $\bar{Re}_p=4,7$ , что требует на каждом цикле регенерации воздействовать на отложения для их эффективного смыва в течение  $\bar{\tau}_p=0,016$ . Зная возможности регенерационного устройства по интенсивности промывочного импульса (давления воздуха для подачи промывочного масла), можно определить, как часто будет включаться в работу цикл регенерации. По связи показателей  $\bar{\tau}_p$  и  $\bar{Re}_p$  в регенерационном индексе  $K_p$ , варьируя каждым из них, можно обеспечить эффективную промывку ФЭ.

Условия работы СРФ в смазочных системах ДВС на судах, которые полностью воспроизводились при лабораторных испытаниях модели фильтров, приведены в таблице. В ней показано, при каких характеристиках звеньев системы ДЭТМО результаты модельных испытаний по определению  $\varphi_{p\Sigma}$  можно распространить на эксплуатационные показатели СРФ. Тождественность лабораторных и натурально замеренных значений  $\varphi_{p\Sigma}$  соблюдается при соответствии качества топлива и ММ с уровнем форсирования дизеля по среднему эффективному давлению  $p_{me}$ .

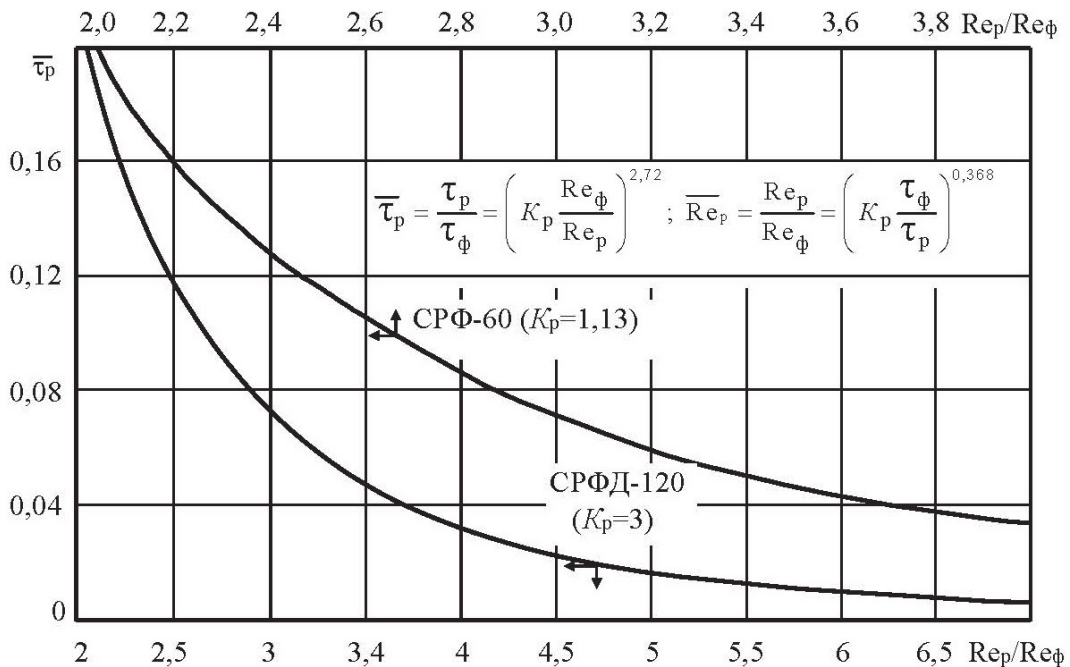


Рис. 2. Зависимость продолжительности регенерации фильтров от соотношения скоростей промывочного и фильтровального потоков  
Fig. 2. Dependence of the filter regeneration duration on the ratio wash and filter flow rates

Апробированные характеристики звеньев ДЭТМО, приводящие к надежной работе дизеля, по состоянию ММ фиксируются следующими значениями показателей  $\bar{П}$  и  $\bar{N}_r$  (таблица), определяемыми к моменту отработки им 2 тыс. ч. Доля присадок в ММ, находящихся в активной форме, должна составлять 0,2–0,4 их содержания в свежем масле. При этом необходимо, чтобы дисперсность нерастворимой фазы загрязнений в ММ находилась в пределах  $\Delta_{0,95}/m_d = 10\text{--}60$ . Уровень  $\bar{N}_r$  грубодисперсной фазы НРП (количество частиц крупнее 5 мкм) должен составлять 75–400 тыс. шт./мл. Статистические показатели по  $\bar{П}$  и  $\bar{N}_r$  приведены для периода стабилизации параметров старения ММ, что наблюдается через 1–3 тыс. ч его работы [5, 10].

Продолжительность работы СРФ до проведения профилактического осмотра и химической чистки ФЭ определяется по достижении перепада давления  $\Delta p_{\text{фд}}$ , фиксируемого сразу же после цикла регенерации. В этом случае число  $n_{\text{х.ч}}$  циклов «фильтрация–регенерация», когда необходимо проведение регламентных работ, составляет

$$n_{\text{х.ч}} = \frac{\ln \varphi_{\text{рд}}}{\ln \varphi_{\text{р}}} = \frac{\ln \left( \frac{\Delta p_{\text{р}} - \Delta p_{\text{фд}}}{\Delta p_{\text{р}} - \Delta p_{\text{фо}}} \right)}{\ln \varphi_{\text{р}}} \quad (4)$$

### Статистические данные по состоянию моторного масла в смазочных системах судовых дизелей при эффективном функционировании СРФ

#### Statistical data on the state of engine oil in the lubrication systems of marine diesels with the effective functioning of the SRF

Уровень форсирования дизеля и применяемое масло		Работа на топливе		Доля присадок, находящихся в активной форме	Количество грубодисперсных НРП
$P_{\text{ме}}$ , МПа	Марка масла	Топливо	Содержание серы, %	$\bar{П}$ , отн. ед.	$\bar{N}_r$ , тыс. шт./мл
0,5–0,8	М-10(14)-Г <sub>2</sub> (цс)	СМТ	0,1–0,5	0,2–0,4	75–100
	М-10(14)-Д <sub>2</sub> (цл20)	ДТ, Ф-5, Ф-12	0,5–2	0,3–0,4	150–200
0,8–1,2	М-10(14)-Г <sub>2</sub> (цс)	СМТ	0,1–0,5	0,2–0,3	100–150
	М-10(14)-Д <sub>2</sub> (цл20)	ДТ, Ф-5, Ф-12	0,5–2	0,3–0,4	200–250
	М-14(16)-Д <sub>2</sub> (цл30)	ДМ, М-40, М-100	2–3,5	0,3–0,4	300–350
1,2–2	М-10(14)-Г <sub>2</sub> (цс)	СМТ	0,1–0,5	0,2–0,3	150–200
	М-10(14)-Д <sub>2</sub> (цл20)	ДТ, Ф-5, Ф-12	0,5–2	0,2–0,3	250–300
	М-14(16)-Д <sub>2</sub> (цл30)	ДМ, М-40, М-100	2–3,5	0,2–0,3	350–400

На основе зависимостей (3) и (4) получено выражение для расчета и корректировки (в зависимости от условий эксплуатации) срока автономной работы СРФ (периодичности освидетельствования и химической чистки МО)

$$\tau_{\text{СРФ}} = \tau_{\text{х.ч}} = 3000\mu_{\text{СРФ}} \frac{\Delta p_{\text{фд}}}{\Delta p_{\text{ф}\Sigma}} \left( \frac{\Pi_{\tau}}{\bar{\Pi}} \right)^{0,85} \left( \frac{\bar{N}_{\tau}}{N_{\tau\tau}} \right)^{1,24}, \quad (5)$$

где  $\Pi_{\tau}$ ,  $\bar{\Pi}$  и  $N_{\tau\tau}$ ,  $\bar{N}_{\tau}$  – реальное и нормативное содержание в масле многофункциональных присадок и грубодисперсных нерастворимых загрязнений;  $\mu_{\text{СРФ}}=0,7-1,2$  – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности фильтра.

Использование зависимости (5) в практике эксплуатации СРФ позволяет прогнозировать состояние и планировать сроки его профилактического обслуживания с учетом условий работы в системе ДЭТМО. Обобщение опыта использования СРФ, комплектуемых на базе модулей СРФ-60 и СРФД-120 [10, 11], в смазочных системах судовых тронковых дизелей показало, что период их автономной работы может составлять 3–5 тыс. ч. Факторы, вызывающие снижение  $\tau_{\text{СРФ}}$ , состоят в интенсивном срабатывании присадок, несоответствии качества масел применяемым топливам, интенсивном загрязнении ММ НРП при нарушении работы топливной аппаратуры. Значительному увеличению  $\tau_{\text{СРФ}}$  способствует использование КСТОМ, особенно при дополнительной глубокой очистке масла сепарированием (центрифугированием) [13–16]. Расчетная зависимость (5) на основе данных, приведенных в таблице, позволяет с высокой точностью (достоверностью) корректировать показатель  $\tau_{\text{СРФ}}$ .

## Выводы

1. На основе экспериментальных исследований разработана модель регенерации самоочищающихся фильтров смазочных систем судовых дизелей, позволяющая рассчитывать эффективность функционирования автоматизированных маслоочистителей в зависимости от различных факторов. Установлена зависимость для определения интенсивности и продолжительности воздействия на осадок ФЭ промывного потока для достижения требуемой для эффективной работы СОФ коэффициента регенерации и его срока (ресурса) необслуживаемой работы.

2. Приведены статистические показатели по интенсивности старения моторного масла при разных уровнях форсирования дизеля в широком диапазоне изменения качества применяемых горюче-смазочных материалов, что позволяет осуществлять обоснованный выбор СОФ и режимов его функционирования в многозвенной системе ДЭТМО и эффективно использовать этот очиститель при комбинированной тонкой очистке масла.

## Список литературы

1. Кича Г.П., Полоротов С.П. Зарубежные автоматические фильтры тонкой очистки масла и топлива судовых энергетических установок // Судостроение за рубежом. 1982. № 3. С. 58–73.
2. 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 морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2019. Т.11, № 4. С. 718–726.
3. Кича Г.П., Артемьев А.К., Надежкин А.В., Шкаренко В.А. Опыт применения и перспективы развития самоочищающихся фильтров в системах смазки судовых ДВС // Двигателестроение. 1985. № 7. С. 35–38.
4. Бойко С.П. Идентификация процесса регенерации автоматизированных фильтров топливных и смазочных систем судовых дизелей // Молодежь. Наука. Инновации: материалы 62-й Междунар. науч.-практ. конф., 18–25 ноября 2014. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2014. С. 59–63.

5. Кича Г.П., Бойко С.П. Идентификация разделительной способности тканых регенерируемых фильтровальных материалов нового поколения // Науч. проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 3. С. 132–139.

6. 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.

7. Кича Г.П., Надежкин А.В., Перминов Б.Н. Имитационное моделирование смазки трибосопряжений и изнашивания основных деталей ДВС // Транспортное дело России. 2004. № 2. С. 51.

8. Кича Г.П., Бойко С.П. Экспериментальное моделирование эффективности процесса регенерации самоочищающихся фильтров, функционирующих в системах смазки судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. 2015. № 3(29), Т. 1. С. 93–100.

9. Dunn, A. R. Selection of wire cloth for filtration and separation // Filtration and Separation. 1980. Vol. 17, № 10. P. 437–451.

10. 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. С. 54–59.

11. Кича Г.П., Надежкин А.В., Пак Н.К. Саморегенерирующийся фильтр новой конструкции для очистки топлив и смазочных масел на судах // Науч. проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 203–207.

12. Lennartz, R. Full flow filtration in lubricating oil systems // Second World Filtration Congress, Proc. London. 1979. P. 541–548.

13. Надежкин А.В., Кича Г.П. Трибомониторинг и трибодиагностика судовых дизелей. Mauritius: Palmarium Academic Publishing, 2018. 422 с.

14. Кича Г.П., Надежкин А.В., Пак Н.К. Оптимизация работы маслоочистительного комплекса судовых двигателей внутреннего сгорания на основе вариационного исчисления // Вестн. инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2012. № 3(12). С. 9–19.

15. Кича Г.П., Глушков С.В., Тарасов В.В. Регенерирование отработанных моторных масел и восстановление их эксплуатационных свойств на судах // Морские интеллектуальные технологии. 2016. № 1. С. 126–132.

16. Кича Г.П. Эксплуатационная эффективность новых маслоочистительных комплексов в форсированных дизелях // Двигателестроение. 1987. № 6. С. 25–29.

**Сведения об авторах:** Бойко Сергей Петрович, кандидат технических наук, e-mail: boykoland@mail.ru;

Кича Павел Петрович, кандидат технических наук, доцент, e-mail: nadezkin@msun.ru;

Молоков Николай Сергеевич, аспирант, e-mail: nadezkin@msun.ru.