

11. *Rukovodstvo po elektrokontaktному динамическому зондированию грунтов* [Guide to electrocontact dynamic sounding of soils]. Moscow, ZNIIS Ministry of Transport Publ., 1983, 62 p.
12. Seredin V. V., Kachenov V. I., Siteva O. S., Paglazova D. N. Izuchenie zakonomernostey koagulyatsii glinistykh chastits [Study of the coagulation patterns of clay particles]. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2013, no. 10–14, pp. 3189–3193.
13. Sokolovich V. E. *Khimicheskoe zakreplenie gruntov* [Chemical fixing of soil]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 119 p.
14. *Ukreplenie gruntov inektsionnymi metodami v stroitelstve. STO NOSTROY 2.3.18-2011* [Strengthening of soil by injection methods in construction. STO NOSTROY 2.3.18-2011]. Moscow, Bast Publ., 2012, 63 p.
15. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika prirodnykh dispersnykh sistem* [Physico-chemical mechanics of natural disperse systems]. Ed. by E. D. Shchukina, N. V. Pertsova, V. I. Osipova, R. I. Zlochevskaya. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 1985, 266 p.
16. Sheremetov I. M., Serebryakov A. O., Aituriyev A. Kh. Proyavlenie tiksotropnykh svoystv osadochnykh porod pri nizkochastotnoy vibratsii [The manifestation of the thixotropic properties of sedimentary rocks with low-frequency vibration]. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya* [Geology, Geography and Global Energy], 2019, no. 1, pp. 23–32.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Лю Чэн, магистрант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Рцсскийская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, e-mail: 759065476@qq.com

Моторова Ксения Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Рцсскийская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, e-mail: motorova.ks@yandex.ru

В случае разлива сырой нефти и нефтепродуктов в море наличие нефтяных слоёв на поверхности моря не только препятствует нормальному поверхностному обмену морской воды и атмосферы, но также негативно влияет на морскую экологическую среду. Цель работы – разработать специальное устройство для очистки воды от разлива нефтепродуктов на поверхности моря с использованием магнитной жидкости. Рассмотрены примеры аварийных разливов нефтепродуктов и их последствия, проанализированы характеристики традиционных методов по борьбе с разливами. На основе существующих сегодня разработок и очистных устройств с использованием магнитной жидкости представлено новое устройство для отчистки загрязнённой нефтепродуктами морской воды. Предложенное устройство закладывает основу для решения проблем загрязнения моря, вызванных авариями с разливом нефтепродуктов. Ожидается, что исследование и разработка устройства очистки воды от нефтепродуктов, основанного на технологии использования магнитной жидкости, позволят эффективнее защищать морскую экологическую среду.

Ключевые слова: загрязнение вод нефтью и нефтепродуктами, методы очистки, механический метод, физико-химический метод, магнитная жидкость, устройство для очистки загрязнённой нефтепродуктами морской воды

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A DEVICE
FOR PURIFYING WATER FROM PETROLEUM PRODUCTS
USING MAGNETIC FLUID**

Liu Cheng, undergraduate, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: 759065476@qq.com

Motorova Kseniya A., Ph. D. in Technology, Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: motorova.ks@yandex.ru

In the case of crude oil and oil products spills in the sea, the presence of oil layers on the sea surface not only impedes the normal surface exchange of sea water and the atmosphere, but also adversely affects the marine ecological environment. The purpose of this work is to develop a special device for cleaning sea water from oil spills on the sea surface using magnetic fluid. This article discusses examples of accidental spills of oil products and their consequences, also analyzes the characteristics of traditional methods of coping with spills. On the basis of the existing developed cleaning devices using magnetic fluid, a new device for cleaning seawater contaminated with oil products is presented. The proposed device lays the foundation for solving the problems of sea pollution caused by accidents with oil spills. It is expected that the research and development of seawater purification devices, based on the technology of magnetic fluid usage, will help protect the marine ecological environment in a more effective way.

Keywords: water pollution caused by oil products spills, purification methods, mechanical method, physico-chemical method, magnetic fluid, device for purifying seawater polluted with oil products

Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов на море, происходящие во время их добычи и транспортировки, наносят ущерб морской экологии и приводят к существенным убыткам нефтяных компаний. Ярким примером служит авария в Мексиканском заливе, произошедшая 22 апреля 2010 г.: платформа затонула у побережья американского штата Луизиана, что привело к крупнейшему в истории США разливу нефти (рис. 1).

Всего в воды Мексиканского залива вылилось почти 5 млн барр. нефти. С тех пор добывающая компания предпринимала многочисленные, но большей частью безуспешные попытки устранить утечки. В результате разлива нефти было загрязнено более 1100 миль прибрежной зоны. Эта экологическая катастрофа привела к гибели множества морских обитателей, птиц и млекопитающих. С учётом масштабов аварии многие учёные прогнозировали, что значительное количество загрязняющих веществ сохранится в водах залива в течение многих лет [1].

Технологии ликвидации разливов нефти делятся на физические и химические. Основными средствами локализации разливов нефти и нефтепродуктов в акваториях являются боновые заграждения. Главные функции боновых заграждений: предотвращение растекания нефти по водной поверхности, уменьшение концентрации нефти для облегчения цикла её сбора (механического). Термический метод, основанный на выжигании слоя нефти, применяется при достаточной толщине слоя и сразу после загрязнения до образования эмульсий с водой (рис. 2). Данные методы эффективны в большинстве случаев, но у них есть свои недостатки. Например, применение химических реагентов может отрицательно влиять на морское пространство. По этой же причине выжигание нефти на поверхности моря не очень экологически эффективно из-за выделения в атмосферу продуктов сгорания.



Рис. 1. Авария в Мексиканском заливе 22 апреля 2010 г.
(фото: www.globallookpress.com)

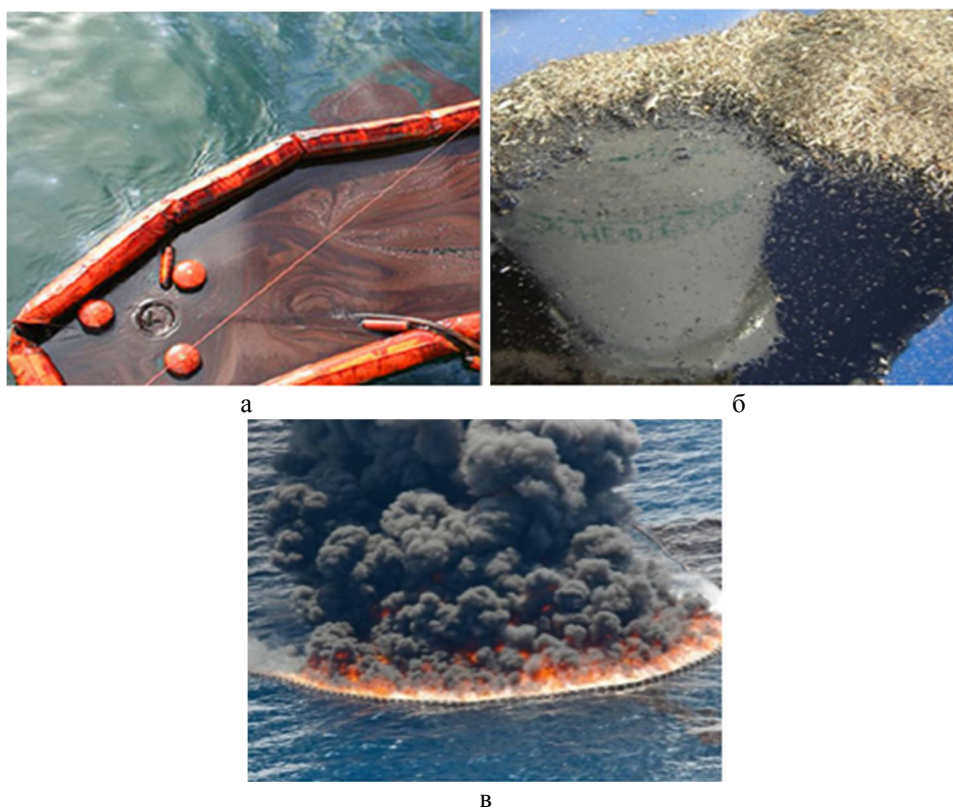


Рис. 2. Традиционные средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов:
а – боновый способ (ограждение нефтяного пятна от распространения по морю);
б – физический способ (использование липофильных маслоабсорбирующих материалов для абсорбции нефти); в – химический способ (использование присадок для сгорания нефтяного разлива)

Мы подробно рассмотрим еще один способ очистки морских вод от разливов нефти – использование магнитной жидкости.

Применение магнитной жидкости основано на том, что высоководосодержащая промысловая продукция в электрическом поле легко разряжается, эффективное разделение нефти и воды происходит под воздействием внешнего магнитного поля за счёт работы принципа электромагнитной индукции. Исследование технологии сверхпроводящей магнитной жидкости для разделения нефти и воды эффективно для решения ряда производственных проблем, вызванных высокой обводненностью нефтяных месторождений, и имеет

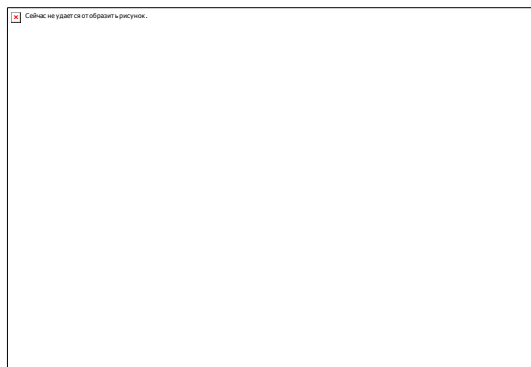


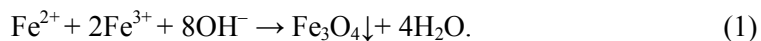
Рис. 3. Нефть с магнитной жидкостью
(фото: Steve Jurvetson)

большое значение для обеспечения стабильной добычи и охраны окружающей среды при разработке нефтяных месторождений. Применение технологии магнитной жидкости имеет актуальное значение. Например, может осуществляться очистка водных поверхностей от нефтяных разливов при экологических катастрофах [5]. На пятно нефтепродукта разбрызгивается магнитная жидкость. Смешиваясь с ней, нефтепродукт приобретает магнитные свойства и собирается

с поверхности воды магнитным устройством, втягиваясь в него под действием магнитных сил (рис. 3).

Магнитные жидкости представляют собой коллоидные дисперсии магнитных материалов с частицами размером от 5 нм до 10 мкм, стабилизированные в полярной и неполярной средах с помощью поверхностно-активных веществ или полимеров [3]. По своим физическим свойствам магнитная жидкость обладает хорошей текучестью в сочетании с магнитными свойствами. Сегодня магнитная жидкость получила широкое применение в разных сферах. Исходя из её уникальных свойств, учёные из Австралийской научно-промышленной исследовательской организации (CSIRO) предполагают использовать её в нефтяной промышленности.

Процесс получения магнитной жидкости в лабораторных условиях представлен в формуле 1. Сначала получают ферромагнитные частицы (Fe_3O_4) на основе показанной формулы. Далее смешивают магнитный порошок с сырой нефтью при нагревании, при этом добавляют олеиновую кислоту для получения стабилизированной магнитной жидкости [5].

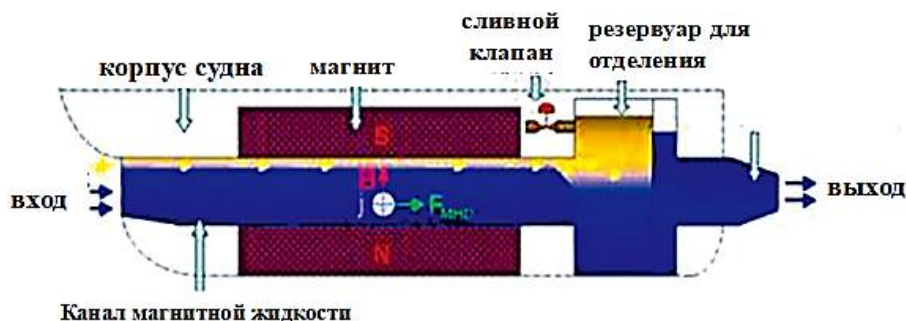


Инженеры Массачусетского технологического университета (MIT) предложили ликвидировать последствия морских разливов нефти при помощи специальных магнитных частиц [2]. Принцип, предложенный авторами, заключается в том, чтобы добавлять в смесь нефти и воды ферромагнитные частицы, покрытые водоотталкивающей оболочкой. Такие частицы будут растворяться в нефти и превращать её в магнитную жидкость, которую можно удалить при помощи магнитного поля. Для отделения нефти с частицами

инженеры разработали стационарные магниты, расположенные в особом порядке. Нефть собирается на поверхности таких магнитов и собирается в особую емкость. Затем магнитные частицы извлекаются из нефти и используются повторно. По задумке исследователей, весь процесс будет происходить на борту специальных судов. Они будут накапливать собранную нефть, которую затем можно использовать. Это должно, по словам разработчиков, создать дополнительный экономический стимул для проведения очистных работ.

Магнитожидкостный способ очистки заключается в предварительном омагничивании нефти путём введения в неё магнитной жидкости и в последующем сборе «магнитной» нефти посредством специального магнитосборника.

Для реализации отделения нефти от воды с помощью магнитной жидкости необходимо создать специальное устройство. На рисунке 4 показан один вид таких устройств по разработке компании “China Shandong Huate Magnetolectric Technology Co., Ltd”. Данное устройство может применяться на морских буровых платформах и терминалах для сбора разлившейся нефти на поверхности моря. Это устройство имеет достаточно простую конструкцию, которая позволяет эффективно обрабатывать загрязнённую морскую воду. Под действием электрического и магнитного поля проводящая морская вода подвергается воздействию электромагнитной силы, и нефтяной слой с вмешанной магнитной жидкостью приводится в параллельное движение без перемешивания с водой [4]. Коробка отделения расположена на выходе системы извлечения. Воздействие давления заставляет нефтяной слой непрерывно накапливаться в верхней части, и чистая морская вода сбрасывается из выхода, тем самым осуществляя отделение и извлечение нефтесодержащей морской воды. Обработанная морская вода соответствует стандарту класса IV без явной масляной плёнки.



Канал магнитной жидкости

Рис. 4. Устройство для очистки воды от разлитой нефти, разработанное компанией “China Shandong Huate Magnetolectric Technology Co., Ltd”

Устройство на рисунке 5 в общем не отличается по структуре от предыдущего. Единственная разница заключается в том, что после ввода загрязнённой воды устанавливается роликовый скиммер, который изготовлен из специальной коррозионностойкой стали и специально разработанных полимерных материалов. Он служит для того, чтобы как можно больше нефти собиралось и прилипало к нему, и это осуществляется таким образом, что морская вода входит в него через очень узкий канал и имеет полный контакт с ним при входе в устройство [6].

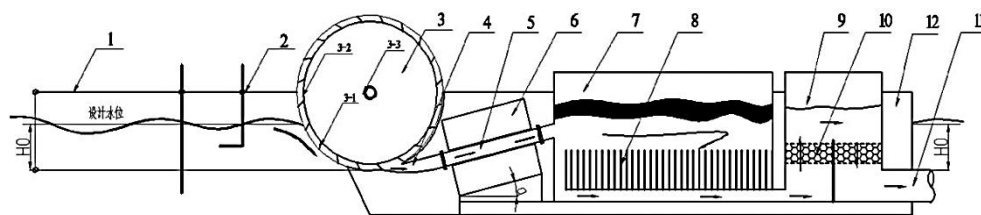


Рис. 5. Устройство для очистки воды от нефтепродуктов с использованием магнитной жидкости: 1 – колонна отводных затворов; 2 – колонна для мусорной сетки; 3 – скиммер; 4 – сопло; 5 – канал для магнитной жидкости; 6 – магнит; 7 – масло-водоразделительная коробка; 8 – маслостойкая гребенчатая пластина полукруглого типа; 9 – открытая фильтровальная коробка; 10 – фильтрующий слой; 11 – сопло; 12 – корпус

Применение нами роликового скиммера вдохновило на собственную работу по созданию другого устройства для отделения нефти от воды. На рисунке 6 представлена модель, спроектированная совместно с коллегами. Как видно, в данном устройстве есть ролик, который извлекает нефть с магнитной жидкостью из морской воды. В нём расположены несколько пластинчатых сильных магнитов.

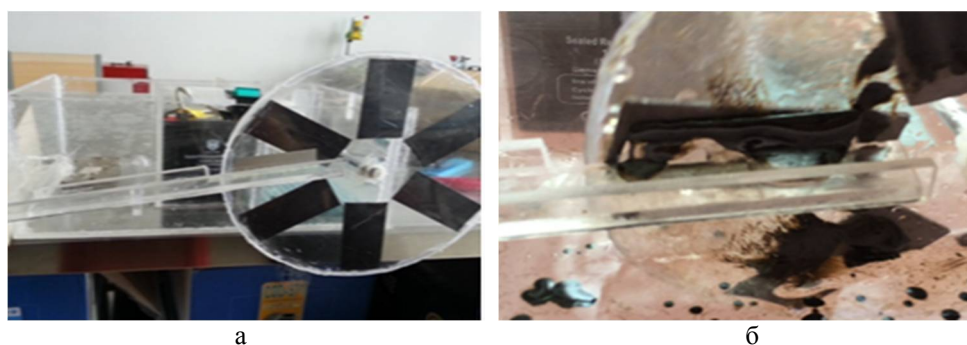


Рис. 6. Устройство для очистки воды от нефтепродуктов с использованием магнитной жидкости: а – модель устройства; б – имитационное испытание работы устройства

Принцип работы скиммера-ролика заключается в том, что вертикально расположенный плоский диск вращается вокруг горизонтальной оси, а часть диска погружается в воду, на поверхности которой плавает нефтяная пленка. По мере вращения диска нефть прилипает к его поверхности под воздействием магнитной силы, а затем сдирается скребком и течёт по специальному каналу в сборную коробку. В практике типичный диаметр диска скиммера составляет 280 ~ 800 мм, в зависимости от различных предназначений. Большие скиммеры в основном используются для ликвидации разливов нефти в открытом море, а меньшие типы используются в портах и внутренних водах.

Выводы:

1. Благодаря уникальным текучим и магнитным свойствам, магнитная жидкость вполне пригодна для очистки морской воды от разлившейся нефти. То есть такая идея достаточно состоятельная и имеет теоретическую обоснованность.

2. Данный метод достаточно выгоден с экономической точки зрения: во-первых, магнитную жидкость можно получить из отходов производства, что существенно сокращает себестоимость данного метода; во-вторых, с помощью специального устройства значительно сокращаются затраты на рабочую силу; в-третьих, по сравнению с традиционными подходами данный метод оказывается более экологически благоприятным.

3. Несмотря на то, что метод эффективен и перспективен, нам ещё предстоит усовершенствовать его в дальнейшем, чтобы его было возможно внедрить в жизнь во всём мире.

Список литературы

1. Analysis of the Deepwater Horizon Accident in Relation to Arctic Waters C. A. Willemse and P. H. A. J. M. van Gelder Delft University of Technology Delft, The Netherlands // *The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. 19-24 June 2011, Maui, Hawaii, USA.
2. MIT Develop Simple, Fast, Efficient Method of Cleaning Up Oil Spills / Joao Peixe. – Режим доступа: <https://oilprice.com/Latest-Energy-News/World-News/MIT-Develop-Simple-Fast-Efficient-Method-of-Cleaning-Up-Oil-Spills.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (Дата обращения: 13.05.2019).
3. Сенатская, И. И. Магнитная жидкость / И. И. Сенатская // *Наука и жизнь*. – 2002. – № 11. – С. 2–7.
4. Копылова, О. С. Особенности движения капли магнитной жидкости в магнитном и электрическом полях / О. С. Копылова. – Ставрополь, 2006. – 137 с.
5. Вэньци, Ван. Текущее состояние и прогресс в области технологии магнитно-жидкостной сепарации нефти и воды / Ван Вэньци, Зуо Кай, Чэн Ран, Тянь Цзиньву // *Химическая промышленность Шаньдуна*. – 2018. – № 17. – С. 56–59.
6. Линчжи, Чжао. Устройство для извлечения и отделения тонкой нефтяной пленки на поверхности моря магнитной жидкостью / Чжао Линчжи, Пэн Айву // *Институт электротехники Академии наук Китая*. – 2014. – № 10. – С. 60–70.

References

1. Analysis of the Deepwater Horizon Accident in Relation to Arctic Waters C. A. Willemse, and P. H. A. J. M. van Gelder Delft University of Technology Delft, The Netherlands. *The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. 19–24 June 2011, Maui, Hawaii, USA.
2. Joao Peixe. MIT Develop Simple, Fast, Efficient Method of Cleaning Up Oil Spills. Available at: <https://oilprice.com/Latest-Energy-News/World-News/MIT-Develop-Simple-Fast-Efficient-Method-of-Cleaning-Up-Oil-Spills.html> (Accessed: 13.05.2019).
3. Senatskaya I. I. Magnitnaya zhidkost [Magnetic fluid]. *Nauka i zhizn* [Science and life], 2002, no. 11, pp. 2–7.
4. Kopylova O. S. *Osobennosti dvizheniya kapli magnitnoy zhidkosti v magnitnom i elektricheskom polyakh* [Features of the movement of a drop of magnetic fluid in the magnetic and electric fields]. Stavropol, 2006, 137 p.
5. Wang W., Zuo K., Cheng R., Tian J. Current status and progress in the field of technology of magnetic liquid separation of oil and water. *Shandong Chemical Industry*, 2018, no. 17, pp. 56–59.
6. Zhao L., Peng I. A device for extracting and separating a thin oil film on the sea surface with a magnetic fluid. *Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences*, 2014, no. 10, pp. 60–70.