

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-68-78
УДК 621.354.326:629.5

А.Н. Соболенко, В.В. Тарасов
Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Владивосток, Россия

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОГО МОТОРНОГО МАСЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

Объект и цель научной работы. Целью является построение регуляторных диаграмм отгона водотопливных фракций (ВТФ) из отработанного моторного масла (ОММ) в циклонном вакуум-термическом испарителе (ЦВИ) с активацией данного процесса вакуум-термическим воздействием на сформированное в ЦВИ тонкопленочное течение ОММ для оценки эффективных параметров процесса регенерации.

Материалы и методы. Регуляторные диаграммы построены на основе графического материала двумерных сечений с линиями постоянной эффективности отгона ВТФ гиперповерхностей функций отклика в трехмерном пространстве в натуральных значениях, характеризующих зависимости коэффициентов эффективности удаления водотопливных фракций из ОММ от его температуры и давления вакуума в ЦВИ.

Основные результаты. Регуляторные диаграммы являются частью разработки комплексной математической модели процесса «мягкой» регенерации ОММ по авторской схеме как отдельного, так и совместного удаления воды и легких топливных фракций из ОММ судового дизеля. Регуляторные диаграммы показывают значения температуры ОММ и давления вакуума, обеспечивающие наивысший процент отгона топлива и воды из ОММ для разной производительности ЦВИ.

Заключение. Регуляторные диаграммы необходимы для прогнозирования результата регенерации с восстановлением параметров показателей вязкости и температуры вспышки регенерированного моторного масла значительно выше браковочных, определенных регламентируемыми документами, для повторного использования в двигателе внутреннего сгорания.

Ключевые слова: регенерация моторных масел, регуляторные диаграммы, циклонный вакуум-термический испаритель.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-68-78
UDC 621.354.326:629.5

A. Sobolenko, V. Tarasov
Nevelskoy State Maritime University, Vladivostok, Russia

EFFICIENCY VS PARAMETERS OF SPENT MOTOR OIL REGENERATION PROCESS

Object and purpose of research. The purpose of this study is to construct regulatory diagram of water-fuel fraction stripping from a thin slick of spent motor oil in a cyclonic vacuum-thermal evaporator and estimate the conditions in which this regeneration process is the most efficient.

Materials and methods. Regulatory diagram are based on the plots of plane sections with the isolines of water-fuel fraction stripping efficiency, three-dimensional hypersurfaces of stripping functions in natural values characterizing the efficiency of water-fuel fraction stripping from spent motor oil slick with reference to the temperature and vacuum pressure in cyclonic vacuum-thermal evaporator.

Main results. Regulatory diagrams are a part of integrated mathematical model describing “soft” regeneration of spent motor oil as per the procedure suggested by the author for both separate and joint stripping of water and light fuels from spent

Для цитирования: Соболенко А.Н., Тарасов В.В. Эффективность регенерации отработанного моторного масла в зависимости от параметров процесса. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 3(393): 68–78.

For citations: Sobolenko A., Tarasov V. Efficiency vs parameters of spent motor oil regeneration process. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 3(393): 68–78 (in Russian).

motor oil of a marine diesel. These regulatory diagrams indicate the temperature of spent motor oil and vacuum pressures offering the greatest efficiency of fuel and water stripping for vacuum-thermal evaporators of various capacity.

Conclusion. Regulatory diagrams are necessary to predict the results of regeneration process bringing viscosity and flash point of regenerated motor oil well above the minimum acceptable levels stipulated in regulatory documents, so that the oil thus regenerated becomes again suitable for use in internal combustion engines.

Keywords: regeneration, motor oils, regulatory diagrams, cyclonic vacuum-thermal evaporator.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Утилизационные мероприятия – повторное использование после соответствующей переработки отработанных моторных масел (ОММ) – являются перспективным направлением экономии в эксплуатации судовых дизелей [1]. ОММ обрабатываются путем их очистки от механических примесей, регенерацией, состоящей в удалении фракций топлива и воды, и легированием присадками. Регенерация ОММ является лучшим способом их утилизации, т.к. при этом нейтрализуются их экологически вредные компоненты, уменьшается количество отходов и предоставляется возможность многократного использования масел [2].

Направление регенерации моторных масел на судах позволяет сократить расходы на транспортировку, но для этого следует иметь в наличии достаточно малогабаритные установки. Одной из них является малогабаритная регенерационная установка «РУМС-1», созданная в МГУ им. адм. Г.И. Невельского. Основной ее элемент – циклонный вакуум-термический испаритель (ЦВТИ) оригинальной конструкции, в котором созданы условия для капельного и тонкопленочного испарения. Закрученное течение потока ОММ на внутренней цилиндрической поверхности испарителя создает капельное, а затем тонкопленочное испарение водотопливных элементов [3]. Вместе с тем при использовании такой установки на судне необходимо выбрать параметры работы, обеспечивающие ее наивысшую эффективность. Решению данной задачи посвящена настоящая статья.

Моделирование эффективности установки «РУМС-1»

Efficiency simulation of RUMS-1 regeneration unit

В качестве критерия эффективности процесса удаления водотопливных фракций (ВТФ) из ОММ был выбран коэффициент эффективности – процентное соотношение количества конденсата удаленной воды и легких фракций топлива к первоначальным браковочным показателям – содержанию воды и топлива в ОММ [4, 5].

Зависимость коэффициента эффективности процесса удаления воды из ОММ от влияющих на него факторов можно выразить функциональной зависимостью

$$\Phi_{\text{в}} = f_{\text{в}}(Q, p_{\text{вак}}, t), \quad (1)$$

а легких топливных фракций –

$$\Phi_{\text{т}} = f_{\text{т}}(Q, p_{\text{вак}}, t). \quad (2)$$

В исследовании переменными приняты следующие факторы: Q – производительность установки «РУМС-1» по приготовленным модельным смесям ОММ; $p_{\text{вак}}$ – давление вакуума в ЦВТИ во время регенерации; t – температура ОММ, подаваемого в ЦВТИ для регенерации.

В работе [5] было рассмотрено применение математических методов оптимального планирования эксперимента с целью получения математической модели процесса удаления воды и топлива из ОММ. Исследования параметров при совместном одновременном удалении ВТФ проводились в соответствии с планом эксперимента на основании некомпозиционного плана второго порядка в виде полинома второй степени. Значимость такого математического описания заключается в том, что оно на основании экспериментальных данных дает информацию о влиянии факторов и может служить основой для построения регуляторных диаграмм с визуализацией границ интервалов возможных оптимальных режимных значений температуры ОММ и вакуума в ЦВТИ. Это позволит количественно определять значения функций отклика в ходе регулирования режимов ведения процесса оптимизации эффективности удаления ВТФ из ОММ при использовании установки «РУМС-1» на проток (однократный проход регенерируемого масла через установку) [3].

В качестве параметров оптимизации принята эффективность удаления воды ($y_{\text{в}}$) и легких топливных фракций ($y_{\text{т}}$) из ОММ. На основе априорной информации были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов (см. таблицу).

Для получения моделей процесса в виде полинома второй степени был реализован некомпозиционный план второго порядка [6].

Уровни и интервалы варьирования факторов
 Variation levels and intervals for different factors

Факторы	Кодовое значение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний -1	основной 0	верхний +1	
Производительность, Q , л/ч	x_1	15	40	65	25
Давление вакуума, $P_{\text{вак}}$, МПа	x_2	0,015	0,045	0,075	0,030
Температура, t , °C	x_3	110	145	180	35

По данным опытов, проведенных согласно матрице планирования [6], получены модели, характеризующие зависимости $y_{\text{в}}$ и $y_{\text{т}}$ от исследуемых факторов процесса. Эти модели представлены полиномами второй степени

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (3)$$

Обработка результатов эксперимента проводилась по стандартной методике [6].

Расчет регрессионной модели для оценки эффективности удаления воды ($y_{\text{в}}$)

Calculation of the regression model for water stripping ($y_{\text{в}}$) efficiency assessment

В результате обработки данных эксперимента и исключения незначимых коэффициентов было получено следующее уравнение регрессии:

$$y_{\text{в}} = 89,34 + 16,68x_1 + 14,48x_2 + 15,95x_3 - 8,81x_2x_3 - 11,08x_1^2 - 16,48x_2^2 - 8,31x_3^2. \quad (4)$$

Проверка гипотезы адекватности данной модели по критерию Фишера показала, что она адекватна (критерий Фишера $F_p < F_{\text{т}}$, $18,595 < 19,3$ при доверительной вероятности 95 %) [6].

Уравнение (4) неудобно для интерпретации полученных результатов, поэтому оно было преобразовано по формулам перехода от кодированных значений [6] (x_1, x_2, x_3) к натуральным значениям факторов ($Q, p_{\text{вак}}, t$). В результате таких преобразований была получена следующая модель расчета коэффициента эффективности для отгона воды:

$$\varphi_{\text{в}} = -287,898 + 2,085Q + 3346,229p_{\text{вак}} + 2,8t - 8,386p_{\text{вак}}t - 0,018Q^2 - 18306,66p_{\text{вак}}^2 - 0,007t^2. \quad (5)$$

Расчет регрессионной модели для оценки эффективности удаления топлива ($y_{\text{т}}$)

Calculation of the regression model for fuel stripping ($y_{\text{т}}$) efficiency assessment

После обработки результатов эксперимента и исключения незначимых коэффициентов было получено следующее уравнение регрессии:

$$y_{\text{т}} = 42 + 6,5x_1 + 6,63x_2 + 6,88x_3 + 5x_1x_2 - 2,5x_1x_3 - 2,25x_2x_3 + 2,63x_1^2 - 7,63x_2^2 + 6,63x_3^2. \quad (6)$$

Проверка гипотезы адекватности данной модели по критерию Фишера показала, что она адекватна (критерий Фишера $F_p < F_{\text{т}}$, $6,08 < 19,16$ при доверительной вероятности 95 %) [6].

Уравнение (6) неудобно для интерпретации полученных результатов, поэтому оно преобразовывалось по формулам перехода от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) к натуральным значениям факторов ($Q_{\text{т}}, P_{\text{вак,т}}, t_{\text{т}}$). В результате таких преобразований получена модель расчета коэффициента эффективности для отгона топлива:

$$\varphi_{\text{т}} = -149,52 - 0,38Q + 1027,38P_{\text{вак}} + 1,98t - 2,14P_{\text{вак}}t + 6,67P_{\text{вак}}Q - 0,003Qt + 0,004Q^2 - 8472,2p_{\text{вак}}^2 - 0,005t^2. \quad (7)$$

Полученные расчетные формулы можно использовать для оценки эффективности процесса совместного удаления воды и легких топливных фракций из ОММ при доверительной вероятности 0,95, а также для обоснования изменения производительности установки регенерации и других параметров ведения процесса за счет конструктивных мероприятий, которые предполагается осуществить при модернизации установки «РУМС-1».

Исследование влияния параметров вакуум-термической активации на эффективность удаления водотопливных фракций из отработанного моторного масла при разной производительности процесса регенерации

Investigation of vacuum-thermal activation factors in terms of their contribution to the efficiency of water and fuel stripping from spent motor oil for regeneration units of different capacity

Удаление водотопливных фракций из отработанного моторного масла при производительности $Q = 40$ л/ч

Преобразуем математическую модель (5) для удаления воды при производительности установки, взятой на основном уровне, подставив значение $Q = 40$ л/ч в формулу (5). В результате формула для оценки удаления воды при $Q = 40$ л/ч имеет вид

$$\varphi_{\text{в}} = -233,298 + 3346,229p_{\text{вак}} + 2,8t - 8,386p_{\text{вак}}t - 18306,66p_{\text{вак}}^2 - 0,007t^2. \quad (8)$$

Геометрическая интерпретация полученной регрессионной модели в натуральных значениях при производительности, взятой на основном уровне ($Q = 40$ л/ч), приведена на рис. 1. Как следует из рисунка, процентное соотношение количества конденсата удаляемой воды и первоначального браковочного показателя содержания воды в ОММ при повышении давления вакуума от 0,02 до 0,06 увеличивается и затем начинает снижаться. Повышение температуры от 120 °С приводит к увеличению удаляемых паров воды до температуры 140 °С, а после начинает снижаться. Таким образом, для удаления воды с наибольшим коэффициентом эффективности 90 % и производительности $Q = 40$ л/ч необходимо установить вакуум в ЦВТИ, $p_{\text{вак}} = 0,060$ МПа, а температуру ОММ не более 140 °С.

Преобразуем математическую модель (7) для удаления топлива при производительности установки, взятой на основном уровне, подставив значение $Q = 40$ л/ч в формулу (7). В результате выражение для оценки удаления топлива при $Q = 40$ л/ч имеет следующий вид:

$$\varphi_{\text{т}} = -158,32 + 1294,18p_{\text{вак}} + 1,86t - 2,14p_{\text{вак}}t - 8472,2p_{\text{вак}}^2 - 0,005t^2. \quad (9)$$

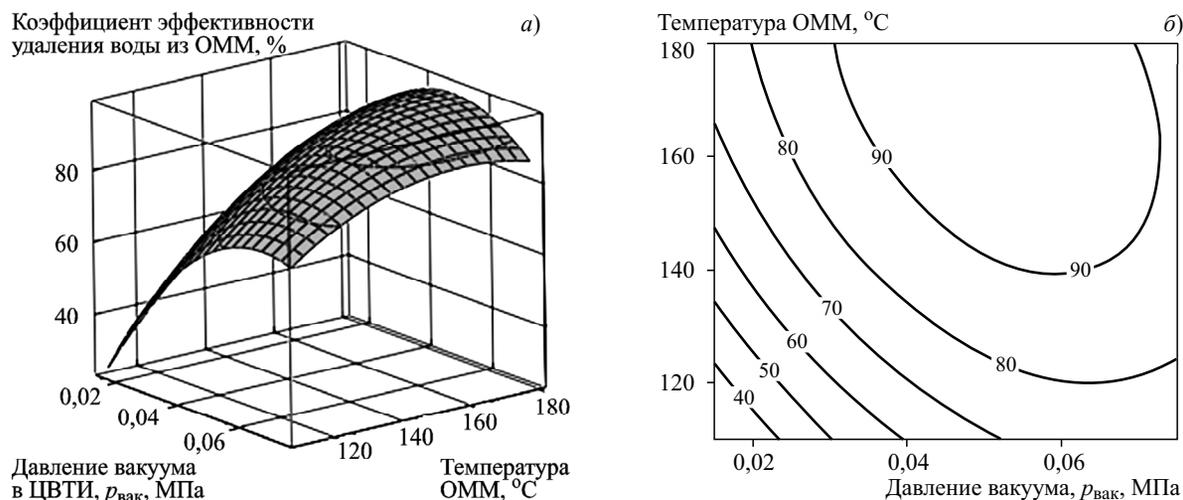


Рис. 1. Зависимость коэффициента эффективности удаления воды при совместном отгоне с топливными фракциями из отработанного моторного масла от его температуры и давления вакуума в циклонном вакуум-термическом испарителе при $Q = 40$ л/ч:

- а) гиперповерхность функции отклика в трехмерном пространстве в натуральных значениях;
б) двумерное сечение гиперповерхности с линиями постоянной эффективности (изолиниями)

Fig. 1. Efficiency of water stripping (jointly with fuel) from spent motor oil versus oil temperature and vacuum pressure in cyclonic vacuum-thermal evaporator at $Q = 40$ l/h: а) hypersurface of three-dimensional response function in natural values; б) plane section of hypersurface with efficiency isolines

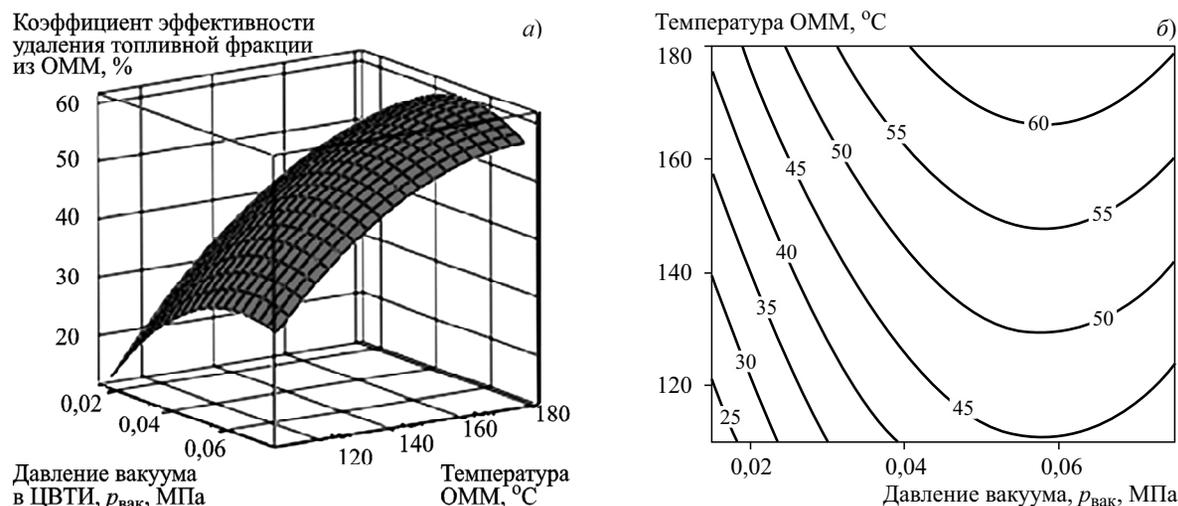


Рис. 2. Зависимость коэффициента эффективности удаления топлива при совместном отгоне с водой из отработанного моторного масла от его температуры и давления вакуума в циклонном вакуум-термическом испарителе при $Q = 40$ л/ч:

- а) гиперповерхность функции отклика в трехмерном пространстве в натуральных значениях;
 б) двумерное сечение гиперповерхности с линиями постоянной эффективности (изолиниями)

Fig. 2. Efficiency of fuel stripping (jointly with water) from spent motor oil versus oil temperature and vacuum pressure in cyclonic vacuum-thermal evaporator at $Q = 40$ l/h: а) hypersurface of three-dimensional response function in natural values; б) plane section of hypersurface with efficiency isolines

Геометрическая интерпретация полученной регрессионной модели в натуральных значениях при производительности, взятой на основном уровне ($Q = 40$ л/ч), представлена на рис. 2. Согласно рисунку, процентное соотношение количества конденсата удаляемых паров легких фракций топлива и первоначальных браковочных показателей по содержанию топлива в ОММ при повышении давления вакуума от 0,02 до 0,058 увеличивается и затем начинает снижаться. Повышение температуры от 120 °С приводит к увеличению удаляемых паров топлива до температуры 175 °С а после начинает снижаться. Таким образом, для удаления топлива с наибольшим коэффициентом эффективности 60 % и производительности $Q = 40$ л/ч нужно установить вакуум в ЦВТИ, $p_{\text{вак}} = 0,058$ МПа, а температуру ОММ не более $t = 175$ °С.

Удаление водотопливных фракций из отработанного моторного масла при производительности $Q = 65$ л/ч

Преобразуем математическую модель (5) для удаления воды при производительности установки, взятой на верхнем уровне, подставив значение $Q = 65$ л/ч в формулу (5). В результате выра-

жение для оценки удаления воды при $Q = 65$ л/ч имеет вид

$$\varphi_{\text{в}} = -228,423 + 3346,229P_{\text{вак}} + 2,80t - 8,386P_{\text{вак}}t - 18306,66P_{\text{вак}}^2 - 0,007t^2. \quad (10)$$

Геометрическая интерпретация полученной регрессионной модели в натуральных значениях при производительности, взятой на верхнем уровне ($Q = 65$ л/ч), приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что процентное соотношение количества конденсата удаляемых паров воды к первоначальным браковочным показателям по содержанию воды в ОММ при повышении давления вакуума от 0,02 до 0,058 увеличивается и затем начинает снижаться. Повышение температуры от 120 °С приводит к увеличению удаляемых паров топлива до температуры 155 °С, а после снижается. Таким образом, для удаления топлива с наибольшим коэффициентом эффективности 100 % и производительности $Q = 65$ л/ч следует установить вакуум в ЦВТИ, $p_{\text{вак}} = 0,058$ МПа, а температуру ОММ не более $t = 155$ °С.

Преобразуем математическую модель (7) для удаления топлива при производительности установки, взятой на верхнем уровне, подставив значение $Q = 65$ л/ч в формулу (7). В результате формула

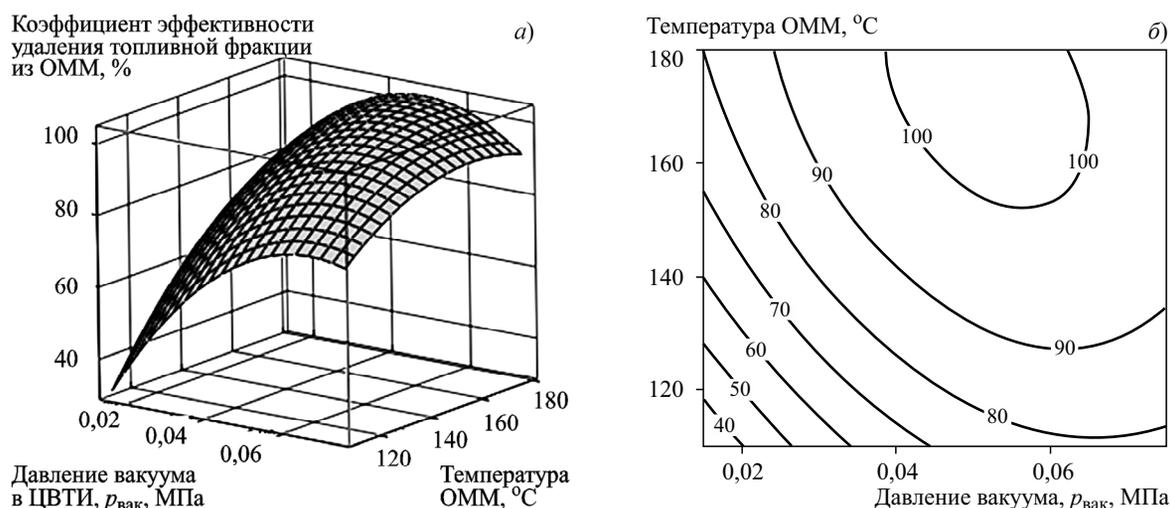


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффективности удаления воды, при совместном отгоне с топливными фракциями из отработанного моторного масла от его температуры и давления вакуума в циклонном вакуум-термическом испарителе при $Q = 65$ л/ч:

- а) гиперповерхность функции отклика в трехмерном пространстве в натуральных значениях;
 б) двумерное сечение гиперповерхности с линиями постоянной эффективности (изолиниями)

Fig. 3. Efficiency of water stripping (jointly with fuel) from spent motor oil versus oil temperature and vacuum pressure in cyclonic vacuum-thermal evaporator at $Q = 65$ l/h: а) hypersurface of three-dimensional response function in natural values; б) plane section of hypersurface with efficiency isolines

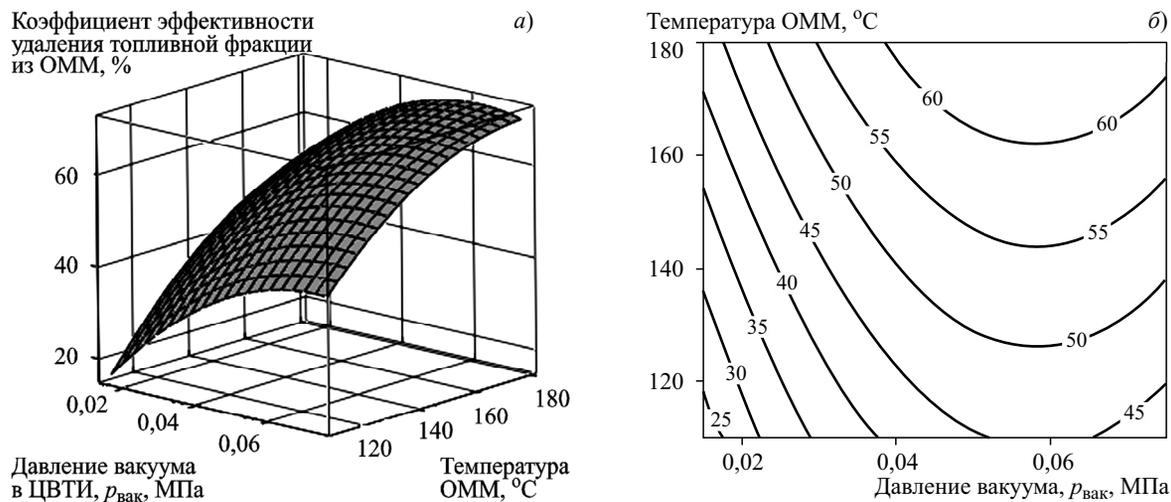


Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективности удаления топлива, при совместном отгоне с водой из отработанного моторного масла от его температуры и давления вакуума в циклонном вакуум-термическом испарителе при $Q = 65$ л/ч:

- а) гиперповерхность функции отклика в трехмерном пространстве в натуральных значениях;
 б) двумерное сечение гиперповерхности с линиями постоянной эффективности (изолиниями)

Fig. 4. Efficiency of fuel stripping (jointly with water) from spent motor oil versus oil temperature and vacuum pressure in cyclonic vacuum-thermal evaporator at $Q = 65$ l/h: а) hypersurface of three-dimensional response function in natural values; б) plane section of hypersurface with efficiency isolines

для оценки удаления топлива при $Q = 65$ л/ч имеет следующий вид:

$$\varphi_T = -157,32 + 1460,93p_{\text{вак}} + 1,785t - 2,14p_{\text{вак}}t - 8472,20p_{\text{вак}}^2 - 0,005t^2 \quad (11)$$

Геометрическая интерпретация полученной регрессионной модели в натуральных значениях при производительности, взятой на верхнем уровне ($Q = 65$ л/ч), приведена на рис. 4. Как следует из рисунка, процентное соотношение количества конденсата удаляемых паров топлива к первоначальному браковочным показателям по содержанию топлива в ОММ при повышении давления вакуума от 0,02 до 0,067 МПа увеличивается и затем начинает снижаться. Повышение температуры от 120 °С вызывает увеличение удаляемых паров топлива до температуры 170 °С, а после начинает снижаться. Таким образом, для удаления топлива с наибольшим коэффициентом эффективности 70 % и производительности $Q = 65$ л/ч необходимо установить вакуум в ЦВТИ, $p_{\text{вак}} = 0,067$ МПа, а температуру ОММ не более $t = 170$ °С.

Удаление ВТФ из ОММ при производительности $Q = 15$ л/ч

Преобразуем математическую модель (5) для удаления воды при производительности установки,

взятой на нижнем уровне, подставив значение $Q = 15$ л/ч в формулу (5). В результате выражение для оценки удаления воды при $Q = 15$ л/ч имеет следующий вид:

$$\varphi_B = -260,673 + 3346,229p_{\text{вак}} + 2,80t - 8,386p_{\text{вак}}t - 18306,66p_{\text{вак}}^2 - 0,007t^2 \quad (12)$$

Геометрическая интерпретация полученной регрессионной модели в натуральных значениях при производительности, взятой на нижнем уровне ($Q = 15$ л/ч), приведена на рис. 5. Из рисунка видно, что процентное соотношение количества конденсата удаляемых паров воды к первоначальным браковочным показателям по содержанию воды в ОММ при повышении давления вакуума от 0,02 до 0,06 увеличивается и затем начинает снижаться. Повышение температуры от 120 °С приводит к увеличению удаляемых паров воды до температуры 135 °С, а после снижается. Таким образом, для удаления воды с наибольшим коэффициентом эффективности 60,0 % и производительности $Q = 15$ л/ч необходимо установить вакуум в ЦВТИ, $p_{\text{вак}} = 0,06$ МПа, а температуру ОММ не более $t = 135$ °С.

Преобразуем математическую модель (7) для удаления топлива при производительности установки, взятой на нижнем уровне, подставив значение $Q = 15$ л/ч в формулу (7). В результате форму-

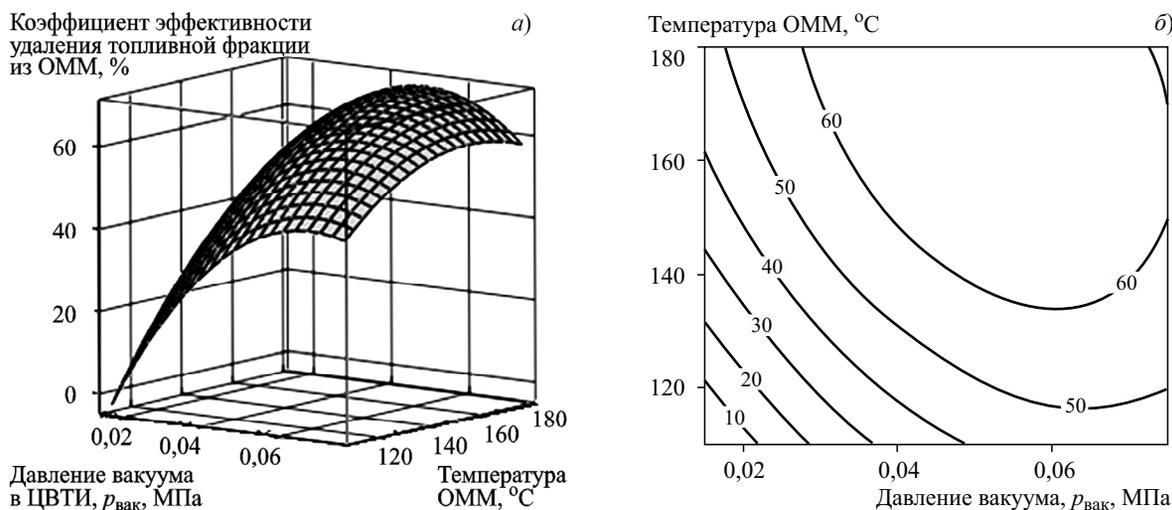


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности удаления воды, при совместном отгоне с топливными фракциями из отработанного моторного масла от его температуры и давления вакуума в циклонном вакуум-термическом испарителе при $Q = 15$ л/ч:

- а) гиперповерхность функции отклика в трехмерном пространстве в натуральных значениях;
- б) двумерное сечение гиперповерхности с линиями постоянной эффективности (изолиниями)

Fig. 5. Efficiency of water stripping (jointly with fuel) from spent motor oil versus oil temperature and vacuum pressure in cyclonic vacuum-thermal evaporator at $Q = 15$ l/h: а) hypersurface of three-dimensional response function in natural values; б) plane section of hypersurface with efficiency isolines

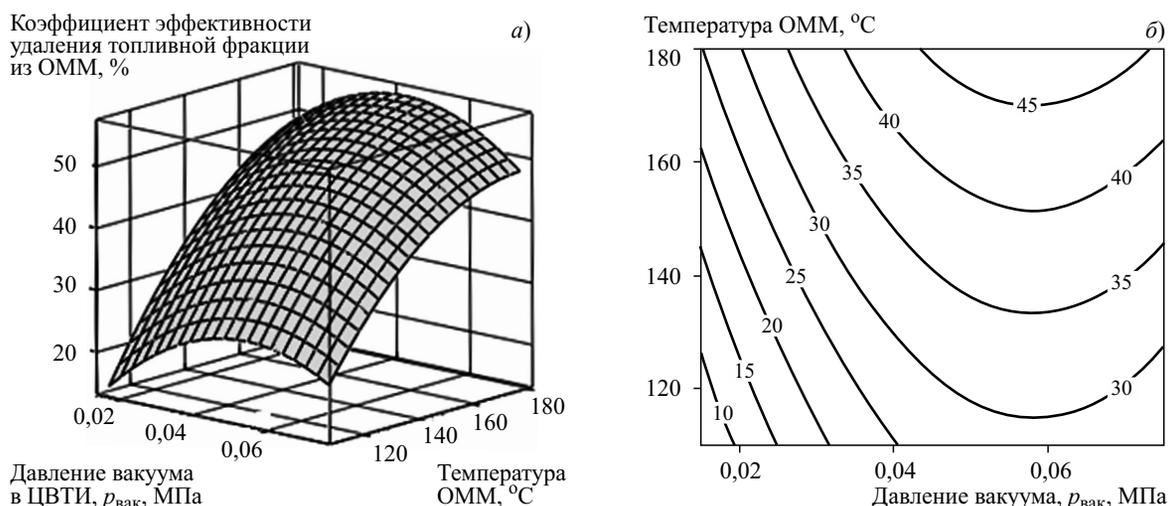


Рис. 6. Зависимость коэффициента эффективности удаления топлива, при совместном отгоне с водой из отработанного моторного масла от его температуры и давления вакуума в циклонном вакуум-термическом испарителе при $Q = 15$ л/ч:

а) гиперповерхность функции отклика в трехмерном пространстве в натуральных значениях;
б) двумерное сечение гиперповерхности с линиями постоянной эффективности (изолиниями)

Fig. 6. Efficiency of fuel stripping (jointly with water) from spent motor oil versus oil temperature and vacuum pressure in cyclonic vacuum-thermal evaporator at $Q = 15$ l/h: а) hypersurface of three-dimensional response function in natural values; б) plane section of hypersurface with efficiency isolines

ла для оценки удаления топлива при $Q = 65$ л/ч имеет вид

$$\varphi_T = -154,32 + 1127,43p_{\text{вак}} + 1,935t - 2,14p_{\text{вак}}t - 8472,2p_{\text{вак}}^2 - 0,005t^2. \quad (13)$$

Геометрическая интерпретация полученной регрессионной модели в натуральных значениях при производительности, взятой на нижнем уровне ($Q = 15$ л/ч), приведена на рис. 6. Как следует из рисунка, процентное соотношение количества топливной фракции к первоначальным браковочным показателям по содержанию топлива в ОММ при повышении давления вакуума от 0,02 до 0,045 увеличивается и затем начинает снижаться. Повышение температуры от 120 °С приводит к увеличению удаляемых паров топлива до температуры 175 °С, а после начинает снижаться. Таким образом, для удаления топлива с наибольшим коэффициентом эффективности 55 % и производительности $Q = 15$ л/ч нужно установить вакуум в ЦВТИ, $p_{\text{вак}} = 0,045$ МПа, а температуру ОММ не более $t = 175$ °С.

Комплексная модель оценки коэффициентов эффективности совместного удаления ВТФ из ОММ представляет две регрессионные математические модели на основании экспериментально-статистических данных [8], которые трансформи-

руются в регуляторные диаграммы. С помощью регуляторных диаграмм рассчитывается коэффициент эффективности удаления воды при наличии загрязнения ОММ, в том числе топливом, в то время как вторая модель дает функцию коэффициента эффективности испарения легких топливных фракций при совместном удалении из ОММ загрязнителей, представляющих ВТФ. Визуализация параметров в виде проекций изолиний на оси двумерного сечения образует режимные зоны вакуума в ЦВТИ и температуры ОММ для ведения процессов удаления ВТФ с заданной эффективностью.

Обобщенные регуляторные диаграммы при производительностях установки «РУМС-1» $Q = 40$ л/ч, $Q = 65$ л/ч и $Q = 15$ л/ч

Generalized regulatory diagrams for RUMS-1 outputs $Q = 40$ l/h, $Q = 65$ l/h and $Q = 15$ l/h

Регуляторная диаграмма при производительности $Q = 40$ л/ч

Двумерное сечение поверхности отклика эффективности удаления воды (рис. 1) дает возможность

установить рациональный режим создания в ЦВТИ давления вакуума и температуры регенерации ОММ при $Q = 40$ л/ч, а двумерное сечение поверхности отклика эффективности удаления топлива (рис. 2) – установить рациональный режим создания в ЦВТИ давления вакуума и температуры регенерации ОММ при $Q = 40$ л/ч. Наложение указанных двумерных сечений (рис. 1, 2) позволяет скорректировать параметры давления вакуума и температуры в ЦВТИ при совместном удалении ВТФ при данной производительности процесса регенерации ОММ (рис. 7). Режимы нагрева свыше 180°C не рассматриваются, т.к. для масла это неприемлемо.

Как видно из рисунка, линия наибольшего отгона топлива (55 %) пересекается с линией наибольшего отгона воды (90 %) при давлении $p_{\text{вак}} = 0,072$ МПа. При этом температура ОММ должна быть 160°C . Следовательно, при эффективности удаления воды 90 %, эффективности удаления топлива 55 % и производительности уста-

новки $Q = 40$ л/ч необходимо установить вакуум в ЦВТИ $p_{\text{вак}} = 0,072$ МПа, а температуру ОММ не более 160°C .

Регуляторная диаграмма при производительности $Q = 65$ л/ч

Двумерное сечение поверхности отклика эффективности удаления воды (рис. 3) дает возможность установить рациональный режим создания в ЦВТИ давления вакуума и температуры при регенерации ОММ при $Q = 65$ л/ч, а двумерное сечение поверхности отклика эффективности удаления топлива (рис. 4) – установить рациональный режим создания в ЦВТИ давления вакуума и температуры при регенерации ОММ при $Q = 65$ л/ч. Наложение указанных двумерных сечений (рис. 3, 4) позволяет скорректировать параметры давления вакуума и температуры в ЦВТИ при совместном удалении ВТФ при данной производительности процесса регенерации ОММ (рис. 8).

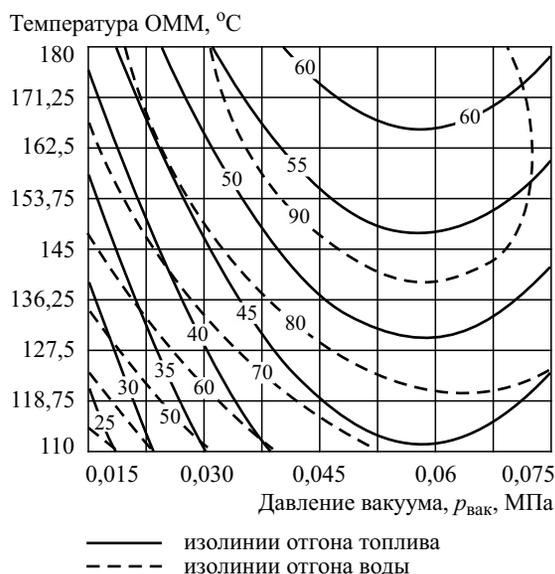


Рис. 7. Регуляторная диаграмма для установки давления вакуума в циклонном вакуум-термическом испарителе и температуры отработанного моторного масла перед его подачи в циклонный вакуум-термический испаритель для осуществления эффективного отгона водотопливных фракций при производительности установки «РУМС-1» $Q = 40$ л/ч

Fig. 7. Regulatory diagram for vacuum pressure setting in cyclonic vacuum-thermal evaporator and spent motor oil temperature setting prior to its feeding to the evaporator for efficient stripping of water and fuel at RUMS-1 capacity $Q = 40$ l/h



Рис. 8. Регуляторная диаграмма для установки давления вакуума в циклонном вакуум-термическом испарителе и температуры отработанного моторного масла перед его подачи в циклонный вакуум-термический испаритель для осуществления эффективного отгона водотопливных фракций при производительности установки «РУМС-1» $Q = 65$ л/ч.

Fig. 8. Regulatory diagram for vacuum pressure setting in cyclonic vacuum-thermal evaporator and spent motor oil temperature setting prior to its feeding to the evaporator for efficient stripping of water and fuel at RUMS-1 capacity $Q = 65$ l/h

Как видно из рисунка, линия наибольшего отгона топлива (70 %) пересекается с линией наибольшего отгона воды (100 %) при давлении $p_{\text{вак}} = 0,67$ МПа. При этом температура ОММ должна быть 169 °С. Следовательно, при эффективности 100 % удаления воды, эффективности 70 % удаления топлива и производительности установки $Q = 65$ л/ч, необходимо установить вакуум в ЦВТИ $p_{\text{вак}} = 0,067$ МПа, а температуру ОММ не более 170 °С.

Регуляторная диаграмма при производительности $Q = 15$ л/ч

Двумерное сечение поверхности отклика эффективности удаления воды (рис. 5) дает возможность установить рациональный режим создания в ЦВТИ давления вакуума и температуры при регенерации ОММ при $Q = 15$ л/ч, а двумерное сечение поверхности отклика эффективности удаления топлива (рис. 6) – установить рациональный режим создания в ЦВТИ давления вакуума и температуры при регенерации ОММ при $Q = 15$ л/ч. Наложение указанных двумерных сечений (рис. 5, 6) позволяет скорректировать параметры давления вакуума и температуры в ЦВТИ при совместном удалении ВТФ при данной производительности процесса регенерации ОММ (рис. 9).

Из рисунка видно, что линия наибольшего отгона топлива (55 %) пересекается с линией наибольшего отгона воды (70 %) при давлении $p_{\text{вак}} = 0,53$ МПа. При этом температура ОММ должна быть 175 °С. Значит, при эффективности 70 % удаления воды, эффективности 55 % удаления топлива и производительности установки $Q = 15$ л/ч необходимо установить вакуум в ЦВТИ $p_{\text{вак}} = 0,053$ МПа, а температуру ОММ не более 175 °С.

Выводы

Conclusion

1. Совместное удаление ВТФ из ОММ для восстановления до браковочных, эксплуатационных показателей моторного масла возможно в судовых условиях с применением модульной мобильной установки «РУМС-1».
2. Значение давления вакуума в установке «РУМС-1» и температура ОММ являются определяющими факторами при моделировании процесса совместного удаления топлива и воды.
3. Графические интерпретации в виде поверхностей отклика, а также регуляторные диаграммы,

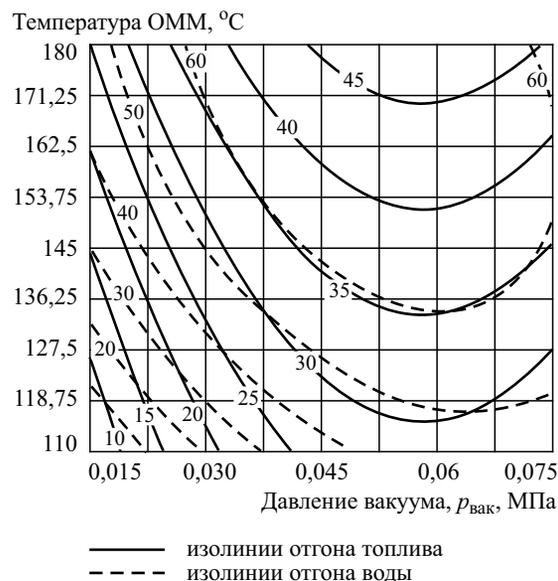


Рис. 9. Регуляторная диаграмма для установки давления вакуума в циклонном вакуум-термическом испарителе и температуры отработанного моторного масла перед его подачи в циклонный вакуум-термический испаритель для осуществления эффективного отгона водотопливных фракций при производительности установки «РУМ -1» $Q = 15$ л/ч.

Fig. 9. Regulatory diagram for vacuum pressure setting in cyclonic vacuum-thermal evaporator and spent motor oil temperature setting prior to its feeding to the evaporator for efficient stripping of water and fuel at RUMS-1 capacity $Q = 15$ l/h

построенные в программе MathCad, представляют собой взаимодействующие поверхности откликов. Поверхности, спроецированные на плоскость в виде изолиний, образуют режимные зоны, отвечающие за максимальный эффект удаления ВТФ. Определено, что при наибольшей производительности установки «РУМС-1», равной $Q = 65$ л/ч, при давлении вакуума $p_{\text{вак}} = 0,067$ МПа и температуре ОММ около 170 °С обеспечивается 100 % отгона воды и 70 % отгона легких топливных фракций. Таким образом, регенерированное моторное масло получает эксплуатационные показатели лучше браковочных по содержанию воды и температуре вспышки масла.

Библиографический список

1. Пиковская Е.В., Сурин С.А. Регенерация отработанных масел в США // Мир нефтепродуктов. 2000. № 4. С. 23–25.

2. *Кича Г.П., Глушков С.В., Тарасов В.В.* Регенерирование отработанных моторных масел и восстановление их эксплуатационных свойств на судах // Морские интеллектуальные технологии. 2016. № 3(33). Т. 1. С. 132–138.
3. *Тарасов В.В.* Экспериментальное исследование работы циклонного испарителя регенерационной установки по удалению топливных фракций из отработанного моторного масла // Научн. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. 2015. № 3. С. 139–143.
4. *Тарасов В.В., Соболенко А.Н.* Рекомендации по глубине очистки от механических примесей регенерированных моторных масел разных эксплуатационных групп // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4(42) Т. 5. С. 110–113.
5. *Тарасов В.В., Соболенко А.Н.* Влияние эксплуатационных свойств регенерированного моторного масла на изнашивание судового дизеля при его работе на разных сортах топлива // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2019. № 4 (ноябрь). С. 71–81.
6. *Спиридонов А.А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. Москва: Машиностроение. 1981. 184 с.
- motor oils of various groups // Marine Intellectual Technologies. 2018. No. 4(42). Vol. 5. P. 110–113 (in Russian).
5. *V. Tarasov, A. Sobolenko.* Performance properties of regenerated motor oil and their effect upon the wear of marine diesel running on various fuels // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Marine Engineering and Technologies series. 2019. No. 4 (November). P. 71–81 (in Russian).
6. *A. Spiridonov.* Experiment planning in the studies of technological processes. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. 184 p. (in Russian).

References

1. *Ye. Pikovskaya, S. Surin.* Spent oil regeneration in the USA // Mir nefteproduktov (World of Oil Products). 2000. No. 4. P. 23–25 (in Russian).
2. *G. Kicha, S. Glushkov, V. Tarasov.* Regeneration of used motor oils and restoration of their performance properties aboard ships // Marine Intellectual Technologies. 2016. No. 3(33). Vol. 1, p. 132–138 (in Russian).
3. *V. Tarasov.* Experimental study of cyclonic evaporator unit in the regeneration plant for fuel fraction removal from used motor oil // Scientific Challenges in Transport of Siberia and the Far East. 2015. No. 3. P. 139–143 (in Russian).
4. *V. Tarasov, A. Sobolenko.* Recommendations on purification degree for mechanical impurities in regenerated

Сведения об авторах

Соболенко Анатолий Николаевич, д.т.н., профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания Морского государственного университета им. адмирала Г.И. Невельского. Адрес: 690003, Россия, Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50А. Тел.: +7 (950) 286-57-03. E-mail: sobolenko_a@mail.ru.

Тарасов Валерий Васильевич, профессор кафедры безопасности в нефтегазовом комплексе Морского государственного университета им. адмирала Г.И. Невельского. Адрес: 690003, Россия, Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50А. Тел.: +7 (902) 064-11-64. E-mail: vtarasov@msun.ru.

About the authors

Anatoly N. Sobolenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Marine Internal Combustion Engines Department, Nevelskoy Maritime State University. Address: 50A, Verkhneportovaya st., Vladivostok, Russia, post code 690003. Tel.: +7 (950) 286-57-03. E-mail: sobolenko_a@mail.ru.

Valery V. Tarasov, Prof., Safety of Oil & Gas Facilities Department, Nevelskoy Maritime State University. Address: 50A, Verkhneportovaya st., Vladivostok, Russia, post code 690003. Tel.: +7 (902) 064-11-64. E-mail: vtarasov@msun.ru.

Поступила / Received: 23.04.20
Принята в печать / Accepted: 20.08.20
© Соболенко А.Н., Тарасов В.В., 2020