

УДК 631.3:62-776

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ МОЮЩИХ РАСТВОРОВ МЕМБРАННЫМИ ФИЛЬТРАМИ ПРИ РЕМОНТЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Е. И. МАЖУГИН, А. Н. КАРТАШЕВИЧ, А. Л. КАЗАКОВ, А. В. ПАШКЕВИЧ

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 25.03.2019)

Важнейшими операциями ремонта сельскохозяйственной техники являются операции очистки ремонтируемых объектов. Эти операции выполняются водными растворами моющих средств (МС). МС состоят из щелочных солей и поверхностно-активных веществ (ПАВ). В процессе использования моющие растворы насыщаются загрязнениями. Для продления срока службы моющих растворов и повышения качества мойки растворы очищают разными способами с применением разнообразных устройств.

Одним из перспективных устройств для очистки моющих растворов являются трубчатые мембранные фильтрующие элементы. При правильно подобранных материалах мембраны, режиме очистки можно достичь высокой степени очистки моющих растворов от твердых частиц загрязнений и капель масла. При проведении данных исследований выполнялся анализ опубликованной информации, описание процесса очистки, теоретическое рассмотрение и анализ протекающих процессов, существенно влияющих на процесс очистки. В статье представлен анализ материалов мембран и предложено для очистки моющих растворов от твердых частиц и капель масла использовать гидрофильные мембраны. Приведены результаты теоретического анализа процесса очистки моющих растворов трубчатыми мембранными фильтрами. Установлено, что работа мембранных фильтров при очистке моющих растворов должна вестись при пониженных значениях перепада давлений. Минимальное значение скорости течения жидкости вдоль поверхности мембраны должно быть таким, чтобы любая капля масла, попавшая в пору, проходила сквозь нее или уносилась потоком жидкости.

Изложенная методика позволяет рассчитать параметры фильтра и режимы его работы. Представлены теоретические зависимости для определения граничных размеров капель масла выделяемых микрофильтром при заданных требованиях к качеству очистки. Получена теоретическая зависимость длины микрофильтра от его диаметра и площади фильтрующей поверхности.

Ключевые слова: очистка, моющий раствор, ремонт, фильтр, пленка, пора.

The most important operations of the repair of agricultural machinery are the operations of cleaning the repaired objects. These operations are performed with aqueous solutions of detergents. Detergents consist of alkaline salts and surface-active substances (surfactants). In the process of using, washing solutions are saturated with contaminants. To extend the service life of cleaning solutions and improve the quality of washing, the solutions are cleaned in different ways using a variety of devices.

One of the promising devices for cleaning detergent solutions are tubular membrane filter elements. With properly selected membrane materials, the cleaning mode can achieve a high degree of cleaning of detergent solutions from solid particles of dirt and oil droplets. When conducting these studies, an analysis of published information, a description of the cleaning process, a theoretical review and analysis of the processes that significantly affect the cleaning process were performed. The article presents an analysis of membrane materials and suggests using hydrophilic membranes for cleaning detergent solutions from solid particles and oil droplets. We have presented results of a theoretical analysis of the purification of cleaning solutions by tubular membrane filters. It has been established that the operation of membrane filters during the cleaning of detergent solutions should be carried out at lower values of the pressure differential. The minimum value of the flow rate of the liquid along the membrane surface should be such that any drop of oil that has entered the pore passes through it or is carried away by the flow of liquid.

The described method allows to calculate the filter parameters and modes of its operation. We have presented theoretical dependences for determining the boundary sizes of oil droplets emitted by a microfilter with given cleaning quality requirements. We have obtained the theoretical dependence of the microfilter length on its diameter and the area of the filtering surface.

Key words: cleaning, cleaning solution, repair, filter, film, pore.

Введение

К числу важнейших операций технологии ремонта сельскохозяйственной техники относятся операции очистки ремонтируемых объектов. Основной объем моечно-очистных операций выполняется с применением водных растворов технических моющих средств (МС). Основными компонентами современных МС являются щелочные соли и одно или два синтетические поверхностно-активные вещества (ПАВ). Соли образуют с водой истинные растворы, а ПАВ при рабочей концентрации МС частично распадаются на молекулы, а частично образуют крупные агрегаты, так называемые мицеллы, имеющие размеры коллоидных частиц. В процессе использования моющие растворы насыщаются

смываемыми с поверхностей ремонтируемых объектов загрязнениями. В этом случае загрязненный моющий раствор согласно положениям коллоидной химии можно считать сложной жидкой дисперсной системой, в которой дисперсной средой является водный раствор солей моющего средства, а дисперсной фазой – находящиеся в растворе загрязнения. Для продления срока службы моющих растворов и повышения качества мойки растворы очищают разными способами с применением разнообразных устройств.

Основная часть

В работах [1, 2, 3] было показано, что наиболее подходящими для очистки моющих растворов являются физические методы.

Физические методы основаны на выделении дисперсной фазы при продавливании дисперсной системы сквозь пористые материалы (фильтры) или разделении дисперсных фаз в силовом поле. Процесс продавливания дисперсной системы сквозь пористые материалы с целью разделения дисперсных фаз называется фильтрованием, причем в зависимости от размеров пор фильтров фильтрование подразделяется на процеживание, обычное фильтрование, микрофильтрование и ультрафильтрование.

Микрофильтрование предназначено для обработки тонкодисперсных систем, размеры частиц дисперсной фазы в которых составляют от нескольких микрометров до размеров коллоидной степени дисперсности. Дисперсные фазы коллоидных систем разделяются ультрафильтрованием. В качестве фильтрующих материалов при микрофильтровании и ультрафильтровании наиболее часто применяются тонкопористые материалы – мембраны. Поэтому два последних вида фильтрования называют еще и мембранным фильтрованием.

Наиболее технологичными и распространенными являются трубчатые мембранные фильтрующие элементы. Они представляют собой широкопористую прочную, чаще всего стеклопластиковую трубку, на внутреннюю или реже на внешнюю поверхность которой нанесена тонкая пленка с большим количеством микроотверстий (пор). Если пленка нанесена на внутреннюю поверхность, то очищаемая жидкость под давлением подается в трубку, причем для предотвращения забивания микроотверстий может быть организовано интенсивное движение очищаемой жидкости вдоль трубки.

Подбором материала мембран, размера их пор и режимов очистки можно обеспечить практически любые требования к очистке, однако применительно к моющим растворам пока отсутствуют как глубокие теоретические разработки, так и достаточный практический опыт. Ранее были исследованы возможности использования трубчатых мембранных фильтров для разделения обратных эмульсий, т. е. обезвоживания дизельных топлив [4, 5, 6].

Известны фильтрационные установки с трубчатыми мембранами [6], предназначенные для разделения водомасляных эмульсий и очистки моющих растворов. Они представляют собой блоки фильтрующих элементов трубчатой формы, выполненных из стеклопластика. На него нанесена пористая мембрана толщиной несколько десятков или сотен микрометров. Разделяемая эмульсия с большой скоростью проходит внутри трубки под большим давлением и проникает сквозь мембрану и стеклопластик, а частицы масла задерживаются мембраной. Созданная в ГОСНИТИ подобная установка БТУ 05/2 для очистки моющих растворов, обеспечивает удаление 99,9 % числа твердых частиц и тонкость очистки 5 мкм [7].

При разделении жидких смесей полимерными мембранами большое значение имеет правильный выбор материала мембраны. Полярные жидкости хорошо проникают через полярные мембраны, а неполярные жидкости – через неполярные мембраны. Известно, что такие системы являются лиофильными. Мембраны в лиофильных системах сильно набухают и являются, по сути, концентрированными коллоидными системами – студнями. Совершенно не взаимодействуют мембраны и жидкости, не совпадающие по полярности. В этом случае мембраны обладают наименьшей проницаемостью.

Обычно мембраны делят на два основных типа: гидрофильные и гидрофобные.

К гидрофильным относятся мембраны из регенерированной целлюлозы (целлофан), ацетатцеллюлозы, поливинилового спирта, полиакрилонитрила, нейлона и т. д.; к гидрофобным – мембраны из сложных эфиров целлюлозы, такие как пропионат целлюлозы, бутират целлюлозы, ацетобират целлюлозы с содержанием ацетильных групп 5...15 % и бутиральных групп 35...50 %, мембраны из полиэтилена, полипропилена, неопрена и др.

Если в растворе один из компонентов является гидрофобным, а другой гидрофильным, то для целей разделения могут быть использованы как гидрофильные, так и гидрофобные полимеры. Если оба компонента являются гидрофобными, то и мембрана должна быть гидрофобной. В противном случае при использовании мембран из гидрофильного материала скорости разделения будут крайне малыми. То же относится и к смеси гидрофильных веществ.

В данном случае рассматривается процесс очистки моющего раствора от загрязнений, которыми являются исходно гидрофобные капли масел и твердые частицы различного происхождения. Последние обычно покрываются пленками масел и независимо от их первоначальных свойств становятся также гидрофобными. В связи с этим основное внимание в данном анализе микрофильтрации посвящено выделению из моющего раствора капель масел. Они, находясь в моющем растворе, покрываются слоем молекул ПАВ, которые благодаря присутствию им свойствам придают каплям масел гидрофильные свойства. В том случае, когда и мембрана была гидрофобной молекулы ПАВ гидрофилизуют и ее, уменьшая при этом пропускную способность пор, но гидрофильную мембрану гидрофобизировать они не будут. В связи с этим можно предположить, что для очистки моющих растворов от масел и гидрофобных загрязнений целесообразно использовать гидрофильные мембраны, в том случае, когда трубчатая мембрана предназначена для пропускания раствора и задерживания твердых частиц и капель масла.

Скорость, с которой отфильтрованный раствор (фильтрат) проходит через мембрану при микрофильтрации, является функцией как размеров пор, так и их количеству на единицу поверхности мембраны. По мере блокирования пор частицами эффективная пористость мембраны и скорость фильтрации падают.

В рассматриваемом случае предполагается, что микрофильтрация осуществляется с помощью мембранного трубчатого фильтрующего элемента, а целью очистки является максимальное удаление масел до уровня, определяемого требованием, согласно которому в фильтрате не должно содержаться микрокапель масел, больших определенного заранее заданного размера.

Принципиальная типичная схема работы мембранного фильтрующего элемента показана на рисунке.

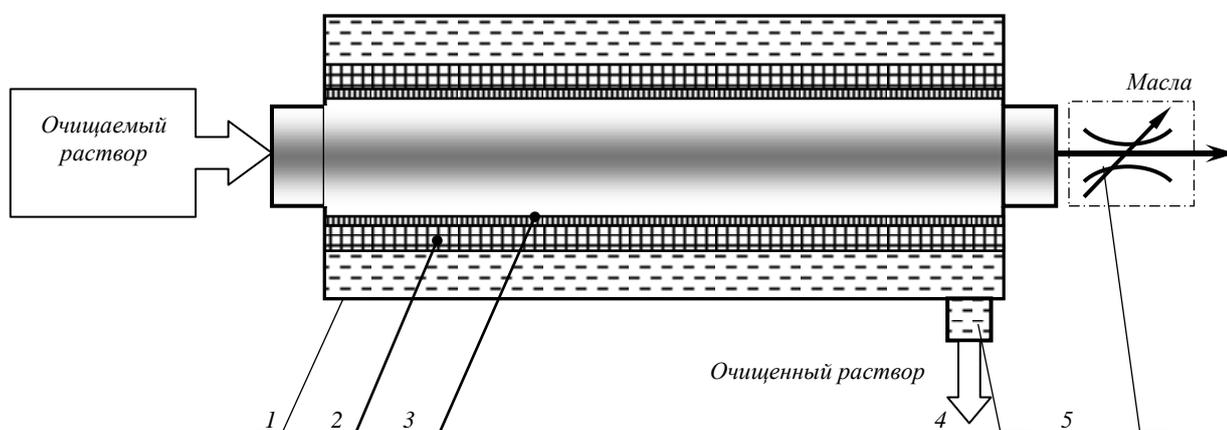


Рис. Схема работы трубчатого мембранного фильтрующего элемента:
1 – корпус; 2 – основа трубчатого элемента; 3 – мембрана; 4 – штуцер; 5 – дроссель

Очищаемый раствор под давлением подается в трубчатый элемент, состоящий из широкопористой основы 2 и нанесенной на нее изнутри мембранной пленки 3. Раствор, проходя вдоль элемента, проникает сквозь поры мембраны и освобождается от масел. Очищенный раствор скапливается в корпусе 1 и выводится из него через штуцер 4. Выделенные масла вместе с остатками раствора выходят из фильтрующего элемента через дроссель 5, необходимый для создания требуемого давления внутри мембранного фильтра.

Известно, что повышение перепада давлений Δp приводит к повышению производительности фильтрующего элемента. Однако при этом может наступить такой момент, когда капли масел размером больше пор фильтра будут продавливаться сквозь них, что приведет к необоснованному повышению энергоемкости процесса фильтрации и снижению степени очистки. Поэтому перепад давлений, при котором возможно продавливание капель масел, примем за максимально допустимый по технологическим соображениям перепад. При гидрофильной мембране капиллярные силы препятствуют прохождению масла сквозь пору. Тогда на основании закона Лапласа [8] можно записать уравнение для расчета допустимого перепада давлений:

$$\Delta p = 4(\sigma_p - \sigma_m) / d_n, \quad (1)$$

где σ_p – поверхностное натяжение моющего раствора; σ_m – поверхностное натяжение масла; d_n – диаметр пор фильтра.

Некоторые значения σ_m приведены в работе [8], а для его определения, например, для дизельного топлива, можно использовать уравнение:

$$\sigma_m = 31 - 0,1t, \text{ мН/м.} \quad (2)$$

где t – температура топлива, °С.

Уравнение (2) получено на основании обработки справочного материала [9].

Значения σ_p для разных растворов определены ранее и приведены в работе [2, 10].

Зная величины σ_m и σ_p и пользуясь уравнением (2), можно определить для разных температур и мембран с разными размерами пор максимально допустимый из условия «непродавливания» капель масла перепад давления на мембране или для известного давления подобрать мембрану с требуемым размером пор. Значение d_n указывается в характеристике мембраны или может быть достаточно легко измерено.

В связи с наличием в моющих растворах ПАВ разность ($\sigma_p - \sigma_m$) невелика, следовательно на основании анализа уравнения (1) можно утверждать, что работа мембранных фильтров при очистке подобных жидкостей должна вестись при пониженных перепадах давления.

Для увеличения допустимого перепада давления можно использовать разбавление раствора водой, что ведет к повышению σ_p , или применять мембраны с меньшим размером пор.

Предотвращение забивания пор при применении мембранных фильтров обычно обеспечивается необходимой скоростью течения фильтруемой жидкости вдоль поверхности мембраны. Минимальное значение скорости должно быть таким, чтобы любая капля, попавшая на пору, проходила сквозь нее или уносилась потоком жидкости, т. е. скатывалась с поры.

Наиболее неблагоприятной с точки зрения скатывания с поры капли, осевшей на нее, будет ситуация, при которой на пору ляжет капля диаметром, превышающим диаметр поры, но на возможно меньшую величину. Если предварительно допустить, что в любой точке поперечного сечения потока скорость жидкости есть величина постоянная, то угол β подхода капли к поверхности мембраны (угол наклона вектора абсолютной скорости – v_a) в начале фильтрующего элемента можно определить следующим образом:

$$\beta = \arctan (v_\phi / v_{oc}), \quad (3)$$

где v_ϕ – составляющая скорость в направлении, перпендикулярном к поверхности мембраны (скорость фильтрации); v_{oc} – скорость капли вдоль оси фильтрующего элемента.

Составляющую скорости v_ϕ можно выразить следующим образом:

$$v_\phi = Q_\phi / (k \cdot \pi \cdot d \cdot L), \quad (4)$$

где Q_ϕ – расход фильтрата; k – отношение суммарной площади проходного сечения пор к площади внутренней поверхности мембраны; d – внутренний диаметр мембранного фильтра; L – длина рассматриваемого участка фильтра.

Составляющую скорости v_{oc} можно определить по известной формуле:

$$v_{oc} = 4 Q_o / (\pi \cdot d^2), \quad (5)$$

где Q_o – общая подача жидкости в фильтр.

Тогда угол β можно найти по формуле:

$$\beta = \arctan [Q_\phi / (k \cdot \pi \cdot d \cdot L) / Q_o / (\pi \cdot d^2 / 4)]. \quad (6)$$

По мере продвижения раствора вдоль трубки значение Q_o уменьшается на величину Q_ϕ , причем величина Q_ϕ не является постоянной даже при отсутствии постепенного забивания пор. На отрезке фильтра длиной L она будет рассчитываться по формуле:

$$Q_\phi = \mu \cdot k \cdot \pi \cdot d \cdot L \sqrt{\Delta p}, \quad (7)$$

где μ – динамическая вязкость моющего раствора [4].

При этом минимальное значение размера капли можно определить по формуле:

$$d_k = d_n / \sin \beta. \quad (8)$$

Капли, размером меньше d_k , будут проходить сквозь поры, а большие – задерживаться на них, но при достаточной скорости течения жидкости вдоль трубки будут увлекаться потоком жидкости и освобождать поры.

При необходимости требования к качеству очистки раствора могут быть обоснованы с использованием опубликованных рекомендаций [11, 12].

Существующая теория [13], рассматривающая поведение частицы, лежащей на поверхности и обтекаемой потоком жидкости, предполагает, что при определенном динамическом давлении потока жидкости происходит скольжение частицы. Однако в соответствии с принятой моделью [4, 5] более вероятным будет не скольжение, а качение капли.

В ранее опубликованной работе [4] получено уравнение для расчета минимальной скорости, обеспечивающей скатывание легших на пору капель. Применительно к рассматриваемым условиям оно будет иметь вид:

$$v_{min} = \sqrt{\frac{\pi \left[0,5 \Delta p + \frac{d_n (\rho_p - \rho_m) g}{3 \sin^3 \beta} \right] \sin^2 \beta}{k_n \rho_m \left[\frac{C_x (1 + \cos \beta)}{\sin \beta} + C_y \right]}}, \quad (9)$$

где ρ_p и ρ_m – соответственно плотности моющего раствора и масел; C_x и C_y – коэффициенты формы частиц; k_n – коэффициент, учитывающий частичное погружение капель в пору.

Коэффициент k_n равен отношению площади вертикального поперечного сечения части капли, выступающей над поверхностью фильтра, к площади большого круга капли. Ранее [4] для расчета k_n получено следующее выражение:

$$k_n = 1 - (\pi \gamma / 180 - \sin \gamma) / 2\pi. \quad (10)$$

Для расчета ожидаемых результатов процесса необходимо иметь возможность теоретического определения размеров капель воды, которые, двигаясь под углом β к поверхности мембраны, обязательно пройдут сквозь пору вместе с фильтратом.

Допустимо предположить, что данное условие будет выполнено, если капля войдет в пору на глубину, не меньшую половины ее диаметра. Расчет предельного значения d_k можно выполнить по формуле [4]:

$$d_k = 2d_n \tan \beta \cdot \tan \left(\frac{90 - \beta}{2} \right). \quad (11)$$

Капли, имеющие диаметр, находящийся в пределах $d_k \dots d_n$, в зависимости от режимов и условий вхождения в пору могут пройти с фильтратом, а могут остаться в дисперсной среде.

Установив по изложенной методике минимальную скорость течения v_{oc} , обеспечивающую унос твердых частиц и капель масла, оседающих на мембрану, можно определить необходимый диаметр d_ϕ трубчатого фильтра по формуле:

$$d_{\phi} = 2\sqrt{Q_{\text{вых}}/(\pi \cdot v_{\text{ос}})}, \quad (12)$$

где $Q_{\text{вых}}$ – расход жидкости на выходе из фильтра.

Принятая теоретическая модель работы фильтра предполагает ламинарный режим движения в нем. Соответствие ламинарному режиму движения оценивается по критерию Рейнольдса Re .

$$Re = v_{\text{ос}} \cdot d_{\phi} / \nu. \quad (13)$$

Для расчета параметров фильтра можно сказать, что фильтр должен быть в состоянии пропустить расход не менее $Q_{\text{н}}$. Это условие может быть выполнено при применении фильтра с необходимой площадью фильтрующей поверхности $A_{\text{ф.п}}$, которую можно рассчитать по уравнению:

$$A_{\text{ф.п}} = Q_{\text{н}} \cdot \mu / (\Delta p \cdot q), \quad (14)$$

где q – удельная пропускная способность материала фильтра, представляющая собой пропускную способность единицы площади материала фильтра при единичном перепаде давления 1 МПа и вязкости жидкости, 1 Па/с.

Для трубчатого фильтра важнейшим параметром является общая длина трубки $L_{\text{т}}$, которую на основании предыдущего уравнения (14) для цилиндрической трубки можно определить следующим образом:

$$L_{\text{т}} = Q_{\text{н}} \cdot \mu / (\pi \cdot d_{\phi} \cdot \Delta p \cdot q). \quad (15)$$

Для предотвращения забивания пор фильтра скорость движения очищаемого раствора должна быть достаточно высокой, однако для обеспечения минимальной энергоемкости процесса режим движения должен быть ламинарным.

В настоящее время серийно выпускаются трубчатые мембранные фильтры с внутренним диаметром 12,2 мм. Приняв при этом в диаметре кинематическую вязкость раствора и учитывая то, что наибольшее критическое значение критерия Рейнольдса для круглых гладких труб равняется 2300 [9], можно определить предельное значение скорости, до которой будет обеспечиваться ламинарный режим. Вероятность перехода к турбулентному режиму повышается при повышенных температурах, ведущих к снижению вязкости очищаемой жидкости.

Выразив $v_{\text{ос}}$ из уравнения (12) и подставив критическое значение Re и указанное значение ν , получим допустимое значение скорости. Минимальное значение скорости, обеспечивающей незабиваемость пор, можно рассчитать по изложенной методике.

Приняв значение $v_{\text{ос}}$ и зная d_{ϕ} , можно определить необходимую производительность по уравнению:

$$Q_{\text{н.п}} = \pi \cdot d_{\phi}^2 \cdot v_{\text{ос}} / 4. \quad (16)$$

Давление $p_{\text{н}}$, которое должен обеспечить насос, подающий очищаемую жидкость в фильтр, можно рассчитать следующим образом:

$$p_{\text{н}} = p_{\text{с}} + p_{\text{т}} + p_{\text{м}} + p_{\text{п}} + p_{\text{д}} + p_{\text{ф}}, \quad (17)$$

где $p_{\text{с}}$, $p_{\text{т}}$, $p_{\text{м}}$, $p_{\text{п}}$, $p_{\text{д}}$, $p_{\text{ф}}$ – статическое давление на преодоление перепада высот установки насоса и слива в бак, потери в трубопроводах до и после фильтра, потери давления соответственно на преодоление местных сопротивлений в фильтре, потери давления на обеспечение путевого и транзитного расходов в фильтре, на дросселе при выходе из фильтра, на перепад давления внутри трубчатых фильтрующих элементов и вне их.

Расчет $p_{\text{с}}$, $p_{\text{т}}$, $p_{\text{м}}$ и $p_{\text{д}}$ выполняется обычными методами гидравлики.

При движении раствора по фильтрующему элементу часть раствора уходит сквозь его стенки. Поэтому расход раствора, движущегося в трубчатом фильтре, есть величина убывающая.

Расход Q_x на расстоянии x от начала фильтра можно выразить следующим образом:

$$Q_x = Q_{\text{н}} (1 - x / L_{\text{т}}) + Q_{\text{вых}}. \quad (18)$$

Для рассматриваемой составляющей потери давления на элементарном участке пути определяются по уравнению:

$$d p_{\text{п}} = s_y \cdot Q_x \cdot dx. \quad (19)$$

Проинтегрировав уравнение (19), получим формулу для расчета $p_{\text{п}}$.

$$p_{\text{п}} = s_y \cdot L_{\text{т}} \cdot Q_{\text{н. п}} = 128 \mu \cdot L_{\text{т}} \cdot Q_{\text{н. п}} / (\pi \cdot d_{\text{ф}}^4), \quad (20)$$

где s_y – удельное сопротивление фильтрующего элемента как трубопровода, Па·с/м⁴.

Значение $Q_{\text{вых}}$ в уравнении (18) можно определить из баланса расхода $Q_{\text{вых}} = Q_{\text{н. п}} - Q_{\text{ф}}$.

Расчет значения $p_{\text{ф}}$ можно выполнить, используя зависимость (1), по которой рассчитаем допустимое избыточное давление $p_{\text{и}}$, которое обеспечит требуемый расход жидкости сквозь поры фильтра.

На основании уравнения (1) и с учетом размерности q можно записать:

$$p_{\text{ф}} = p_{\text{и}} + \mu \cdot Q_{\text{ф}} / (q \cdot A_{\text{ф}} \cdot 10^{-6}), \text{ Па.} \quad (21)$$

Определение необходимой площади $A_{\text{ф}}$ фильтрующей поверхности при известных $p_{\text{ф}}$ и $p_{\text{и}}$ выполним по формуле:

$$A_{\text{ф}} = \mu \cdot Q_{\text{ф}} \cdot 10^6 / [q(p_{\text{ф}} - p_{\text{и}})]. \quad (22)$$

Зная $A_{\text{ф}}$, можно легко определить и необходимую длину трубчатого фильтра:

$$L = A_{\text{ф}} / (\pi \cdot d_{\text{ф}}). \quad (23)$$

Заключение

Из анализа материалов мембран нами рекомендуется использовать для очистки моющих растворов от масел и гидрофобных загрязнений гидрофильные мембраны.

Нами установлено, что для обеспечения низкой энергоемкости при очистке подобных жидкостей работа мембранных фильтров должна вестись при небольших перепадах давления.

Изложенная методика позволяет рассчитать параметры фильтра и режимы его работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мажугин, Е. И. Тонкослойное сепарирование моющих растворов при ремонте машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.06 / Е. И. Мажугин. Белорус. с.-х. акад. Горки, 1987. – 220 с.
2. Карташевич, А. Н. Интенсивная очистка жидкостей и газов в технических системах: монография / А. Н. Карташевич, Е. И. Мажугин. – Минск: Красико – Принт, 2002. – 290 с.
3. Мажугин, Е. И. Центробежная очистка моющих растворов при ремонте сельскохозяйственной техники: монография / Е. И. Мажугин, А. Л. Казаков, А. В. Пашкевич. – Горки: БГСХА, 2015. – 185 с.
4. Карташевич, А. Н. Теоретическое обоснование режимов микрофльтрации обратных эмульсий / А. Н. Карташевич, Е. И. Мажугин, В. Д. Прудников // Химия и химическая технология / Известия высш. учебн. заведений. 1991. – Т. 34. Вып. 6. – С. – 102–106.
5. Мажугин, Е. И. Обоснование параметров фильтра тонкой очистки с мембранным фильтрующим элементом / Е. И. Мажугин, В. Д. Прудников // Эксплуатация, восстановление и ремонт с.-х. техники / Доклады междунар. научно-практ. конф. Горки: БСХА, 1997. – С. 43–45.
6. Мажугин, Е. И. Энергетический расчет трубчатого мембранного фильтра тонкой очистки топлива / Е. И. Мажугин, М. А. Жарский, В. В. Мохов // Механизация мелиоративных работ / Сб. науч. тр. БСХА. Горки, 1997. – С. 14–18.
7. Тельнов, А. Ф. Мембранная технология на службе охраны окружающей среды / А. Ф. Тельнов, В. Б. Бочкарев // Труды ГОСНИТИ. М.: ГОСНИТИ, 1987. – Т. 80. – С. 120–122.
8. Щукин, Е. Д. Коллоидная химия / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. – 348 с.
9. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер [и др.]; под общ. ред. Б. Б. Некрасова 2-е изд. – М.: Высшэйшая школа, 1985. – 382 с.
10. Мажугин, Е. И. Результаты определения физико-химических показателей моющих растворов / Е. И. Мажугин // Сб. научных тр. БСХА, вып. 125, Горки, 1984. – С. 50–53.
11. Мажугин, Е. И. Обоснование требований к чистоте моющих растворов, применяющихся на сельскохозяйственных ремонтных предприятиях / Е. И. Мажугин // Эксплуатация и ремонт строительных и мелиоративных машин. / Сб. науч. тр. Вып. 108. Горки, 1983. – С. 10–15.
12. Карташевич, А. Н. Геометрический метод обоснования необходимой тонкости очистки моющих растворов / А. Н. Карташевич, Е. И. Мажугин // Современные материалы, оборудование и технология упрочнения и восстановления деталей машин / Тематич. сб. по материалам междунар. научнотехнич. конф. Новополоцк: ПГУ, 1999. – С. 112–114.
13. Зимон, А. Д. Адгезия пыли и порошков / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1967. – 372 с.