

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ САМОРЕГЕНЕРИРУЮЩИХСЯ ФИЛЬТРОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В СМАЗОЧНЫХ СИСТЕМАХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Г. П. Кича<sup>1</sup>, С. П. Бойко<sup>1</sup>, П. П. Кича<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского,  
Владивосток, Российская Федерация

<sup>2</sup> Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
Владивосток, Российская Федерация

Обоснована актуальность исследований рабочих процессов самоочищающегося фильтра, предназначенного для очистки моторного масла в двигателях внутреннего сгорания. Осуществлено экспериментальное моделирование процесса противоточной регенерации самоочищающихся фильтров при их использовании в системах топливоподготовки и смазки дизелей на судах. Схема установки для моделирования рабочих процессов саморегенерирующихся фильтров включает рабочий бак, гидромотор с мешалкой, насос, гидроцилиндр, ресивер сжатого воздуха, сточную цистерну, фильтрующий элемент, запорную и пневморегулируемую аппаратуру, дозатор загрязнений, датчик температуры и другие элементы. Сформирована матрица планирования, и проиллюстрированы результаты эксперимента по оценке эффективности регенерации саморегенерирующихся фильтров. Рассматриваются основные факторы, влияющие на коэффициент регенерации. Представлены зависимости для оценки эффективности этого процесса и прогнозирования срока работы фильтров между химическими чистками. Приведена методика расчета параметров регенерации автоматизированных фильтров, сформированных на базе модулей СРФ-60 и СРФД-120, позволяющая осуществлять выбор гидродинамического режима и времени обратной промывки фильтрующих элементов с учетом условий функционирования маслоочистителей. Анализируется влияние на эффективность регенерации фильтровального процесса, идентифицированного удельной интенсивностью удаления дисперсной фазы из масла, гидродинамики (числа Рейнольдса) и относительного времени обратной промывки, адгезионных свойств отложений, особенностей конструкции фильтра, дисперсности загрязнений. Приведены доказательства адекватности расчетно-экспериментальных зависимостей, полученных по результатам лабораторных испытаний модели фильтра, и соответствия их данным эксплуатационных натурных испытаний самоочищающихся фильтров на судах. Представлена возможность расчета и корректировки срока автономной работы самоочищающегося фильтра в смазочных системах судовых дизелей с учетом форсирования дизеля, качества применяемых горюче-смазочных материалов, интенсивности старения масла, срабатывания входящих в него присадок и уровня загрязнения крупнозернистыми механическими примесями.

**Ключевые слова:** саморегенерирующийся фильтр, система смазки дизеля, судовой дизель, очистка масла, регенерация фильтра, рабочие процессы фильтра.

**Для цитирования:** Кича Г. П., Бойко С. П., Кича П. П. Моделирование рабочих процессов саморегенерирующихся фильтров, функционирующих в смазочных системах судовых дизелей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 2. С. 69–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-69-80.

### Введение

В современных автоматизированных судовых энергетических установках применяются саморегенерирующиеся фильтры (СРФ) для полнопоточной тонкой очистки моторного масла (ММ) в судовых дизелях [1–3]. Они эффективно защищают трибосопряжения двигателя от абразивного изнашивания, в первую очередь рамовые и мотылевые подшипники, т. к. имеют тонкость отсева, равную 30–50 мкм [4].

При подборе СРФ в систему смазки (СС) определенного дизеля необходимо задавать режимы работы этого маслоочистителя (МО) для обеспечения эффективного функционирования

с длительным сроком автономной работы. Процесс фильтрации, описанный в работах [5, 6], характеризуется величиной потока масла, подлежащего очистке, тонкостью и полнотой отсева его от нерастворимых загрязнений. Схема расчета этих показателей известна.

Рабочие процессы СРФ, особенно регенерация, слабо изучены [3]. В настоящее время нет рекомендаций по выбору скорости промывочного потока и времени регенерации, чтобы СРФ надежно функционировали в течение срока необслуживаемой работы с достижением требуемой автономности.

Методики расчета показателей СРФ с позиции задания режима регенерации не существует. Параметры регенерации задаются без должного обоснования, поэтому довольно часты случаи нарушения в работе фильтра, когда автоматизированная промывка фильтрующих элементов (ФЭ) не восстанавливает функциональные характеристики МО для эффективного функционирования в режиме фильтрации [7]. Фильтрующие элементы интенсивно забиваются отложениями, и СРФ переходит в частичнопоточный режим работы, пропуская в пары трения дизеля крупные абразивные частицы загрязнений, способные вызывать задиры в трибосопряжениях.

Режим обратной промывки ФЭ фильтра в значительной мере зависит от диспергирующе-стабилизирующих свойств ММ, адгезионных свойств и скорости поступления загрязнений в СС дизеля. Регенерация в определенной мере зависит и от предшествующего ей процесса фильтрации [6, 7]. Скорость накопления отложений на ФЭ, плотность и адгезия отложений на фильтрующей перегородке формируют требования к промывочному импульсу. Интенсивность его по скорости и периодичность действия обратного потока должны полностью соответствовать качеству-количественному составу отложений, накапливающихся на фильтровальном материале (ФМ). Его тип и форма переплетения, особенно для тканых материалов, также в значительной мере сказываются на требованиях к режиму промывки.

Таким образом, можно заключить, что скорость промывочного потока, периодичность и продолжительность цикла регенерации в большой степени зависят от параметров СС, форсирования и режимов работы дизеля, качества применяемых горюче-смазочных материалов. Параметры регенерации индивидуальны в зависимости от конструкции СРФ [8]. Подбор режимов регенерации осуществляется эмпирически. Имеется необходимость установить связь между процессами фильтрации и регенерации с учетом условий функционирования СРФ. Требуется разработка методики расчета параметров регенерации для обоснования скорости и продолжительности противоточной промывки наиболее распространенных конструкций СРФ с целью обеспечения их эффективного функционирования в СС судовых форсированных тронковых дизелей.

### **Разработка расчетно-экспериментальной модели процесса регенерации фильтров**

Цель проводимого экспериментального моделирования состояла в изучении закономерностей процесса регенерации СРФ. Регенерация при физическом моделировании рассматривалась в связи с циклом фильтрации, предшествующим промывке и характеризующим блокировку пор, уплотнение и распределение осадка на поверхности ФМ и в порах, глубину проникновения частиц в капилляры, силу адгезионных и когезионных связей дисперсной фазы с сеткой и коагуляционные контакты. Основные факторы, влияющие на регенерацию, были выявлены путем наблюдения и контроля за работой фильтров разного типа в судовых форсированных дизелях при очистке ММ широкого уровня эксплуатационных свойств [9].

Одним из основных факторов, влияющих на эффективную регенерацию СРФ, являются скорость промывочного потока  $v_p$  и вязкость промывочной жидкости. Так как скорость  $v_f$  и вязкость фильтруемого потока влияют на закупорку пор ФМ, то в качестве первого фактора выбран показатель, равный отношению критериев Рейнольдса в процессах регенерации и фильтрации  $Re_p / Re_f$ .

Существенное влияние на процесс регенерации также оказывает продолжительность промывки в каждом его цикле. В качестве фактора, характеризующего длительность воздействия промывочного потока, принято следующее отношение:  $\tau_{фСРФ} / \tau_p$ , где  $\tau_p$ ,  $\tau_{ф}$  – продолжительность регенерации и фильтрации в каждом цикле очистки, с;  $c$  – концентрация загрязнителя в фильтруемом масле, %;  $\phi_f$  – полнота отсева загрязнителя, отн. ед.

Отложения, скапливаемые на ФЭ, имеют разные адгезионные свойства, поэтому вводится показатель  $\Phi_p$  адгезионных свойств отложений, который характеризует удаляемость загрязнений при противоточной промывке ФЭ в стандартизированном цикле «фильтрация – регенера-

ция» модельной установки СРФ, определяемый по отношению перепада давлений на ней до фильтрации и после регенерации [1, 8].

Фактор, влияющий на закупорку пор ФМ и эффективность регенерации, – это соотношение  $\Delta_{0,95} / m_d$  (номинальной тонкости отсева и среднего размера дисперсной фазы загрязнителя).

Критерий эффективности тканых фильтровальных сеток (ФС) зависит от коэффициентов проницаемости  $K_{п}$ , формы пор  $\varepsilon_{\Delta}$  и пористости  $m$  ФМ:  $K_{\phi} = K_{п}m / d_{y}T_0\varepsilon_{\Delta}$ . Показатель  $K_{\phi}$  формируется также через диаметр  $d_y$ , точной нити и шаг  $T_0$  проволоки основы [3, 6].

Коэффициент живого сечения опорного каркаса ФЭ  $f_{\phi_3}$  – это отношение площади проходных каналов к общей поверхности элемента. От его значений зависят не только гидравлические, но и регенерационные показатели ФЭ. В табл. 1 представлены значения натуральных уровней факторов и кодовые обозначения.

Таблица 1

Основные факторы, влияющие на эффективность регенерации СРФ

Фактор	Обозначение		Уровень		
	Кодовое	Натуральное	-1	0	+1
Гидродинамический режим регенерации	$x_1$	$\frac{Re_p}{Re_{\phi}}$	1	8	15
Продолжительность процесса «фильтрация–регенерация»	$x_5$	$\bar{\tau}_{\phi} = \frac{\tau_{\phi} c_x \Phi_{\phi}}{\tau_p}$	$10^{-3}$	1	2
Удаляемость (адгезионная активность) загрязнителя	$x_2$	$\Phi_p$	0,2	0,6	1
Степень дисперсности загрязнителя	$x_6$	$\frac{\Delta_{0,95}}{m_d}$	10	35	60
Критерий эффективности ФС	$x_3$	$K_{\phi}$	0,2	0,6	1
Коэффициент «живого сечения» ФЭ	$x_4$	$f_{\phi_3}$	0,3	0,6	0,9

Анализ процесса регенерации СРФ по результатам наблюдений за эффективностью их работы проиллюстрировал, что для практических целей он может быть описан линейной моделью. Для определения коэффициентов полинома был поставлен эксперимент. Предлагаемая матрица планирования (табл. 2) и результаты опытов для каждого варианта сочетания факторов позволили получить значение  $b_i$ . При представлении факторов в кодированном выражении уравнение регрессии для оценки  $y$  имеет следующий вид:

$$y = -0,3915 + 0,1177x_1 + 0,1406x_2 + 0,1154x_3 + 0,0289x_4 - 0,121x_5 - 0,0872x_6 .$$

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента по оценке эффективности регенерации СРФ

№	–	$\frac{Re_p}{Re_{\phi}}$	$\Phi_p$	$K_{\phi}$	$f_{\phi_3}$	$\frac{\tau_{\phi} c_x \Phi_{\phi}}{\tau_p}$	$\frac{\Delta_{0,95}}{m_d}$	$\varphi_p$	$\ln \varphi_p$	$\hat{\varphi}_p$	$\ln \hat{\varphi}_p$
–	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	–	–	–	–
1	+	–	–	–	+	+	–	0,4984	-0,6963	0,4706	-0,7537
2	+	+	–	–	–	+	+	0,4287	-0,8467	0,4568	-0,7834
3	+	–	+	–	–	–	+	0,6604	-0,4149	0,6295	-0,4627
4	+	+	+	–	+	–	–	0,9631	-0,0375	0,9726	-0,0278
5	+	–	–	+	+	–	+	0,5810	-0,5429	0,6138	-0,4881
6	+	+	–	+	–	–	–	0,9195	-0,0838	0,902	-0,1031
7	+	–	+	+	–	+	–	0,6865	-0,3761	0,7172	-0,3323
8	+	+	+	+	+	+	+	0,8591	-0,1518	0,8347	-0,1807
$b_i$	-0,3915	0,118	0,1406	0,116	0,0289	-0,1211	-0,0873	$\sum_{i=1}^8 (\ln \varphi_{pi} - \ln \hat{\varphi}_{pi})^2 = 0,0157$			

Проведенные натурные лабораторные испытания модели СРФ с использованием теории планирования эксперимента позволили получить регрессионную модель процесса регенерации [8]. По критерию Фишера доказана адекватность модели. Ускоренные испытания позволили получить

результаты по интегральному коэффициенту регенерации, которые тождественны данным, характерным для длительных (в течение 2–3 тыс. ч) условий работы СРФ на судах при полнопоточном фильтровании (очистке) ММ дизелей.

В зависимости от вышеперечисленных факторов интегральный коэффициент регенерации может быть представлен выражением

$$\varphi_{p\Sigma} = \left( \frac{Re_p}{Re_\phi} \right)^{0,087} \Phi_p^{0,1747} K_\phi^{0,1434} f_{\phi\alpha}^{0,053} \left( \frac{\tau_\phi c_x \varphi_\phi}{\tau_p} \right)^{-0,032} \left( \frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{-0,097}$$

Рассматриваемый показатель через число циклов регенерации  $n_p$  может быть связан с локальным коэффициентом регенерации соотношением  $\varphi_p = (\varphi_{p\Sigma})^{1/n_p}$ . Данная зависимость справедлива при допущении, что процесс зарастания ФС происходит с постоянной скоростью. Принято допущение о постоянстве  $\varphi_p = \text{const}$  на всем промежутке работы СРФ между химическими чистками ФЭ, т. е. за период  $\tau_{\text{СРФ}}$  его автономной работы.

Оценка процесса регенерации состояла в определении его рабочих параметров, обеспечивающих эффективную работу СРФ. Для этого на модельной установке фильтра (рис. 1) воспроизводили его характеристики, соответствующие условиям работы автоматизированного МО в двигателе внутреннего сгорания (ДВС).

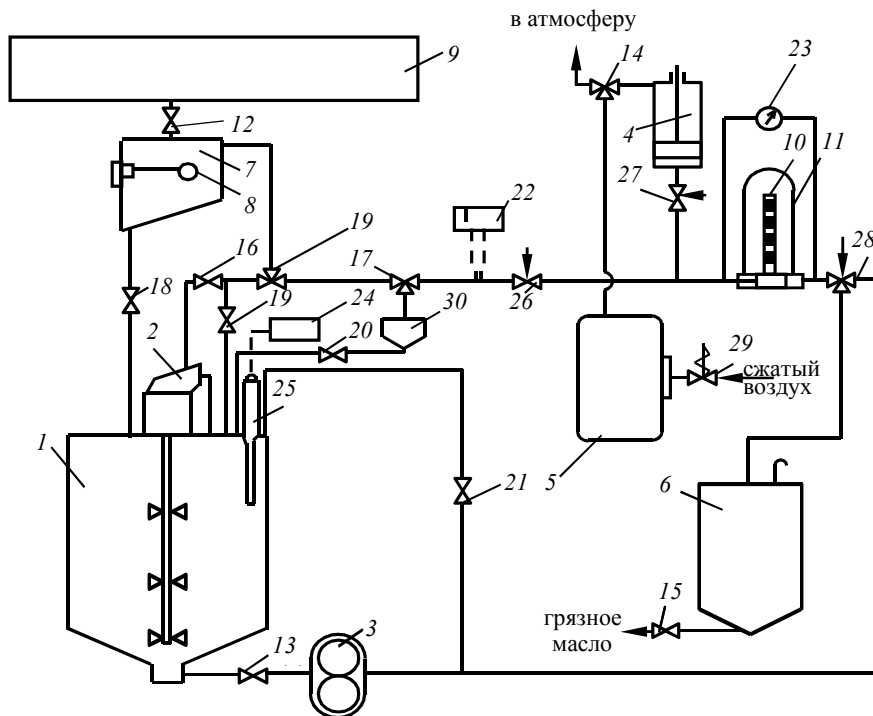


Рис. 1. Схема установки для моделирования рабочих процессов СРФ:

- 1 – рабочий бак; 2 – гидромотор с мешалкой; 3 – насос; 4 – гидроцилиндр; 5 – ресивер сжатого воздуха; 6 – сточная цистерна; 7 – мерительный бак; 8 – указатель уровня;  
9 – бак запаса масла; 10 – фильтрующий элемент; 11 – корпус фильтра;  
12–21 – запорная арматура; 22 – термометрический гальванометр;  
23 – дифференциальный манометр; 24 – электронное термореле; 25 – датчик температуры;  
26–28 – пневморегулируемая аппаратура; 29 – редуктор сжатого воздуха; 30 – дозатор загрязнений

Режимы физического моделирования, состав искусственного загрязнителя были подобраны так, чтобы за пять циклов «фильтрация – регенерация» остаточные явления на фильтровальной перегородке с позиции гидравлики и неудаляемых отложений соответствовали состоянию СРФ в эксплуатации за 3 тыс. ч работы.

В работе [8] доказано, что интегральный (суммарный) коэффициент регенерации за пять циклов «жестких» режимов работы экспериментальной фильтровальной установки соответствует значению этого показателя  $\varphi_{p\Sigma}$  в эксплуатации к моменту проведения химической чистки СРФ. Модельная установка СРФ соответствовала конструкции фильтра с периодическим режимом регенерации типа СРФД-120 отечественной конструкции [10, 11] и фильтра 6.33 фирмы Boll & Kirch [9, 12]. Введение оценочного показателя интегрального коэффициента регенерации было вызвано необходимостью его определения с высокой точностью, т. к. за один цикл регенерации значение локального коэффициента регенерации  $\varphi_p$  близко к 1 и фиксация его затруднительна.

Оценка интегрального коэффициента регенерации  $\varphi_{p\Sigma}$  в лабораторном эксперименте осуществлялась гидравлическим методом по остаточным явлениям на фильтровальной перегородке сравнением значения перепада давлений при фильтровании  $\Delta p_{\phi\Sigma} = \Delta p_{\phi5}$  после пятого цикла промывки с начальным перепадом давлений  $\Delta p_{\phi0}$  (рис. 2).

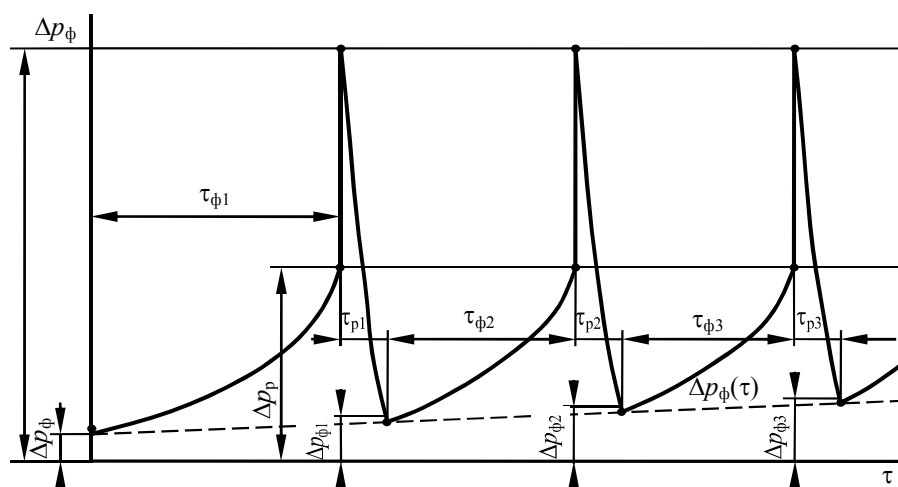


Рис. 2. Гидравлика фильтрования и регенерации при работе СРФ

В лабораторном эксперименте СРФ восстанавливающее действие регенерации по снижению гидравлического сопротивления фильтра на последнем промывочном цикле по отношению к накопительному перепаду давлений на первом (нулевом) этапе фильтрования формирует интегральный коэффициент регенерации, характерный для эксплуатационных условий работы СРФ:

$$\varphi_{p\Sigma} = \frac{\Delta p_p - \Delta p_{\phi\Sigma}}{\Delta p_p - \Delta p_{\phi0}},$$

где  $\Delta p_{\phi0}$ ,  $\Delta p_{\phi\Sigma}$  – начальный и конечный (после заключительного цикла регенерации) перепад давлений при фильтровании, кПа;  $\Delta p_p$  – перепад в конце цикла фильтрования при включении механизма регенерации, кПа.

Эффективность работы промывочного устройства в СРФ с непрерывно функционирующим механизмом регенерации, когда циклы фильтрования и регенерации кратковременны, а рост перепада давлений и его падение при промывке ФЭ незначительны, эффективность фильтра с рассматриваемых позиций характеризуется коэффициентом стабилизации его характеристик. Этот коэффициент рассчитывается по формуле

$$\beta_{p\Sigma} = \frac{\Delta p_{\phi0}}{\Delta p_{\phi\Sigma}}. \quad (1)$$

Рост перепада давлений на фильтре из-за остаточных явлений и накопления на фильтровальной перегородке загрязнений, не смываемых при регенерации, определяется следующим образом:

$$\Delta p_{\phi\Sigma} = \Delta p_p (1 - \varphi_{p\Sigma}) + \Delta p_{\phi0} \varphi_{p\Sigma}. \quad (2)$$

Для возможности трансформирования результатов лабораторного эксперимента с целью определения возможностей СРФ с непрерывным режимом регенерации на основе формул (1) и (2) получена следующая связь между показателями эффективности регенерационного процесса:

$$\beta_{p\Sigma} = \frac{1 - \frac{\Delta p_p}{\Delta p_{\Phi\Sigma}} (1 - \varphi_{p\Sigma})}{\varphi_{p\Sigma}}. \quad (3)$$

Для исследования процесса регенерации были выявлены главные факторы, влияющие на этот процесс [7, 8]. Основным фактором, формирующим коэффициент регенерации, является соотношение продолжительности процессов фильтрации  $\tau_\Phi$  и регенерации  $\tau_p$ . При этом удельная интенсивность  $c_x \Phi_\Phi$  накопления нерастворимых продуктов (НРП) на фильтре существенным образом оказывает воздействие на эффективность регенерации и предопределяет необходимость использования комплексного параметра, влияющего на качество промывки ФЭ [6]. Он назван относительной продолжительностью процесса «фильтрация – регенерация», предназначен для учета фильтрации в формировании показателя  $\varphi_p$  и может быть представлен симплексом

$$\bar{\tau}_\Phi = \frac{\tau_\Phi c_x \Phi_\Phi}{\tau_p},$$

где  $c_x$ ,  $\Phi_\Phi$  – концентрация в масле НРП, полнота их отсева при фильтрации, отн. ед.

Вторым по важности во влиянии на процесс регенерации является показатель интенсивности гидродинамического режима промывки, определяемый через соотношение критериев Рейнольдса  $Re_p / Re_\Phi$  при регенерации и фильтрации, выражаемых через определяющий размер ФМ (номинальная толщина отсева) и поверхностную скорость рассматриваемых процессов.

Весьма существенную (доминирующую) роль при смыве отложений играет адгезионная активность отложений  $\Phi_p$ . Адгезионные свойства оценивали по их удаляемости из ФС полотняного переплетения под воздействием стандартного промывочного потока [8]. Чем выше у отложений промывочный эффект, тем ниже адгезионные свойства. По сути, в диапазоне  $\Phi_p = 0,2-0,9$  этим показателем оценивалась не адгезионная активность, а способность отложений к удалению при промывке. Показатель  $\Phi_p$  хорошо коррелируется с удаляемостью отложений. С его увеличением регенерационный импульс для смыва отложений уменьшается.

Значительное место в формировании  $\varphi_p$  имеет также показатель эффективности ФМ  $K_\Phi$ . Физически природа этого коэффициента представлена в работах [5, 7]. Его значение зависит от геометрии и параметров полотняного переплетения ФС, т. е. от коэффициента проницаемости, формы пор и пористости материала. Факторы  $\Delta_{0,95} / m_d$  и  $f_{\Phi\Phi}$  меньше всего, как выявлено в лабораторном эксперименте [6], влияют на эффективность регенерации. Первый из них характеризуется соотношением толщины отсева ФМ и среднего размера тонкодиспергированных частиц НРП загрязнений ММ. Второй указывает на просветность (отношение площади отверстий к общей поверхности подложки) опорного каркаса ФМ.

### Расчет и анализ регенерационной эффективности саморегулирующихся фильтров в эксплуатационных условиях

Судовой эксперимент с фильтровальными модулями типа СРФ-60 и СРФД-120 [2, 7] при очистке ММ групп 10(14)-Д<sub>2</sub>(цл20, цл30) во время работы среднеоборотных тронковых форсированных дизелей на низкосортных топливах проиллюстрировал возможность соблюдения МО режима автономного функционирования в течение 3–4 тыс. ч. Такая периодичность обслуживания СРФ возможна, если интегральный коэффициент регенерации в натуральном виде или сформулированный по показателю  $\beta_p$  к моменту химической чистки ФЭ составлял 0,7. Это нормативное значение  $\varphi_{p\Sigma}$  принято для расчета основных показателей промывочного процесса, следование которым позволит соблюсти контрольную автономность  $\tau_{\text{СРФ}}$  фильтра, равную 3 тыс. ч.

Приравняв выражение (3) величине  $\varphi_{p\Sigma} = 0,7$ , получим систему уравнений, по которой, зная относительное время регенерации  $\bar{\tau}_p$ , можно задать гидравлику промывки по  $\bar{Re}_p$ , чтобы реализо-

вать нормативное значение  $\tau_{\text{СРФ}}$ . Возможно решение обратной задачи: по гидравлическому режиму обратной промывки  $\overline{\text{Re}}_p$  находим требуемое время регенерации  $\overline{\tau}_p$ . Система имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\text{Re}_p}{\text{Re}_\phi} &= 0,0167 \Phi_p^{-2} K_\phi^{-1,65} f_{\phi\Delta}^{-0,609} \left( \frac{\tau_\phi c_x \Phi_\phi}{\tau_p} \right)^{0,368} \left( \frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{1,115} ; \\ \frac{\tau_p}{\tau_\phi} &= 1,2456 \cdot 10^{-4} c_x \Phi_\phi \left( \frac{\text{Re}_p}{\text{Re}_\phi} \right)^{-2,72} \Phi_p^{-5,46} K_\phi^{-4,48} f_{\phi\Delta}^{-1,66} \left( \frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^3 . \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Объединение уравнений системы (4) позволит 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:

$$K_p = \frac{\text{Re}_p}{\text{Re}_\phi} \left( \frac{\tau_p}{\tau_\phi} \right)^{0,368} = 0,0167 \Phi_p^{-2} K_\phi^{-1,65} f_{\phi\Delta}^{-0,609} (c_x \Phi_\phi)^{0,368} \left( \frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{1,115} . \quad (5)$$

Выбор параметров регенерации фильтра может осуществляться по промывочному индексу. Его значение, соответствующее конкретным условиям функционирования СРФ, выбирается по зависимости (5).

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. 3. При его формировании учитывались конструктивные особенности фильтров и условия функционирования их регенерационных устройств.

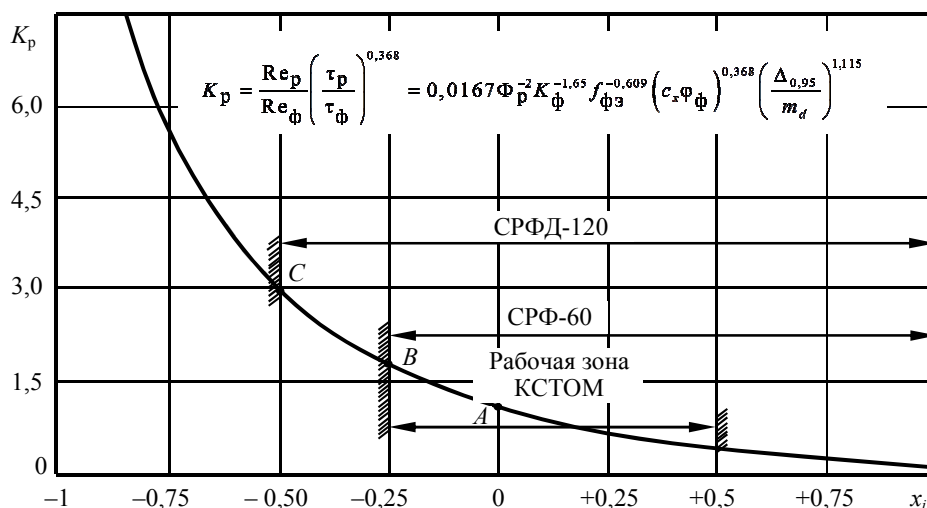


Рис. 3. Влияние на промывочный индекс фильтров основных факторов регенерационного процесса

Градации факторов  $x_i$  зависимости (5) 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 (см. рис. 2) 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* ( $K_p = 2$ ).

Учитывая значение промывочного индекса для заданных условий функционирования конкретного СРФ, по уравнению (5) можно выбрать основные компоненты его регенерационного процесса. Возможности варьирования компонентами  $\overline{Re}_p$  и  $\overline{\tau}_p$  для довольно жестких условий работы модулей СРФ-60 (непрерывный режим регенерации) и СРФД-120 (периодический режим) приведены на рис. 4.

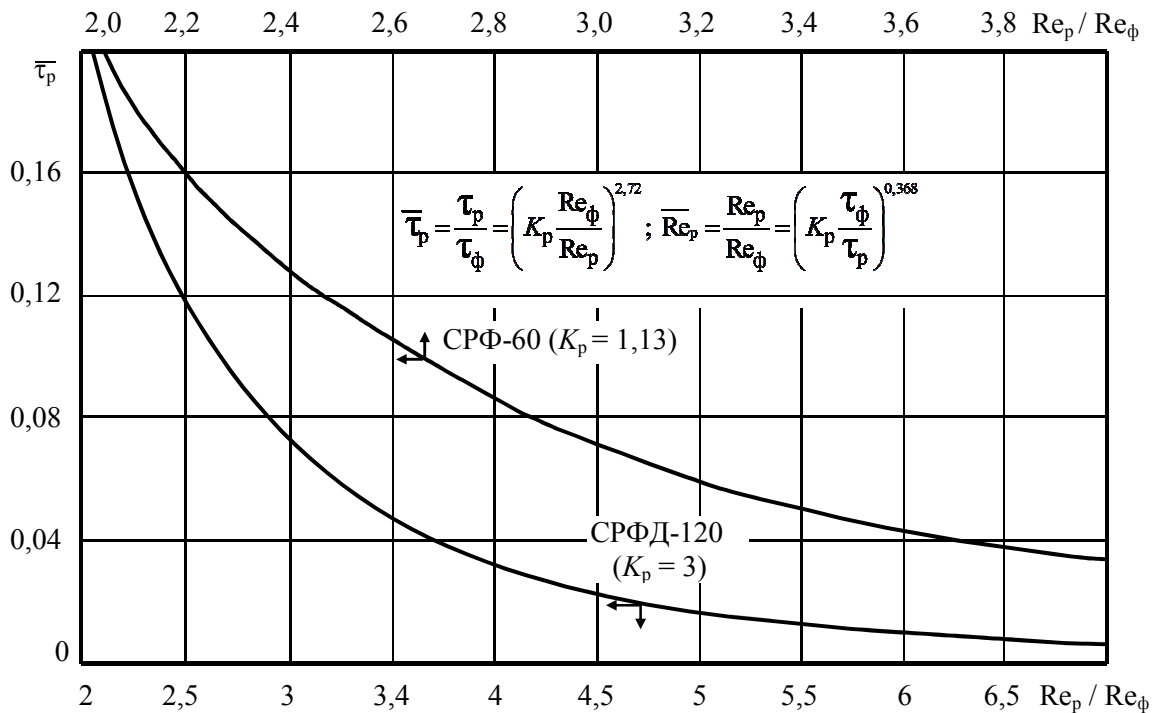


Рис. 4. Зависимость продолжительности регенерации фильтров от соотношения скоростей промывочного и фильтровального потоков

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  $\overline{\tau}_p = 0,1$  процесс регенерации будет эффективен, если  $\overline{Re}_p$  будет выше 2,66, т. е. скорость промывки ФЭ должна превышать скорость фильтрования почти в 3 раза.

Для модуля СРФД-120 ( $K_p = 3$ ) легко реализуем режим промывки  $\overline{Re}_p = 4,7$ , что требует на каждом цикле регенерации воздействия на отложения для их эффективного смыва в течение  $\overline{\tau}_p = 0,016$ . 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  $\overline{\tau}_p$  и  $\overline{Re}_p$  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 табл. 3.



Статистические данные по состоянию ММ в смазочных системах судовых дизелей при эффективном функционировании СРФ

Уровень форсирования дизеля и применяемое масло		Работа на топливе		Доля присадок, находящихся в активной форме	Количество грубодисперсных НРП
$p_{me}$ , МПа	Марка масла	Топливо	Содержание серы, %	$\bar{\Pi}$ , 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

В табл. 3 проиллюстрировано, при каких характеристиках звеньев системы ДЭТМО результаты модельных испытаний по определению  $\varphi_{p\Sigma}$  можно распространить на эксплуатационные показатели СРФ. Тожественность лабораторных и натурально замеренных значений  $\varphi_{p\Sigma}$  соблюдается при соответствии качества топлива и ММ с уровнем форсирования дизеля по среднему эффективному давлению  $p_{me}$ .

Апробированные характеристики звеньев ДЭТМО, приводящие к надежной работе дизеля, по состоянию ММ фиксируются следующими значениями показателей  $\bar{\Pi}$  и  $\bar{N}_r$  (табл. 3), определяемыми к моменту отработки маслом 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  $\Delta_{0,95} / m_d = 10 \div 60$ . Уровень  $\bar{N}_r$  грубодисперсной фазы НРП (количество частиц крупнее 5 мкм) должен составлять 75–400 тыс. шт./мл. Статистические показатели по  $\bar{\Pi}$  и  $\bar{N}_r$  приведены для периода стабилизации параметров старения ММ, что наблюдается через 1–3 тыс. ч его работы [2, 7].

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

$$n_{x.ч} = \frac{\ln \varphi_{pд}}{\ln \varphi_p} = \frac{\ln \left( \frac{\Delta p_p - \Delta p_{фд}}{\Delta p_p - \Delta p_{ф0}} \right)}{\ln \varphi_p} \quad (6)$$

На основе соотношений (5) и (6) получено выражение для расчета и корректировки (в зависимости от условий эксплуатации) срока автономной работы СРФ (периодичности освидетельствования и химической чистки МО):

$$\tau_{СРФ} = \tau_{x.ч} = 3\,000 \mu_{СРФ} \frac{\Delta p_{фд}}{\Delta p_{ф\Sigma}} \left( \frac{\Pi_r}{\bar{\Pi}} \right)^{0,85} \left( \frac{\bar{N}_r}{N_{гт}} \right)^{1,24} \quad (7)$$

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

Использование зависимости (7) 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 [2, 7, 10, 11], в смазочных системах судовых тронковых дизелей подтвердило, что период их автономной работы может составлять 3–5 тыс. ч. Факторы, вызывающие снижение  $\tau_{СРФ}$ , состоят в интенсивном срабатывании присадок, несоответствии качества масел применяемым топливам, интенсивном загрязнении ММ НРП при нарушении работы топливной аппаратуры. Значительному увеличению  $\tau_{СРФ}$  способствует использование КСТОМ, особенно

при дополнительной глубокой очистке масла сепарированием (центрифугированием) [13, 14]. Расчетная зависимость (7) на основе данных, приведенных в табл. 3, позволяет с высокой точностью (достоверностью) корректировать показатель  $\tau_{\text{СРФ}}$ .

### Выводы

1. Полученная по результатам лабораторных испытаний и выраженная позиномом  $\varphi_{\text{рΣ}} = f(x_i)$  модель регенерации СРФ трансформирована на эксплуатационные условия работы фильтра, что позволяет идентифицировать параметры механизированной (автоматизированной) промывки его ФЭ обратным потоком – гидродинамическую интенсивность и продолжительность этого процесса с учетом адгезионной активности отложений, дисперсности нерастворимых загрязнений и функциональных особенностей МО.

2. Доказана работоспособность и адекватность расчетно-экспериментальной модели регенерации СРФ в эксплуатационных условиях при очистке ММ в судовых дизелях. Через нормативное значение интегрального коэффициента регенерации и регенерационный индекс фильтра имеется возможность определять автономный срок работы СРФ в зависимости от срабатывания многофункциональных присадок и содержания в масле грубодисперсных нерастворимых загрязнений.

3. Приведены статистические показатели по интенсивности старения ММ при разных уровнях форсирования дизеля в широком диапазоне изменения качества применяемых горюче-смазочных материалов, что позволяет осуществлять обоснованный выбор СРФ и режимов его функционирования в многосвязной 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 мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2019. № 4. Т. 11. 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. Кича Г. П. Эксплуатационная эффективность новых маслоочистительных комплексов в форсированных дизелях // Двигателестроение. 1987. № 36. С. 25–27.
5. Кича Г. П., Бойко С. П. Идентификация раздельной способности тканых регенерируемых фильтровальных материалов нового поколения // Науч. проблемы трансп. 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., Перминов Б. Н., Надежкин А. В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях. Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2011. 372 с.
8. Кича Г. П., Бойко С. П. Экспериментальное моделирование эффективности процесса регенерации самоочищающихся фильтров, функционирующих в системах смазки судовых дизелей // Мор. интеллектуал. 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. N. 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 // Мор. интеллектуал. 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 трансп. 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. инженер. шк. Дальневосточ. федерал. ун-та. 2012. № 3 (12). С. 9–19.

Статья поступила в редакцию 15.02.2020

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Кича Геннадий Петрович** – Россия, 690059, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания; kicha@msun.ru.

**Бойко Сергей Петрович** – Россия, 690059, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; канд. техн. наук; доцент кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; nadezkin@msun.ru.

**Кича Павел Петрович** – Россия, 690087, Владивосток; Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры судовых энергетических установок; kicha@msun.ru.



**MODELING WORKING PROCESSES  
OF SELF-REGENERATING FILTERS  
FUNCTIONING IN LUBRICATING SYSTEMS OF SHIP DIESELS**

**G. P. Kicha<sup>1</sup>, S. P. Boiko<sup>1</sup>, P. P. Kicha<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,  
Vladivostok, Russian Federation

<sup>2</sup> Far Eastern State Technical Fisheries University,  
Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** The article highlights the urgency of the research of working processes of a self-cleaning filter designed to purify the engine oil in the internal combustion engines. There was carried out experimental modeling of countercurrent regeneration of self-cleaning filters used in fuel preparation and diesel lubrication systems on ships. The layout of the unit for modeling the working processes of self-regenerating filters includes a service tank, a hydraulic motor with a stirrer, a pump, a hydraulic cylinder, a receiver of compressed air, a waste tank, a filtering element, shut-off and pneumatic control equipment, a pollution gauge, a temperature sensor, and other elements. A planning matrix is formed, and the experiment results on evaluating the efficiency of the self-regenerating filters are illustrated. The main factors of the regeneration coefficient are considered. There are presented the dependencies of evaluating the process effectiveness and predicting the life of filters between dry cleanings. The methods of calculating the regeneration parameters of automated filters based on the SRF-60 and SRFD-120 modules have been presented, which allows choosing the hydrodynamic modes and backwash time of filter elements taking into account the operating conditions of oil filters. The influence of the filtering process regeneration efficiency identified by the specific intensity of the removal of the dispersed phase from the oil, hydrodynamics (Reynolds number) and the relative backwash time, the adhesive properties of sludge, the filter design, and dispersion of the pollution are analyzed. The evidence of the validation of the calculated experimental dependences obtained from the laboratory tests of the filter model and their compliance with the results of field tests of self-cleaning filters on ships are presented. The possibility of calculating and adjusting the off-line operation of the self-cleaning filter in the lubrication systems of marine diesel engines is presented subject to diesel forcing, fuel quality and lubricants used, oil aging, additives wear and contamination by coarse-grained mechanical impurities.

**Key words:** self-regenerating filter, diesel lubrication system, marine diesel, oil refining, filter regeneration, filter working processes.

**For citation:** Kicha G. P., Boiko S. P., Kicha P. P. Modeling working processes of self-regenerating filters functioning in lubricating systems of ship diesels. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;2:69-80. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-69-80.

## REFERENCES

1. Kicha G. P., Polorotov S. P. Zarubezhnye avtomaticheskie fil'try tonkoj ochistki masla i topliva sudovyh energeticheskikh ustanovok [Foreign automatic fine filters for oil and fuel of marine power plants]. *Sudostroenie za rubezhom*, 1982, no. 3, pp. 58-73.
2. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Bojko S. P. Rezul'taty ekspluatatsionnyh ispytaniy samoregeneriruyushchegosya fil'tra v sudovyh dizelyah v sostave kombinirovannogo masloochistitel'nogo kompleksa [Test results of self-regenerating filter operation in marine diesel engines as part of combined oil refining complex]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2019, no. 4, vol. 11, pp. 718-726.
3. Kicha G. P., Artem'ev A. K., Nadezhkin A. V., Shkarenko V. A. Opyt primeneniya i perspektivy razvitiya samoochishchayushchihsya fil'trov v sistemah smazki sudovyh DVS [Practice of application and development prospects of self-cleaning filters in marine ICE lubrication systems]. *Dvigatelsestroenie*, 1985, no. 7, pp. 35-38.
4. Kicha G. P. Ekspluatatsionnaya effektivnost' novyh masloochistitel'nyh kompleksov v forsirovannyh dizelyah [Operational efficiency of new oil cleaning systems in forced diesel engines]. *Dvigatelsestroenie*, 1987, no. 36, pp. 25-27.
5. Kicha G. P., Bojko S. P. Identifikatsiya razdelitel'noj sposobnosti tkanyh regeneriruemyyh fil'troval'nyh materialov novogo pokoleniya [Identification of separation ability of woven regenerated filter materials of new generation]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2015, no. 3, pp. 132-139.
6. Kicha G. P., Artem'ev A. K., Nadezhkin A. V. Optimizatsiya i vybor parametrov tkanyh setok toplivnyh i maslyanyh samoochishchayushchihsya fil'trov [Optimization and selection of parameters of woven mesh for fuel and oil self-cleaning filters]. *Dvigatelsestroenie*, 1984, no. 11, pp. 28-31.
7. Kicha G. P., Perminov B. N., Nadezhkin A. V. *Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovyh dizelyah* [Resource-saving oil use in marine diesel engines]. Vladivostok, Izd-vo MGU im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2011. 372 p.
8. Kicha G. P., Bojko S. P. Eksperimental'noe modelirovanie effektivnosti processa regeneratsii samoochishchayushchihsya fil'trov, funkcioniruyushchih v sistemah smazki sudovyh dizelej [Experimental modeling of efficiency of regeneration process of self-cleaning filters operating in marine diesel engine lubrication systems]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2015, no. 3 (29), vol. 1, pp. 93-100.
9. Dunn A. R. Selection of wire cloth for filtration and separation. *Filtration and Separation*, 1980, vol. 17, no. 10, pp. 437-451.
10. Kicha G. P., Pak N. K. Novye inzhenernye resheniya v konstrukciyah samoregeneriruyushchihsya fil'trov dlya ochistki topliv i smazochnyh materialov na sudah [New engineering solutions in design of self-regenerating filters for cleaning fuels and lubricants on ships]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2013, no. 1, pp. 54-59.
11. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Pak N. K. Samoregeneriruyushchihsya fil'tr novoy konstrukcii dlya ochistki topliv i smazochnyh masel na sudah [Newly designed self-regenerating filter for cleaning fuels and lubricants on ships]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2013, no. 1, pp. 203-207.
12. Lennartz R. *Full flow filtration in lubricating oil systems*. Second World Filtration Congress, Proc. London, 1979. Pp. 541-548.
13. Nadezhkin A. V., Kicha G. P. *Tribomonitoring i tribodiagnostika sudovyh dizelej* [Tribomonitoring and tribodiagnosics of marine diesel engines]. Mauritius, Palmarium Academic Publishing, 2018. 422 p.
14. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Pak N. K. Optimizatsiya raboty masloochistitel'nogo kompleksa sudovyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya na osnove variatsionnogo ischisleniya [Optimization of oil-cleaning complex of marine internal combustion engines based on calculus of variations]. *Vestnik inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*, 2012, no. 3 (12), pp. 9-19.

The article submitted to the editors 15.02.2020

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kicha Gennadiy Petrovich** – Russia, 690059, 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.

**Boiko Sergey Petrovich** – Russia, 690059, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines; nadezkin@msun.ru.

**Kicha Pavel Petrovich** – Russia, 690087, Vladivostok; Far Eastern State Technical Fisheries University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines; kicha@msun.ru.

