

© Севостьянов И. В.  
Sevostyanov I.

## РЕГЕНЕРАЦИЯ ОТРАБОТАННЫХ МАСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРОУДАРНОЙ ИНЕРЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

### REGENERATION OF THE FULFILLED OILS WITH USE VIBRO-BLOWING INERTIAL LOADING

**Аннотация.** В статье приводится схема экспериментальной установки с гидромпульсным приводом для регенерации отработанных масел способом поточной виброударной фильтрации, обеспечивающая по сравнению с другими известными способами и оборудованием аналогичного назначения высокую производительность и низкую энергоемкость рабочего процесса, при достаточной степени регенерации масел. В частности, по сравнению со способом поточной безударной фильтрации, производительность предлагаемого способа на 20% выше и стабильнее во времени. Представлены экспериментально проверенные уравнения и зависимости для определения основных рабочих параметров процессов поточной виброударной фильтрации – периодического увеличения давления в среде масла и приращения скорости его перемещения по каналам фильтрующей мембраны. Приводится теоретическое обоснование эффективности предлагаемого способа.

**Annotation.** The scheme of experimental installation with a hydraulic pulse drive for regeneration of the fulfilled oils by method of flow vibro-blowing filtration, providing in comparison with other known methods and the equipment of similar appointment high efficiency and low power consumption of working process, under sufficient degree of regeneration of oils, are presented in this article. In particular, in comparison with a method of flow unaccented filtration, productivity of an offered method on 20% higher and more stable in time. Experimentally checked up equations and dependences for definition of the basic working parameters of processes of flow vibro-blowing filtration – periodic increase of pressure in the medium of oil and an increment of speed of its moving on channels of a filtering membrane, are brought. The theoretical substantiation of efficiency of an offered method, are presented.

**Ключевые слова.** Регенерация, отработанные масла, поточная виброударная фильтрация, фильтрующая мембрана, параметры нагрузки.

**Key words.** Regeneration, fulfilled oils, flow vibro-blowing filtration, filtering membrane, loading parameters.

Серьезной экологической проблемой в Российской Федерации и других странах СНГ является регенерация отработанных масел (ОМ) – промышленных, моторных, авиационных, трансформаторных, турбинных, компрессорных [1, 2], которые достаточно широко используются в различных отраслях, в том числе и в ракетной технике. На данный момент даже в передовых странах Европы сбор ОМ не превышает 55% от потребления свежих масел [3] (в России – 10% [1]), тогда как остальная часть ОМ так или иначе попадает в биосферу [1]. При этом регенерации (восстановлению свойств с целью повторного использования в качестве масла [2]) подвергается сравнительно небольшой объем собранных ОМ (в

России он составляет 9%), а основная часть (40%) используется в качестве котельно-печного топлива [3], что приводит к не менее серьезным экологическим последствиям, чем слив ОМ на грунт. В связи с этим актуальной с точки зрения экологии и экономии задачей является разработка высокоэффективных способа и оборудования для регенерации ОМ, обеспечивающих высокую производительность и низкую энергоемкость рабочего процесса при достаточной степени регенерации ОМ.

Известные способы регенерации ОМ делятся на физические (отстаивание, сепарация, фильтрация), физико-химические (коагуляция, адсорбция), химические (сернокислотная и щелочная очистка), электроли-

Севостьянов Иван Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлорежущих станков и оборудования автоматизированного производства», Украина, Винницкий национальный технический университет, тел. (0432) 43 – 76 – 22.

Sevostyanov Ivan – Cand. Tech. Sci., reader, the senior lecturer of chair «Metal-cutting machine tools and the equipment of the automated manufacture», Ukraine, Vinnitsa national technical university, tel. (0432) 43-76-22.

тические, термические (термический крекинг и тонкопленочное вакуумное испарение) и комбинированные [2, 3]. Отстаивание является малопродуктивным способом, требующим к тому же использования громоздкого оборудования [2]. Сепарация (центрифугирование) не обеспечивает достаточно полного удаления из ОМ загрязняющих частиц [2].

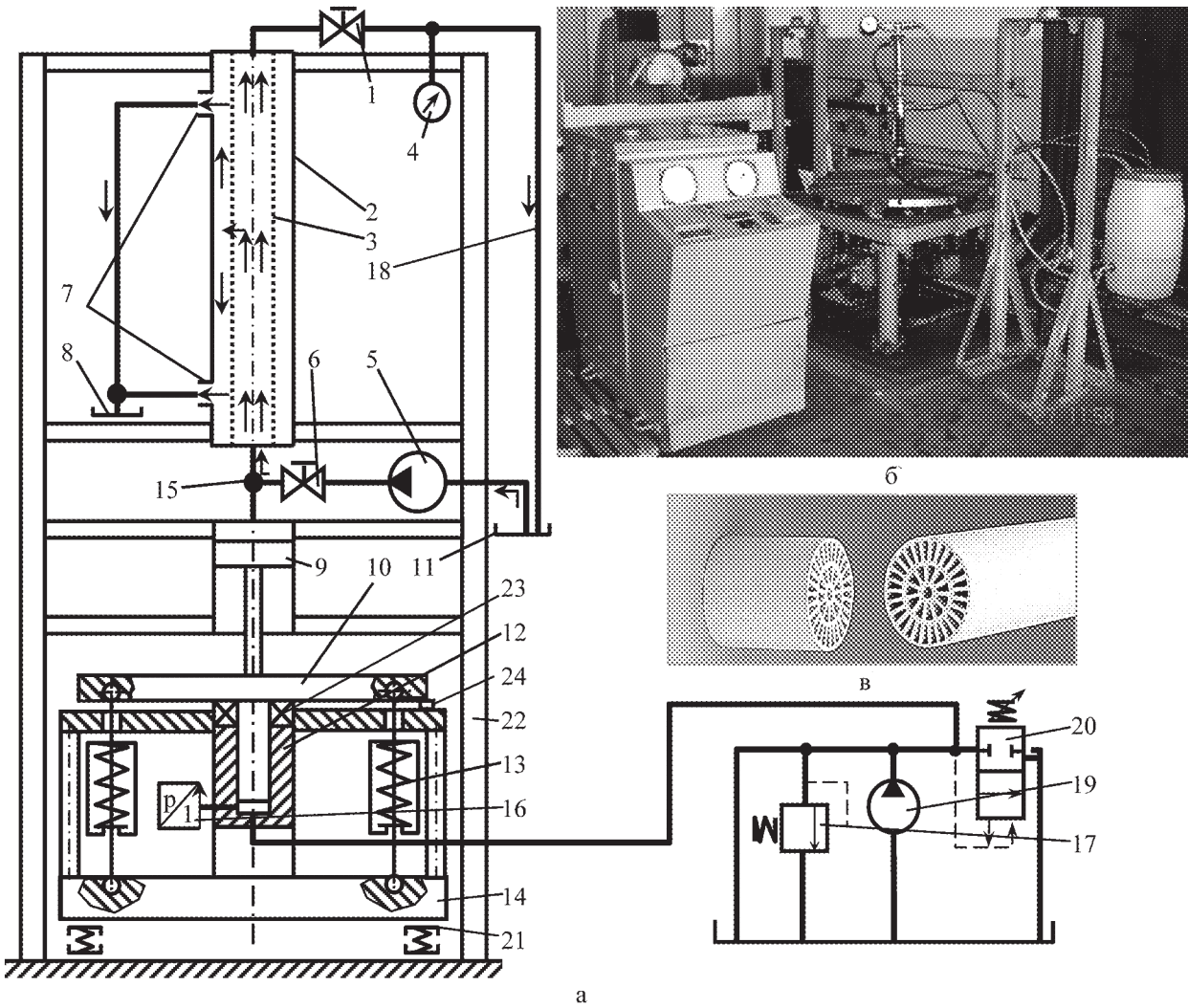
В процессе фильтрации, в том числе при использовании трубчатых металлокерамических мембран, являющимися на данный момент наиболее эффективными фильтрующими элементами, происходит их постепенное забивание [3]. Последнее обстоятельство приводит к снижению производительности рабочего процесса и требует его остановки и промывания мембраны. Кроме того, для обеспечения заданной производительности фильтрации в условиях крупных предприятий при больших объемах ОМ в ходе их регенерации необходимо создавать в среде ОМ одновременно высокие давление и скорость потока [3], что требует значительных энергозатрат. Физико-химические, химические и электролитические способы реализуются с использованием сложных многокорпусных технологических комплексов и дорогостоящих агентов-коагуляторов, поверхностно-активных веществ, адсорбентов, кислот, щелочей или электролитов [2]. К тому же после коагуляции и адсорбции ОМ обязательно подвергается фильтрации, а после химической очистки остаются кислотные или щелочносодержащие осадки, загрязняющие окружающую среду [2].

Термические крекинг и испарение являются достаточно энергоемкими процессами, а комбинированным способом присущи практически все недостатки способов, являющихся для них основой (см. выше). Нами предлагается способ поточной виброударной фильтрации ОМ на оборудовании с гидроимпульсным приводом (ГИП) [4], который по результатам предварительных экспериментов обеспечивает в сравнении с известными способами достаточно высокую эффективность.

На рисунке представлена схема и фотографии экспериментальной установки с ГИП для поточной виброударной фильтрации ОМ, созданной на базе инерционной гидроимпульсной вибромашины ИМЗГК-5 [5]. Установка включает (см. рисунок) вибродол 10, шарнирно связанный пружинами 13 со станиной 14, которая, в свою очередь, установлена на виброопорах 21. Вибродол опирается на подшипник 23 и соединен с плунжером гидроцилиндра 12 ГИП. Корпус гидроцилиндра 12 жестко закреплен на станине 14. Центробежный насос 5 присоединен через кран 6 к распределительной полости 15, с которой также сообщаются поршневая полость ги-

дроцилиндра 9 и трубчатая металлокерамическая мембрана 3 (фильтрующий элемент), установленная в корпусе 2 с отводами 7. Во время экспериментов с установкой применялась микрофильтрующая мембрана [3] фирмы "Tami" длиной  $l_{\phi} = 300$  мм и диаметром  $D_{\phi} = 25$  мм, с  $n_x = 39$  каналами гидравлического диаметра  $d_{\phi} = 2,5$  мм, изготовленная из смеси частиц оксидов титана и циркония, с размерами пор от 0,14 до 1,4 мкм [6] (см. рисунок, в). Гидроцилиндр 9 (см. рисунок, а) вместе с корпусом мембраны закреплены вертикально на кронштейне 22, при этом шток гидроцилиндра связан с вибродолом 10. На выходе из мембраны 3 установлен еще один кран 1 и манометр 4. Бак 11 предназначен для ОМ (таким было масло АМГ-10 [7] после его годовичного использования в гидросистеме ИМЗГК-5), бак 8 – для отфильтрованного масла. ГИП установки состоит из насоса 19, предохранительного клапана 17 и двухкаскадного двухходового двухпозиционного вибродол 20, присоединенного по схеме "на выходе" [4]. Вибродол является основным элементом управления и регулирования ГИП, обеспечивающим периодическое изменение давления рабочей жидкости в полости гидроцилиндра 12, а также настройку величин параметров нагрузки ОМ [4].

Работала установка таким образом. ОМ в беспре-рывном режиме подавалось насосом 5 по замкнутой системе из бака 11 через кран 6, мембрану 3 и кран 1 назад в бак 11. С помощью кранов 1, 6 в среде ОМ, проходящего по каналам мембраны, устанавливалось необходимое для микрофильтрации [3] давление  $p_{mi} = 0,2$  МПа [6]. ОМ проходило через поры в стенках мембраны, отфильтровывалось и стекало в корпус 2, а дальше через отводы 7 в бак 8. Содержащиеся в ОМ загрязняющие частицы, окислы, асфальтовые смолы [2] задерживались стенками мембраны. Включался насос 19 ГИП, в результате чего при закрытом вибродоле 20 (верхняя позиция по схеме) давление рабочей жидкости в полости гидроцилиндра 12 увеличивалось. Вибродол 10 и вместе с ним поршень гидроцилиндра 9 перемещались вверх, что приводило к сжатию пружин 13. В момент достижения в гидросистеме ГИП максимального давления рабочей жидкости  $p_{z1}$  вибродол 20 открывался (нижняя позиция по схеме), соединяя полость гидроцилиндра 12 со сливом. Давление в ней падало, в результате вибродол 10 с поршнем гидроцилиндра 9 под влиянием силы собственной тяжести и силы упругости сжатых пружин 13 возвращались в исходное нижнее положение. При падении давления в подсистеме ГИП до величины  $p_{z2}$  вибродол 20 закрывался (верхняя позиция по схеме), после чего цикл срабатывания ГИП снова повторялся. Таким обра-



Принципиальная гидрокинематическая схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки с ГИП для поточной виброударной фильтрации отработанных масел на базе вибромашины ИМЗГК-5; в – трубчатая металлокерамическая фильтрующая мембрана, используемая в процессе экспериментов

зом, поршень гидроцилиндра 9 осуществлял вертикальные возвратно-поступательные перемещения с частотой до 150 Гц и амплитудой до 2 мм, которые можно было бесступенчато и точно регулировать. Данные перемещения, в свою очередь, приводили к созданию в среде ОМ, циркулирующего по каналам мембраны 3, ударных волн напряжений и деформаций, периодического увеличения на величину  $\Delta p_{y0}$  давления ОМ и приращения скорости  $v_n$  его перемещения (в частности, изменение давления в среде ОМ было экспериментально подтверждено с помощью манометра 4). В результате, по сравнению с безударной поточной фильтрацией, реализуемой на этой же самой установке при отключенном ГИП, обеспечивалась на 20% более высокая и стабильная во времени производительность рабочего процесса.

Увеличение давления  $\Delta p_{y0}$  и скорости  $v_n$  в среде ОМ следует считать основными рабочими параметрами процессов поточной виброударной фильтрации. В целом, в

соответствии с данными [6], давление и скорость в среде обрабатываемого материала в процессе его тангенциальной поточной фильтрации в наибольшей степени определяют производительность и энергоёмкость рабочего процесса. Поэтому установим зависимости  $\Delta p_{y0}$  и  $v_n$  от параметров нагрузки ОМ – максимального давления  $p_{z1}$  рабочей жидкости в гидросистеме ГИП, амплитуды  $z_{ia}$  и частоты  $\nu$  колебаний вибростола установки.

При достаточно высокой частоте возвратно-поступательных перемещений поршня гидроцилиндра 9  $\nu = 60$  Гц и выше и амплитуде  $z_{ia} = 1...2$  мм в среде ОМ, протекающего по каналам мембраны, имеют место неполные гидравлические удары [7]. При этом на этапе перемещения поршня вверх увеличение давления  $\Delta p_{y0}$  в каналах мембраны можно найти по формуле Жуковского [7]

$$\Delta p_{y0} = \rho_m \cdot c (v_{m1} - v_{m0}) = \rho_m \cdot c \cdot v_n, \quad (1)$$

где  $\rho_m$  – плотность ОМ;  $c$  – скорость распространения в нем ударной волны;  $v_{m0}$ ,  $v_{m1}$  – средние скорости ОМ в

мембране до и после прямого хода поршня гидроцилиндра 9;  $v_n$  – средняя скорость перемещения поршня (приращение скорости потока ОМ).

Величина  $c$  в формуле (1) вычисляется как

$$c = 1 / \sqrt{\rho_m / K_m + \rho_m d_\phi n_k / \delta_\phi K_\phi},$$

где  $K_m, K_\phi$  – модули объемной упругости ОМ и материала фильтрующей мембраны;  $\delta_\phi$  – средняя толщина ее стенок.

Вследствие высокой жесткости мембраны ( $K_\phi \rightarrow \infty$ ), составляющей  $\rho_m d_\phi n_k / \delta_\phi K_\phi$  можно пренебречь. Тогда формула для определения скорости  $c$  примет вид

$$c = 1 / \sqrt{\rho_m / K_m}. \quad (2)$$

Скорость  $v_n$  находим по формуле

$$v_n = z_{la} / t_{x.n}, \quad (3)$$

в которой  $t_{x.n}$  – время прямого хода поршня 9, которое приблизительно соответствует продолжительности  $t_{нд}$  этапа набора давления в рабочей полости гидроцилиндра 12 [4] и поэтому может быть рассчитано как [4]

$$t_{x.n} = t_{н.д} = p_{z1} W_{ГПП} / Q_{н1} K_{ГПП},$$

где  $W_{ГПП}$  – объем гидросистемы ГИП, в котором изменяется давление;  $Q_{н1}$  – подача насоса 19 ГИП;  $K_{ГПП}$  – приведенный модуль объемной упругости полостей и каналов  $W_{ГПП}$  а также рабочей жидкости в нем.

Объем  $W_{ГПП}$  равняется сумме минимального начального объема  $W_0$  гидросистемы ГИП и объема рабочей полости гидроцилиндра 12 в момент завершения прямого хода вибростола 10

$$W_{ГПП} = W_0 + S_z z_{la},$$

где  $S_z$  – площадь поперечного сечения плунжера гидроцилиндра 12.

Значение  $K_{ГПП}$  можно подсчитать по формуле [7]

$$K_{ГПП} = 1 / \left( \frac{1}{K_{z-ж.а.ср}} + \frac{1}{K_n} + \frac{1}{K_g} + \frac{1}{K_z} + \frac{1}{K_p} \right),$$

где  $K_{z-ж.а.ср} = (K_{z-ж.а.1} + K_{z-ж.а.2}) / 2$  – средняя величина адиабатного модуля объемной упругости рабочей жидкости в объеме  $W_{ГПП}$  при изменении давления от  $p_{z1}$  до  $p_{z2}$  с учетом содержащегося в ней нерастворенного воздуха. Адиабатный модуль упругости для быстропотекающих процессов  $K_{жа} \approx 1,5 \cdot K_{ж}$  [7], а объемный модуль упругости газожидкостной смеси определяем как [7]

$$K_{z-ж} = \frac{K_{ж} \left( \frac{W_{жс}}{W_z} + 1 \right)}{\frac{W_{жс}}{W_z} + K_{жс} \frac{p_0}{p_{z1}}}, \quad (4)$$

где  $K_{ж}$  – модуль упругости жидкости, которая не содержит воздуха;  $W_{жс}, W_z$  – соответственно, объемы жидкостной и газовой фаз при атмосферном давлении  $p_0$ .

Приведенные модули объемной упругости сте-

нок каналов и полостей насоса 19 –  $K_n$ , вибровозбудителя 20 –  $K_g$ , гидроцилиндра 12 –  $K_z$  и распределительной полости, к которой в стык присоединены насос, вибровозбудитель и гидроцилиндр  $K_p$ , определяем с помощью зависимости [7]

$$K_{np} = K_{mat} \delta / d,$$

где  $K_{mat}$  – модуль объемной упругости материала канала или полости;  $\delta, d$  – толщина ее стенки и диаметр.

Величина  $t_{н.д}$  может быть приблизительно вычислена как половина периода  $T_{ц}$  срабатывания ГИП [4], который, в свою очередь, зависит от частоты  $\nu$  колебаний вибростола 10. Таким образом

$$t_{н.д} = 1 / 2 \cdot \nu. \quad (5)$$

Подставив зависимости (2, 3, 5) в формулу (1), получим

$$\Delta p_{yo} = 2 \cdot \nu \cdot z_{la} \sqrt{K_m \rho_m}. \quad (6)$$

Определим значение  $\Delta p_{yo}$  для рабочих и конструктивных параметров рассматриваемой установки при фильтровании с ее помощью масла АМГ-10, широко применяемого в качестве рабочей жидкости в гидросистемах станочного и кузнечно-прессового оборудования, авиационной и ракетной техники, в связи с чем представляет практический интерес его регенерация и повторное использование в гидросистемах, обеспечивающие уменьшение материальных затрат и негативное воздействие на окружающую среду.

По формуле (4) для адиабатного модуля объемной упругости масла АМГ-10:  $K_{ма} = 1,5 \cdot 1,33 \cdot 10^9 = 1,995 \cdot 10^9$  Па [7], при содержании в ОМ 0,003% нерастворенного воздуха [4, 7] и  $p_{z1} = p_{мн} = 0,2$  МПа

$$K_m = \frac{1,995 \cdot 10^9 \left( \frac{99,997}{0,003} + 1 \right)}{\frac{99,997}{0,003} + 1,995 \cdot 10^9 \frac{101300}{(0,2 \cdot 10^6)^2}} = 1,732 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Вычисляем плотность ОМ с учетом среднего повышения его рабочей температуры  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$  [7]

$$\rho_m = \frac{\rho_{m20}}{1 + 8 \cdot 10^{-4} \Delta t} = \frac{850}{1 + 8 \cdot 10^{-4} \cdot 5} = 846,61 \text{ кг/м}^3,$$

где  $\rho_{m20}$  – плотность АМГ-10 при температуре  $20^\circ\text{C}$  [7]

Подставляем рассчитанные  $K_m$  и  $\rho_m$  в формулу (6) вместе с  $\nu = 60$  Гц и  $z_{la} = 2$  мм, получаем

$$\Delta p_{yo} = 2 \cdot 60 \cdot 0,002 \sqrt{1,732 \cdot 10^9 \cdot 846,61} = 290621 \text{ Па} \approx 0,3 \text{ МПа}.$$

Таким образом, создание в среде ОМ, проходящего по трубчатой металлокерамической мембране, ударных волн напряжений и деформаций обеспечивает периодическое повышение в нем давления в 2,5 раза, а следовательно, и увеличение производительности рабочего процесса.

Рассчитанное значение  $\Delta p_{y0}$  было с точностью в 9% подтверждено экспериментально на установке (см. рисунок), при реализации на ней соответствующего режима нагрузки ОМ:  $\nu = 60$  Гц;  $z_{ia} = 2$  мм;  $p_{mi} = 0,2$  МПа. При этом давление  $p_{z1}$  определялось с помощью тензометрического датчика 16 модели ADZ-SML-10.0, а  $\nu$  и  $z_{ia}$  – посредством тензометрического датчика перемещений 24 модели TURCK Ni8-M18-LiU. Также использовались аналогово-цифровой преобразователь модели E14-140, компьютер и пакет прикладных программ IGraph2.

Следует учесть, что эффективность предлагаемого способа может быть и выше, так как значение  $\Delta p_{y0}$  определялось при частоте  $\nu = 60$  Гц, зависимость от которой  $\Delta p_{y0}$  является прямо пропорциональной. В то же время ГИП установки обеспечивает регулирование  $\nu$  в пределах 0...150 Гц, таким образом, периодическое увеличение давления в среде ОМ по сравнению с  $p_{mi}$  может составлять до четырех раз.

Кроме этого, на этапах перемещения вибростола 10 вверх возрастает и скорость потока ОМ в каналах мембраны. С учетом формул (1), (3), (5) и подачи  $Q_{n2}$  насоса 5 ее приблизительное значение можно рассчитать как

$$\begin{aligned} v_{ml} &= v_{m0} + v_n = \frac{4 \cdot Q_{n2}}{\pi \cdot d_m^2 \cdot n_k} + 2 \cdot z_{ia} \cdot \nu = \\ &= \frac{4 \cdot 0,00077}{3,14 \cdot 0,0025^2 \cdot 39} + 2 \cdot 0,002 \cdot 60 \approx 4,26 \text{ м / с,} \end{aligned}$$

что на 6% выше, чем в процессе безударной фильтрации.

При этом рассчитанные периодические увеличения давления и скорости ОМ не требуют дополнительных энергозатрат, так как для их компенсации, с учетом кратковременности цикла срабатывания ГИП, между его электродвигателем и насосом установлена массивная муфта-маховик, накапливающая энергию на этапах сброса давления рабочей жидкости в гидросистеме привода и отдающая ее на этапах увеличения давления (длительность двух данных этапов приблизительно одинакова – см. формулу (5)).

Теоретически высокую эффективность предлагаемого способа можно объяснить следующим образом. При прохождении по каналам мембраны очередной ударной волны повышенного давления  $\Delta p_{y0}$  на частицы осадка, образующегося на внутренних поверхностях мембраны действуют напряжения сжатия, что обуславливает существенное снижение сил трения между ними, разрушение сводов с частиц, уменьшение толщины слоя осадка и забивания пор мембраны, а следовательно, более высокую и стабильную во времени, по сравнению с поточной безударной фильтрацией, производительность рабочего процесса. Кроме того, в соответствии с данными [3], ви-

брационная (а значит, и виброударная) нагрузка ОМ создает условия для его коагуляции, что также способствует более интенсивной регенерации.

Что касается еще одного параметра эффективности рассматриваемых процессов, а именно степени восстановления первоначальных свойств ОМ, то при использовании серийно выпускаемых авторитетными западными фирмами («Membrflow filtersysteme», «Aaflow systems», «Tami», «Della Toffola» и др.) мембран соответствующего назначения, высокое качество фильтрации будет гарантированно обеспечено.

Установка для поточной виброударной ультрафильтрации [3] может быть выполнена по той же схеме, что и установка для микрофильтрации (см. рисунок) и будет отличаться только мембраной (которая должна иметь поры меньших размеров, чем мембрана, используемая на предыдущей стадии), а также режимом работы (необходимо создать большой перепад давления между внутренними и внешними стенками мембраны). Для повышения производительности процесса регенерации следует увеличивать количество мембран в корпусе и их длину; соответственно должна возрасти и мощность установки.

Следует, однако, отметить, что предлагаемый способ не обеспечивает полного восстановления свойств ОМ до заданного уровня, позволяющего повторно использовать его в качестве рабочей жидкости гидросистем, охлаждающей среды или смазки. После виброударной микро- и ультрафильтрации из ОМ необходимо еще удалить остатки воды, топлива, а также мельчайшие частицы загрязнений, смол и окислов, находящихся во взвешенном состоянии [2, 3]. Тем не менее реализация предлагаемого способа позволит существенно снизить общие затраты на регенерацию ОМ времени и энергии при сравнительно невысоких сложности, материалоемкости и стоимости используемого оборудования.

## Выводы

1. Актуальной экологической проблемой промышленно развитых стран является загрязнение окружающей среды отработанными техническими маслами, лишь незначительная часть которых на данный момент регенерируется с целью повторного использования.

2. Известные физические способы регенерации ОМ не обеспечивают высокой производительности или непрерывности рабочего процесса и могут рассматриваться как предварительные. Физико-химические, химические и электролитические способы сложны и дороги в реализации, кроме того, после их применения остаются кислотные или щелочносодержащие осадки, загрязня-

ющие окружающую среду. Термические способы слишком энергоемки.

3. Предлагаемый способ поточной виброударной фильтрации ОМ обеспечивает по сравнению с поточной безударной фильтрацией на 20% более высокую и стабильную во времени производительность рабочего процесса, при заданной степени восстановления свойств ОМ.

4. Высокая эффективность предлагаемого способа

обусловлена созданием при его реализации в среде ОМ, циркулирующего по каналам фильтрующей трубчатой мембраны, периодических высокочастотных повышений давления (в 3 – 4 раза) и увеличения скорости его потока (до 12%), что способствует уменьшению толщины слоя осадка на внутренних поверхностях мембраны и забивания ее пор, интенсификации коагуляции ОМ и повышению производительности регенерации.

#### *Литература*

1. Потанков А. Г. Совершенствование технологии регенерации отработанных смазочных материалов путем моделирования регенерационного комплекса: Дис... канд. техн. наук – Санкт-Петербург, 1999. – 172 с.
2. Шашкин П. И., Брай И. В. Регенерация отработанных нефтяных масел. – М.: Химия, 1970. – 303 с.
3. Грищенко В. О. Разработка технологии регенерации моторных масел на основе микро- и ультрафильтрации: Дис... канд. техн. наук – Москва, 2003. – 176 с.
4. Искович-Лотоцкий Р. Д., Матвеев И. Б., Крат В. А. Машины вибрационного и виброударного действия. – Киев: Техніка, 1982. – 208 с.
5. А. с. 967651 СССР, М. Клз. Инерционная гидроимпульсная вибромашина/ Ходкин В. И., Матвеев И. Б., Обертюх Р. Р. – опубл. 23.10.82, Бюлл. №39. – 6 с.: ил.
6. Техническое руководство по трубчатым керамическим мембранам INSIDE C&RAM. Document B. BL. Handbuch Ru, 2004, Rev. 23, 36 с.
7. Баишта Т. М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.

Материал поступил в редакцию 29. 12. 2012 г.