

СУПЕРГИДРОФОБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ: ОБЗОР

М. Нажипкызы^{1,2*}, З. А. Мансуров^{1,2}

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай Батыра 172, Алматы, Казахстан

²КазНУ им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби 71, Алматы, Казахстан

Дата поступления:
2 ноября 2020

Принято на печать:
7 декабря 2020

Доступно онлайн:
28 декабря 2020

АННОТАЦИЯ

В этой статье описаны последние достижения в области создания супергидрофобных поверхностей. Основная идея получения супергидрофобных поверхностей заключается в создании неровностей микронаноповерхности с изменением химического состава для увеличения поверхностного натяжения воды на контактной поверхности. Предлагаемый обзор состоит из восьми разделов, такие как: получение гидрофобных наноструктур в пламени; получение гидрофобного песка; антиобледенение; прозрачные и антибликовые супергидрофобные покрытия; снижение гидравлического сопротивления; применение в батарейках и в топливных элементах; супергидрофобная диатомитовая земля; супергидрофобный текстиль. Растущий интерес к самоочищающимся покрытиям объясняется их низкой стоимостью обслуживания, высокой долговечностью и огромным потенциалом применения. Такие покрытия, например, могут обеспечивать полезную стойкость к засорению, обледенению, смазыванию, коррозии и обладают способностью отделять воду от масла. Супергидрофобные поверхности привлекают внимание ученых и инженеров из-за их исключительной водоотталкивающей способности. Следовательно, разработка и создание самоочищающихся материалов представляет значительный интерес для исследователей во всем мире.

Ключевые слова: супергидрофобная поверхность, супергидрофобный текстиль, водоотталкивание, сажа.

Введение

Основные механизмы смачивания на структурированных твердых поверхностях изучались десятилетиями. В 1936 году Венцель [1] пришел к выводу, что смачиваемость твердой подложки должна быть прямо пропорциональна физическому состоянию (шероховатости) смачиваемой поверхности. В 1944 году в фундаментальной работе Кэсси и Бакстера была представлена связь между смачиваемостью гидрофобных поверхностей и шероховатостью и пористостью поверхности, в частности, сравнение тех, которые встречаются в природе, с искусственными или ненатуральными [2]. Кэсси и Бакстер предположили, что “водоотталкивающая способность утки обусловлена структурой ее перьев”, а

не природным водоотталкивающим агентом или химией поверхности (например, природным маслом и т.д.). Например, сегодня мы знаем, что ультрагидрофобность, проявляемая листом лотоса, обусловлена наличием на его поверхности нано- и микромасштабных архитектур, которые способствуют шероховатости, тем самым усиливая его гидрофобность [3]. Были предложены два основных типа гидрофобности, а следовательно, и две модели [4]. Первая модель относится к гидрофобной поверхности, в которой капля воды смачивает поверхность и закрепляется. Эта модель известна как равновесное состояние Венцеля и возникает, когда микроскопические зазоры поверхностной структуры достаточно велики, чтобы поверхностное натяжение капли воды было нарушено под ее собственным весом.

*Ответственный автор
E-mail: meruert82@mail.ru (М. Нажипкызы).

Другая модель – это равновесное состояние Касси-Бакстера, в котором поверхностное натяжение капли воды не нарушается. Вместо этого капля опирается на микроскопические структуры, образующие поверхность, создавая под каплей границу раздела твердое тело–воздух–жидкость. Состояние смачивания Касси–Бакстера – это уникальное физическое свойство, которое предлагает широкий спектр новых и захватывающих применений (например, самоочищение, защита от пятен, коррозионная стойкость и т.д.). Фундаментальные свойства смачивания, постулированные Кэсси–Бакстером и Венцелем, были исследованы для проектирования и разработки различных типов гидрофобных поверхностей для широкого спектра применений.

В настоящее время продукты с гидрофобными поверхностями пользуются большим спросом и могут быть применены в широком спектре от повседневных товаров до более сложных систем (например, пятновыводители в одежде, анти-запотевание и антиобледенение). Применение гидрофобных поверхностей может значительно помочь подавить недостатки, обнаруживаемые в настоящее время в сложных системах, таких как обледенение, теплообменники, сопротивление, загрязнение в трубах, запотевание и многие другие [5-9].

Супергидрофобные материалы и покрытия представляют большой практический интерес, поскольку обладают рядом уникальных функциональных характеристик. Наиболее важное из них водонепроницаемость, устойчивость к биообрастанию, к неорганическим, а в ряде случаев и к органическим загрязнениям, устойчивость к коррозии, обеспечение скольжения жидкого потока вблизи гидрофобной поверхности, управляемые электроизоляционные свойства. Благодаря вышеперечисленным свойствам преимущества использования таких материалов в быту и в технологии очевидны. Так, например, с проникновением воды в строительных сооружениях происходит коррозия и деформация. Такое разрушение для традиционных материалов связано, в первую очередь, с воздействием напряжений, возникающих при попадании воды в дефекты и трещины поверхностного слоя материала и ее последующем замораживании. Однако эта проблема может быть решена с помощью гидрофобных водоотталкивающих материалов, которые способны предоставить таким материалам, как кирпич, бетон, штукатурка, гипс,

асбоцемент, свойства отталкивания воды. Также гидрофобные гидроизоляционные материалы могут наделять бетонные и железобетонные конструкции такими качествами, как морозостойкость и коррозионная устойчивость, особенно в условиях нахождения в агрессивных и неблагоприятных средах. Супергидрофобность строительных поверхностей защищает их от разрушения в условиях высокой влажности при циклических перепадах температур.

Кроме того, имеются работы по созданию супергидрофобных покрытия, полученные методом плазменного напыления порошковых материалов (грамм) [10].

В настоящее время целый ряд мировых научных центров и научно-исследовательские отделы ряда крупнейших производителей активно ведут работы в области создания супергидрофобных материалов и покрытий с заданными свойствами.

Гидрофобность и гидрофильность

Абсолютно гидрофобных веществ не бывает, даже наиболее гидрофобные углеводородные и фторуглеродные поверхности адсорбируют воду. В связи с этим, гидрофобность рассматривают как малую степень гидрофильности, т.к. между молекулами воды и любого тела всегда действуют в большей или меньшей степени межмолекулярные силы притяжения. Общей мерой гидрофильности служит величина энергии связи молекул воды с поверхностью тела. Гидрофобность и гидрофильность можно оценить по растеканию капли воды на гладкой поверхности тела (рис. 1). Капля на гидрофильной поверхности растекается полностью, на гидрофобной – частично, причем величина угла между поверхностями капли и смачиваемого тела зависит от того, насколько данное тело гидрофобно [11].

Гидрофобность и гидрофильность могут быть оценены, как и смачиваемость поверхности водой (в воздушной среде), величиной угла смачивания : для гидрофильных поверхностей $\theta < 90^\circ$ (для абсолютно гидрофильных поверхностей); для гидрофобных поверхностей $90^\circ < \theta < 180^\circ$ (например, для парафина). На трёхфазной границе твердого тела с водой и углеводородной жидкостью при $\theta < 90^\circ$ (в водной фазе) поверхность олеофобна, т.е. не смачивается маслом, а при предельно олеофильна.

В основе гидрофобных покрытий лежит регулярная структура из частиц субмикронного и нанометрового размера, выступов или острий, располагающихся подобно лесу на поверхности. Пространство между этими элементами занимает воздух или любой другой газ из атмосферы. Подобные поверхности получают химическим или ионным травлением [12]. Известен способ выращивания в вакууме «ковровых» гидрофобных покрытий из углеродных волокон с применением катализаторов (как правило, никель). При таком процессе в глубоком вакууме, на подложке, из паров катализатора сначала выращивают зародыши-островки размером порядка 10-100 нанометров. Далее, в атмосфере углеродосодержащего газа (метан, ацетилен) происходит рост

углеродных волокон из островков катализатора (используется метод высокочастотной плазмы). Структура волокон может варьироваться в зависимости от параметров процесса (давление газа, температура подложки и др.). Таким образом, порции воды на таком покрытии, имея контакт лишь с кончиками выступов или волокон, фрагментируются в капли силами поверхностного натяжения. Подобный эффект наблюдается и в живой природе. Например, поверхность листьев лотоса тоже отличается гидрофобностью, поскольку усеяна многочисленными микроскопическими выступами. Прослойки воздуха, удерживаемые на теле между волосками, кутикулы водных насекомых, помогают им дышать под водой.

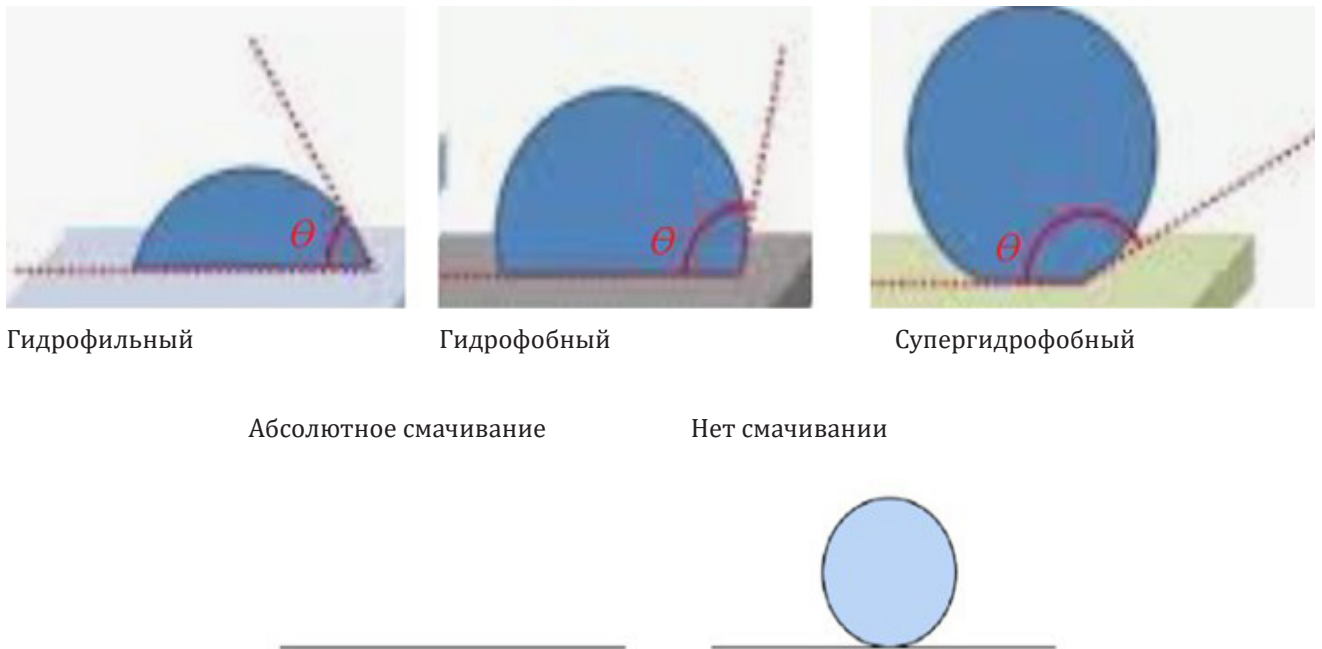


Рис. 1. Гидрофильные и гидрофобные условия смачивания.



Рис. 2. Капля воды на ткани, обработанной гидрофобным составом [12].

На основе наночастиц диоксида кремния (кварца, кремнезема) размером порядка 40 нм разработаны коллоидные растворы для обработки тканей (рис. 2).

В форме наночастиц это вещество приобретает новые свойства, в частности, высокую поверхностную энергию, что и позволяет частицам при высыхании коллоидного раствора прочно присоединяться к различным поверхностям, в первую очередь, к родственному им по составу стеклу, образуя тем самым, сплошной слой наноразмерных выступов. Если погрузить костюм из этого материала в воду, то, вынув его, можно обнаружить, что он совершенно сухой. А если поливать эту ткань из шланга, то можно заметить отсутствие какого-либо следа жидкости на ткани. Кроме того, отмечается, что этот эффект, хотя и не вечный, хорошо сохраняется после механических манипуляций с материалом. В силу наноразмерной толщины, такие покрытия совершенно невидимы, а благодаря биоинертности кремнезема – безвредны для человека и окружающей среды. Они устойчивы к ультрафиолету и выдерживают температуры до 400 °С, а действие водоотталкивающего эффекта длится в течение 4 месяцев.

Супергидрофобными называют материалы, демонстрирующие так называемый “эффект лотоса”. Этот эффект проявляется в том, что при контакте с таким материалом капля воды принимает форму, близкую к шарообразной, и при небольшом наклоне материала по отношению к горизонту капля с поверхности скатывается, захватывая при движении все загрязнения поверхности (рис. 3).

Так как лотос – эффект основан исключительно на физико – химических явлениях и свойствах растений и не привязан только

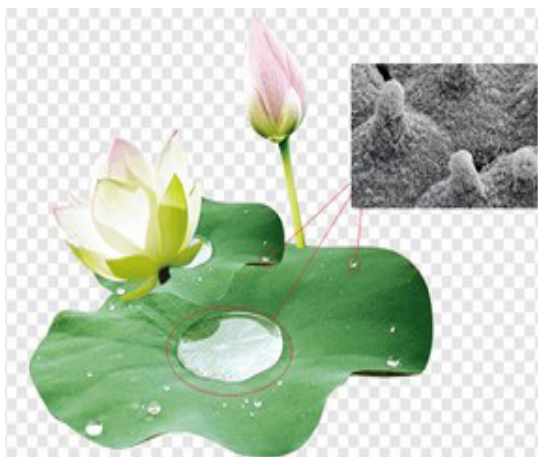


Рис. 3. Капля воды на поверхности листа Лотоса.

к живой системе, то не смачивающиеся поверхности можно технически получить для всевозможных материалов. В связи с этим в настоящее время проводятся интенсивные исследования по разработке и производству устойчивых к загрязнению не смачивающихся поверхностей и покрытий.

Наиболее широкое применение нанотехнологии на основе “эффекта лотоса” получили в автомобильной промышленности, строительстве, при производстве защитных тканей и в ряде других отраслей. В этих целях разработано покрытие на основе наночастиц оксида титана с размерами 20-50 нм и полимерного связующего [13, с.318].

Данное покрытие резко снижает смачиваемость поверхности водой, растительным маслом и спиртовыми растворами.

С помощью электронных микроскопов исследователи обнаружили, что листья и цветки лотоса покрыты воскоподобным веществом. Это вещество называется кутин и оно не просто покрывает листья, оно образует на поверхности листьев и лепестков лотоса особую структуру (нанорельеф) в виде «кочек». Капля воды при этом не может «растечься» по холмикам кутина и стремится свернуться в шарик. При этом кутин является ещё и гидрофобным веществом, т.е. отталкивающим воду. Если бы поверхность цветка была гладкой, то любая грязь удерживалась бы на ней достаточно прочно благодаря большой площади контакта. Но из-за «кочек» площадь контакта минимальна, и грязь как бы «висит на ножках-столбиках». Капельки воды, скатываясь с листа, увлекают за собой и частицы грязи. И поэтому цветок лотоса всегда сухой и чистый [14].

В области инженерии поверхностей топографии поверхностей в основном основываются на шероховатых поверхностях. Шероховатая поверхность часто описывается как «пик и впадина» определенной высоты или амплитуды и количественно определяется среднеквадратичным значением шероховатости. Поверхность с высокой шероховатостью будет иметь высокое среднеквадратичное значение.

Для многих практических применений очень важно, какие свойства по отношению к воде проявляет та или иная поверхность – гидрофильные или гидрофобные. Например, супергидрофобные поверхности успешно применяются для создания защитных водоотталкивающих покрытий. Кроме того, смачи-

вание играет немаловажную роль в жизнедеятельности живых организмов.

Смачивание – это поверхностное явление, заключающееся во взаимодействии жидкости с твердым или другими жидкими телами при наличии одновременного контакта с воздухом. Явления смачивания близки к адсорбционным, так как и те и другие определяются интенсивностью взаимодействия между молекулами различных веществ.

Рассмотрим явление смачивания на примере капли жидкости, нанесенной на поверхность твердого тела (существует также явление смачивания одной жидкости другой). При этом могут наблюдаться два крайних случая:

- полное смачивание, когда капля жидкости самопроизвольно растекается на поверхности, пока не покроет всю поверхность или пока слой жидкости не станет мономолекулярным (например, капля воды на обезжиренном стекле);

- несмачивание, когда капля жидкости на твердой поверхности самопроизвольно принимает почти сферическую форму (например, капля ртути на неметаллической поверхности).

Между этими крайними случаями наблюдаются различные промежуточные, когда поверхность частично смачивается жидкостью.

Получение гидрофобных наноструктур в пламени

Физико-химические свойства сажи и процессы, происходящие в пламени при сажеобразовании, являются объектом многочисленных исследований на протяжении более 100 лет и не теряют своей актуальности до настоящего времени. Природа сажи остается предметом интенсивных исследований как для физики и химии различных форм твердого углерода, так и для объяснения ряда фундаментальных явлений, имеющих место в конденсированных средах с различным масштабом структурного упорядочения. Изучение структуры сажистых пламен дает ценную информацию о химических и физических процессах, происходящих до и вовремя сажеобразования.

К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по процессам сажеобразования и предложены различные феноменологические модели [15].

В работе [16] представлен обзор супергидрофобных материалов и покрытий на основе углерода.

Получение покрытий с гидрофобными свойствами является актуальным направлением исследований. В настоящее время созданию таких покрытий и исследованию их свойств посвящено много открытых публикаций различных научных центров [17-20]. Гидрофобность поверхности напрямую связана с наноразмерной шероховатостью поверхности. Разрабатываются новые методы синтеза и методики определения характеристик полученных материалов. Для изменения смачивания поверхности часто используется аморфный углерод [17]. Методика быстрого осаждения углеродного слоя предложена S. Naha в 2007 году [18]. Данный метод синтеза, позволяет получать крупные агрегаты, состоящие из отдельных частиц (нанобисеры) с размерами от 20 до 50 нм [98], но возможен синтез более крупных частиц. Авторы работ [20] исследовали горение ацетиленового пламени при температуре 700 °С, где в качестве катализатора использовался никель.

В качестве подложки для создания слоя углерода использовались 450 мкм пластинки кремния. Кремниевая подложка подвергалась воздействию пламени на расстоянии 10 мм при различных экспозициях времени. В результате экспериментов авторами было сделано заключение, что вне зависимости от способа обработки поверхности, обращенной к пламени, синтезированные на них углеродные наноструктуры идентичны [18]. Размер и состав областей образования углеродных наночастиц, названных авторами нанобисерами, зависит от времени экспозиции (2,5; 5; 7,5 мин). Показано, что радиус области наночастиц с особыми гидрофобными свойствами уменьшается с увеличением времени экспозиции. Так для времени воздействия пламени 5 мин первая зона имеет границу 23 мм, а для 7,5 мин – 20 мм. Ближе к центру диска легче формируются большие углеродные цепочечные структуры – нанобисеры. Архитектура поверхности оказывает глубокое воздействие на смачиваемость [20]. Известно, что гидрофобность системы в первую очередь зависит от вида поверхности покрытия – ее шероховатости. Так тонкий слой углеродистых частиц (одномерных шариков сажи) дает очень низкую степень шероховатости поверхности.

Pozzato и его коллеги [21] установили, что, когда капли воды образуют углы смачивания более 150°, то гидрофобность частиц позволяет капле легко скатываться с поверхности. Из электронно-микроскопических изображений

кремниевой подложки, подвергшиеся обработке в течение 5 мин, было подтверждено, что углеродные наночастицы (нанобисеры) связаны друг с другом.

Поскольку процесс осаждения для нанобисеров не каталитический, было предположено, что рост является результатом пиролиза топлива в газовой фазе. Продукты пиролиза, транспортируются в слое, прилегающем к относительно холодной поверхности Si, на которых они конденсируются и образуют нанобисеры. Пиролиз является определяющим в формировании углерода, в то время как окисление происходит вне пламени. Сажа образуется в самом начале фронта пламени, так как дефицит кислорода (ниже критического значения) способствует образованию предшественников сажи. Шарон и его коллеги, которые являются одними из первых исследователей синтезировавших углеродные наночастицы, показали, что желательно иметь источник углерода, который содержит сочетание и структуры связи. Они доказали, что источники с орбиталью, таких как графит, затрудняет образование сферических структур. Пиролизом пара камфары при 1000 °C в атмосфере аргона были синтезированы губчатые наноструктуры углерода. В качестве катализатора использовали ферроцен. При этом были получены твердые и полые углеродные наночастицы двух размеров ≈ 250 нм и 500-800 нм. Они состояли из аморфных слоев, которые были покрыты графитовыми оболочками. Спектральный анализ энергетических потерь электронов показал, что внутренняя часть частиц (бусин) была аморфной. Рентгеновский анализ различных спектров показывает, что периферия нанобисеров содержит по объему 98,1% углерода. Хотя углеродные частицы могут образовывать различные наноструктуры [21].

Одним из материалов с низкой поверхностной энергией, которые часто используются для изменения поверхности, для того чтобы контролировать их смачиваемость, такие как пленки аморфного углерода (АУ) [16]. В работе [20, с.2692] приводилась техника для быстрого осаждения на супергидрофобный а-С слой, состоящей из однородных нанобисеров углерода на Si подложке с использованием метода совместного сжигания этилен-воздушного не перемешанного пламени. Нанобисеры морфологически подобны наножемчугу углерода синтезированным Левеском и его сотрудниками [18] с помощью диссоциации

ацетилену при 700 °C на никелевых каталитических нанокластерах.

В работе [22] были определены оптимальные условия образования гидрофобной поверхности в зависимости от расположения сетки или фольги, изготовленной из нержавеющей стали или кремниевой подложки с нанесенной на ее поверхность ферромагнитной жидкостью.

Супергидрофобные углеродные материалы, синтезируемые в пламени, имеют ряд практических применений, в том числе и для получения гидрофобного сыпучего материала [15]. Процесс синтеза супергидрофобной сажи включает в себя множество промежуточных стадий [16]. Введение в систему катализаторов может существенно повлиять на выход и структуру получаемого продукта. В качестве катализаторов применяются массивные и дисперсные металлы. Катализаторы, применяемые в процессе горения топлива, можно вводить непосредственно в топливо, в пламя путем распыления или помещать в объеме пламени. Каталитическое горение топлива происходит с технологически приемлемой скоростью уже в диапазоне температур 250–400 °C.

Образование сажевых частиц основано на разложении углеводородов под действием высокой температуры. Интенсивное сажеобразование в пламенах углеводородов происходит при ограниченном доступе воздуха к ним или же при термическом разложении сырья без доступа окислителя. Реакция сажеобразования является эндотермической, и для непрерывного продолжения процесса необходима тепловая энергия, которая вносится сжиганием части исходного сырья. Скорость термического разложения углеводородов зависит от температуры процесса, и их основное количество разлагается в реакционном объеме с образованием сажи при температуре выше 1000 °C. Чем выше температура разложения углеводородов, тем большее количество сажевых частиц будет сформировано за определенный промежуток времени и тем более дисперсная сажа будет образовываться при фиксированном доступе исходного сырья, расходуемого на горение. Температуру пламени в локальном объеме топлива можно повышать путем введения в реакционную зону катализаторов, при этом снижение энергии активации приводит к более полному сгоранию исходного сырья при низкой общей температуре пламени. Таким образом, применение катализаторов

позволяет регулировать размеры и структуру образующихся сажевых частиц [23].

Работа [24] посвящена созданию лакокрасочных материалов с высоким значением краевого угла смачивания за счет создания микрошероховатости в наноразмерном приповерхностном слое лакокрасочного покрытия. Для модификации приповерхностного слоя лакокрасочного покрытия были использованы углеродные нанотрубки и углеродное нановолокно.

Все опубликованные методы получения гидрофобных поверхностей в зависимости от способа синтеза имеют свои недостатки, это длительность процесса синтеза и высокая себестоимость полученных материалов.

Нами на протяжении последних лет проведены ряд экспериментальных работ по синтезу супергидрофобной сажи в режиме пиролиза и горения углеводородных топлив [22, 25], а также получением гидрофобных и антиобледенительных покрытий на основе наноструктур [26-29].

В работе [26] исследовалась процесс горения пропан-кислородной смеси. Кремниевая пластина использовалась в качестве подложки для синтеза сажи (рисунок 4).

Si диск подвергался воздействию пламени от 2 мин до 10 мин. В результате на поверхности диска наблюдалось три зоны сажи: центральная серая область (1) была окружена коричневой зоной (2), которая, в свою очередь, была охвачена внешней черной закопченной зоной (3). Расход пропана был $51 \text{ см}^3/\text{с}$, а кислорода $260 \text{ см}^3/\text{мин}$, время экспозиций мин, температура пламени $900 \text{ }^\circ\text{C}$.

После завершения экспериментов полученные образцы сажи собирались, взвешивались и исследовались физико-химическими методами. Количественный и качественный анализ состава саж и их экстрактов проводили на спектрометре ИК-Фурье фирмы «Perkin Elmer». Рентгенографический анализ фазового состава получаемых образцов проводили на дифрактометре ДРОН-3М и ДРОН-4, а электронно-микроскопические исследования на электронных микроскопах типа Jem-100CX ($\times 360000$) и Jem-3010 ($\times 1500000$).

Для того, чтобы сажа автоматический собиралась в сажесборнике, установка для синтеза сажи была модифицирована.

Таким образом, экспериментальные исследования по выявлению условий повышения гидрофобных свойств сажевого материала получаемого в процессе горения сопутствующих газов нефтяных месторождений проводили на модифицированной установке, которая состоит из системы дозированной подачи газов, горелки и сажесборника барабанного типа. В качестве сопутствующих газов нефтяных месторождений использовали сжиженный в баллонах газ.

Принцип работы установки основан на осаждении сажевых частиц из пламени на поверхности вращающегося железного цилиндра и его автоматического сбора с использованием встроенного скребка. Структура и свойство сажевых частиц зависит от температуры в объеме пламени.

Кроме того, авторами было проведено исследования по выявлению оптимальных условий повышения гидрофобных свойств са-

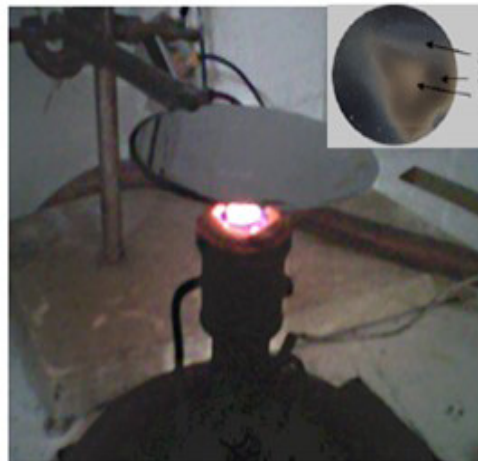
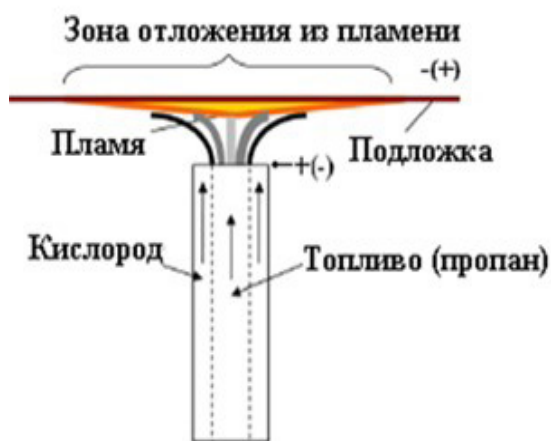


Рис. 4. Фотография и схема экспериментальной установки [26, 27].

жевых частиц при горении сопутствующих нефтяных газов в зависимости от сбора сажи по высоте фронта пламени. Расход газа варьировался от 250-300 см³/мин, сбор сажи производился по высоте пламени 2; 2,3; 2,5; 3 и 4 см. Макроскопическое осаждение сажи на поверхности железного цилиндра служащей сажесборником, начиналась при расстоянии 2,3 см от начала фронта пламени. Увеличение расстояния свыше 3 см приводит к увеличению количества образующей сажи, но угол смачивания сажевой поверхности составляет не более 120°. Выявлено, что оптимальным режимом образования сажи обладающей супергидрофобным свойством с углом смачивания свыше 150° является расстояние сбора 2,5 см. На рис. 6 приведена фотография капель воды на сажевой поверхности полученной при расстоянии сбора 2,5 см от начала фронта пламени.

Несмотря на популярность и выгодность бизнеса по переработке полиэтиленовых отходов, в настоящее время перерабатывается всего порядка 3%. И при этом переработанный полиэтилен остается полиэтиленом, что, через определенное время использования превращается обратно в не разлагающиеся мусор.

Одним из методов полного уничтожения полиэтиленовых отходов, является сжигание, но здесь существует своя проблема.

В идеальных условиях, в среде кислорода полиэтилен сгорает с образованием углекислоты и воды.

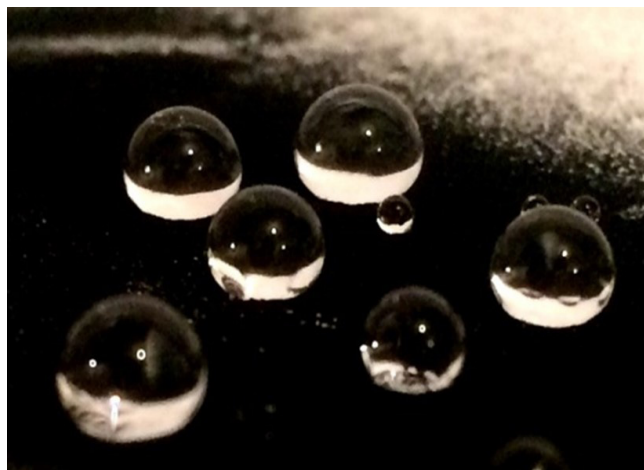
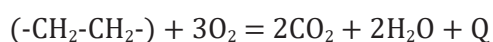


Рис. 5. Капли воды на полученной сажевой поверхности при расстоянии сбора 2,5 см от начала фронта пламени [29].

В реальности при сжигании полиэтилена в составе отходящих газов, могут присутствовать: бензопирен, оксид углерода, всевозможные летучие вещества, остается несгораемый остаток в виде золы или сажи, которые содержат углеводороды с канцерогенными свойствами. На это очень много причин, это то, что в полиэтилене могут быть различные добавки, красители, материал катализатора, используемый при производстве и т.д. Для того чтобы минимизировать в составе сажи канцерогенные вещества необходимо сжигать не полиэтиленовые отходы а газообразные продукты разложения образующихся при нагреве без доступа кислорода. Для синтеза сажи при горении полиэтиленовых отходов, была собрана установка, схематическое изображение, которого показано на рис. 6.

Для выявления структурных характеристик синтезированной сажи исследовалась физико-химическими методами. На рис. 7 приведен электронно-микроскопический снимок сажи полученной при сжигании продуктов разложения полиэтиленовых отходов.

Исследования показали, что сажа состоит из скоплений сажевых частиц округлой формы диаметром от 30 до 60 нм скрепленных в цепочечные структуры. При этом сажевые частицы имеют развитую поверхность, что придает им супергидрофобные свойства с углом смачивания свыше 160°.

Синтезированную сажу экстрагировали методом холодной экстракции и полученный экстракт исследовали на Фурье ИК-спектрометре Spectrum 65.

На рис. 8 приведен ИК-спектр экстракта сажи.

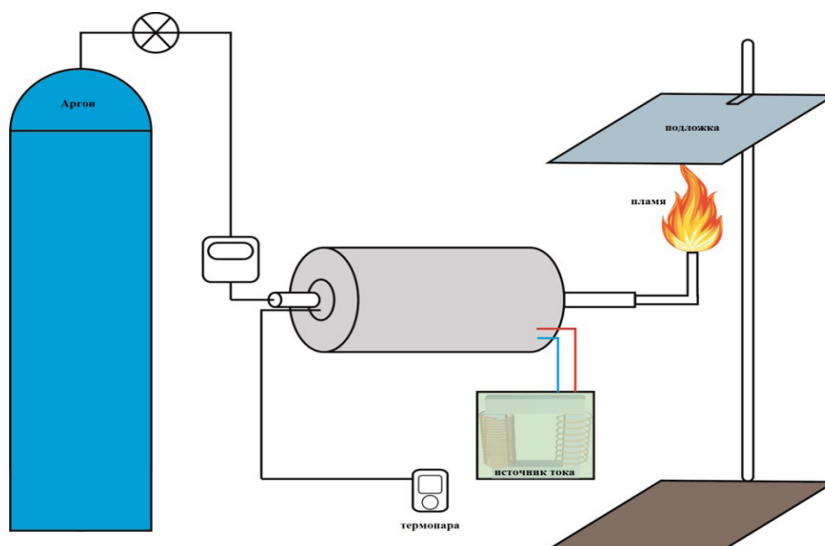


Рис. 6. Схематическое изображение установки для синтеза сажи при сжигании полиэтиленовых отходов [29].

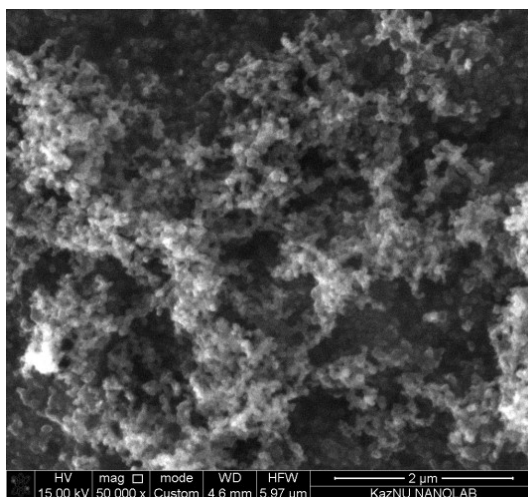


Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок сажи полученных при сжигании продуктов разложения полиэтиленовых отходов [29].

Основными полосами поглощения в спектре полиэтилена являются полосы с частотами $1462,68 \text{ см}^{-1}$, $2954,85 \text{ см}^{-1}$ (соответствует алкановым группам) и полосы с частотами $3076,17 \text{ см}^{-1}$ и $2848,62 \text{ см}^{-1}$, 1472 см^{-1} (соответствует цепочкам CH_2); полосы с частотами $3437,25 \text{ см}^{-1}$ (соответствует гидроксильным группам). Кроме того, всегда имеется полоса поглощения с частотой $1376,94 \text{ см}^{-1}$ характеризующая наличие группы — O-H, а также полоса поглощения с частотой $1726,52 \text{ см}^{-1}$ характеризующая наличие карбоксильных групп. ИК-спектроскопические исследования показывают, что термическое разложение с ограниченным доступом воздуха приводит к появлению групп веществ в полосах поглоще-

ния в области пика $752,48 \text{ см}^{-1}$ (S-O) и $841,23 \text{ см}^{-1}$ (S-H), $1148,58 \text{ см}^{-1}$, $1641,38 \text{ см}^{-1}$ (C=C), $909,46 \text{ см}^{-1}$, $964,53 \text{ см}^{-1}$ (C-O-C). Полосы соответствуют S-H, C=C и S-O связям.

Образцы сажи полученные путем сжигания полиэтиленовых отходов исследовали на гидрофобное свойство методом лежащей капли (рис. 9).

Эти исследования показывают, что угол смачивания составляет свыше 160° .

Были изготовлены гипсовые растворы средней густоты, затем в качестве наполнителя были добавлены гидрофобная сажа в разных концентрациях (0,5 г; 0,75 г; 1 г).

После перемешивания и заливки в сферические формы все образцы были подвергну-

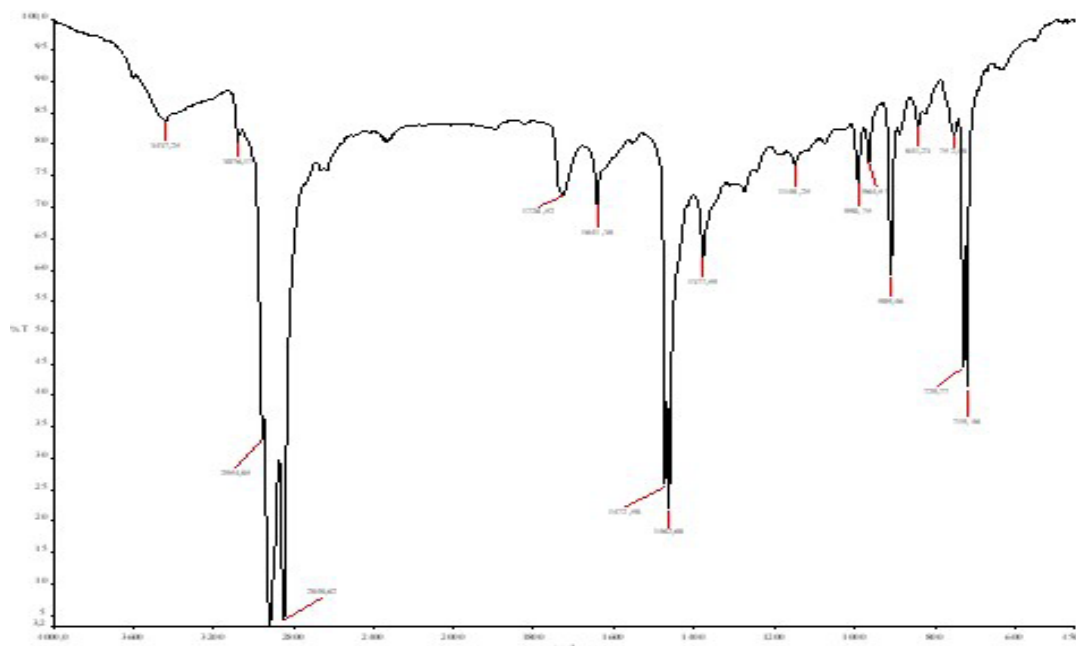


Рис. 8. ИК-спектр сажи, полученной при горении продуктов разложения полиэтиленовых отходов [29].



Рис. 9. Капли воды на сажевой поверхности полученной при горении продуктов разложения полиэтиленовых отходов [29].

ты вибрации с частотой 50 Гц для устранения воздушных включений, и оставлены для набора прочности в естественных воздушно-влажных условиях на 28 суток.

После полного отверждения гипса, приготовленные образцы были исследованы на прочностные характеристики на гидравлическом прессе. На рис. 10 приведена диаграмма измерения прочностных характеристик полученных гипсовых сферических форм.

Исследования показали, что добавление к цементу 0,75% от массы углеродных наноматериалов в виде гидрофобной сажи улучшает прочностные характеристики гипса, в среднем на 84%.

Также были проведены работы по применению полученных гидрофобных сыпучих

материалов для создания гидрофобных наполнителей и гидроизоляционных конструктивных материалов на основе полученных углеродных наноматериалов обладающих супергидрофобным свойством.

Для создания водоотталкивающих лакокрасочных материалов гидрофобный порошок диоксида кремния, полученный при сжигании силиконовых отходов, и гидрофобная углеродная сажа, которая образуется при горении пропан-бутановой газовой смеси, наносился на поверхность гипсокартона, фанера с добавлением и без добавления огнеупорной краски.

В таблице 1 представлены данные о гидрофобных свойствах полученных поверхностей.

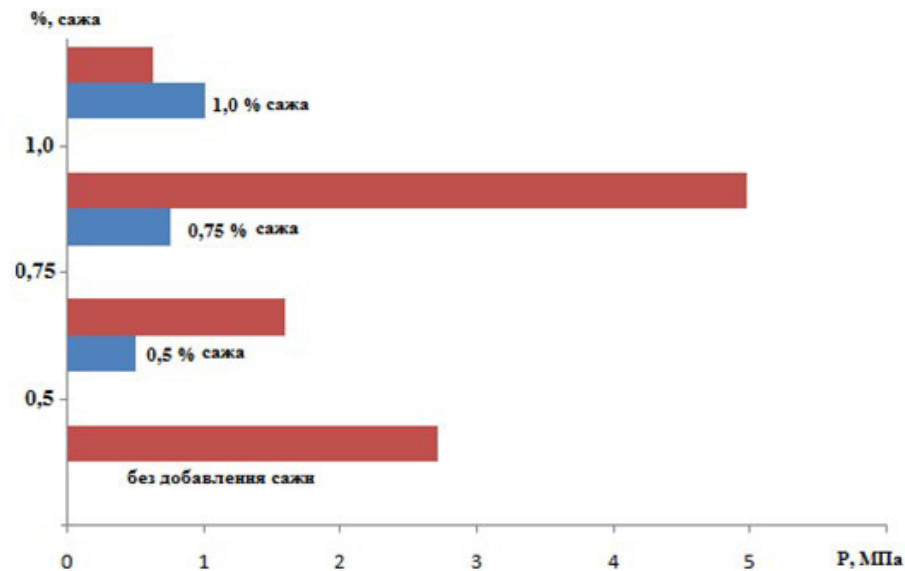


Рис. 10. Прочностные характеристики гипсовых форм [29].

Таблица 1

Гидрофобные свойства созданных поверхностей из фанера и гипсокартона

| | Порошок SiO ₂ | Огнеупорная краска+SiO ₂ | Сажа | Огнеупорная краска+сажа |
|-------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------|-------------------------|
| Гипсокартон | гидрофобная | гидрофобная | гидрофобная | гидрофобная |
| Фанера | гидрофобная | гидрофобная | гидрофильная | - |

Результаты показали, что полученные гидрофобные поверхности строительных материалов не теряли водоотталкивающие свойства.

Таким образом, добавления в лакокрасочные материалы сыпучих гидрофобных порошков, таких как, диоксид кремния и сажа, способствует получению супергидрофобных покрытий строительного назначения.

Далее полученную супергидрофобную сажу добавляли в качестве гидрофобного наполнителя в шпаклевку типа Т-37 в концентрациях 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15% от массы основного материала для получения гидроизоляционного материала. Тщательно перемешанную смесь наносили на гипсокартон и сушили в течение 5 дней при комнатной температуре. По истечению пяти дней образцы исследовали на гидрофобность методом «сидящей капли». Исследования показали, что добавление сажи повышает гидрофобные свойства шпаклевки до определенного предела, максимальный угол смачивания (выше 150°) был зафиксирован при концентрации сажи, равной 8%. Однако, уже при 10%-ой концентрации, по-

верхность шпаклевки утрачивает свои гидрофобные свойства и начинает легко впитывать воду. Дальнейшее увеличение содержания сажи до 15% резко ухудшает пластические и прочностные свойства покрытия, способствует его растрескиванию, уменьшению коэффициента укрывистости и утрате основного назначения, как материала для первичной обработки и защиты штукатурки (рис. 11).

На рисунке 12 приведен график зависимости угла смачивания от процентного содержания получаемой супергидрофобной сажи в шпаклевке.

Проведенные исследования показали, что использование супергидрофобной сажи в качестве гидрофобного наполнителя позволяет придать водоотталкивающие свойства не только поверхностному слою шпаклевки, но и всему её объему, что существенно повышает защиту от проникновения влаги. Введение сажи в малых количествах также способствует повышению твердости и износостойкости покрытия. Кроме того, полученная гидрофобная шпаклевка обладает высокой адгезией к различным поверхностям и высокой проникаю-

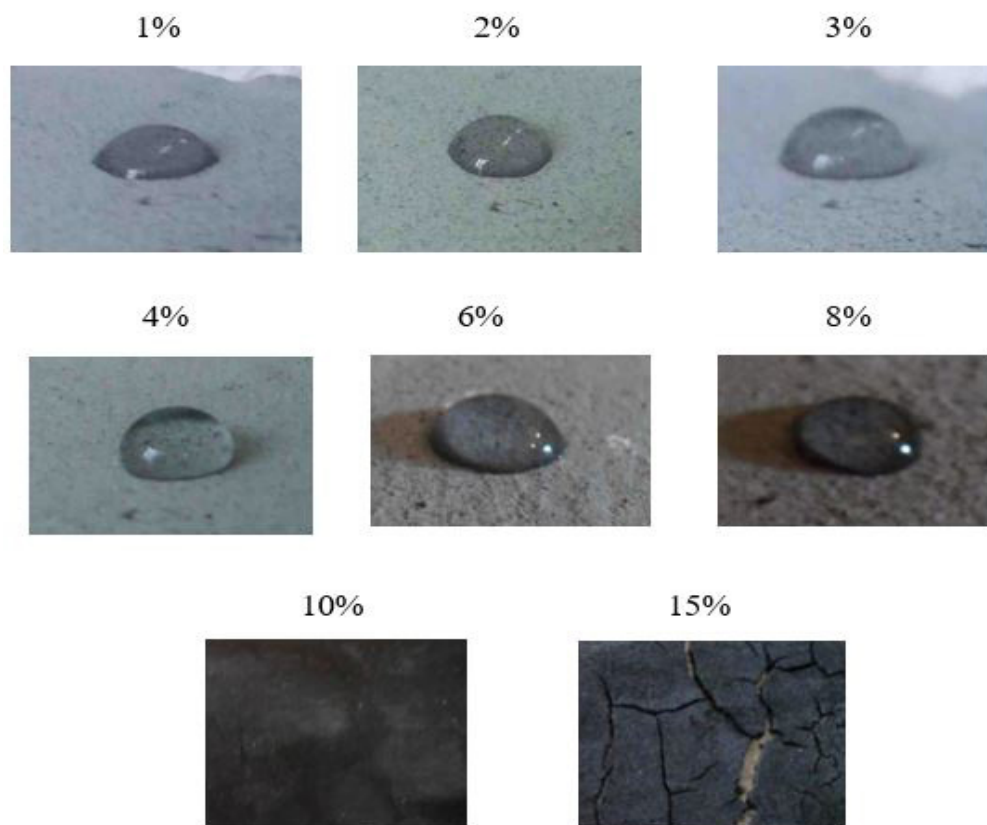


Рис. 11. Прочностные характеристики гипсовых форм [28, 29].

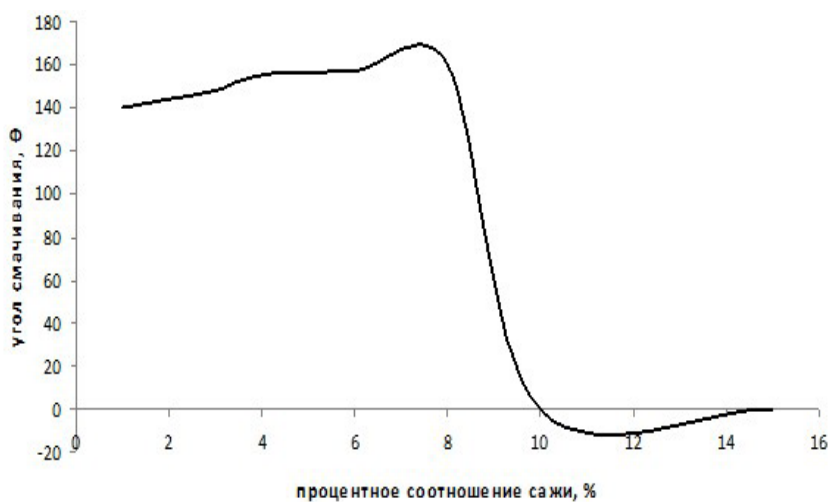
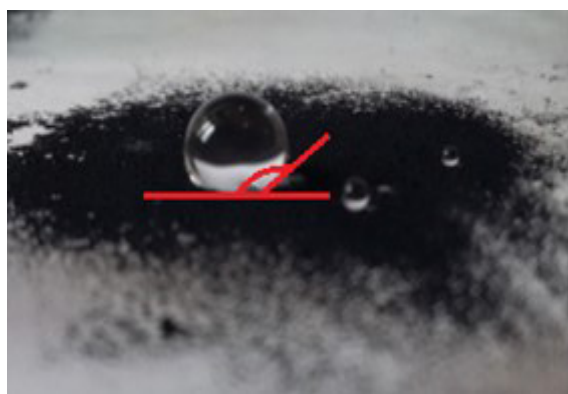


Рис. 12. Зависимость угла смачивания от процентного соотношения сажи, % [28, 29].

щей способностью. Применения гидрофобных сыпучих материалов в качестве наполнителя способствует повышению водоотталкивающих, антикоррозийных свойств гидроизоляционных конструкционных материалов [28, 29].

Получение гидрофобного песка

Проблема переработки отработанных смазочных масел остро стоит во всем мире, так как наряду с другими углеводородами отработанные смазочные масла значительно загрязняют биосферу. В отличие от нефти и других нефтепродуктов, отработанные масла при



а)



б)

а) с использованием хлопчатобумажного фетилия; б) с использованием углеродной ткани

Рис. 13. Фотографии капли воды на сажевой поверхности, полученной при сжигании отработанных масел [29].

попадании в окружающую среду не обезвреживаются естественным путем (окисление, фотохимические реакции, биоразложение). В связи с этим существует актуальная проблема утилизации отработанных масел.

К отработанным маслам относятся моторное, трансмиссионное, гидравлическое, промышленное, трансформаторное, минеральные и синтетические масла загрязненные физическими или химическими примесями. В зависимости от применения и операционной среды, масло загрязняется или ухудшает свои свойства, после чего становится непригодным для последующего использования. Источников отработанного масла множество, большую часть представляют автомастерские, металлообрабатывающие производства, электростанции и т.д. Ощутимый экологический ущерб наносит слив отработанных масел в почву и водоемы, который по данным исследователей, превышает по объему аварийные сбросы и потери нефти при ее добыче, транспортировании и переработке.

Были проведены ряд экспериментальных исследований по определению эффективного образования гидрофобной сажи при сжигании отработанных масел. В качестве сырья использовали отработанные масла со станций технического обслуживания автомобилей по замене масел. Отработанные масло сжигали используя обычный фетиль, путем пропитки углеродной и стекловолоконной ткани. Для проверки гидрофобных свойств полученную сажу замачивали в спиртовом растворе и после высушивания тестировали на гидрофобные свойства методом лежащей капли. Резуль-

таты исследований показали, что поверхность из сажи полученной при сжигании отработанных масел обладает гидрофобным свойством с углом смачивания $145-150^\circ$ (рис. 13).

Проведенные экспериментальные исследования по получению сажи путем сжигания отработанных масел показали, что при сжигании 100 гр масло в зависимости от условий сжигания можно получать от 0,5 до 1,5 г сажи. Экстрагирование полученной сажи в бензоле показывает на малое содержание растворимой части, что говорит о нетоксичности получаемого продукта.

Таким образом, проведенные исследования показали, что метод сжигания с поверхности пропитанной углеродной ткани или стеклоткани позволяет получать сажу обладающую повышенным гидрофобным свойством.

Но для увеличения массового выхода сажевых частиц необходимо провести дополнительное исследование, а именно усовершенствованием горелочных устройств.

В наших ранних исследованиях были проведены работы по созданию гидрофобного песка на основе речного песка и супергидрофобной сажи полученных при сжигании пропан-бутановой смеси и полиэтиленовых отходов [30].

Кварцевый песок первоначально проходил стадию измельчения для получения тонкой пылевидной фракции, что на конечном этапе приводит к усилению водоотталкивающего эффекта за счет уменьшения расстояния между частицами покрытыми гидрофобным слоем и, следовательно, уменьшает размер капилляров, через которые может просочиться

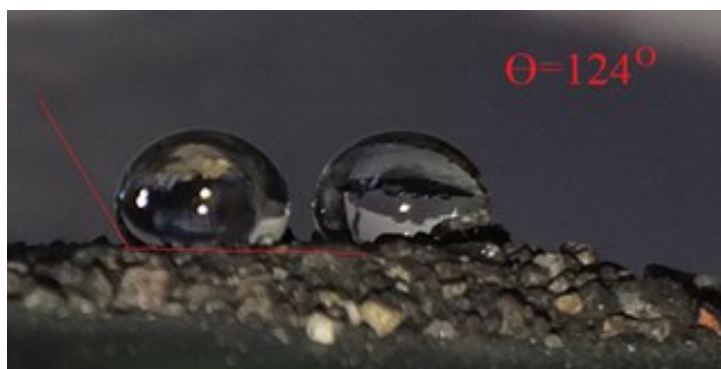


Рис. 14. Фотографии капли воды на поверхности гидрофобного песка крупной фракции [30, 31].

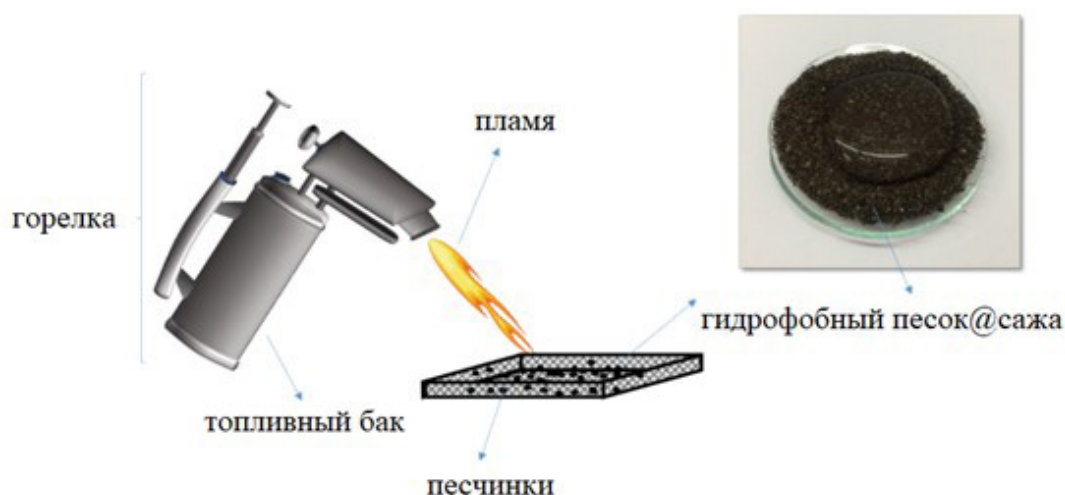


Рис. 15. Процесс осаждения углеродного слоя на поверхности песка [32].

вода. В качестве растворителя мы использовали этилацетат, не требующий для выпаривания специального нагрева свыше комнатной температуры. Клейкий слой с основным материалом подвергают интенсивному перемешиванию, в это время летучий растворитель выпаривается. Затем в мешалку добавляется порошок, содержащий сажу с гидрофобными свойствами. Во время перемешивания кварцевый песок обволакивается им, затем проходит отверждение при комнатной температуре.

Таким образом, успешно был проведен ряд экспериментов по получению гидрофобного слоя на песчинках с использованием сажи обладающей гидрофобными свойствами.

В продолжение этих работ синтезированной сажу из отработанных масел использовали для получения гидрофобного песка. Использовали песок крупной фракции и 1% полученной сажи из отработанных масел. Полученный песок обладает гидрофобностью с

углом смачивания 124° [31]. На рис. 14 показано поведение капель воды на поверхности созданного песка крупной фракции.

Одной из самых серьезных экологических проблем для морских территорий является разлив нефти, поэтому необходимо найти подходящий метод отделения разливов нефти от воды. Для разделения масла и воды был синтезирован высокогидрофобный песок как очень дешевый материал. При сжигании керосина с помощью горелки на поверхность песка можно легко нанести нано/микрогранулу. Предлагаемым одностадийным методом получается гидрофобный песок с углом смачивания 134° . Подготовленный гидрофобный песок, покрытый сажей, полностью охарактеризован методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионного рентгеновского излучения (EDS), рамановской и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (XPS) [10].

Сначала песчинки просеивали (диаметр: 250-500 мкм), затем промывали дистиллированной водой и этанолом и сушили в печи при 60 °С в течение 2 часов. Частицы песка подвергались воздействию пламени горелки с керосином в качестве топлива в течение примерно 18 мин для осаждения частиц сажи на песке. На рис. 15 приведен процесс создания углеродного слоя на поверхности песка.

Представленный в работе [32] метод прост, быстр и позволяет производить гидрофобный песок в больших количествах. Поверхность песок@сажа имеет шероховатость в микро- и наномасштабе, что соответствует водоотталкивающим свойствам (гидрофобности). Всех этих заметных преимуществ достаточно, чтобы сделать песок@сажа хорошим кандидатом для отделения масла от воды. Песок@сажа способен отделять различные виды масел, таких как керосин, газойль, моторное масло, от воды благодаря своим высоким гидрофобным/суперолеофильным свойствам.

Антиобледенение

В последние десятилетия значительные усилия инженеров и исследователей были направлены как на более детальное понимание физико-химических явлений, определяющих процессы обледенения, так и на создание более эффективных систем для предотвращения обледенения и борьбы с его последствиями. Результаты уже проведенных исследований показали необходимость решения двух проблем. Это, во-первых, предотвращение либо замедление перехода переохлажденных капель воды, попадающих на конструктивные элементы, в твердое состояние с последую-

щим их удалением с поверхности под действием воздушных потоков. Во-вторых, это снижение адгезии уже образовавшихся ледяных отложений к поверхности конструктивных элементов и аппаратуры, что способствует удалению льда под действием аэродинамических сил.

На поверхностях подвергающихся условиям обледенения, следует устанавливать полностью испарительные антиобледенительные системы не только во избежание прироста льда на площадях, где присутствуют антиобледенительные системы, а также для избежания прироста льда вниз по потоку, где и присутствуют антиобледенительные системы и стекающая вода может замерзнуть. Однако, этот метод требует больше количества энергии, требующейся для испарения жидкой воды на поверхности. В случае с гидрофобным покрытием (СПП), большая часть собранной воды либо отскакивает вскоре после удара либо может быть быстро сброшена с поверхности, так что на поверхности остается небольшое количество, которое требуется испарить антиобледенительными системами. Таким образом, уменьшение воды на поверхности приводит к уменьшению энергии.

Выбранный нами экспериментальный образец представляет собой 2D крыло с аэродинамической поверхностью NASA 0021. Крыло состояло из двух компонентов: основное тело для крыла из алюминиевого листа и заменяемая вкладка. Центральная часть основного тела спроектирована таким образом, чтобы можно было вставить испытуемый образец (рис. 16).

Эксперименты в различных условиях обледенения показали, что применение суперги-



а)



б)

Рис. 16. Фотографии экспериментальной установки и капель воды на антиобледенительном покрытии [33]

дрофобного покрытия дает множественные выгоды: во первых, значительное сокращение энергии нагревания, необходимое для поддержания ведущего края крыла свободным от льда (экономия до 80% энергии); во вторых, значительное уменьшение или полное предотвращение образования стекающего льда. Эффективность метода смягчения еще яснее в условиях обледенения, который может испытывать обычно самолет. Также предлагается механизм для объяснения эффективности стратегии покрытий водоотталкивающими покрытиями. На гидрофильной поверхности вода не замерзает на участках, где температура поверхности поддерживается выше температуры замерзания воды, например, ведущий край крыла. Однако, силы прилипания между жидкостью и поверхностью высоки, а мобильность жидкости на поверхности низкая и, когда стекает вниз из-за аэродинамической тяги, вода замерзает там, где температура падает ниже температуры замерзания, вызывая образование стекающего льда. А на СГП, где сила прилипания между жидкостью и поверхностью низкая, большая часть жидкой воды сбрасывается с поверхности из-за отскока капли или благодаря аэродинамической тяги, что заставляет капли скатываться с поверхности. Таким образом, жидкая вода удаляется с поверхности прежде, чем она может стечь вниз и замерзнуть на необработанных площадях.

Результаты показывают, что применение стратегии покрытий позволяет значительно сократить энергию нагрева на поверхностях, подвергнутых условиям обледенения. Например, эффективная работа аэродинамических поверхностей обычно требует, чтобы антиобледенительные системы работали как полностью испарительные системы, так, чтобы жидкая вода испарялась на нагретой поверхности и жидкая вода не стекла вниз для избежания прироста стекающего льда. Если используется стратегия покрытия, то требуется гораздо меньше энергии, потому что энергия нагрева подается только для поддержания температуры выше точки замерзания в зоне сбора капель воды, а не обеспечивать латентное тепло, необходимое для испарения воды [33].

Были проведены исследования влияния супергидрофобных покрытий на сокращение энергопотребления в антиобледенительные системы [33, 34]. Кроме того, обледенение измерительной и контрольной аппаратуры при-

водит к нарушению ее нормальной работы и управляемости летательного аппарата.

Проблема прилипания льда/снега к поверхностям открытого воздуха в холодных регионах имеет жизненно важное значение для исследователей во всем мире. Различные авторы предложили многочисленные методологии с несколькими материалами для решения таких проблем [35, 36]. Например, Како и др. [37] подготовили образец с гидрофильной поверхностью, а другой образец с супергидрофобной поверхностью, и определил его адгезионные и скользящие характеристики по снегу. Одна акриловая пластина была покрыта методом центрифугирования раствором диоксида титана-диоксида кремния, а другая была покрыта гидрофобными фторсодержащими смолами.

Угол смачивания 45° и 158° наблюдалась вместе с коэффициентом сцепления на снегу 80% и 10%, соответственно. Точно так же Цао и др. [38] синтезировали акриловую полимерную смолу путем свободнорадикальной полимеризации с использованием азобисизобутиронитрила в качестве инициатора. Его использовали в качестве полимерного связующего с использованием силиконовой смолы для получения полимерного композита с частицами диоксида кремния, модифицированного органосилоном, а затем нанесли в качестве покрытия на алюминиевую подложку. Угол смачивания (107°) была определена для подготовленного образца и (150°) для образца, в котором использовались частицы кремнезема размером 20 мкм. Считается, что такие покрытия обеспечивают пониженную адгезию, в настоящее время синтезированные материалы не продемонстрировали полного или почти полного отталкивания льда или мокрого снега.

Известно, что бетон представляет собой пористый гидрофильный материал, проникновение воды и коррозионных ионов является двумя основными факторами, снижающими его долговечность. В процессе проникновения агрессивных ионов вода выступает в качестве носителя или транспортной среды. Сама вода также может быть реагентом в реакции щелочно-кремнеземной реакции или разрушения при замораживании-оттаивании. Таким образом, эффективный способ продлить срок службы бетона – предотвратить попадание воды в его структуру. Флорес-Вивиан и др. изготовили гидрофобные эмульсии (обогащенные гидрофобным агентом на основе по-

лиметил-водородсилоксанового масла, а также метакаолином или дымом кремнезема) и нанесли их на плитки из портландцементного раствора для получения супергидрофобного бетона [39]. Рамачандран и др. контролируемыми энтропийными молекулярными взаимодействиями для создания нового ледофобного бетона. Этот вид бетона показал низкую прочность сцепления со льдом и мог отталкивать поступающие капли воды при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [40]. Джао и др. изготовили супергидрофобную поверхность на бетоне для защиты от обледенения [41]. Как показано на рис. 19(а), раствор фторсодержащей смолы сначала распыляли на бетон в качестве адгезионного слоя, а затем покрывали кремнеземом, функционализированным фторсиланом, для реализации супергидрофобности. Из рис. 19 (б, в) видно, что капли воды быстро растекаются по бетону без покрытия и образуют слой льда за 5 с при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в то время как на супергидрофобном бетоне видны сферические ледяные шары (как показано на вставке на рис. 19(б); после долгого распространения слой льда покрыл супергидрофобный бетон.

Свежеприготовленная супергидрофобная бетонная поверхность продемонстрировала отличные противообледенительные свойства при низкой прочности сцепления со льдом. Кроме того, с учетом противообледенительных свойств Esmeyan и др. представила рациональную стратегию предотвращения атмосферного обледенения на основе покрытий из углеродной сажи с химическими функциональными группами; эта стратегия также подходит для защиты от обледенения бетона [42]. Кроме того, они контролировали гидрофильные активные центры, чтобы замедлить конденсацию и образование инея на супергидрофобных покрытиях из углеродной сажи, что также является полезным перспективным средством предотвращения конденсации льда на бетоне [43]. Ши и др. разработали супергидрофобную поверхность бетона путем распыления модифицированного силикагеля для одновременного создания иерархической микро/наноструктуры и снижения поверхностной энергии [44]. Капли воды на поверхности можно увидеть на рис. 17(г) с углом смачивания $162 \pm 3^{\circ}$. Более того, степень водопоглощения этого супергидрофобного бетона была снижена на 95,2% по сравнению с сухим бетоном без покрытия, что показано на рис. 17(д).

Прозрачные и антибликовые супергидрофобные покрытия

Прозрачные супергидрофобные покрытия могут применяться в архитектуре или автомобильных окнах, очках, оптических окнах для электронных устройств и т.д. Однако для достижения интеграции супергидрофобности и прозрачности на одной и той же поверхности размеры шероховатости должны быть меньше длины волны видимого света (примерно 380-760 нм) [45]. Этим критерием руководствуются несколько методов изготовления прозрачных супергидрофобных покрытий.

Во избежание истирания и загрязнения Накаджима и др. изготовили твердые супергидрофобные тонкие пленки методом фазового разделения. Пленка, полученная с использованием соответствующего состава, обладает высоким коэффициентом пропускания в видимом диапазоне длин волн, а ее твердость почти такая же, как у обычных твердых покрытий на основе диоксида кремния.

Более того, та же группа также ввела фотокатализатор TiO_2 в супергидрофобные прозрачные покрытия, которые проявляют самоочищающиеся свойства за счет фоторазложения органических загрязнителей под воздействием солнечного света. При добавлении всего 2% TiO_2 в супергидрофобное покрытие скорость фоторазложения снижается, гидрофобный внешний слой фторированного силана была очень низкой из-за высокой стабильности связей C – F, в то время как пятна фоторазлагались относительно намного быстрее [46].

По сравнению с неорганическими покрытиями, исследование органических прозрачных супергидрофобных покрытий все еще находится на начальной стадии. Структуры органических покрытий гибкие, легкие в изготовлении и сравнительно не хрупкие.

Антибликовые свойства супергидрофобных покрытий могут повысить их прозрачность. Ху и др. сообщили о создании одновременных супергидрофобных и антиотражающих покрытий на основе золь-гель методов с наночастицами кремнезема [47].

Антиотражающие супергидрофобные покрытия на неровных поверхностях солнечных элементов могут повысить производительность солнечных элементов. Артус и др. изготовили пористую антиотражающую супергидрофобную пленку на солнечном элементе,

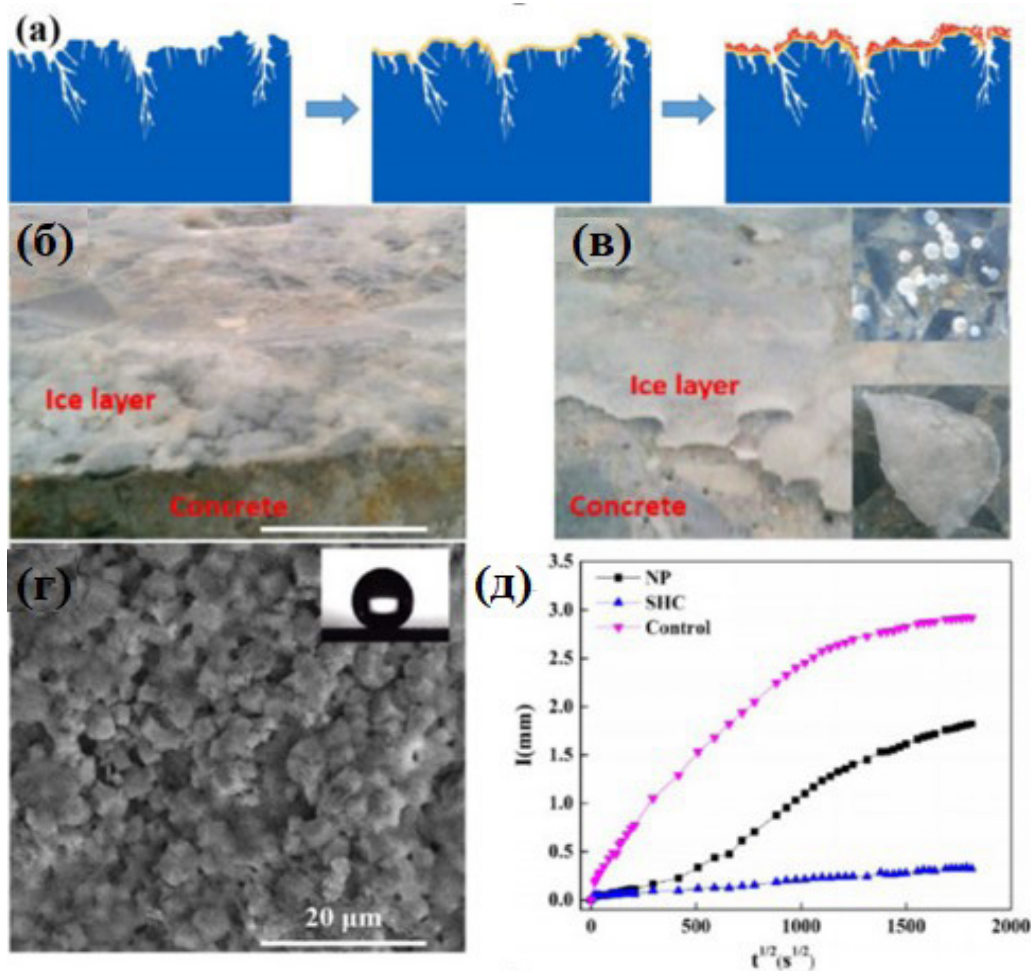


Рис. 17. (а) Схематическое изображение процесса изготовления супергидрофобной бетонной поверхности методом распыления; (б, в) образование льда на непокрытой и покрытой поверхности при -20°C , фигуры на вставке представляют собой образование ледяных шариков в начале обледенения (верхнее изображение) и кусок льда после удаления (нижнее изображение); (г) СЭМ-изображение бетонной поверхности с покрытием, на вставке изображена капля воды на поверхности; (д) результаты водопоглощения различных бетонных поверхностей [40, 44].

которая может эффективно снизить эффективный показатель преломления [48].

Позднее Прево и др. подготовили антиотражающие супергидрофобные покрытия из наночастиц кремнезема. Нанопокртия снижают отражательную способность солнечных элементов примерно на 10% в диапазоне от УФ до ближнего ИК, обеспечивая 17% увеличение выходной мощности. Кроме того, супергидрофобность покрытия может дополнительно снизить водопоглощение и помочь сохранить характеристики антиотражающих свойств. Однако, похоже, существует противоречие между супергидрофобностью и высокой эффективностью солнечного элемента для получения высокой выходной мощности. Шероховатость поверхности должна поддерживать баланс, чтобы поддерживать оба этих

фактора, что показывает, что потенциальное улучшение обоих свойств все еще ожидается [49].

Оптическая прозрачность или антибликовая способность являются важными предпосылками для многих современных оптических устройств, таких как сенсорные экраны, ЖК-дисплеи, OLED, солнечные элементы, окна зданий, очки, оптические зеркала, линзы и оптические окна, для все более требовательных электронных устройств. Подавляющее большинство этих поверхностей дополнительно также требуют водоотталкивающих свойств и самоочистения. Следовательно, существует потенциальная необходимость объединить супергидрофобность с оптической прозрачностью или антиотражающей способностью на той же поверхности. Шероховатость поверх-

ности обычно увеличивает рассеяние света и тем самым снижает прозрачность. Таким образом, ключом к созданию полезных антибликовых или прозрачных супергидрофобных покрытий является оптимизация или регулирование шероховатости поверхности.

Для достижения хорошей прозрачности материала важно, чтобы уровень шероховатости поверхности был ниже, чем длина волны падающего света (350–750 нм). В этом направлении Тешима и др. [50] было изготовлено гидрофобное прозрачное покрытие путем обработки кислородной плазмой с использованием полиэтилентерефталата (ПЭТ). Авторы сначала подготовили нанотекстурированную подложку из ПЭТ с использованием связанной системы радиочастотного разряда, а затем в процессе низкотемпературного химического осаждения из паровой фазы использовали прекурсоры органосилана для снижения поверхностной энергии. Полученная подложка из ПЭТ одновременно дает прозрачность более 90% и угол смачивания составила 150°.

Накадзима и др. [51] получали прозрачные супергидрофобные пленки путем придания шероховатости поверхности в диапазоне от 30 до 100 нм пленкам кремнезема путем сублимации ацетилацетоната алюминия ($\text{Al}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_3$) во время прокалывания и покрытия их гептадекаурадецилтриметоксисилоном. Ходзуми и др. [52] приготовили супергидрофобные прозрачные покрытия с использованием тетраметилсилана (ТМС) и фторалкилсилана (ФАС) со среднеквадратичной шероховатостью 11,3–60,8 нм. Полученные супергидрофобные покрытия дают максимальное значение угла смачивания около 160°. Браво и др. [53] подготовили многослойное прозрачное супергидрофобное покрытие слой за слоем с использованием наночастиц диоксида кремния разного размера. Первый слой состоял из ПГА (поли (гидрохлорид аллиламина)) для создания катионного раствора и ПСН (поли (4-стиролсульфонат натрия)) для создания анионного раствора, который используется для усиления связывания полимера с субстратом. Для основного слоя был использован ПГА для создания катионного раствора и двух наночастиц диоксида кремния разного размера (50 и 20 нм) для анионного раствора.

В качестве верхнего слоя использовались наночастицы кремнезема размером 20 нм для увеличения шероховатости поверхности.

Стекло широко применяется в строительных окнах из-за хорошего света и широкого

обзора. Таким образом, важно поддерживать его прозрачность. Как правило, чтобы сохранить стекло чистым и прозрачным, нужно мыть его в технике «человека-паука», что требует много времени и чревато опасностями. Супергидрофобное покрытие может помочь стеклу сохранять прозрачность благодаря его самоочищающимся свойствам. Шанг и др. методом послойного нанесения на стеклянную подложку было получено прозрачное пористое покрытие из кремнезема [54]. Изображение на рис. 18(а) показывает капли воды на супергидрофобном стекле, что указывает на его прозрачность. Цзо разработал супергидрофобное покрытие на стекле с помощью магнетронного распыления наночастиц ZnO [55]. Как показано на рис. 18(б), это покрытие показало превосходную термическую стабильность даже после обработки при температуре 100 °С. Кроме того, он показал свои отличные самоочищающиеся свойства, которые можно увидеть на рис. 18(в). Саксена и Париа сначала создали фрактальные узоры на стекле, а затем погрузили его в раствор наночастиц ПТФЭ, чтобы сформировать супергидрофобное покрытие [56]. Как показано на рисунке 18 г, капля воды на стекле с покрытием из ПТФЭ имела сферическую форму, демонстрируя при этом свойства смачивания на простом стекле. Кроме того, стекло с покрытием показало низкую адгезию, что видно на рис. 18 д. Лин и др. создавали прозрачное стекло с помощью сверхбыстрой лазерной техники [57]. Как показано на рис. 18(е, ж) свежеприготовленное стекло показало сверхпрозрачность, а также гидрофобность; прозрачность более 92% в видимом свете. При увеличении времени экспозиции стекло все еще показывало большую угол смачивания и низкую угол скольжения, что показано на рис. 18(з), что указывает на сенсационную стабильность.

Снижение гидравлического сопротивления

Снижение гидравлического сопротивления супергидрофобной поверхности в основном связано с водоотталкивающими свойствами поверхности, что резко снижает взаимодействие на границе раздела твердое тело/вода и создает тонкий слой воздуха для установления нового граничного условия воздух / вода [59]. Watanabe и др. были одними из первых, кто сообщил о явлении уменьшения сопротив-

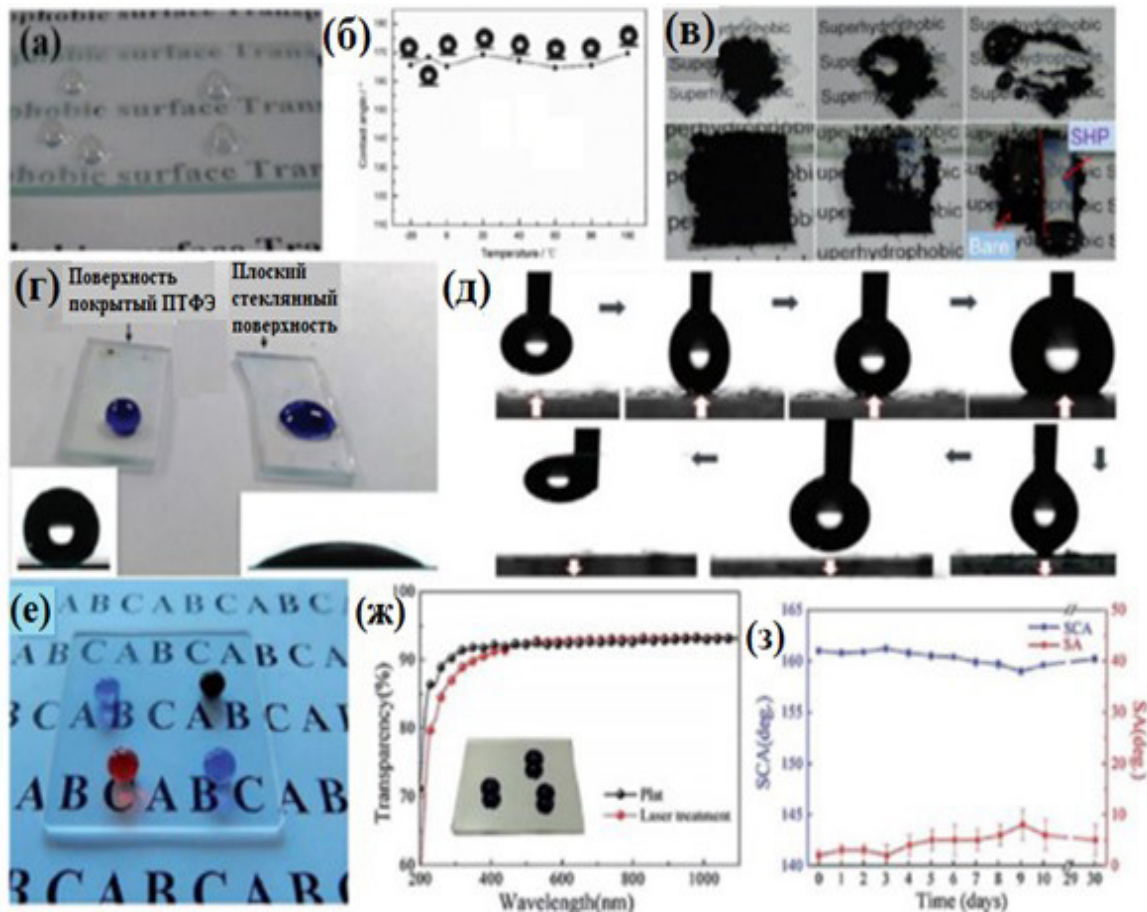


Рис. 18. (а) Капли воды на супергидрофобном стекле; (б) угол смачивания стекла после обработки при различных температурах; (с) самоочищающееся свойство супергидрофобного стекла; (д) капли воды на стеклах с покрытием из ПТФЭ и без покрытия; (е) процесс испытания подготовленной поверхности на адгезию; (е) капли воды на сконструированном супергидрофобном стекле, лежащие на бумаге; (ж) прозрачность оптимально спроектированной поверхности в видимом свете; (з) угол смачивания и углы скольжения супергидрофобной поверхности стекла при разном времени экспонирования [54-57].

ления ламинарного потока супергидрофобных покрытий для ньютоновских жидкостей [60]. Позже эксперименты Кима также показали значительное снижение сопротивления потоку жидкости на инженерных поверхностях в супергидрофобные структуры. Недавно был описан механизм и экспериментальные детали снижения гидравлического сопротивления супергидрофобных покрытий в ламинарном потоке [61]. Например, Оу и др. [62, 63] предположили, что супергидрофобная поверхность приводит к снижению падения давления более чем на 40% и кажущейся длине скольжения, превышающей 20 мм. Также есть некоторые другие модели, изображающие механические детали смачивания и потока на границе раздела между супергидрофобными поверхностями и водой, чтобы проиллюстрировать явление уменьшения сопротивления [64, 65]. Кроме того, теоретически предска-

но, что супергидрофобное покрытие может не только уменьшить гидравлическое сопротивление ламинарного потока, согласно прогнозу Фукага [66], он также может стать эффективным для уменьшения сопротивления турбулентному потоку.

Применение в батарейках и в топливных элементах

Внедрение супергидрофобных материалов в аккумуляторную систему пролило свет на решение проблем, связанных с их продолжительностью и эффективностью. Лифтон и др. разработали новую архитектуру батареи, основанную на супергидрофобных наноструктурированных материалах [67]. Оба электрода батареи сформированы на кремниевых материалах, модифицированных супер-

гидрофобными покрытиями, которые могут эффективно отделять жидкий электролит от материалов активных электродов для предотвращения протекания реакции. Таким образом, срок годности аккумулятора можно продлить. Когда батарея активируется для выработки энергии, явление электросмачивания изменяет смачивание жидкого электролита на супергидрофобных электродах, заставляя их проникать в электрод и инициировать реакцию батареи. Явление электросмачивания можно определить как изменение краевого угла твердого электролита из-за приложенной разности потенциалов между твердым телом и электролитом.

В системах топливных элементов супергидрофобные ориентированные углеродные нанотрубки в качестве носителей катодного катализатора, загруженные наночастицами Pt (30% масс.), могут повысить эффективность топливного элемента. Супергидрофобность углеродных нанотрубок может способствовать удалению воды с электрода за счет отталкивания воды, которая образуется во время электродной реакции, тем самым улучшая массоперенос в системе топливных элементов [68].

Супергидрофобная диатомитовая земля

Кизельгур содержит микроскопические остатки скелета класса фитопланктона, известного как диатомовые водоросли. Уникальная особенность диатомовых водорослей в том, что их скелет состоит из гидратированного диоксида кремния. Диатомитовая земля - это природный материал на основе диоксида кремния, который легко добывается во всем мире. Он имеет микро- и нанопористость, а также нано-шероховатость, которая в зависимости от химического состава поверхности значительно увеличивает водопоглощение или водоотталкивающие свойства. Поскольку его естественная поверхность является супергидрофильной. Но, если диатомитовую землю обрабатывают гидрофобным силаном, он становится супергидрофобным из-за его гидрофобной химии поверхности и эффект усиления его текстуры и нанопористости. Этот супергидрофобный нанопористый порошок называется супергидрофобной диатомитовой землей. Поверхность такой диатомитовой земли имеет типичный угол контакта от 160° до 170°, но может достигать 175° [69].

Такие супергидрофобные покрытия могут значительно уменьшить или даже устранить многие эффекты ледяных штормов и обледенения самолетов. Супергидрофобные покрытия могут уменьшить или устранить биообрастание корпусов судов, причалов, систем водозабора электростанций и других поверхностей, подверженных биообрастанию, включая ракушек и мидий зебры [69].

Супергидрофобный текстиль

Супергидрофобный текстиль не только требует суперводоотталкивающих свойств, но также должен быть биосовместимым, нетоксичным и удобным. Одной из попыток изготовления супергидрофобных тканей является создание тканей с низкой поверхностной энергией и микро/наноструктур. Например, Ма и др. изготовили волокна блок-сополимера поли (капролактон) и поли (блок-стирол-диметилсилоксан) методом электроспиннинга [70, 71]. Смачивающие свойства поверхности ткани можно легко регулировать диаметром волокон. Из-за их превосходных водоотталкивающих свойств и малого угла наклона капель воды эти волокна являются хорошими кандидатами для ткачества текстильных изделий с супергидрофобными и самоочищающимися свойствами. Еще одна попытка изготовить супергидрофобный текстиль состоит в модификации традиционных волокон, чтобы сделать их супергидрофобными. Методы модификации поверхности текстиля в основном включают золь-гель методы для изготовления фторированного неорганически-органического покрытия на текстиле из нейлона [72] прививку поли (акриловой кислоты) (ПАК) на поверхность нейлонового полимера с последующей прививкой фторамина или алкиламина к цепям ПАК. Супергидрофобные поверхности на основе хлопка могут быть изготовлены в основном путем модификации иерархических наноразмерных структур, которые могут придать хлопку супергидрофобность [73].

Оксид графена (ОГ), имеющий как гидрофильные, так и гидрофобные функциональные группы, был успешно привит на поверхности хлопкового волокна при загрузке с использованием 5-40% ОГ в водных растворах.

На рисунке 19 приведены изменение краевого угла смачивания воды по мере увеличения нагрузки оксида графита на поверхности ткани [74].

В таблице 2 показан статический угол смачивания водой хлопчатобумажной ткани, покрытой оксидом графита, при различных содержаниях оксида графита и при разной степени отслаивания оксида графита.

Максимальная загрузка оксида графита, который состоит из многих слоев ГО на хлопчатобумажной ткани, где угол смачивания составляет 143° .

В зависимости от покрытия площади поверхности хлопкового волокна листами оксида графена получают разную степень гидрофобности. Хлопковая ткань может иметь гидрофобную поверхность, покрывая ее оксидом графена.

Гидрофобность была достигнута за счет снижения межфазной энергии поверхности волокна за счет гидрофобных доменов, при-

существующих на листах оксида графена. Водные каналы, созданные из-за нанесения множества слоев листов оксида графена, приводят к тому, что поверхность ткани имеет гидрофобность адгезионного типа. Оксид графена, имеющий свойство распределения гидрофильных и гидрофобных доменов от края к центру, которое придает ему амфифильный характер, может использоваться в качестве покрытия на хлопчатобумажных тканях для получения гидрофобности при сохранении хорошей адгезии. Амфифильное свойство оксида графена имеет общий эффект уменьшения межфазной энергии поверхности хлопчатобумажной ткани с покрытием, что обеспечивает гидрофобность адгезивного типа [74].

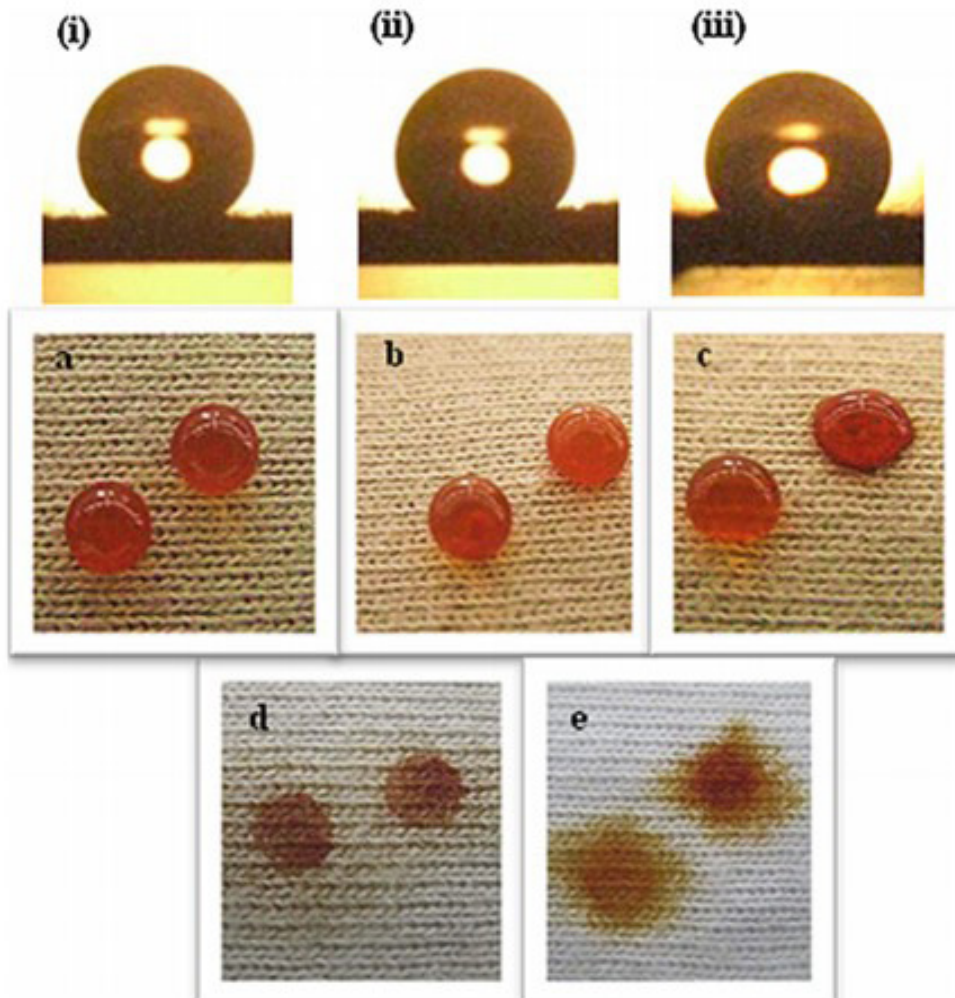


Рис. 19. Капли воды объемом 10 мл, сидящие на хлопчатобумажной ткани [74]: (а) ГО – хлопок O₁, (б) ГО – хлопок O₂, (с) ГО – хлопок O₃

Цветные капли воды на (а) хлопке с покрытием ГО

O₁ (б) хлопок с покрытием ГО; O₂ (с) хлопок с покрытием ГО; O₃ (d) хлопок с покрытием ГО; O₄ (е) нормальный хлопок

Таблица 2

Результаты измерения статического угла смачивания водой хлопчатобумажной ткани, покрытой оксидом графита, при различных содержаниях оксида графита и при разной степени отслаивания оксида графита (где, ГО – хлопок O₁, ГО – хлопок O₂, (с) ГО – хлопок O₃ и т.п.)

| Образец | Статический угол контакта воды |
|----------------|--------------------------------|
| O ₁ | 143±2° |
| O ₂ | 135±1° |
| O ₃ | 121±2° |
| O ₄ | 60±2° |
| Хлопок | 0° |

Заключение

В данном обзоре приведены основная природа и характеристики гидрофобного и супергидрофобного поведения, и описаны области применения созданных супергидрофобных покрытий. В работе изложены результаты по получению гидрофобных наноструктур в пламени; созданию супергидрофобного песка на основе сажи; антиобледенение; прозрачные и антибликовые супергидрофобные покрытия; снижение гидравлического сопротивления; внедрение супергидрофобных материалов в аккумуляторную систему; супергидрофобная диатомитовая земля; супергидрофобный текстиль.

Супергидрофобные покрытия используются во многих сферах деятельности людей: в химии, физике, строительстве, материаловедении, машиностроении, электронике и т.д. Успехи нанотехнологии еще раз показывают, какие выдающиеся открытия и технические новшества рождаются на стыке наук. Такие покрытия, например, могут обеспечивать полезную стойкость к засорению, обледенению, смазыванию, коррозии и обладают способностью отделять воду от масла. Таким образом, разработка и создание самоочищающихся материалов представляет значительный интерес для исследователей во всем мире.

Список литературы

- efect: influence of double roughness structures and slender pillars. *Langmuir* 20(19):8209–8213.
- [4]. Pozzato A, Zilio SD, Fois G, Vendramin D, Mistura G, Belotti M et al (2006) Superhydrophobic surfaces fabricated by nanoimprint lithography. *Microelectron Eng* 83(4–9):884–888.
- [5]. Sethi SK, Manik G (2018) Recent progress in super hydrophobic/hydrophilic self-cleaning surfaces for various industrial applications: a review. *Poly Plast Technol Eng* 57(18):1932–1952.
- [6]. Chermahini SH, Ostad-Ali-Askari K, Eslamian S, Singh VP (2018) Recent progress in self-cleaning materials with diferent suitable applications. *Am J Eng Appl Sci* 11(2):560–573.
- [7]. Fortin G (2017) Super-Hydrophobic coatings as a part of the aircraft ice protection system. SAE International. <https://saemobilus.sae.org/content/2017-01-2139/>. Accessed 26 July 2020.
- [8]. Lin Y, Chen H, Wang G, Liu A (2018) Recent progress in preparation and anti-icing applications of superhydrophobic coatings. *Coatings* 8(6):208–241.
- [9]. Гуляев И.П., Кузьмин В.И., Ковалев О.Б. Высокогидрофобные керамические покрытия, получаемые методом плазменного напыления порошковых материалов. *Теплофизика и аэромеханика*, 2020, Т.27, №4.
- [10]. Duncan Merchan Breuer, Ethan Murphy, Benjamin Berka, Elena Echeverria, · David N. McIlroy, · Wilson Merchan Merchan. Biodiesel fames as a unique pyrolyzing carbon source for the synthesis of hydrophobic carbon flms. *Carbon Letters*. – P.1-16. <https://doi.org/10.1007/s42823-020-00168-4>.
- [11]. Фролов Ю. Г., Курс коллоидной химии. -
- [1]. Wenzel RN (1936) Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind Eng Chem* 28(8):988–994.
- [2]. Cassie ABD, Baxter S (1944) Wettability of porous surfaces. *Trans Faraday Soc* 40:546–551.
- [3]. Patankar NA (2004) Mimicking the lotus

- М., 1982.
- [12]. Комиссаров А. В. В статье использованы материалы из портала «NANO NEWS NET». – <http://www.nanonewsnet.ru>.
- [13]. Hsieh C.T., Chen J.M., Kuo R.R. Influence roughness on water and oil-repellent surfaces coated with nanoparticles // *Applied Surface Science*. - 2005. - Vol. 240. - P.318-326.
- [14]. <http://archive.fo/iZoi2>
- [15]. Homann K. H., Wagner H. G. Some aspects of soot formation // *Dynamics of Exothermicity* / ed. J. Ray Bawen. *Combust. Sc. Technol. Book Series* // Carbon and Breach Publishers. - 1996. - Vol. 2. - P.151-184.
- [16]. Мансуров З.А. Сажеобразование в процессах горения (обзор) // *Физика горения и взрыва*. – 2005. - Т. 41, № 6. - С.137-156.
- [17]. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon // *Mater Sci Eng R*, - 2002. Vol.37(4-6), - P.129-281.
- [18]. Naha S., Sen S., Puri I.K. Flame synthesis of superhydrophobic amorphous carbon surfaces // *Carbon*. - 2007. - Vol.45 - P.1696-1716.
- [19]. Levesque A., Binh V.T., Semet V., Guillot D., Fillit R.Y., Brookes M.D., et al. Mono disperse carbon nanoparticles in a foam-like arrangement: a new carbon nano-compound for cold cathodes // *Thin Solid Films*. - 2004. - № 464-465. - P.308-314.
- [20]. Sen S., Puri I.K. Flame synthesis of carbon nanofibers and nanofiber composites containing encapsulated metal particles // *Nanotechnology*. - 2004. - №15(3), - P.264-268.
- [21]. Zhou Y., Wang B., Song X., Li E., Li G., Zhao S., Yan H. Control over the wettability of amorphous carbon films in a large range from hydrophilicity to super-hydrophobicity // *Applied Surface Science*. - 2006. - № 253(5), - P.2690-2694.
- [22]. Mazumdera S., Ghoshb S., Puri I.K. Nonpremixed Flame Synthesis of Hydrophobic Carbon Nanostructured Surfaces // *Virginia 24061*. - USA. - 14 p.
- [23]. Smagulova G.T., Nazhipkyzy M., Lesbayev B.T., Bakkar A.E., Prikhod'ko N.G., Mansurov Z.A. Influence of the Type of Catalysts on the Formation of a Superhydrophobic Carbon Nanomaterial in Hydrocarbon Flames. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. - 2018. - Vol. 91, № 3. - P.774-783.
- [24]. Zhou Y., Wang B., Song X., Li E., Li G., Zhao S., Yan H. Control over the wettability of amorphous carbon films in a large range from hydrophilicity to super-hydrophobicity // *Applied Surface Science*. - 2006. - № 253(5), - P.2690-2694.
- [25]. Chao-Hua Xue, Shun-Tian Jia, Hong-Zheng Chen and Mang Wang. Superhydrophobic cotton fabrics prepared by sol-gel coating of TiO₂ and surface hydrophobization // *Sci. Technol. Adv. Mater*. 9. – 2008. 035001 (5pp). – P.1-5.
- [26]. Нажипкызы М., Мансуров З.А., Пури И.К., Лесбаев Б.Т., Шабанова Т.А., Цыганов И.А. Получение супергидрофобной углеродной поверхности при горении пропана // *Нефть и газ*. - 2010. - №5. – С. 27-33.
- [27]. Mansurov Z.A., Nazhipkyzy M., Lesbayev B.T., Prikhodko N.G., Auyelkankyzy M., Puri I.K. (2012) Synthesis of superhydrophobic carbon surface during combustion propane. *Eurasian Chem Tech J* 14(1):19-23.
- [28]. Nazhipkyzy M., Lesbayev B.T., Mansurov Z.A., Arapova A.K., Baidaulova D.K., Solovyova M.G., Prikhodko N.G. Creation based on superhydrophobic soot waterproofing materials obtained in flames. *Advanced Materials Research*. – 2012. - Vol. 535-537. – P.1437-1440.
- [29]. Нажипкызы М., Турганбай А. Получение гидрофобных покрытий. *Химия и химическая технология. Современные проблемы: сборник обзорных статей ученых-химиков/под общей ред. проф. З.А. Мансурова*. – Алматы: Қазақ университеті, 2020. – Вып. 6. – 335 с. ISBN 978-601-04-3622-0.
- [30]. B. Lesbayev, M. Nazhipkyzy, N. Prikhodko, M. Solovyova, G. Smagulova, G. Turesheva, M. Auyelkankyzy, T. Mashan, Z. Mansurov, Hydrophobic Sand on the Basis of Superhydrophobic Soot Synthesized in the Flame, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2 (2014) 63.
- [31]. M. Nazhipkyzy, Z.A. Mansurov, T.S. Temirgaliyeva. Superhydrophobic sand on the basis of nanosoot obtained by combustion of waste oil, *Int. J. Chem. Chem. Eng. Sys.*, 2 (2017) 7-11.
- [32]. Elham Mosayebi¹, Saeid Azizian, Byeong Jun Cha, Tae Gyun Woo, Young Dok Kim. Fabrication of highly hydrophobic sand@soot with core-shell structure and large scale production possibility for oil/water separation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2020. – P.1-30.
- [33]. Nazhipkyzy M., Mansurov Z.A., Amirfazli

- A.A., Esbosin A., Temirgaliyeva T.S., Aliyev E.T., and Prikhodko N.G. Influence of superhydrophobic properties on deicing. *Journal of engineering physics and thermophysics.* – V. 89. № 6. – 2016. – P.1498-1503.
- [34].Antonini C., Innocenti M., Horn T., Marengo M., Amirfazli A. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems. *Cold Regions Science and Technology* 67. – 2011. – P.58–67. doi:10.1016/j.coldregions. 2011.02.006.
- [35].Tomabechi T., Takakura M., Ito T. Influence of the Surface Roughness of Roofing Materials on Snow Sliding. *J. Snow Eng. Japan* 1996, 12(3), 205–211.
- [36].Tripathi D., Jones F. R. Single Fibre Fragmentation Test for Assessing Adhesion in Fibre Reinforced Composites. *J. Mater. Sci.* 1998, 33(1), 1–16.
- [37].Kako T., Nakajima A., Irie H., Kato Z., Uematsu K., Watanabe T., Hashimoto K. Adhesion and Sliding of Wet Snow on a Super-Hydrophobic Surface with Hydrophilic Channels. *J. Mater. Sci.* 2004, 39(2), 547–555.
- [38].Cao L., Jones A. K., Sikka V. K., Wu J., Gao D. Anti-Icing Superhydrophobic Coatings. *Langmuir* 2009, 25(21), 12444–12448.
- [39].Flores-Vivian I., Hejazi V., Kozhukhova M.I., Nosonovsky M., Sobolev K. Self-Assembling particle-siloxane coatings for superhydrophobic concrete. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2013, 5, 13284–13294.
- [40].Ramachandran R., Kozhukhova M., Sobolev K., Nosonovsky M. Anti-Icing superhydrophobic surfaces: Controlling entropic molecular interactions to design novel icephobic concrete. *Entropy* 2016, 18, 132.
- [41].Zhao Y., Liu Y., Liu Q., Guo W., Yang L., Ge D. Icephobicity studies of superhydrophobic coatings on concrete via spray method. *Mater. Lett.* 2018, 233, 263–266.
- [42].Esmeryan K.D., Bressler A.H., Castano C.E., Fergusson C.P., Mohammadi R. Rational strategy for the atmospheric icing prevention based on chemically functionalized carbon soot coatings. *Appl. Surf. Sci.* 2016, 390, 452–460.
- [43].Esmeryan K.D., Castano C.E., Mohammadi R., Lazarov Y., Radeva E.I. Delayed condensation and frost formation on superhydrophobic carbon soot coatings by controlling the presence of hydrophilic active sites. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2018, 51, 055302.
- [44].She W., Wang X., Miao C. Biomimetic superhydrophobic surface of concrete: Topographic and chemical modification assembly by direct spray. *Constr. Build. Mater.* 2018, 181, 347–357.
- [45].A. Nakajima, K. Abe, K. Hashimoto and T. Watanabe, *Thin Solid Films*, 2000, 376, 140.
- [46].A. Nakajima, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 2004, 112, 533.
- [47].Y. Xu, W. H. Fan, Z. H. Li, D. Wu and Y. H. Sun, *Appl. Opt.*, 2003, 42, 108.
- [48].G. R. J. Artus, S. Jung, J. Zimmermann, H. Gautschi, K. Marquardt and S. Seeger, *Adv. Mater.*, 2006, 18, 2758.
- [49].B. G. Prevo, E. W. Hon and O. D. Velev, *J. Mater. Chem.*, 2007, 17, 791.
- [50].Teshima K., Sugimura H., Inoue Y., Takai O., Takano A. Transparent Ultra Water-Repellent Poly (Ethylene Terephthalate) Substrates Fabricated by Oxygen Plasma Treatment and Subsequent Hydrophobic Coating. *Appl. Surf. Sci.* 2005, 244(1–4), 619–622.
- [51].Nakajima A., Fujishima A., Hashimoto K., Watanabe T. Preparation of Transparent Superhydrophobic Boehmite and Silica Films by Sublimation of Aluminum Acetylacetonate. *Adv. Mater.* 1999, 11(16), 1365–1368.
- [52].Hozumi A., Takai O. Preparation of Ultra Water Repellent Films by Microwave Plasma-Enhanced CVD. *Thin Solid Films* 1997, 303(1–2), 222–225.
- [53].Bravo J., Zhai L., Wu Z., Cohen R.E., Rubner M.F. Transparent Superhydrophobic Films Based on Silica Nanoparticles. *Langmuir* 2007, 23(13), 7293–7298.
- [54].Shang Q., Zhou Y. Fabrication of transparent superhydrophobic porous silica coating for self-cleaning and anti-fogging. *Ceram. Int.* 2016, 42, 8706–8712.
- [55].Zuo Z., Gao J., Liao R., Zhao X., Yuan Y. A novel and facile way to fabricate transparent superhydrophobic film on glass with self-cleaning and stability. *Mater. Lett.* 2019, 239, 48–51.
- [56].Saxena N., Paria S. Fractal pattern mediated superhydrophobic glass and metallic surfaces using PTFE particles: A generalized simple approach. *New. J. Chem.* 2019, 43, 8075–8084.
- [57].Lin Y., Han J., Cai M., Liu W., Luo X., Zhang H., Zhong M. Durable and robust transparent superhydrophobic glass surfaces fabricated by a femtosecond laser with exceptional water repellency and thermostability. *J. Mater. Chem. A* 2018, 6, 9049–9056.
- [58].Tengfei Xiang, Zhong Lv, Feifei Wei, Jian

- Liu, Wei Dong, Cheng Li, Yingxuan Zhao and Depeng Chen. Superhydrophobic Civil Engineering Materials: A Review from Recent Developments. *Coatings*. MDPI. 2019, 9, 753; doi:10.3390/coatings9110753.
- [59]. R. Truesdell, A. Mammoli, P. Vorobieff, F. van Swol and C. J. Brinker, *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97, 044504.
- [60]. K. Watanabe, Yanuar and H. Udagawa, *J. Fluid Mech.*, 1999, 381, 225.
- [61]. J. Kim, C.-J. Kim, *Proceedings of the IEEE Conference MEMS, Las Vegas, NV, IEEE, New York*, 2002, 479.
- [62]. J. Ou, B. Perot and J. P. Rothstein, *Phys. Fluids*, 2004, 16, 4635.
- [63]. J. Ou and J. P. Rothstein, *Phys. Fluids*, 2005, 17, 103606. 136 J. Davies, D. Maynes, B. W. Webb and B. Woolford, *Phys. Fluids*, 2006, 18, 087110
- [64]. J. Davies, D. Maynes, B. W. Webb and B. Woolford, *Phys. Fluids*, 2006, 18, 087110.
- [65]. C. H. Choi, U. Ulmanella, J. Kim, C.-M. Ho and C. J. Kim, *Phys. Fluids*, 2006, 18, 087105.
- [66]. K. Fukagata, N. Kasagi and P. Koumoutsakos. A theoretical prediction of friction drag reduction in turbulent flow by superhydrophobic surfaces. *Phys. Fluids*, 2006, 18, 051703.
- [67]. A. Lifton, S. Simon and R. E. Frahm, *AT&T Bell Lab. Tech. J.*, 2005, 10, 81.
- [68]. W. Li, X. Wang, Z. Chen, M. Waje and Y. Yan, *Langmuir*, 2005, 21, 9386
- [69]. Zhang X., et al. Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application *J. Mater. Chem.* 18. - 2008. - P.621-633.
- [70]. M. Ma, R. M. Hill, J. L. Lowery, S. V. Fridrikh and G. C. Rutledge, *Langmuir*, 2005, 21, 5549.
- [71]. M. Ma, Y. Mao, M. Gupta, K. K. Gleason and G. C. Rutledge, *Macromolecules*, 2005, 38, 9742.
- [72]. K. Satoh and H. Nakazumi, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 2003, 27, 327.
- [73]. S. Michielsen and H. J. Lee, *Langmuir*, 2007, 23, 6004.
- [74]. Nadeeka D. Tissera, Ruchira N. Wijesena, J. Ranganana Perera, K.M. Nalin de Silva, Gehan A.J. Amaratunge Hydrophobic cotton textile surfaces using an amphiphilic graphene oxide (GO) coating. *Applied Surface Science*. Vol.324, 2015, P. 455-463.

Super hydrophobic materials and coatings: overview

M. Nazhipkyzy^{1,2}, Z.A. Mansurov^{1,2}

¹Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

²Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbay batyr st., Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This article describes the latest advances in superhydrophobic surfaces. The main idea of obtaining superhydrophobic surfaces is to create irregularities in the micronanosurface with a change in the chemical composition to increase the surface tension of water on the contact surface. The proposed review consists of eight sections, such as: obtaining hydrophobic nanostructures in a flame; obtaining hydrophobic sand; anti-icing; transparent and anti-reflective superhydrophobic coatings; decrease in hydraulic resistance; the use of batteries and fuel cells; superhydrophobic diatomaceous earth; superhydrophobic textiles. The growing interest in self-cleaning coatings is due to their low maintenance cost, high durability, and enormous application potential. Such coatings, for example, can provide useful resistance to clogging, icing, smudging, corrosion and have the ability to separate water from oil. Superhydrophobic surfaces attract the attention of scientists and engineers due to their exceptional water repellency. Consequently, the development and creation of self-cleaning materials is of considerable interest to researchers around the world.

Супергидрофобтық материалдар және жабыну: шолу

М. Нажипкызы^{1,2}, З. А. Мансуров^{1,2}

¹аль-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан

АҢДАТПА

Бұл мақалада аса гидрофобты беттердің соңғы жетістіктері сипатталған. Аса гидрофобты беттерді алудың негізгі идеясы - байланыс бетіндегі судың беттік керілуін жоғарылату үшін химиялық құрамы өзгерген кезде

микронано бетінде кедір-бұдырлықты жасау. Ұсынылып отырған шолу сегіз бөлімнен тұрады, мысалы: жалында гидрофобты наноқұрылымдарды алу; гидрофобты құм алу; мұздануға қарсы; мөлдір және шағылысқа қарсы аса гидрофобты жабындар; гидравликалық қарсылықтың төмендеуі; батареялар мен отын элементтерінде пайдалану; аса гидрофобты диатомды жер; аса гидрофобты тоқыма. Өздігінен тазаланатын жабындарға деген қызығушылықтың артуы олардың техникалық қызмет көрсету құнының төмендігіне, ұзақ мерзімділігіне және қолданудың

үлкен әлеуетіне байланысты. Мұндай жабындар, мысалы, ластануға, мұздануға, коррозияға пайдалы төзімділікті қамтамасыз ете алады және суды майдан бөліп алу мүмкіндігіне ие. Аса гидрофобты беттер өзінің ерекше суды тепкіш қасиеттерімен ғалымдар мен инженерлердің назарын аударуда. Демек, өзін-өзі тазартатын материалдарды әзірлеу және құру бүкіл әлем зерттеушілерін айтарлықтай қызықтырады.