

Коалесценция как метод очистки сточных вод от нефтепродуктов

Рецензия эксперта на статью получена
19.03.2025 [The expert review of the article
was received on March 19, 2025]

Одной из основных причин загрязнения природных вод нефтепродуктами является недостаточная очистка сбрасываемых сточных вод и увеличение их объёма. Нефтепродукты и масла присутствуют в производственных сточных водах промышленных, транспортных и сервисных предприятий, также попадают в поверхностный сток с территорий этих предприятий и присутствуют в отработанных технологических растворах различного назначения, включая смазочно-охлаждающие, моющие, обезжиривающие растворы, а также образуют эмульсии промышленного происхождения.

Рекомендации по выбору процессов очистки нефтесодержащих сточных вод определяются исходя из таких критериев, как концентрация и фазово-дисперсное состояние загрязняющих веществ, количество сточных вод, целевое назначение очищенной воды, целесообразность утилизации отделённых нефтепродуктов [1–6].

Нефть и нефтепродукты в воде представляют собой гетерофазную полидисперсную систему. В сточных водах нефтепродукты могут находиться в разных фазово-дисперсных состояниях. Устойчивость грубодисперсных частиц нефтепродуктов к осаждению зависит от их плотности по сравнению с плотностью воды. Если плотность частиц меньше плотности воды, они образуют плёнку («слик») на поверхности. Если же плотность частиц больше плотности воды, то тяжёлые фракции твёрдых и вязких компонентов оседают. В толще воды могут находиться взвешенные мазутно-нефтяные агрегаты, которые сорбируются на других микродисперсных примесях. Микродисперсные частицы, образующие эмульсии типа «нефтепродукт в воде», обладают высокой стабильностью. Эти частицы «светлых» нефтепродуктов называются «растворимыми» [1–6].

В сточных водах нефтепродукты в большинстве случаев находятся в жидкой фазе, образуя состояние «жидкость в жидкости». Если две жидкости не смешиваются и не растворяются друг в друге, то они могут образовывать либо эмульсию, либо коллоидную суспензию. В обоих случаях диспергированная жидкость будет представлена в виде капель в непрерывной фазе — воде.

Способы осуществления коалесценции можно условно разделить на две категории: пассивные и активные.

Рекомендации по выбору процессов очистки нефтесодержащих сточных вод определяются исходя из таких критериев, как концентрация и фазово-дисперсное состояние загрязняющих веществ, количество сточных вод, целевое назначение очищенной воды, целесообразность утилизации отделённых нефтепродуктов [1–6]

Пассивные методы не требуют внешнего источника энергии. Слияние капель происходит благодаря специальным структурам в каналах и свойствам поверхности. Принцип пассивного улавливания капель в наиболее простом виде заключается в том, что в канале устанавливается элемент, который изменяет гидравлическое сопротивление. Этот элемент служит для задержки и улавливания капли на необходимое время, чтобы обеспечить контакт со следующей за ней каплей. Конструкция элемента гидравлического сопротивления должна быть такой, чтобы эффективно отводить непрерывную фазу и удерживать каплю дисперсной фазы.

УДК: 628.316.12. Научная специальность: 2.1.4.

Коалесценция как метод очистки сточных вод от нефтепродуктов

Е. В. Алексеев, д.т.н., профессор; **О. В. Букина**, аспирант, кафедра водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Продукты нефтепереработки — одни из самых опасных химических загрязнителей водных ресурсов и мирового океана. Нефтепродукты, попадая в водоём вместе со сточными водами, могут проявляться в разных формах: в виде поверхностной плёнки, эмульсий, растворимых в воде соединений или тяжёлых фракций, оседающих на дно. В настоящее время проблема очистки воды от нефтепродуктов стала особенно острой, что требует разработки новых методов и технологий. Цель исследований рассмотреть явление коалесценции применительно к процессам очистки сточных вод от нефтепродуктов. Определены условия применения метода коалесценции. Установлено, что эффективность процесса зависит от свойств дисперсной фазы нефтепродуктов и материала коалесцирующей среды.

Ключевые слова: продукты нефтепереработки, нефтяные эмульсии, очистка сточных вод, коалесценция, эффективность процесса.

UDC: 628.316.12. Scientific specialty number: 2.1.4.

Coalescence as a method of wastewater purification from oil products

E. V. Alekseev, Doctor of Technical Sciences, Professor; **O. V. Bukina**, postgraduate student, the Department of Water Supply and Sanitation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

Refined petroleum products are among the most dangerous chemical pollutants of water resources and the world ocean. Petroleum products entering the reservoir together with wastewater can manifest themselves in various forms: in the form of a surface film, emulsions, water-soluble compounds or heavy fractions settling to the bottom. Currently, the problem of water purification from petroleum products has become particularly acute, which requires the development of new methods and technologies. The purpose of the research is to consider the phenomenon of coalescence in relation to wastewater treatment processes from petroleum products. The conditions of application of the coalescence method are determined. It is established that the efficiency of the process depends on the properties of the dispersed phase of petroleum products and the material of the coalescing medium.

Key words: oil refining products, oil emulsions, wastewater treatment, coalescence, process efficiency.

К пассивным способам слияния капель можно отнести: создание препятствия внутри канала; локальное увеличение диаметра канала; локальная асимметрия канала в сечении; слияние в месте пересечения каналов или спрямление неоднородного по скорости потока; применение двойного Т-образного инжектора с конусообразным уширением; размещение микроструктур в реакционной камере. Другие пассивные методы основаны на изменении свойств поверхности стенок каналов.

В случае активной коалесценции энергия берётся из внешних источников, таких как электрические или температурные поля. К активным способам, реализующим процесс коалесценции можно отнести: электрокоалесценцию (слияние капель под действием электрического поля переменного тока); коалесценцию капель, индуцируемую диэлектрофорезом (используется неоднородное электрическое поле, основанное на разнице диэлектрических проницаемостей капель и непрерывной фазы); коалесценцию капель, индуцируемую температурой (основана на зависимости вязкости и поверхностного натяжения используемых сред от температуры); коалесценцию капель с помощью пневматических клапанов (в этом методе используются специальные пневматические клапаны, которые регулируют процесс слияния капель) [7].

Проблема обработки эмульсий часто возникает в различных отраслях промышленности, включая пищевую, фармацевтическую и косметическую.

В промышленном технологическом оборудовании смеси жидкостей образуются двумя основными способами:

1. Смешивание фаз. Это процесс, который осуществляется в специально сконструированном оборудовании, например, механических и статических смесителях. В таких устройствах давление используется для повышения поверхностной свободной энергии жидкостей, что приводит к образованию капель. Также смешивание может происходить при сдвиговом течении смеси жидкостей в трубах.

2. Охлаждение насыщенной жидкости. Когда насыщенная жидкость охлаждается ниже точки растворения, растворённая фаза конденсируется, образуя вторую жидкую фазу. Этот процесс часто наблюдается в резервуарах для хранения и в процессах, следующих за конденсаторами или охладителями.

Когда образуются две фазы, смесь обычно имеет форму дисперсии, в которой капли одной фазы распределены в другой, непрерывной фазе. Такая смесь является



термодинамически нестабильной, и это означает, что со временем капли разделятся и образуют две объёмные жидкие фазы. Этот процесс происходит благодаря коалесценции капель, когда они сливаются друг с другом (коалесценция капель) или с объёмной фазой, которая образуется и оседает из смеси (коалесценция на поверхности). Скорость, с которой происходят эти процессы, определяет выбор и конструкцию необходимого оборудования [8].

Движущей силой, способствующей коалесценции, является сила тяжести, которая в данной системе пропорциональна произведению $\Delta\rho g$, где $\Delta\rho$ — разность плотностей двух жидких фаз; g — ускорение свободного падения. Диаметр капель d является критическим параметром, который в сочетании с $\Delta\rho$ и g определяет силу «оседания» капель в дисперсии «жидкость — жидкость». Этот процесс разделения определяется законом Стокса:

$$v_d = \frac{g|\Delta\rho|d^2}{18\mu},$$

где v_d — скорость оседания дисперсной капли; $\Delta\rho$ — разность плотностей двух жидких фаз; d — диаметр капли; μ — динамическая вязкость непрерывной фазы; g — ускорение свободного падения.

На мелкие капли в жидкости дополнительно действует броуновская сила. Поскольку скорость оседания таких капель под действием силы тяжести крайне мала, случайное движение, которое они получают благодаря броуновскому движению, становится сопоставимым со скоростью оседания. Из-за этого капли такого размера не могут оседать и, следовательно, не поддаются гравитационным методам осаждения. Такие дисперсии называются вторичными. Технически они всё ещё остаются термодинамически нестабильными, но кинетика разделения только под действием силы тяжести настолько низка, что для большинства целей они кажутся стабильными. Вторичные дисперсии не могут быть эффективно разделены в гравитационном или первичном сепарационном оборудовании и требуют других технологий для разделения.

Простейшим оборудованием для разделения дисперсий являются горизонтальные или вертикальные гравитационные отстойники. В промышленных целях они традиционно применялись для обработки эмульсий до того, как стало обычным использование коалесцирующих сред.

Концепция проектирования коалесцирующих устройств

При выборе и проектировании коалесцирующего устройства важно оценить свойства эмульсии, которую необходимо обработать. Чем мельче капли, диспергированные в эмульсии, тем она стабильнее, поскольку сила плавучести уменьшается по мере уменьшения диаметра. Способ создания смеси влияет на распределение капель по размерам. Это связано с тем, что с течением времени более мелкие капли укрупняются (или коалесцируют), а крупные капли с большей вероятностью образуют отдельный слой, так что они больше не считаются вовлечёнными. Для количественной оценки эмульсии используется кривая распределения капель по размерам. Эта кривая строится на основе соотношения диаметра капель с их объёмом или массовой долей. Форма этой кривой зависит от способа образования эмульсии и её возраста.

Другой ключевой характеристикой эмульсии и описывающего её распределения является существование максимального диаметра капель. Максимальный стабильный размер капель, который образуется в эмульсии в конкретной ситуации, зависит от механизма их образования, количества энергии, подводимой к смеси, и межфазного натяжения между фазами.

Капли, размер которых превышает максимальный, быстро покидают дисперсную фазу, образуя отдельный жидкий слой, и поэтому не должны рассматриваться как часть эмульсии. Так, эмульсии с содержанием дисперсной фазы $> 5\%$ и размером капель 100–1000 мкм будут иметь слабую стабильность, эмульсии с содержанием дисперсной фазы $< 5\%$ и размером капель 50–400 мкм будут иметь среднюю стабильность, эмульсии с низким поверхностным натяжением и размером капель 10–200 мкм будут иметь высокую стабильность, а эмульсии, образованные при конденсации в больших объёмах, жидкие фазы и поверхностно-активные вещества с размером капель 0,1–25 мкм будут иметь очень высокую стабильность.

Одним из наиболее важных свойств, которое необходимо учитывать при определении размеров и выборе коалесцирующих элементов, является межфазное натяжение. Чем ниже межфазное натяжение,

тем стабильнее эмульсия и тем сложнее разделить жидкости. Часто проблема заключается в присутствии поверхностно-активного вещества, которое снижает межфазное натяжение.

Коалесцирующие устройства для жидкостей используются для ускорения процесса слияния многих капель с образованием меньшего количества капель, но большего диаметра и работают в три этапа: захват капель, объединение собранных капель, гравитационное разделение укрупнённых капель.

Технологический процесс коалесценции, как правило, состоит из трёх следующих ступеней:

1. Предварительное кондиционирование жидкости. Для обеспечения эффективной работы коалесцирующего устройства рекомендуется использовать предварительный фильтр. Этот фильтр минимизирует количество твёрдых частиц, которые могут накапливаться в устройстве, снижая его общий срок службы и эффективность. Предварительный фильтр также способствует увеличению пиковой производительности коалесцирующей системы, что, в свою очередь, снижает общие эксплуатационные расходы.

2. Коалесценция дисперсной фазы. Следующим шагом является объединение, агрегация или коалесценция захваченных капель. Повышение склонности капель к прилипанию к среде увеличивает вероятность того, что последующие капли будут иметь возможность удариться и скоалесцировать с теми, которые уже были удержаны. Является ли коалесцирующая среда гидрофильной (любит воду) или олеофильной (любит масло), зависит от межфазного натяжения твёрдого тела/жидкость между ней и дисперсной фазой. Обычно органическая дисперсная фаза «смачивает» органические (то есть пластиковые или полимерные) среды, так как между ними существует относительно сильное притяжение, в то время как водная дисперсная фаза предпочтительно «смачивает» неорганические среды, такие как металлы или стекло. Это способствует этапу коалесценции, так как капли дольше прилипают к носителю. Коалесценции также способствует плотность носителя: при меньшей пористости образуется больше участков, доступных для коалесценции. В случае пряди и шерсти капиллярные силы также важны для удержания капель.

Когда несколько капель собираются на пластине, проволоке или волокне, они стремятся объединиться, чтобы минимизировать свою межфазную энергию. Предсказать, насколько быстро это произойдёт,

без проведения экспериментальных испытаний очень сложно. Суждения о надлежащем объёме и, следовательно, времени пребывания в коалесцентре основываются на опыте и следующих свойствах:

- для коалесцирующей среды — межфазное натяжение среды и дисперсной фазы, пористость, капиллярность;
- для жидких фаз — непрерывное/дисперсное межфазное натяжение, разница в плотности непрерывной/дисперсной фазы, вязкость непрерывной фазы — поверхностная скорость.

Коалесцирующие устройства для жидкостей используются для ускорения процесса слияния многих капель с образованием меньшего количества капель, но большего диаметра

Коалесцирующие устройства демонстрируют более высокую эффективность в условиях ламинарного потока по нескольким причинам:

- капли удерживаются в потоке вокруг проволоки или волокна, не покидая его;
- при высоких скоростях жидкости капли способны преодолевать силы поверхностного натяжения, что может привести к отрыву капель от коалесцирующей среды и повторному уносу в противоточном потоке (это, в свою очередь, предотвращает подъём или опускание капель в противоточном потоке);
- медленные скорости способствуют увеличению времени пребывания капель в среде, что, в свою очередь, увеличивает вероятность их столкновения с целью и внутрикапельного осаждения.

3. Отделение дисперсной фазы от непрерывной фазы. После образования крупных капель их необходимо отделить. Степень разделения в первую очередь зависит от геометрии ёмкости и её способности использовать преимущества крупных коалесцированных капель, которые были созданы на первом и втором этапах.

Моделирование этапа коалесценции является сложной функцией поверхностного натяжения, влияния силы вязкости, движения капель и динамики размеров капель в дисперсии.

Подбор коалесцирующих элементов зависит от размера капель эмульсий. Для эффективного разделения крупнодисперсных капель (диаметром преимущественно более 30 мкм), легко разделяемых под действием силы тяжести, используются коалесцирующие устройства, представляющие собой систему наклон-

ных параллельных пластин, расстояние между которыми остаётся постоянным. Благодаря этому расстояние, преодолеваемое каплями для оседания, значительно сокращается, что значительно улучшает процесс коалесценции. Наклонное расположение пластин обеспечивает расхождение жидких фаз по диагонали к границе раздела жидкостей. Поток обычно поддерживается в ламинарном режиме для максимальной эффективности сепарации. Угол наклона и расстояние между пластинами выбираются в зависимости от области применения, типа загрязнений в смеси и требуемой степени разделения. Обычно угол наклона составляет 45° или 60°, а расстояние между пластинами варьируется от 15 до 100 мм. Высокая устойчивость к загрязнению делает такие элементы идеальным выбором для модернизации существующих гравитационных отстойников. Это позволяет увеличить производительность и улучшить качество разделения. Такие элементы могут быть выполнены в виде модульной рамы или короба.

В маслоотделителях могут быть использованы элементы, которые изготавливаются из структурированных гофрированных металлических или пластиковых листов.

Применение различных коалесцирующих устройств, использующих сочетание двух материалов с различной поверхностной свободной энергией, например, плетение металлических и пластиковых нитей, позволяют улучшить процесс слияния капель на границах между этими материалами. Металлическая нить обладает высокой поверхностной свободной энергией, а пластиковая — низкой. Это значительно сокращает время отстаивания дисперсий, содержащих капли размером до 30 мкм. Ключевые преимущества — увеличение производительности существующих отстойников, повышение эффективности разделения фаз.

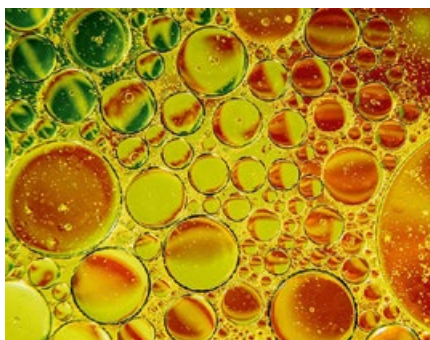
Объёмные коалесцирующие элементы (картриджи). Вторичные дисперсии представляют собой мельчайшие капли, которые не смачивают поверхность и не оседают под действием силы тяжести. Их размеры обычно колеблются от 1 до 30 мкм. Коалесцирующие элементы выполняются в виде картриджей. В такой конфигурации смесь жидкостей поступает внутрь коалесцирующего элемента и движется изнутри наружу. Сопротивление потоку способствует более эффективному процессу коалесценции. Капли, благодаря силам адгезии, прилипают к поверхности волокон в определённых местах, образуя скопления. В результате коалесценции

капли растут. Сила сопротивления вязкости возрастает до тех пор, пока не превысит силу прилипания. В этот момент капли отделяются от волокна и продвигаются дальше в слой волокон, где процесс повторяется. В результате, капли достигают размера, превышающего 60 мкм. Одним из важных преимуществ данного картриджа является то, что его внешний слой выполнен из композитного материала, который способствует ускорению сепарации и предотвращает образование струй и унос. Обычно капли не покидают внешнюю поверхность, а дренаж осуществляется внутри слоя коалесцирующих элементов. Использование волокнистых материалов с высокой удельной поверхностью, расположенных в картридже определённым образом, обеспечивает высокую эффективность коалесценции капель в широком спектре применений.

Потенциальную проблему представляют эмульсии, дисперсная фаза которых состоит из очень стабильных микронных и субмикронных капель (диаметр капель менее 1 мкм). Для таких эмульсий стандартные методы разделения, такие как гравитационная флотация, неприменимы из-за длительного времени пребывания, необходимого для подъёма капель, и обычно требуется добавление химических реагентов для стимулирования коалесценции и разрушения эмульсии.

Мембранная коалесценция — это безреагентный метод разрушения стабильных эмульсий типа «масло в воде». Использование мембран предлагает потенциальное решение проблемы очистки сточных вод от нефтепродуктов с микронными размерами. Пористая матрица мембраны может способствовать коалесценции микронных и более мелких капель масла в более крупные, которые затем можно легко разделить гравитационным способом. Общий процесс коалесценции на мембране регулируется частотой столкновений капель с поверхностью раздела фаз. На это влияет перемещение капель масла из основного раствора на мембрану, а также стекание плёнки между соседними каплями или на границе раздела капель и мембраны, что является основным механизмом, обеспечивающим слияние. В процессах мембранной коалесценции используется перекрёстная микрофилтрация с прерывистым потоком пермеата (проточная или безпроточная) для обработки эмульсий типа «масло в воде» [9].

Проведённые исследования влияния размера пор гидрофобных мембран из тефлона (PTFE) с номинальными средними размерами пор 0,22; 0,45; 1,2 и 5,0 мкм и скорости сдвига в поровом простран-



стве на коалесценцию стабильных микронных и субмикронных капель нефти, присутствующих в эмульсиях «масло в воде», позволили установить существенное влияние на процесс размеров пор, направления потока и скорости сдвига капель нефти [10].

Таким образом, параметрами, влияющими на эффективность пассивной коалесцентной фильтрации, на основании исследований свойств натуральных и синтетических волокон являются [11–13]:

- характеристики волокна, такие как смачиваемость поверхности волокна, на которую влияют состав поверхности (поверхностная энергия) и шероховатость волокон, плотность слоёв, эквивалентный диаметр и средний гидравлический диаметр пор;
- фильтрующий материал;
- характеристика эмульсий;
- технологические параметры процесса.

Заключение

В современных условиях развития общества и состояния окружающей среды актуальным является направление поиска новых решений эффективной очистки сточных вод от нефтепродуктов.

В промышленных аппаратах для очистки жидкостей от нефтепродуктов и масел в эмульгированных формах в настоящее время широко применяется метод коалесценции посредством создания различных по свойствам коалесцирующих сред.

Так как сточные воды, содержащие нефтепродукты, представляют собой эмульсии, очевидно, что метод коалесценции также может работать в составе технологической схемы очистки сточных вод.

Для применения метода коалесценции необходимо соблюдение условий:

- в сточных водах должны присутствовать мелкодисперсные водонефтяные эмульсии в относительно небольших количествах;
- должен быть доступен подходящий материал для создания коалесцирующей среды;
- перед поступлением в коалесцирующую среду поток сточных вод должен быть предварительно очищен;

- создание условий, способствующих движению частиц дисперсной фазы, их взаимодействие, слияние, увеличение размера, всплытие или осаждение капель.

На эффективность процесса коалесцентного разделения оказывают влияние следующие основные факторы:

- 1. Свойства эмульсии** (содержание дисперсной фазы, стабильность, размер капель, концентрация и скорость входящего потока).
- 2. Характеристики материала коалесцирующей среды** [смачиваемость поверхности, которая определяется составом (поверхностной энергией) и шероховатостью волокон, а также плотностью слоёв, эквивалентным диаметром и средним гидравлическим диаметром пор].

Внедрение метода коалесценции может привести к экономически эффективным решениям в сфере очистки сточных вод от нефтепродуктов. ●

1. Alekseev E.V., Bukina O.V. Petroleum products in wastewater and their properties. 19th International Conference Water and Wastewater: Transportation, Treatment, Management "Yakovlev Readings" (YRC-2024). BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 107. 7 p.
2. Анапольский В.Н., Прокопьев К.Л., Олиферук С.В., Романенко А.П. Актуальные проблемы очистки нефтесодержащих сточных вод // Журнал СОК. 2007. №6. С. 28–33.
3. Анапольский В.Н., Олиферук С.В., Романенко А.П. Очистка нефтесодержащих сточных вод // Журнал СОК. 2011. №1. С. 28–31.
4. Воробьёва Е. В. Исследование коллоидных свойств нефтезагрязнённых сточных вод и разработка способов их очистки // Вестник ТГАСУ. 2022. Т. 24. №4. С. 165–176.
5. Алексеев Е.В. Физико-химические процессы очистки сточных вод: монография. — М.: Изд-во АСВ, 2022. 302 с.
6. Singh C.J., Mukhopadhyay S., Rengasamy R.S. Fibrous coalescence filtration in treating oily wastewater: A review. Journal of Industrial Textiles. 2021. Vol. 51. Issue 3. suppl. Pp. 3648S–3682S.
7. Кухтевич И.В., Посмитная Я.С., Белоусов К.И., Букакин А.С., Евстапов А.А. Принципы, технологии и устройства «капельной» микрофлюидики (обзор). Часть 2 // Научное приборостроение. 2015. Т. 25. №3. С. 94–109.
8. Pall coalescers bring down costs through advanced phase separation technology. Pall Corp. April 2009. Port Washington, N.Y., U.S. 16 p.
9. Hong A.C., Fane A.G., Burford R.P. The effects of intermittent permeate flow and crossflow on membrane coalescence of oil-in-water emulsions. Desalination. 2002. Vol. 144. Issues 1–3. Pp. 185–191.
10. Hong A.C., Fane A.G., Burford R.P. Factors affecting membrane coalescence of stable oil-in-water emulsions. Journal of Membrane Science. 2003. Vol. 222. Issues 1–2. Pp. 19–39.
11. Clayfield E.J., Dixon A.G., Foulds A.W., Miller R.J.L. The coalescence of secondary dispersions: I. The effect of wettability and surface energy. Journal of Colloid and Interface Science. 1985. Vol. 104. Issue 2. Pp. 500–511.
12. Bastow T., Durnie W.H., Jefferson A., Pang J. Ultraviolet spectroscopy for the analysis of oil-in-water effluent using isopropanol as co-solvent. Applied Spectroscopy. 1997. Vol. 51. Issue 3. Pp. 318–322.
13. Ji F., Li Ch., Dong X., Li Ya., Wang D. Separation of oil from oily wastewater by sorption and coalescence technique using ethanol grafted polyacrylonitrile. Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 164. Issues 2–3. Pp. 1346–1351.

References — see page 78.

Coalescence as a method of wastewater purification from oil products. Pp. 16–19.

Evgeny V. Alekseev, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Olga V. Bukina**, post-graduate student, the Department of Water Supply and Sanitation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. E.V. Alekseev, O.V. Bukina. Petroleum products in wastewater and their properties. 19th International Conference Water and Wastewater: Transportation, Treatment, Management “Yakovlev Readings” (YRC-2024). BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 107. 7 p.
2. V.N. Anapolsky, K.L. Prokopyev, S.V. Oliferuk, A.P. Romanenko. *Aktualnye problemy ochistki neftesoderzhashchikh stochnykh vod* [Actual problems of oil-containing wastewater treatment]. *Zhurnal Santehnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2007. No. 6. Pp. 28–33. [In Russian]
3. V.N. Anapolsky, S.V. Oliferuk, A.P. Romanenko. *Ochistka neftesoderzhashchikh stochnykh vod* [Oil-containing wastewater treatment]. *Zhurnal Santehnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2011. No. 1. Pp. 28–31. [In Russian]
4. E.V. Vorobeva. *Issledovanie kolloidnykh svoystv neftezagryaznennykh stochnykh vod i razrabotka sposobov ikh ochistki* [Study of colloidal properties of oil-contaminated wastewater and development of methods for their treatment]. *Vestnik TGASU* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]. 2022. Vol. 24. No. 4. Pp. 165–176. [In Russian]
5. E.V. Alekseev. *Fiziko-himicheskie protsessy ochistki stochnykh vod: monografiya* [Physico-chemical processes of wastewater treatment: A monography]. Moscow. Izd-vo ASV [Publishing House of the Association of Construction Universities (“ASV” Publishers)]. 2022. 302 p. [In Russian]
6. C.J. Singh, S. Mukhopadhyay, R.S. Rengasamy. Fibrous coalescence filtration in treating oily wastewater: A review. *Journal of Industrial Textiles*. 2021. Vol. 51. Issue 3_suppl. Pp. 3648S–3682S.
7. I.V. Kukhtevich, Ja.S. Posmitnaya, K.I. Belousov, A.S. Bukatin, A.A. Evstrapov. *Printsipy, tekhnologii i ustrojstva “kapel’noj” mikrofluidiki (obzor). Chast’ 2* [Principles, technologies and devices of “droplet” microfluidics: A review. Part 2]. *Nauchnoe priborostroenie* [“Scientific instrumentation” Magazine]. 2015. Vol. 25. No. 3. Pp. 94–109. [In Russian]
8. Pall coalescers bring down costs through advanced phase separation technology. Pall Corp. April 2009. Port Washington, New York, U.S. 16 p.
9. A.C. Hong, A.G. Fane, R.P. Burford. The effects of intermittent permeate flow and cross-flow on membrane coalescence of oil-in-water emulsions. *Desalination*. 2002. Vol. 144. Issues 1–3. Pp. 185–191.
10. A.C. Hong, A.G. Fane, R.P. Burford. Factors affecting membrane coalescence of stable oil-in-water emulsions. *Journal of Membrane Science*. 2003. Vol. 222. Issues 1–2. Pp. 19–39.
11. E.J. Clayfield, A.G. Dixon, A.W. Foulds, R.J.L. Miller. The coalescence of secondary dispersions: I. The effect of wettability and surface energy. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1985. Vol. 104. Issue 2. Pp. 500–511.
12. T. Bastow, W.H. Durnie, A. Jefferson, J. Pang. Ultraviolet spectroscopy for the analysis of oil-in-water effluent using isopropanol as co-solvent. *Applied Spectroscopy*. 1997. Vol. 51. Issue 3. Pp. 318–322.
13. F. Ji, Ch. Li, X. Dong, Ya. Li, D. Wang. Separation of oil from oily wastewater by sorption and coalescence technique using ethanol grafted polyacrylonitrile. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 164. Issues 2–3. Pp. 1346–1351.