

КАВИТАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЕГАЗАЦИИ ВОДЫ ДЛЯ АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ

БАК1.4.2.
УДК 608.4, 504.423

Сапрыкин О.А., к.т.н., oleg.sapr@gmail.com, **Сафронов В.В.**, к.т.н., vik.saf@yandex.ru, **Зевакин Е.А.**, к.т.н., ezevakin.zev@yandex.ru, Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН

В прикладных исследованиях современной аналитической химии большой круг вопросов связан с изучением состава и концентрации растворенных в жидкости (чаще всего в воде) газов. От результатов таких исследований зависит оценка экологического благополучия районов Земли, акваторий Мирового океана, содержания и масштабов газообмена между литосферой, гидросферой и атмосферой, перспектив обнаружения природных месторождений на морском дне, результатов химических заражений и т.д. Существующие отечественные газоаналитические датчики либо не ориентированы на применение под водой, либо их глубины применения не превосходят пяти метров. Это очень осложняет процедуры комплексных исследований в широком диапазоне глубин. Приходится применять трудоемкие технологии с использованием батометров – с физическим отбором проб воды на глубинах громоздкими связками дистанционно запираемых контейнеров. Зарубежные подводные датчики газов существуют и для больших глубин, однако они рассчитаны, как правило, на один выбранный газ (например, на кислород) и имеют высокую стоимость. В ГЕОХИ имени В.И.Вернадского РАН были разработаны прототипы глубоководных анализаторов для широкого спектра газов на различных глубинах.

Одна из современных проблем химической аналитики – проведение газового анализа растворенных в жидкости (например, в морской воде) газов. Это направление исследований имеет большое значение для экологии (обеспечения биологической безопасности, безопасности человека) и фундаментальной науки [1, 2]. Особенно сложная задача – изучение газового состава на морских глубинах.

Проблема может решаться без дегазации или с дегазацией (отбором газовой фазы) [3, 4]. Первый вариант без дегазации в подавляющем большинстве случаев подразумевает узко специализированное исследование, направленное на изучение концентрации конкретного газа. Второй способ является универсальным, он позволяет определить качественный и количественный состав смеси растворенных газов.

Несмотря на довольно большой перечень методов газового анализа [3, 4], лишь немногие из них можно использовать для подводных исследований – это электрохимические и оптические сенсоры [5, 6, 7]. По оценке компании Yole Development (Франция) [8], в 2018 г. наибольшая доля (44%) на рынке газовых сенсоров (датчиков) представлена электрохимическими датчиками, около 15% приходится на оптические датчики и 38% рынка составляют полупроводниковые (металлооксидные) сенсоры. Прочие типы охватывают не более 3% рынка.

Все датчики обладают отличительными свойствами. Оптические датчики зависят от ударов, вибраций, а также от прозрачности воды, которая заметно различается в различных водоемах, морях, океанах. Электрохимические – работают по принципу измерения тока, возникающего на рабочем электроде в результате окислительно-восстановительной реакции анализируемого газа. Отличаясь высокими эксплуатационными характеристиками (точность, компактность, относительная дешевизна), эти датчики могут реагировать на сопутствующие газы, что приводит к изменению вырабатываемого сигнала и искажению информации. Для некоторых типов электрохимических датчиков их чувствительность пропорциональна атмосферному давлению, на морской глубине давление возрастает на одну атмосферу на каждые 10 м погружения. После проведения измерений электрохимический датчик может не восстанавливаться полностью из-за частичного расходования его компонентов (уменьшение электролита в электрохимических элементах, деградация электродов) [9].

Для использования остальных методов требуется выделение газа, которое отличается большими сложностями при проведении исследования на глубине без доставки образцов газосодержащей воды на поверхность [7].

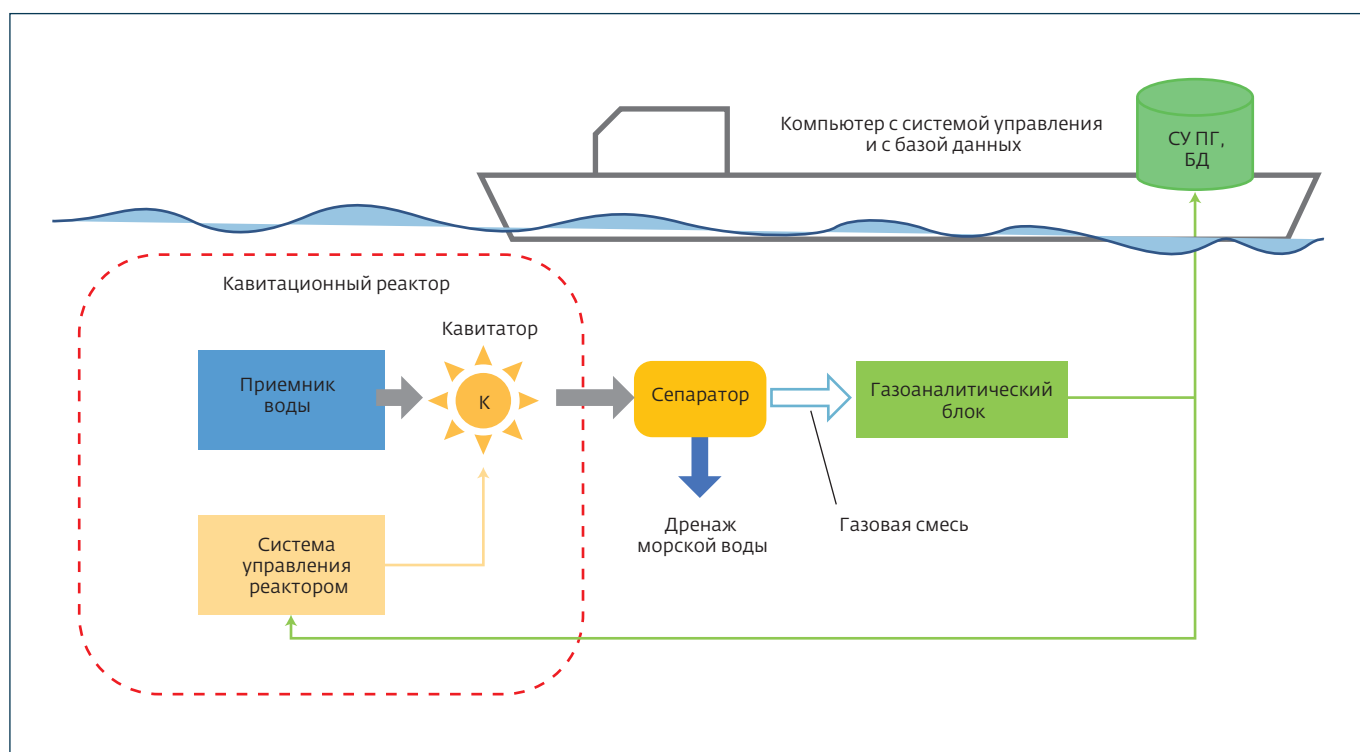


Рис.1. Общая схема установки для прямого измерения состава растворенной смеси газов в воде

Один из эффективных способов выделения газов из жидкости – кавитация. В полости кавитационных камер вовлекаются все растворенные в ней газы, независимо от степени диссоциации и температуры жидкости. Это подтверждают исследования ряда отечественных ученых [10, 11], а также эксперименты, проведенные на установках компании ООО "РР Технологии" (г. Москва).

ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для надежной кавитации на глубине требуются высокие значения скорости потока воды – начиная от значений $u = 25-30$ м/с в приповерхностных акваториях [12] и более 500 м/с на глубинах порядка двух километров. Такие скорости сложно обеспечить с помощью обычных импеллеров, насосов, нагнетателей, требуется устройство особой конструкции. Наиболее мощный и эффективный ускоритель – магнитное поле, оно было использовано как техническое решение разработанного устройства, в котором вода смешивается с ферромагнитной жидкостью, обладающей высокой магнитной проницаемостью. Смесь ускоряется в тороидальной камере (реакторе) переменного сечения, где организован каскад диффузоров и конфузоров, обеспечивающий кавитацию в потоке.

В ГЕОХИ им. В.И.Вернадского РАН создан прототип устройства для прямого измерения состава растворен-

ной смеси газов в воде, состоящий из кавитационного реактора, системы управления кавитационным реактором, сепаратора, газоаналитического блока и компьютерной системы управления подводным газоанализатором (СУ ПГ) с сохранением результатов измерений (рис.1). Для работы установки необходим глубоководный электрический кабель с жилами питания прибора (до примерно 2,5 кВт мощности) и жилами межкомпьютерного обмена данными, интерфейс стандарта RS-485 длиной до 4 км. Это максимальная глубина погружения установки в текущем исполнении. При необходимости кабель и интерфейс могут быть доработаны для больших глубин.

Общая схема разработанного струйно-циклического кавитатора приведена на рис.2. Принцип его работы заключается в управлении скоростью движения воды по замкнутой "круговой" траектории с помощью бегущего магнитного поля. Морская вода обладает слабыми магнитными свойствами и относится к парамагнетикам. Растворенные газы тоже относятся к диамагнетикам и парамагнетикам, поэтому магнитное поле на них практически не действует. Необходима активная среда – посредник между магнитным полем и морской водой, в качестве которой была выбрана магнитная жидкость, представляющая собой несмачиваемую водой смесь технического масла, мелкодис-

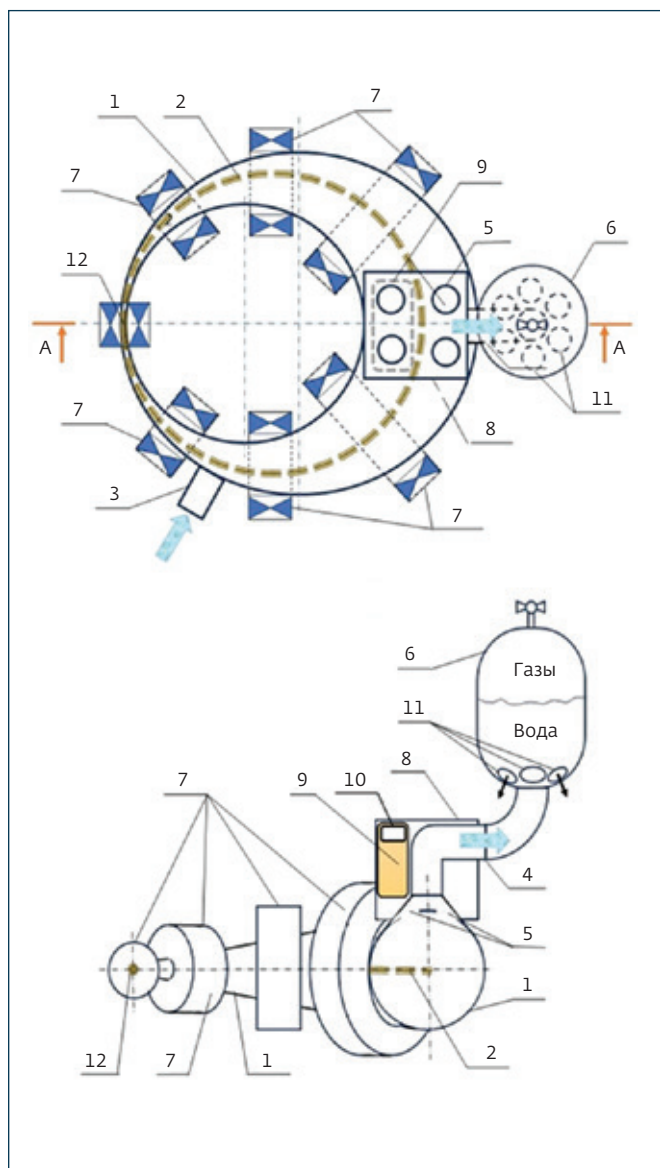


Рис.2. Струйный циклический кавитатор: 1 – корпус реактора, 2 – ферромагнитная жидкость, показана круговая траектория движения под воздействием вращающегося магнитного поля; 3 – входной патрубок для поступления воды; 4 – выходной патрубок для газовой смеси; 5 – выходные отверстия в корпусе реактора; 6 – сепаратор; 7 – обмотки фазных электромагнитов, создающих вращающееся магнитное поле; 8 – электронный коммутатор; 9 – тактовый генератор импульсов; 10 – управляющий микроконтроллер; 11 – дренажные отверстия; 12 – критическое сечение реактора

персного ферритового порошка (ферритовой керамической пыли с высокой магнитной проницаемостью $\mu > 10000$) и антикоагулянта (обычно касторовое либо машинное масло). Она взаимодействует с магнитным

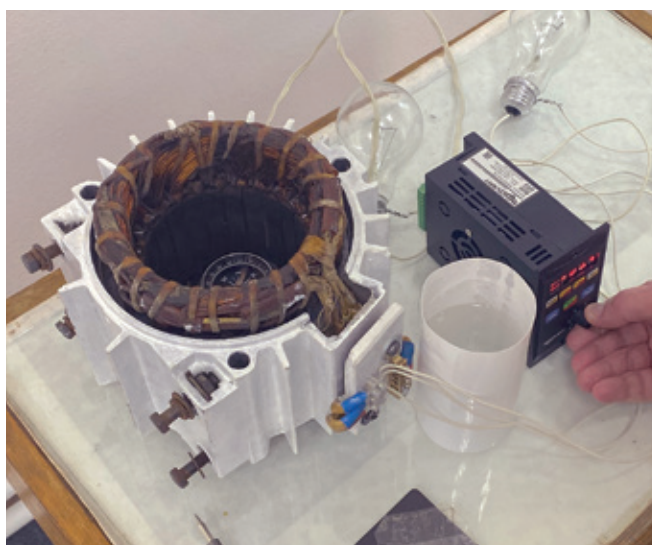


Рис.3. Прототип устройства газоотборного кавитационного блока

полем, но при этом остается химически нейтральной и не смешивается с водой.

Реактор представляет собой замкнутую тороидальную пустотелую камеру, состоящую из двух встречно-последовательно соединенных сопел Лавалю, развернутых навстречу друг к другу. На внешней поверхности по кругу размещены семь фазных обмоток электромагнитов, предназначенных для создания бегущего магнитного поля внутри реактора. Ферромагнитная жидкость заливается в камеру реактора и удерживается там магнитным полем без потерь на время работы. Импульсные токи в катушках формируются генератором импульсов тока по специальной временной диаграмме в программе микроконтроллера.

После включения начинает работать микроконтроллер 10, программно выполняя формирование временной диаграммы и осуществляя управление электронным коммутатором 8, который переключает в заданной последовательности фазные обмотки электромагнитов. Формируемое ими бегущее магнитное поле внутри камеры реактора воздействует на ферромагнитную жидкость, увлекая ее в круговое движение. На воду бегущее магнитное поле практически не действует, но поток ферромагнитной жидкости механически, как поршень, заставляет ее двигаться внутри реактора в общем потоке, самостоятельно всасываясь через входной патрубок 3. Всасывание воды через входной патрубок 3 происходит благодаря околосвуковой скорости в критическом сечении 12 камеры 1 в соответствии с законом Бернулли, а выделение и выброс газожидкостной

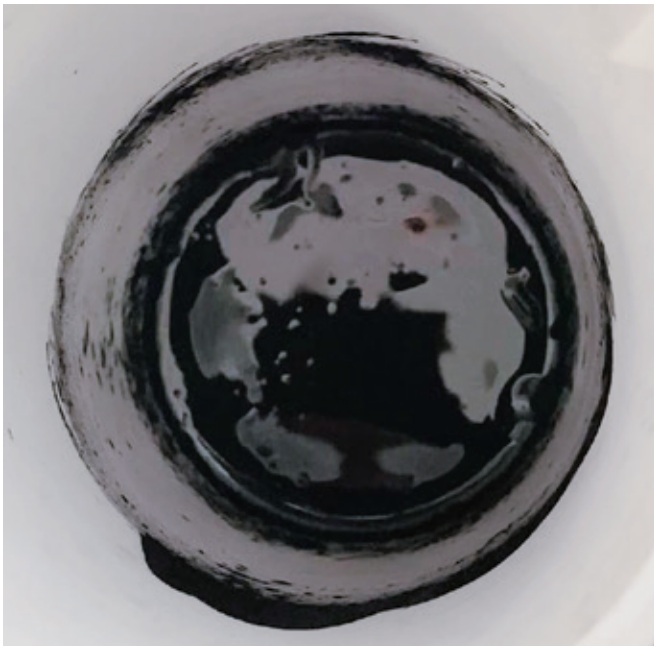


Рис.4. Ускорение ферромагнитной жидкости и воды в емкости внутри статора асинхронного электродвигателя

смеси происходит в зоне с максимальной площадью сечения камеры через выходные отверстия 1 и патрубок 4 за счет избыточного давления паров, возникающего из-за энергии кавитации. Далее газо-жидкостная смесь направляется в сепаратор 6, где газ отделяется от воды.

Специальный нагнетательный насос в устройстве не нужен – морская вода всасывается внутрь и выталкивается наружу благодаря только гидродинамическому эффекту.

Магнитная жидкость в реакторе, ускоряемая бегущим магнитным полем, может разгонять воду до сверхзвуковых скоростей (соответствует угловой скорости порядка 5000 об/мин и выше). На таких скоростях кавитация будет обеспечена практически на любых глубинах Мирового океана.

Для подтверждения возможности эффективного ускорения водяного потока при использовании ферромагнитной жидкости и управляемых магнитных катушек был собран прототип устройства (рис.3). Статор асинхронного электродвигателя мощностью 2 кВт с удаленным ротором подключен к усилителю мощности. Подключение нагрузки (ротора) компенсируется подключением трех ламп мощностью по 200 кВт каждая. В полости статора, где находится ротор, помещается емкость с ферромагнитной жидкостью и водой. Питание двигателя трехфазное, в отличие от семи фаз в предлагаемой установке, однако принцип ускорения

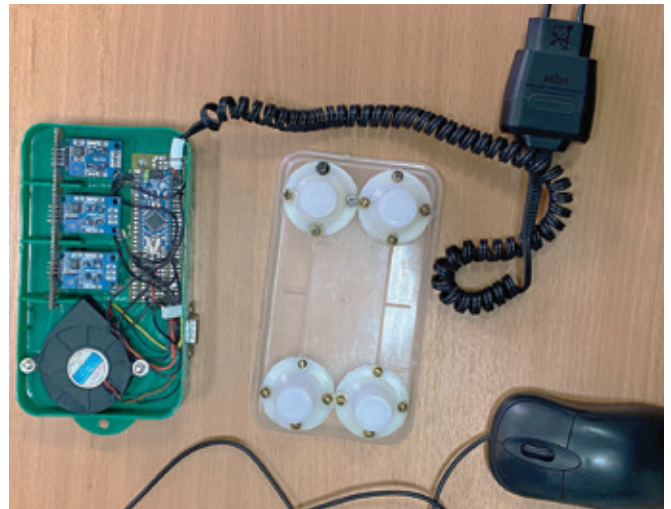


Рис.5. Газоаналитический блок

магнитным потоком реализуется и в этом случае, хотя и с менее динамичным разгоном.

Скорость движения магнитной жидкости в магнитном поле линейно зависит от частоты переключения магнитных катушек (h) и радиуса движения (R , в данном случае это радиус кавитационной камеры).

Частота переключения катушек – управляемая на усилителе мощности величина, испытания проводились при частотах $h = 5$ и 7 Гц. Одновременно велась видеосъемка наблюдаемых процессов в емкости с водой и ферромагнитной жидкости. Было зафиксировано ускорение ферромагнитной жидкости и воды до скоростей порядка $1,5$ м/с (рис.4), что полностью соответствует расчетным величинам. На фотографии черная ферромагнитная жидкость на стенках емкости практически смыта (не просматривается на стенках стакана) за счет высокой скорости ее движения.

В полноразмерной установке предполагается использование рабочей частоты 83 Гц, что соответствует разгону жидкости до скоростей более 500 м/с и обеспечивает условия для кавитации на всем диапазоне глубин, например, Черного моря. Разработанный механизм ускорения потока воды при участии ферромагнитной жидкости не требует наличия насосов-нагнетателей, импеллеров и т.д.

Кроме кавитационного реактора был специально разработан газоаналитический блок и соответствующее программное обеспечение для персонального компьютера (ноутбука). В основе газоаналитического блока использованы полупроводниковые (металлооксидные) сенсоры. Испытания газоаналитического блока, оснащенного тремя типами сенсо-

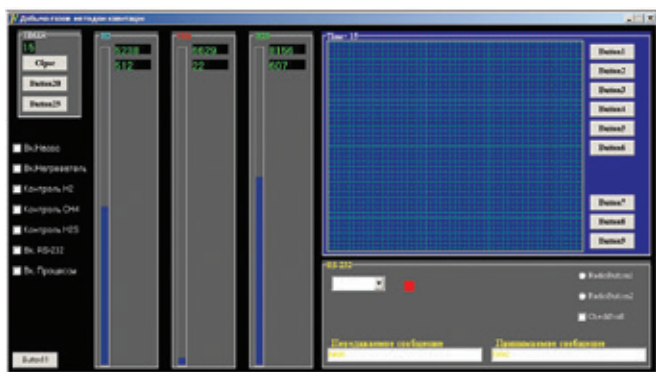


Рис.6. Интерфейс работающего газоаналитического блока

ров – на водород, метан и сероводород, показали его полную работоспособность в режиме реального времени (in situ) на экране (рис.5, 6). Сенсоры позволяют обеспечить чувствительность прибора: по водороду – от 8,4 мг/м³; по метану – от 66,54 мг/м³; по сероводороду – от 1,43 мг/м³.

По результатам работы получен патент на изобретение [13] и проводится подготовка к функциональным испытаниям прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алекин О.А., Ляхин Ю.И.** Химия океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 344 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/27388>
2. **Шнюков Е.Ф., Топачевский И.В.** Газовые сипы Мирового океана // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2019. Т. 15. № 2. С. 3–15. DOI: 10.15407/gpi-mo2019.02.003.
3. **Хаханина Т.И.** и др. Химия окружающей среды. М.: Высшее образование. 2009. 129 с. С. 27. URL: https://studme.org/286850/matematika_himiya_fizik/rastvorennnye_gazy#351
4. **Кулаков М.В.** Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. 424 с. URL: <https://reallib.org/reader?file=544767>
5. Датчики растворенного газа Наутилус. URL: <https://datchiki.com/news/datchiki-rastvorennogo-gaza-v-vode-nautilus/?ysclid=m5mshbjtc2043824#kupit-datchiki-rastvorennogo-gaza-v-vode>
6. Датчик растворенного кислорода SBE-43 (США, Sea Bird Scientific). URL: <https://www.seabird.com/oxygen-sensors/sbe-43-dissolved-oxygen-sensor/family-cms.block?productCategoryId=54627869932>
7. Датчик измерения растворенного кислорода AQ-SMART-DO1. URL: <https://аква-лаб.рф/promyshlennye-pribory/3431-aq-smart-do1?ysclid=m5tm8zrued389278451>

Разработанный новый тип прибора обладает рядом важных преимуществ – возможностью дистанционного отбора газов на больших глубинах Мирового океана с одновременным определением нескольких газов с высокой чувствительностью, отсутствием движущихся механизмов, вследствие чего повышением надежности и долговечности. Кроме того, за счет циклического режима работы устройства с прокачиванием проточной воды газы можно накапливать – либо для точных замеров концентрации редких газов (например, радона), либо для последующего использования на борту судна-носителя установки, например, в качестве рабочего тела для двигателей или для других целей. В настоящее время ведется поиск промышленных партнеров для развития данных технологических исследований и проведения испытаний в Мировом океане.

Авторы выражают глубокую благодарность ООО "РР Технологии" за возможность работы на оборудовании компании и за полученные консультации.

Работа выполнена Институтом геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН в рамках госзадания № FMMZ-2024-0053.

8. **Лагутин А.С., Васильев А.А.** Твердотельные газовые сенсоры // Журнал аналитической химии. 2022. № 2. С. 100–116.
9. <https://www.souz-pribor.ru/articles/kakie-byvayut-sensory-u-gazoanalizatorov>
10. **Курочкин А.К., Мотин Н.В., Алексеев С.З., Курочкин А.А.** Кавитационная конверсия мазута газовых конденсатов в дизельнобензиновые дистилляты // Сфера: нефть и газ. 2018. Т. 64. № 2. С. 64–74.
11. **Васильева Н.Б.** Очистка сточных вод с использованием гидродинамической кавитации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2008. 19 с. URL: https://new-dissert.ru/_avtoreferats/01004258140.pdf
12. **Ысламидинов А.Ы., Абдалиев У.К., Ташполотов Ы.** Образование кавитационных пузырьков при прохождении водяной струи через сопло Лавала // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 7–5. С. 776–778.
13. **Сапрыкин О.А., Сафронов В.В.** Устройство выделения растворенных газов, преимущественно из морской воды. Патент № 2838321, гос. Регистрация в Гос. Рее-стре изобретений РФ от 14.04.2025, приоритет изобретения от 06.05.2024.



ТОПЛИВА И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Технологии, эксплуатационные свойства и методы испытаний. Справочник

Джордж Е. Тоттен, Раджеш Дж. Шах, Дэвид Р. Форестер (ред.)

Перевод с англ. яз. (*Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing (MNL37-2nd)*)

под ред. Е. А. Новикова

2024 г., 1840 с., 2 тома, цв. ил., табл., тв. пер., 210×290 мм.

Цена — 24 500 руб.

В обновленном международном справочнике отражены результаты научно-технических достижений за последние 15 лет в области технологий, определения свойств, эксплуатационных характеристик, а также методов испытаний топлив и смазочных материалов на основе оригинальных публикаций, патентов и внедренных стандартов.

Рассмотрены все основные нефтяные жидкости и продукты: топлива, нефтяные парафины, нефтяной газ; базовые, моторные, турбинные и компрессорные масла; пластичные смазки, присадки, жидкости для теплопереноса и металлообработки. Уделено внимание «не-нефтяным» материалам — синтетическим смазкам, растительным маслам и ионным жидкостям, а также их использованию в качестве альтернативы нефтяным. Отдельные разделы посвящены методам определения свойств и эксплуатационных характеристик материалов с использованием современных аналитических методов: хроматографии, ИК-, масс- и ЯМР-спектроскопии; экологическим характеристикам топлив и смазок; основам теории смазывания. Обширный справочный иллюстративный материал имеет практическую направленность, качественно дополняет описание и закрепляет выводы авторов.

По широте охвата, глубине и подробному изложению рассматриваемых вопросов справочник не имеет аналогов в России и послужит надежным современным источником академических и практических знаний для специалистов, разработчиков, исследователей в области нефтепереработки, нефтехимии и в смежных областях.

Заказать справочник можно на нашем сайте: <https://www.epcprof.ru/>

или по электронной почте: info@epcprof.ru

Доставка осуществляется компанией СДЕК и рассчитывается отдельно.

Телефон издательства: +7 (812) 313-54-14

