

Научные труды Дальрыбвтуза. 2022. Т. 59, № 1. С. 69–81.  
Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2022. Vol. 59, no 1. P. 69–81.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ  
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Научная статья

УДК 621.43.013:629.3

**Некоторые закономерности процесса загрязнения  
и очистки циркуляционного масла судового дизеля**

**Николай Сергеевич Молоков<sup>1</sup>, Сергей Петрович Бойко<sup>2</sup>, Павел Петрович Кича<sup>3</sup>**

<sup>1, 2</sup> Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Владивосток, Россия

<sup>3</sup> Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

<sup>1</sup> nikolaimolokov2014@mail.ru

<sup>2</sup> boykoland@mail.ru

<sup>3</sup> pkicha@inbox.ru

**Аннотация.** Рассмотрена совместная работа комплекса «дизель–смазочная система–циркуляционное масло–сепаратор» и установлено влияние его звеньев на процесс изменения эксплуатационных свойств масла, проявляемый через динамику накопления в нем механических примесей при работающем двигателе. Выявлена роль маслоочистителя в общем балансе нерастворимых загрязнений в циркуляционном масле судового дизеля. Обоснована пропускная способность центробежного сепаратора в смазочной системе двигателя, при которой накопление механических примесей в масле находится на минимальном уровне. Приведены основные кинетические уравнения старения смазочного масла в дизеле при условии компенсации его угара и работе без долива. Расчетные зависимости по старению масла могут использоваться для определения срока его службы до замены.

**Ключевые слова:** центробежный сепаратор, очистка масла, смазочная система, судовый дизель, оптимальный режим сепарирования

**Для цитирования:** Молоков Н.С., Бойко С.П., Кича П.П. Некоторые закономерности процесса загрязнения и очистки циркуляционного масла судового дизеля // Научные труды Дальрыбвтуза. 2022. Т. 59, № 1. С. 69–81.

MARINE POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Original article

**Some patterns of marine diesel engines circulating oil contamination process**

**Nikolai S. Molokov<sup>1</sup>, Sergei P. Boiko<sup>2</sup>, Pavel P. Kicha<sup>3</sup>**

<sup>1, 2</sup> Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

<sup>3</sup> Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

<sup>1</sup> nikolaimolokov2014@mail.ru

<sup>2</sup> boykoland@mail.ru

<sup>3</sup> pkicha@inbox.ru

**Abstract.** Operation of the complex "diesel – lubricating system - circulating oil - separator" is considered and its influence on the process of changing the operational parameters of the oil. It's shown through the dynamics of the accumulation of mechanical impurities in the oil when engine is running. The role of the oil purificator in the overall balance of insoluble contaminants in the circulating oil of a marine diesel engine is revealed. The presence of the optimum capacity of the centrifugal separator in the engine lubrication system is shown, at which the level of accumulation of mechanical impurities in the oil is at a minimum level. Kinetic equations for lubricating oil aging in marine diesel engine are given under the condition of operation without topping up. The calculations can be used to determine oil lifetime before its replacement.

**Keywords:** centrifugal purifier, lubricating oil purification, lubricating system, marine diesel engine, optimum purification mode

**For citation:** Molokov N.S., Boiko S.P., Kicha P.P. Some patterns of marine diesel engines circulating oil contamination process. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2022;59(1):69–81. (in Russ.).

Экономичность, надежность и долговечность работы судового дизеля в значительной степени зависят от сохранения циркуляционным маслом своих эксплуатационных качеств [1, 2]. Высокие химмотологические свойства его обеспечиваются грамотной эксплуатацией и рациональной конструкцией системы смазки, подбором соответствующих двигателю и применяемому топливу моторных масел и средств их отчистки [3, 4].

Рациональное сочетание звеньев в комплексе «дизель–смазочная система–циркуляционное масло–сепаратор» может контролироваться по динамике старения моторного масла в судовом дизеле [5]. Однако накопление в циркуляционном масле двигателя нерастворимых продуктов с учетом удаления их центробежным сепаратором в теоретическом плане еще не достаточно полно исследовано [6]. Особый интерес представляют загрязнение и очистка смазочного масла механическими примесями, от уровня накопления которых в смазочной системе зависит изнашивание и нагарообразование деталей двигателя [3, 6]. В данной статье предпринята попытка идентифицировать процесс загрязнения циркуляционного масла дизеля нерастворимыми продуктами с очисткой его сепарированием. Процесс центрифугирования масла рассмотрен на основе позиций и допущений, представленных в работах [7, 8].

Новый подход к балансу загрязнений в циркуляционном масле состоит в рассмотрении влияния на удаление нерастворимых примесей угара масла и эффективности сепарирования [4, 9, 10]. Динамика старения смазочного масла представлена при условии его непрерывного долива для компенсации угара и работы двигателя без долива. Приведенные зависимости справедливы для смазочных систем двигателей внутреннего сгорания, включающих саморегенерирующиеся фильтры и самоочищающиеся сепараторы [1, 11], а также полнопоточные фильтры со сменными фильтрующими элементами [12].

Для анализа динамики процесса загрязнения циркуляционного масла рассмотрим схему (рис. 1) материального баланса загрязнений циркуляционного масла мощного судового двигателя внутреннего сгорания.

Материальный баланс нерастворимых продуктов составлен согласно схеме (рис. 1). Затененная стрелка показывает поступление загрязнений, остальные – их удаление.

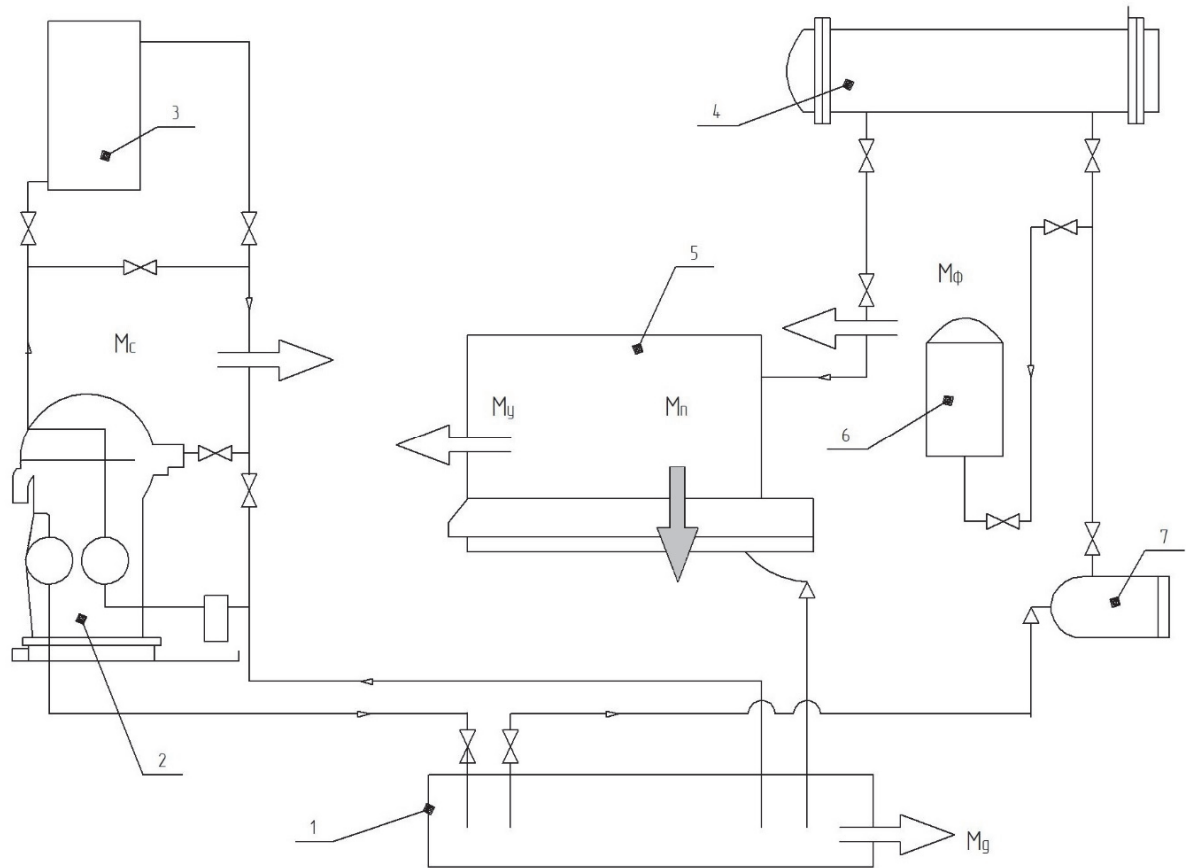


Рис. 1. Схема материального баланса загрязнений циркуляционного масла судового дизеля:  
1 – сточно-циркуляционная цистерна; 2 – сепаратор; 3 – подогреватель сепарируемого масла;  
4 – масляный холодильник; 5 – двигатель; 6 – фильтр грубой очистки масла; 7 – масляный насос;  
 $M_c, M_\phi, M_g, M_y$  – примеси, удаляемые из масла сепарированием, фильтрованием, отстоем и угаром;  
 $M_\pi$  – примеси, поступающие в масло из двигателя

Fig. 1. Scheme of the material balance of pollution of marine diesel circulating oil:

1 – waste-circulation tank; 2 – separator; 3 – separated oil heater;  
4 – oil cooler; 5 – engine;  
6 – crude oil filter; 7 – oil pump:  $M_c, M_\phi, M_g, M_y$  – impurities removed from the oil by separation,  
filtration, sludge and carbon monoxide;  $M_\pi$  – impurities entering the oil from the engine

Основные составляющие баланса:

1. Примеси, поступающие в масло:

$$M_\pi = a\tau,$$

где  $a$  – скорость поступления загрязнений извне и образующихся от окисления масла и износа двигателя, кг/ч;  $\tau$  – время работы двигателя, ч.

2. Примеси, удаляемые из масла:

$$M_{уд} = M_c + M_\phi + M_g + M_y, \quad (1)$$

где  $M_c, M_\phi, M_g, M_y$  – примеси, удаляемые сепаратором, фильтром грубой очистки, отстоем и с угаром, кг.

Общее содержание примесей в масле определяется разностью их поступления над удалением:

$$M = M_0 + M_{\text{п}} - M_{\text{с}} - M_{\text{ф}} - M_{\text{г}} - M_{\text{у}}, \quad (2)$$

где  $M_0$  – начальное содержание примесей в циркуляционном масле, кг.

Как показывает практика, эффективность очистки отстоем и фильтром грубой очистки [1] во много раз ниже, чем сепарированием. При решении поставленной задачи примем следующие допущения:

а) удаление загрязнений фильтром грубой очистки и отстоем отсутствует:  $M_{\text{ф}} = 0$  и  $M_{\text{г}} = 0$ ;

б) скорость поступления примесей постоянна, т.е.  $a = \text{const}$ ;

в) удаление загрязнений с угаром и утечками масла пропорционально текущей  $x$  концентрации их.

Исходя из вышепринятых допущений, составляем уравнение материального баланса примесей в дифференциальной форме. За время  $d\tau$  в масло поступает  $ad\tau$  продуктов загрязнений, а удаляется сепаратором:

$$Q\rho \frac{x - x_{\text{с}}}{100} d\tau = Q\rho\varphi \frac{x}{100} d\tau$$

и с выгоревшим и утечным маслом:

$$Q_{\text{у}}\rho \frac{x}{100} d\tau.$$

где  $Q$  – производительность сепаратора, л/ч;  $Q_{\text{у}}$  – скорость угара масла л/ч;  $\rho$  – плотность масла, кг/л;  $x$  – массовая концентрация продуктов загрязнения в масле ко времени  $\tau$  (перед сепаратором), %;  $x_{\text{с}}$  – массовая концентрация загрязнений на выходе из сепаратора, %,  $\varphi = \frac{x - x_{\text{с}}}{x}$  – коэффициент очистки масла, показывающий, какая часть проходящего через сепаратор масла подвергается полной очистке.

Общее количество масла в системе смазки ко времени  $\tau$ :

$$V = V_0 - (Q_{\text{у}} - Q_{\text{д}})\tau,$$

где  $V$  – текущее значение объема масла в системе, л;  $V_0$  – объем масла, первоначально залитого в систему, л;  $Q_{\text{д}}$  – скорость долива масла, л/ч.

Исходное уравнение материального баланса загрязнений в дифференциальной форме будет

$$ad\tau - Q\rho\varphi \frac{x}{100} d\tau - Q_{\text{у}}\rho \frac{x}{100} d\tau = V \frac{\rho dx}{100}. \quad (3)$$

Преобразовав его в

$$\frac{dx}{d\tau} + \frac{Q\varphi + Q_{\text{у}}}{100} x = \frac{Q\varphi + Q_{\text{у}}}{V} \frac{100}{\rho(Q\varphi + Q_{\text{у}})} \quad (4)$$

и обозначив

$$\frac{100a}{\rho(Q_{\Phi} + Q_{\Psi})} = x^{уст},$$

получим

$$x' - \frac{x}{T} = \frac{x^{уст}}{T}, \quad (5)$$

где  $T$  – постоянная времени системы (период времени, за который полностью очищается масло в количестве, равном рабочему объему системы, ч);  $x^{уст}$  – установившееся значение концентрации загрязнений в системе, %.

Решение этого линейного неоднородного дифференциального уравнения первого порядка методом вариации произвольной постоянной [3] даст окончательное выражение для концентрации загрязнений в циркуляционном масле. При этом могут быть рассмотрены следующие два случая:

1. Двигатель работает при непрерывном ( $Q_{д}=Q_{у}$ ) доливе свежего масла при условии поддержания количества циркулирующего в системе масла постоянным ( $V_0 = \text{const}$ ).

$$x = x_0 \exp\left(-\frac{Q_{\Phi} + Q_{\Psi}}{V_0}\tau\right) + \frac{100a}{\rho(Q_{\Phi} + Q_{\Psi})} \left[1 - \exp\left(-\frac{(Q_{\Phi} + Q_{\Psi})\tau}{V_0}\right)\right], \quad (6)$$

где  $x_0$  – начальная весовая концентрация продуктов загрязнения, %.

2. Двигатель работает без долива свежего масла в систему ( $Q_{д} = 0$ ,  $V = V_0 - Q_{у}\tau$ )

$$x = x_0 \left(\frac{V_0 + Q_{\Psi}\tau}{V_0}\right)^{\frac{Q_{\Phi}}{Q_{\Psi}}+1} + \frac{100a}{\rho(Q_{\Phi} + Q_{\Psi})} \left[1 - \left(\frac{V_0 + Q_{\Psi}\tau}{V_0}\right)^{\frac{Q_{\Phi}}{Q_{\Psi}}+1}\right]. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) относятся к разряду кинетических уравнений смазочной системы [2]. Первая из них показывает кинетику накопления нерастворимых загрязнений при непрерывном доливе угорающего масла, вторая – работу дизеля без долива масла. Обе формулы можно использовать для расчета загрязнения масла при периодическом доливе свежего для компенсации угоревшего.

Уравнение (6) показывает, что концентрация загрязнений в системе изменяется по экспоненциальному закону, стремясь к  $x^{уст}$ . Период, в течение которого происходит полное затухание экспоненты, соответствует переходному процессу очистки системы смазки. Считая бесконечно идущий процесс заканчивающимся при  $x = 0,95x^{уст}$ , получим

$$\tau \approx 3T = 3 \frac{V_0}{Q_{\Phi} + Q_{\Psi}}.$$

Следовательно, чем больше значение постоянной времени системы, тем более длителен переходный режим у неё. В свою очередь,  $T$  находится в прямо пропорциональной зависи-

мости от рабочего объема системы  $V_0$  и обратно пропорциональной от суммы интенсивности очистки  $Q_\Phi$  [4] со скоростью угара  $Q_y$  масла.

С другой стороны, кроме длительности переходного режима динамика накопления загрязнений смазочной системе характеризуется еще и предельным значением установившейся концентрации их в циркулярном масле. Можно легко убедиться, что предельная концентрация, к которой стремится система

$$x^{\text{уст}} = \frac{100a}{\rho(Q_\Phi + Q_y)},$$

будет тем выше, чем больше скорость поступления загрязнения, меньше интенсивность очистки и скорость угара. В выражении для установившейся концентрации отсутствует непосредственная связь значений  $x^{\text{уст}}$  с  $V_0$ , но косвенно она проявляется через  $a$  и  $Q_y$ . При этом влияние  $Q_y$  менее ощутимо из-за несоизмеримости ее с  $Q_\Phi$ . С уменьшением емкости смазочной системы возрастает кратность циркуляции масла через двигатель. Увеличивается время контакта единицы объема масла с нагретыми деталями, что приводит к более быстрому его окислению, отчего возрастают  $a$  и  $Q_y$ . Следовательно, с уменьшением емкости смазочной системы или рабочего объема масла в ней предельная концентрация загрязнений возрастает, а продолжительность переходного периода уменьшается.

На скорость поступления загрязнений, а через нее на предельное значение концентрации примесей в системе влияют следующие факторы:

- а) тип двигателя, его конструктивное исполнение, техническое состояние, режимы работы и условия эксплуатации;
- б) тип, конструктивная схема, параметры и режимы работы смазочной системы;
- в) сорт применяемого масла, насыщенность его присадками;
- г) качество топлива, содержание в нем серы и присадок.

Интенсивность очистки масла зависит:

- а) от качественно-количественного состава загрязнений;
- б) индекса производительности  $\Sigma$  (комплекса конструктивных параметров) сепаратора, определяющих его способность производить разделение гетерогенных фаз [5];
- в) организации потока масла в межтарельчатом пространстве сепаратора;
- г) режимов сепарирования: производительности и температуры подогрева масла;
- д) вязкостно-температурных свойств масла;
- е) наличия и эффективности диспергирующего действия моющих присадок в масле;
- ж) добавления в сепарируемое масло воды, пара или химических реагентов, что приводит в некоторых случаях к повышению коэффициента очистки.

Вместе с  $Q_\Phi$  на  $x^{\text{уст}}$  влияет и  $Q_y$ , определяющаяся типом, режимом эксплуатации, техническим состоянием двигателя; конструктивным исполнением смазочной системы и режимами ее работы, маркой применяемого масла.

При исследовании уравнения (7) видно, что концентрация загрязнений в системе приближается к значению  $x^{\text{уст}}$  асимптотически. В остальном анализ его ничем не отличается от анализа уравнения (6). Возрастает только в переходных процессах роль скорости угара, имеет большое значение, в каких соотношениях она находится с интенсивностью очистки.

В дизеле процесс очистки циркуляционного масла сепаратором может быть установившимся и переходным. Установившийся процесс наступает после продолжительной совместной работы дизеля и сепаратора при условии постоянства скорости и характеристики поступаемых загрязнений, постоянных значений интенсивности очистки и скорости угара масла.

С количественной стороны он характеризуется тем, что в системе устанавливается постоянная концентрация загрязнений, а скорости их поступления и удаляемости равны. Качественная сторона этого процесса – постоянство состава как поступаемых, так и удаляемых загрязнений.

Для установившегося процесса очистки характерно также постоянство состава и концентрации ( $x_c^{уст}$ ) загрязнений в отсепарированном, возвращаемом в систему масле.

Являясь функцией производительности сепарирования и характеристики поступаемых загрязнений,  $x_c^{уст}$  оказывает влияние на  $x^{уст}$  при принятии  $Q_y = 0$  через связь

$$x^{уст} = \frac{100a}{\rho Q} + x_c^{уст}, \quad (8)$$

получаемую после подстановки  $\varphi = \frac{x^{уст} - x_c^{уст}}{x^{уст}}$  в выражении  $x^{уст} = \frac{100a}{\rho Q \varphi}$

разований. Величина первого слагаемого выражения (8) находится в обратно пропорциональной зависимости от  $Q$ , графически представляющую равнобокую гиперболу. Второе слагаемое – степенная функция от производительности сепарирования ( $x^{уст} = PQ^n$ ), уравнение которой для большинства систем весьма близко к квадратичной ( $n=2$ ) или полукубической ( $n = \frac{2}{3}$ ) параболе. Эта эмпирическая зависимость установлена на основании опытных данных [3]. Коэффициент  $P$  зависит от скорости поступления и состава загрязнений, типа и индекса производительности сепаратора, температуры подогрева сепарируемого масла и его вязкостно-температурных характеристик. Подставляя  $x_c^{уст} = PQ^n$  в уравнение (8), получим

$$x^{уст} = \frac{100a}{\rho Q} + PQ^n. \quad (9)$$

Оптимальную производительность, определяющую минимальное значение уровня установившейся концентрации  $x_{min}^{уст}$  в системе, находим, приравнявая  $\frac{dx}{dQ} = 0$ . Окончательное выражение имеет вид

$$Q_{opt} = \left( \frac{100a}{\rho P n} \right)^{\frac{1}{n+1}}. \quad (10)$$

Увеличение дисперсности частиц поступающих загрязнений или уменьшение их плотности приводит к увеличению  $P$ , что влечет за собой уменьшение  $Q_{opt}$  и возрастание  $x_{min}^{уст}$ . Обратное явление наступает, когда размеры и плотность частиц возрастают. При уменьшении температуры подогрева сепарируемого масла  $P$  увеличивается. При постоянной физико-дисперсной характеристике поступающих загрязнений с изменением скорости  $a$  их поступления  $Q_{opt}$  остается без изменения, так как  $P$  изменяется почти в такой же пропорции.

Уровень и состав установившейся концентрации загрязнений в циркуляционном масле – результат совместной работы комплекса. Зависимость  $x_c^{уст} = PQ^n$  также является его рабочей характеристикой [6]. Между нею и коэффициентом очистки или интенсивностью очистки масла существует следующая взаимосвязь:

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{\rho P Q^{n+1}}{100a}} \quad (11)$$

$$Q\varphi = \frac{1}{\frac{1}{Q} + \frac{\rho P Q^n}{100a}} \quad (12)$$

Эта взаимосвязь является важной для всего комплекса. Если состав поступаемых загрязнений представить состоящим из нескольких монодисперсных групп разной плотности, то

$$x^{\text{уст}} = \sum_{i=1}^k x_i^{\text{уст}} = \sum_{i=1}^k \frac{100a_i}{\rho Q \varphi_i} = \frac{100a}{\rho Q_c} \sum_{i=1}^k \frac{g_i}{\varphi_i} \quad (13)$$

где  $a_i$ ,  $x^{\text{уст}}$ ,  $g_i = \frac{a_i}{a}$ ,  $\varphi_i$  – скорость поступления в абсолютных (кг/ч) и в относительных единицах, установившаяся концентрация, коэффициент очистки для отдельной группы загрязнений с производительностью  $Q$ ;  $k$  – число групп.

При таком способе задания состава загрязнений коэффициент отчистки масла в установившемся процессе определяется

$$\varphi_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{g_i}{\varphi_i}} \quad (14)$$

Для переходного процесса очистки характерно обязательное изменение концентрации и состава примесей в системе. В этом процессе нет равенства между скоростью поступления и скоростью удаления загрязнений. Поступаемые и удаляемые загрязнения качественно разные. Переходные процессы очистки происходят при приближении исходной концентрации загрязнений в масле системы к установившейся, например, при переходе от одной установившейся концентрации к другой при сепарировании и неработающем двигателе. Описываются такие процессы уравнениями (6) и (7), хотя в действительности могут протекать со значительными отклонениями, вызванными непостоянством в них коэффициента очистки и интенсивности очистки. Однако для загрязнений, близких по составу к однородному, погрешности незначительны.

Переходные процессы обладают интересным свойством. Если в системе с любой установившейся концентрацией примесей вести непродолжительное сепарирование с разными производительностями, то можно убедиться, что чем ближе производительность приближается к оптимальной, тем больше для нее начальная скорость удаления загрязнений. Коэффициент очистки масла с неоднородными по составу загрязнениями при переходе от режима сепарирования с производительностью  $Q_A$ , когда в системе установится концентрация  $x_A^{\text{уст}}$ , на сепарирование с производительностью  $Q_B$  определяется

$$\varphi_{A-B} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{\varphi_{iB}}{\varphi_{iA}} g_i}{\sum_{i=1}^k \frac{g_i}{\varphi_{iA}}} = \varphi_A \sum_{i=1}^k \frac{\varphi_{iB}}{\varphi_{iA}} g_i \quad (15)$$



где  $\Phi_{A-B}$ ,  $\Phi_A$  – коэффициенты очистки масла в переходном процессе с производительностью  $Q_B$  и в установившемся режиме с производительностью  $Q_A$ ;  $\Phi_{iA}$ ,  $\Phi_{iB}$  – коэффициенты очистки масла для монодисперсной группы частиц с производительностью  $Q_A$  и  $Q_B$ .

На рис. 2 изображены кривые процессов загрязнения циркуляционного масла вышеприведенной системы. Построены они по частному случаю уравнения (6) с подстановкой для каждого режима сепарирования (по производительности) соответствующего значения интенсивности отчистки.

Наглядно видны преимущества сепарирования с оптимальной пропускной способностью – в системе быстрее устанавливается равновесие и с меньшим уровнем концентрации загрязнений. Пунктирной линией в этом рисунке отделена область переходных процессов очистки. Характер экспериментальных кривых динамики загрязнений данной системы несколько отличался от приведенных на рис. 2, однако общая закономерность соблюдалась. Наиболее часто встречались отклонения в сторону уменьшения, доходившие до 15 %, особенно в начальные моменты переходных процессов. Результаты совместной работы комплекса в установившихся процессах очистки с разной пропускной способностью представлены на рис. 3. Здесь же показана в переходном процессе очистки зависимость концентрации загрязнений  $x_A^c$  в отсепарированном масле от производительности сепарирования при постоянной концентрации загрязнений  $x_A^{уст}$  на входе в сепаратор.

Наглядно видно преимущество сепарирования с пропускной способностью 30 % от паспортной  $Q_{п}$  производительности сепаратора. Концентрация механических примесей искусственного загрязнителя в этом случае устанавливается на уровне 0,052 %. На паспортной пропускной способности она более чем в 3 раза выше и составляет 0,17 %. Высокая концентрация накопления нерастворимых продуктов и при низкой пропускной способности сепаратора. При  $Q = 15$  % от  $Q_{п}$  в системе устанавливается уровень загрязнений 0,12 %, т.е. в 2,3 раза выше, чем при оптимальном режиме (по пропускной способности) сепарирования масла.

Сравнение концентрации загрязнений в отсепарированном масле на переходном  $x_{сА}$  и установившемся  $x_A^{уст}$  режимах очистки показывает, что наибольшая разница в концентрациях нерастворимых примесей будет наблюдаться на режимах сепарирования 40–50 % от паспортной производительности. На этой пропускной способности сепаратор будет выделять из масла наибольшее количество нерастворимых примесей и позволит за более короткий срок приблизиться к оптимальному режиму сепарирования, когда в системе смазки установится минимальный уровень  $x^{уст}$  механических примесей. Таким образом, процесс загрязнений циркуляционного масла – результат совместной работы комплекса «дизель–смазочная система–циркуляционное масло–сепаратор», обладающего свойствами саморегулирования. По динамике этого процесса можно судить о правильном подборе звеньев комплекса, их состоянии и соответствии друг другу. С другой стороны, через уровень концентрации и состав загрязнений проходит количественная взаимосвязь с износом и нагарообразованием двигателя. При правильно подобранном комплексе стабилизация уровня концентраций нерастворимых примесей в циркуляционном масле наступает гораздо раньше наступления его браковочного значения.

Анализ динамики изменения концентраций примесей в масле показывает, каким образом ею можно управлять. Большую роль в этом управлении играет сепаратор и режимы отчистки. Одновременно этим агрегатом наравне с функциями отчистки можно осуществлять контроль над совместной работой комплекса.

Необходимо накопление экспериментального материала по скоростям поступления загрязнений в судовых двигателях с разным составом и условиями эксплуатации рассматриваемого комплекса с целью и дальнейшего развития теории расчета переходного процесса очистки смазочного масла.

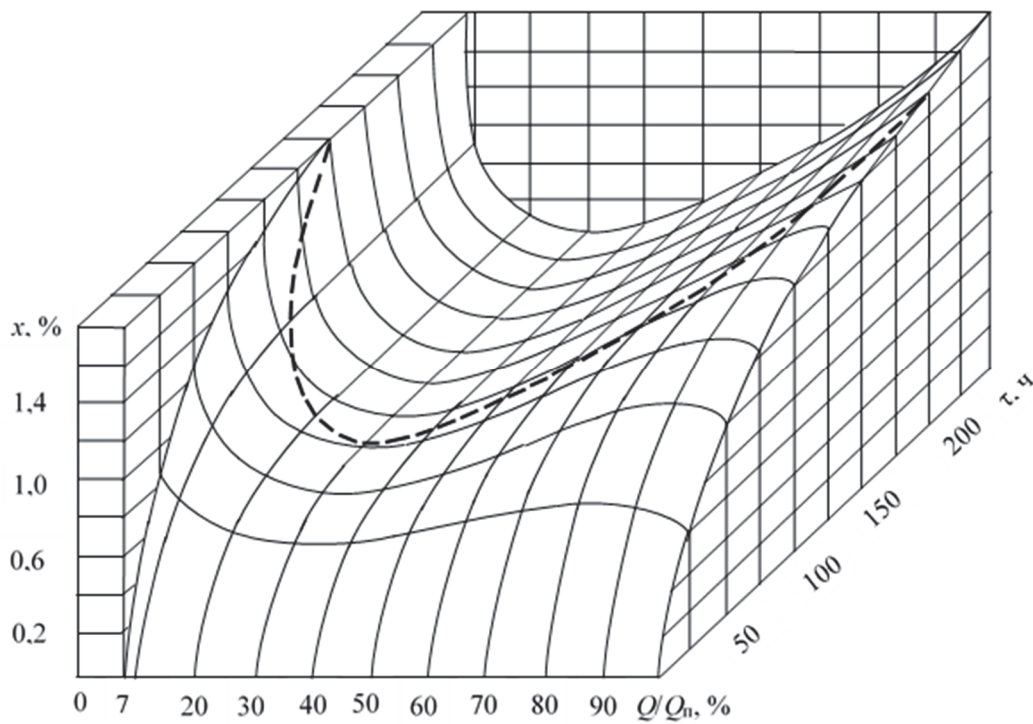


Рис. 2. Динамика процесса загрязнения циркуляционного масла механическими примесями в зависимости от пропускной способности сепаратора  
 Fig. 2. Dynamics of the process of contamination of circulating oil with mechanical impurities depending on the capacity of the separator

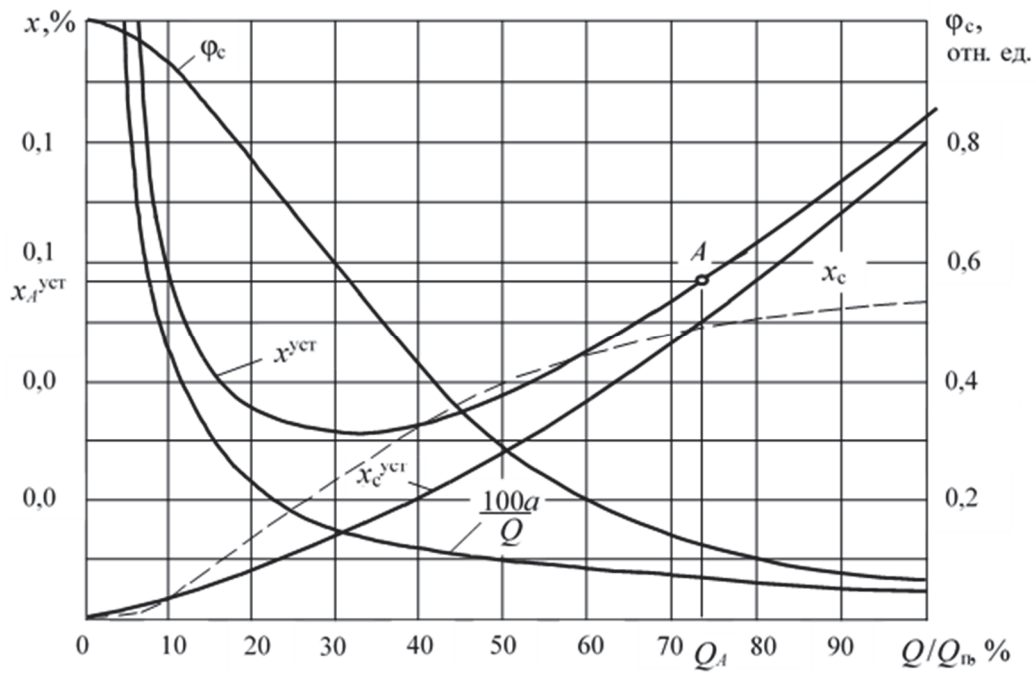


Рис. 3. Рабочие характеристики результатов совместной работы комплекса при установившихся процессах очистки  
 Fig. 3. Performance characteristics of the results of joint work of the complex with steady cleaning processes

### Заключение

1. На основе баланса нерастворимых загрязнений в системе смазки судового дизеля выведены кинетические уравнения накопления механической примесей в циркуляционном (моторном) масле с учетом эффективности его очистки сепарированием при непрерывном (постоянном) и периодическом доливе. Эффективность периодического сепарирования идентифицирована для моно- и полидисперсного загрязнителя как установившихся, так и переходных режимов очистки.

2. Показано наличие оптимальной пропускной способности сепаратора, когда в системе смазки устанавливается минимальный уровень накопления нерастворимых примесей. Оптимальную пропускную способность маслоочистителя можно определить пробным сепарированием масла по максимальному накоплению шлама в агрегате очистки. Оптимальная пропускная способность сепаратора зависит от его паспортной производительности, дисперсного и количественного состава загрязнителя. Для масел группы В<sub>2</sub> и Г<sub>2</sub> она составляет 30–40, а группы Д<sub>2</sub> – 20–30 % от паспортной пропускной способности  $Q_n$  сепаратора, задаваемой при вязкости масла 2 °ВУ.

### Список источников

1. Кича Г.П., Надежкин А.В., Бойко С.П. Результаты эксплуатационных испытаний саморегенерирующегося фильтра в судовых дизелях в составе комбинированного маслоочистительного комплекса // Вестник гос. университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11, № 4. С. 718–726.

2. Кича Г.П. Влияние очистки масел на их расход в дизельных двигателях // Химия и технология топлив и масел. 1986. № 8. С. 22–24.

3. Кича Г.П. Решение проблемы высокоэффективной очистки моторного масла в судовых дизелях: специальность 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)»: автореф. дис. ... доктора технических наук. Владивосток, 1992. 46 с.

4. Кича Г.П., Молоков Н.С., Надежкин А.В. Выбор индекса производительности центробежного сепаратора для комбинированных маслоочистительных комплексов судовых тронковых дизелей // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 4(45) С. 45–57.

5. Кича Г.П., Тарасов В.В., Деревцов Е.М. Эффективность применения в судовых дизелях регенерированных восстановленных отработанных моторных масел // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2016. № 1–2. С. 83–91.

6. Надежкин А.В., Безвербный А.В., Кича Г.П. Имитационная модель трибодиагностики двигателей внутреннего сгорания // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. №3. С. 6–14.

7. Воробьев Б.Н., Надежкин А.В., Кича Г.П. Стохастическое моделирование разделения сложных гетерогенных систем судовых устройств на основе представлений и аппарата случайных марковских процессов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 2, № 3(37). С. 112–120.

8. Кича Г.П., Семенюк Л.А. Полнопоточная комбинированная фильтрацией и центрифугированием тонкая очистка моторного масла в судовых дизелях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. 2018. № 2. С. 62–69.

9. Кича Г.П., Тарасов М.И. Конструктивные и эксплуатационные методы снижения угара моторного масла в судовых дизелях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 3–4. С. 138–143.

10. Тарасов М.И., Кича Г.П. Исследование влияния угара масла на его старение и состояние малоразмерного дизеля // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 3–4. С. 143–147.

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

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

### References

1. Kicha G.P., Reliable A.V., Boyko S.P. Results of operational tests of a self-regenerating filter in marine diesel engines as part of a combined oil cleaning complex // Bulletin of the State Admiral S.O. Makarov University of Marine and River Fleet. 2019. Vol. 11, No. 4. P. 718–726.

2. Kicha G.P. Influence of oil purification on their consumption in diesel engines // Chemistry and technology of fuels and oils. 1986. No. 8. P. 22–24.

3. Kicha, G.P. Solving the problem of highly efficient cleaning of engine oil in marine diesel engines: specialty 05.08.05 "Marine power plants and their elements (main and auxiliary)": abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Vladivostok, 1992. 46 p.

4. Kicha G.P., Molokov N.S., Reliable A.V. Selection of the performance index of a centrifugal separator for combined oil cleaning complexes of marine tank diesels // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2020. No. 4(45). P. 45–57.

5. Kicha G.P., Tarasov V.V., Derevtsov E.M. The effectiveness of the use of regenerated recovered used engine oils in marine diesels // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2016. No. 1–2. P. 83–91.

6. Reliable A.V., Bezverbny A.V., Kicha G.P. Simulation model of tribodiagnostics of internal combustion engines // Friction and lubrication in machines and mechanisms. 2009. No. 3. P. 6–14.

7. Vorobyev B.N., Reliable A.V., Kicha G.P. Stochastic modeling of separation of complex heterogeneous systems of ship devices based on representations and apparatus of random Markov processes // Marine intelligent technologies. 2017. Vol. 2, No. 3(37). P. 112–120.

8. Kicha G.P., Semenyuk L.A. Full-flow combined filtration and centrifugation fine cleaning of engine oil in marine diesel engines // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. 2018. No. 2. P. 62–69.

9. Kicha G.P., Tarasov M.I. Constructive and operational methods of reducing engine oil fumes in marine diesels // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2017. No. 3–4. P. 138–143.

10. Tarasov M.I., Kicha G.P. Investigation of the effect of oil fumes on its aging and the condition of a small-sized diesel engine // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2017. No. 3–4. P. 143–147.

11. Kicha G.P., Reliable A.V., Pak N.K. Self-regenerating filter of a new design for cleaning fuels and lubricating oils on ships // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2013. No. 1. P. 203–207.

12. Kicha G.P. Operational efficiency of new oil-cleaning complexes in forced diesels // Engine-building. 1987. No. 6. P. 25–29.

### Информация об авторах

Н.С. Молоков – аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, SPIN-код: 8121-6450, AuthorID: 1077761, ResearcherID: AAA-7012-2022;

С.П. Бойко – кандидат технических наук, доцент кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, SPIN-код: 2975-7872, AuthorID: 1059734;

П.П. Кича – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, SPIN-код: 7258-9751, AuthorID: 818386.

### **Information about the authors**

N.S. Molokov – Postgraduate Student of the Department of Marine Internal Combustion Engines, SPIN-code: 8121-6450, AuthorID: 1077761, ResearcherID: AAA-7012-2022;

S.P. Boiko – PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marine Internal Combustion Engines, SPIN-code: 2975-7872, AuthorID: 1059734;

P.P. Kicha – PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ship Power Plants, SPIN-code: 7258-9751, AuthorID: 818386.

Статья поступила в редакцию 08.02.2022; одобрена после рецензирования 28.02.2022; принята к публикации 21.03.2022.

The article was submitted 08.02.2022; approved after reviewing 28.02.2022; accepted for publication 21.03.2021.