



# ГОРЕНИЕ И ПЛАЗМОХИМИЯ

Том 15

1

2017

---

# **ГОРЕНИЕ И ПЛАЗМОХИМИЯ**

## **ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ НАУЧНОГО СОВЕТА ПО ГОРЕНИЮ И ВЗРЫВУ ПРИ ПРЕЗИДИУМЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК И ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ ГОРЕНИЯ МОН РК**

В журнале публикуются работы по фундаментальным и прикладным аспектам  
горения и плазмохимии

### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор З.А. МАНСУРОВ

Зам. главного редактора В.Е. МЕССЕРЛЕ

Ответственный секретарь С.Х. АКНАЗАРОВ

### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ**

В.В.Азатян (Россия), И.Г.Ассовский (Россия), Е.Т.Алиев (Казахстан), Р.Г. Абдулкаримова (Казахстан), В.С.Бабкин (Россия), И.П.Боровинская (Россия), В.А.Бородуля (Белоруссия), В.И.Быков (Россия), Р.Бейсенов (Казахстан), А.А.Васильев (Россия), П.А.Власов (Россия), В.В.Голуб (Россия), С.А.Жданок (Белоруссия), В.Е.Зарко (Россия), З.Р.Исмагилов (Россия), А.Ж.Калтаев (Казахстан), Е.И.Карпенко (Россия), Т.А.Кетегенов (Казахстан), Б.Я.Колесников (Казахстан), О.П.Коробейничев (Россия), А.В.Крестинин (Россия), Г.И.Ксандопуло (Казахстан), Ю.А.Лебедев (Россия), В.А.Левин (Россия), Ю.М.Максимов (Россия), А.А.Мантасян (Армения), Н.Н.Мофа (Казахстан), А.С.Мукасян (США), Г.Ш.Ониашвили (Грузия), Н.Г.Приходько (Казахстан), А.В.Савельев (Россия), В.К.Смоляков (Россия), А.Б.Устименко (Казахстан), Б.Урмашев (Казахстан), С.М. Фролов (Россия), С.М.Фоменко (Казахстан), В.И.Юхвид (Россия)

---

Научное издание

### **ГОРЕНИЕ И ПЛАЗМОХИМИЯ**

Компьютерный набор и верстка О.Ю.Головченко

**ИБ № 9888**

Подписано в печать 21.01.2016. Формат 60х84 1/8. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Объем 7,0 п.л. Заказ № 3269. Тираж 500 экз.

Издательство «Қазақ университеті»

Казахского национального университета им. аль-Фараби.

050038 г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71, КазНУ.

Отпечатано в типографии издательства «Қазақ университеті»



# ГОРЕНИЕ И ПЛАЗМОХИМИЯ

Том 15

1

2017

---

*Журнал зарегистрирован в Агентстве Республики Казахстан по связи  
и информации*

*Свидетельство о постановке на учет периодического печатного  
издания № 14299-Ж от 18.04.2014 г.*

*Издается с 2003 г.*

*Решением Коллегии Комитета по надзору и аттестации в сфере  
образования и науки МОН РК (Приказ № 376 на основании протокола  
№ 1 от 19.04.2016) научный журнал «Горение и плазмохимия» включен  
в перечень изданий для публикации основных научных результатов  
диссертаций по химическим и техническим наукам*

Компьютерный набор и верстка  
О.Ю. Головченко

**Горение и плазмохимия.** – Алматы: «Қазақ университеті», 2017. – 81 с.

Адрес редакции:

050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172,

Институт проблем горения

<http://bpc.ect-journal.kz/>

Тел. +7 (727) 292-43-46, 267-51-41

Факс: +7 (727) 292-58-11

E-mail: [sestager@mail.ru](mailto:sestager@mail.ru)

УДК 543.272.73, 661.666.4.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕДЯНЫХ ПОКРОВОВ И НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ПО СОЗДАНИЮ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Түрғанбай А., Нажипқызы М., Есбосын А., Султахан Ш., Лесбаев Б.Т., Исанбекова А.Т.

<sup>1</sup>«Институт проблем горения» 480012, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>КазНУ им. аль-Фараби

E-mail: anar.turganbaeva@mail.ru

### Аннотация

В последние годы исследователи проявляют огромный интерес к исследованию свойств гидрофобных и супергидрофобных наноструктурированных поверхностей, а также к разработке методов их изготовления. Проблема создания антиобледенительных покрытий не теряет своей актуальности, работы над усовершенствованием этих материалов продолжаются и в данной статье. В работе проводилось исследование процесса образования сажи обладающей повышенным гидрофобным свойством при горении углеводородов в электрическом поле и второе процесс получения наноразмерного порошка диоксида кремния методом сжигания силиконовых отходов. Также разработана методика по созданию антиобледенительного покрытия на основе полученного наноразмерного порошка диоксида кремния.

**Ключевые слова:** горение, сажа, супергидрофобность, антиобледенительные покрытия, наноматериалы

### Введение

Поверхность материала всегда обладает избытком энергии, природа которой связана с значительно большим содержанием свободных связей поверхностных атомов, чем у атомов в объеме. Капля воды на поверхности любого материала, подвергается действию двух сил, это поверхностное натяжение, которое стремится придать капле круглую форму, т.е. ми-

нимизировать площадь поверхности капли, и сила земного притяжения, которая стремится расплющить форму капли. Когда капля воды находится на гладкой и химически гомогенной поверхности, энергия поверхности раздела твердое-жидкость меньше, чем энергия поверхности раздела твердое-воздух, капля воды растекается по поверхности. В случае когда энергия поверхности раздела твердое-жидкость выше энергии поверхности раздела твердое-воздух, капля воды стремится принять округлую форму. Изменение угла контакта характеризуется углом Янга (рис. 1).

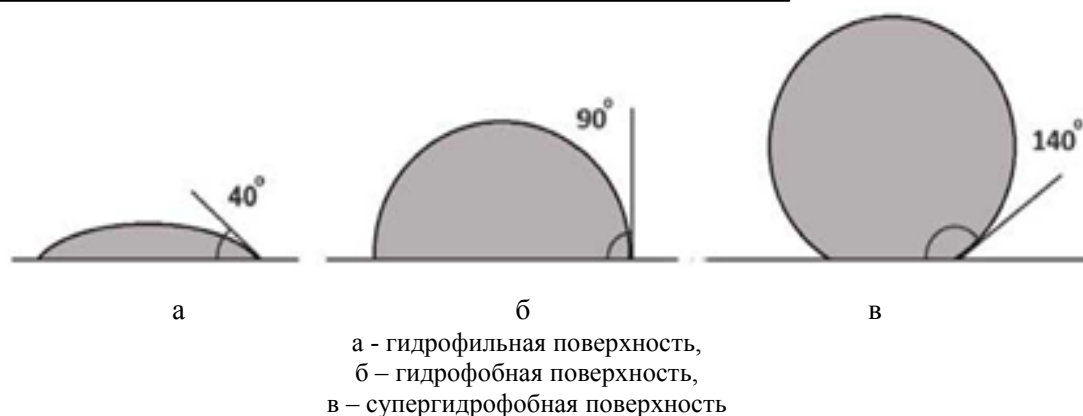


Рис. 1 - Изменение угла контакта характеризующееся углом Янга

Поверхности с углом контакта меньше  $90^\circ$  классифицируются как гидрофильные и с углом контакта более  $90^\circ$  как гидрофобные. Если угол контакта превышает  $140^\circ$ , то такая

поверхность классифицируется как супергидрофобная [1].

Исследования, проводимые по изучению гидрофобных свойств поверхностей пока-

зывают, что для придания поверхности супергидрофобных свойств недостаточно подбора химического состава, а требуется комбинирование гидрофобного химического состава и рельефное текстурирование поверхности. Исследования по приданию супергидрофобных свойств поверхности путем создания специальных текстурированных структур проводились уже в середине прошлого столетия [2,3]. В этих работах текстурирование поверхности производили методом набрызгивания на поверхность диспергированных парафиновых или фторуглеродных восков. С развитием нано-технологий появилось новые технологии по созданию текстурированных структур в том числе и на наноуровне, это химическое осаждение из паров упорядоченных структур, плазменное травление поверхности, нанесение пленок сублимирующих материалов, электроосаждение и химическое электро-осаждение наночастиц на поверхности, применение темплатных методов для создания шероховатости поверхности и т.д.

На текстурированной поверхности капля воды может оказаться в двух основных конфигурациях. Первая когда капля воды принимает контур твердой поверхности, т.е. происходит смачивание пазов или канавок поверхности. Для описания этого явления, когда вода проникает в пустоты наноструктур и заполняет их, применяется состояние Венцеля [4]. Второе, когда капля воды на поверхности задерживается на верхних частях текстурированной поверхности и захватывает воздух в изолированных впадинах ниже себя описывается состоянием Касси – Бакстера.

Обе модели поведения капли воды на поверхности описывают энергетически равновесные состояния, при этом обычно состояние Венцеля соответствует минимуму глобальной энергии, состояние Касси – Бакстера соответствует минимуму локальной энергии.

При процессе обледенения конденсацией водных капель на ранней стадии процесса на поверхности появляются очень маленькие капельки воды – зародыши, которые с истечением времени увеличиваются в размере, и возникает условие, когда некоторая часть капель находятся в состоянии Венцеля, другая часть в состоянии Касси - Бакстера.

С продолжением процесса конденсации капли сливаются и по истечении большого промежутка времени поверхность полностью покрывается образовавшимися большими кап-

лями воды в состоянии Венцеля. При замерзании водных капель происходит теплообмен через поверхность раздела вода - твердое тело, и происходит зародышеобразование льда и при этом поверхностные нанонеровности или частицы на поверхности интенсифицируют этот процесс. В этом процессе захваченный воздух ниже капли воды может работать как термический барьер и может задерживать и даже предотвратить аккумуляцию и адгезию льда.

Эти выводы показывают, что для предотвращения интенсивного процесса обледенения поверхности недостаточно только гидрофобных свойств поверхности а необходимо проводить дополнительное рельефное текстурирование поверхности.

Исследования ухудшения свойств антиобледенительных покрытий показывают, что свойства ухудшаются с увеличением циклов замерзания и разморозки ледяного покрытия. Это объясняется тем, что выступы шероховатой поверхности врезаются в водяные капли и в процессе замерзания капли происходит механическое расширение, что приводит к повреждениям и ломке структуры шероховатости структуры.

При следующем замерзании капля воды проникает глубже и площадь контакта поверхность-лед увеличивается и как следствие повышается адгезия льда.

Исследования показывают, что покрытия с микро- и наноструктурированной текстурой более эффективны по сопротивлению к процессу образованию ледяных покровов, но не малую роль играет выбор материала покрытия. Замерзшие капли воды в состоянии Касси - Бакстера, имеют слабую адгезию с поверхностью и легко отрываются от поверхности.

И в настоящее время проводится исследования по созданию антиобледенительных покрытий на базе создания супергидрофильных поверхностей с микро- и наноструктурированной поверхностью. Так в работе, созданы полимерные антиобледенительные композиты с наночастицами [5], покрытия на основе фторполимеров [6].

В работах [7,8] изучены свойства фторполимерных покрытий с включением наночастиц отталкивать лед, а также алюминиевых поверхностей после травления с последующей гидрофобизацией монослоем органосилана. Проведенные испытания циклов замерзания-

размерзания лучшие результаты показали на алюминиевой поверхности.

В последние годы исследователи проявляют огромный интерес к исследованию свойств гидрофобных и супергидрофобных наноструктурированных поверхностей. Подобные поверхности широко распространены в природе, например, “эффект лотоса”, когда капли скатываются или легко скользят по супергидрофобной поверхности листьев лотоса [9].

Таким образом проблема создания антиобледенительных покрытий не теряет своей актуальности, работы над усовершенствованием этих материалов продолжают-ся и в данной статье приведены результаты исследований по разработке методов получения наноматериалов обладающих гидрофобным свойством и по созданию на основе полученных наноматериалов антиобледенительных покрытий.

### Экспериментальная часть

Для отработки режимов горения для синтеза наноматериалов в пламени с заранее заданными свойствами, были проведены исследования в двух направлениях. Первое это исследование процесса образования сажи обладающей повышенным гидрофобным свойством при горении углеводородов в электрическом поле и второе процесс получения наноразмерного порошка диоксида кремния методом сжигания силиконовых отходов.

Исследования влияния наложения постоянного электрического поля на процесс образования сажи обладающей гидрофобными свойствами проводились на установке, фотография которой показана на рисунке 2.

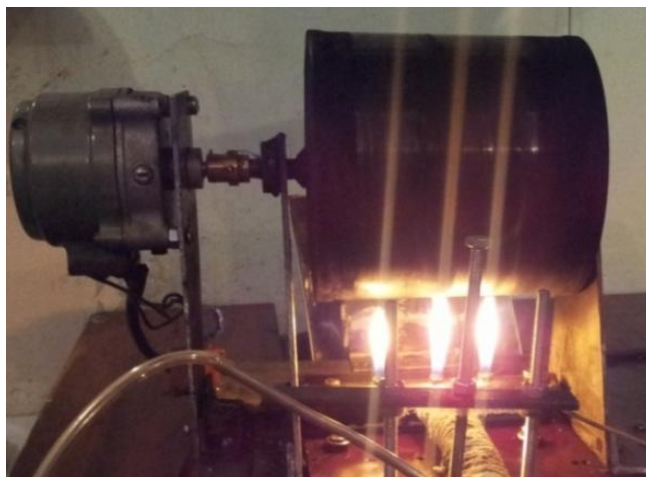


Рис. 2 – Фотография установки для исследования процесса синтеза супергидрофобной сажи с наложением электрического поля

Принцип работы установки основан на осаждении сажевых частиц из пламени на поверхности вращающегося железного цилиндра с автоматическим сбором ее установленным скрепкам в емкость. Для возможности наложения постоянного электрического поля на пламя, цилиндр и горелка изолированы друг от друга. В зависимости от полярности подаваемого напряжения цилиндр и горелка могут выполнять роль анода или катода. Подача напряжения осуществляется от источника БВ-9,0-1,5 работающего в режиме подачи напряжения до 1 кВ. Предусмотрена возможность передвижения горелки по вертикали со свободным ходом в 4 см для изменения расстояния между горелкой и цилиндром.

Исследования по образованию гидрофобной сажи проводили при сжигании бытовой пропан-бутановой смеси. Проведенные исследования показали, степень гидрофобных свойств образующейся сажи изменяются в зависимости от величины налагаемого напряжения. Также было выявлено, что важным параметром условий образования сажи с гидрофобным свойством является расстояние сбора сажи от начала фронта пламени. Проведенные исследования показали, что диапазон лежит в пределах 1,8 до 2,2 см. Формирование сажевой частицы можно стабилизировать на определенном уровне процесса ее образования путем отбирания энергии. В нашем случае стабилизирующим фактором процесса формирования

сажевой частицы на определенном уровне роста, является поверхность цилиндра служащая теплоемником, и при этом вращение цилиндра обеспечивает время для охлаждения поверхности. Температура поверхности цилиндра стабилизировался на температуре порядка 180°C.

Таким образом, в результате проведенных исследований определены закономерности влияния постоянного электрического поля, на процесс образования сажи обладающей гидрофобным свойством. Проведенные исследования показали, что наложение электрического поля при горении, оказывает значительное влияние на структуру и морфологию частиц образующееся сажи. В частности повышается степень структурированности и уменьшается разброс по размерам. Выявлено, что наложение электрического поля напряжением свыше 300 вольт приводит к уменьшению размеров сажевые частиц, что положительно сказывается на их гидрофобных свойствах. Увеличение объемов выпуска, переработки и потребления силиконовых изделий создает экологические и экономические проблемы.

Технологическими отходами являются циклосилаксаны, линейные или частично структурированные силоксановые полимеры, отходы, образующиеся при переработке силиконовых резин в процессе формирования изделий прессованием, силиконовые изделия с отработанным ресурсом эксплуатации и т.д.. И в настоящее время проблема утилизации отходов силиконового производства путем создания энергосберегающей технологии их возврата на производство путем разработки новых композиционных материалов различного назначения является актуальной задачей. В связи с выше изложенным для отработки режимов горения для синтеза наноматериалов в пламени с заданными свойствами были проведены исследования по получению наноразмерного порошка диоксида кремния в процессе сжигания силиконовых отходов.

В лабораторных исследованиях был изучен процесс горения силиконового строительного герметика марки «SECONOM» выбранного в качестве стандартного образца силиконового отхода. Были проведены исследования процесса диффузионного горения с образованием диоксида кремния при различном содержании в окружающей атмосфере количества кислорода.

Эти исследования показали, что при повышенном содержании кислорода в окружающей атмосфере сокращается общее время процесса горения, но изменение содержания кислорода не оказывает существенного влияния на структуру и химический состав образующегося порошка диоксида кремния. Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено, что оптимальным режимом для получения наноразмерного диоксида кремния при сжигании силиконовых отходов, является ее сжигание в нормальных условиях при умеренном перемешивании. Метод не требует дополнительной внешней энергии и создания особых условий, что позволяет получать наноразмерный диоксид кремния из отходов силиконового производства с малыми трудозатратами.

На рисунке 3 показано внешний вид полученного из силиконовых отходов нанодисперсного порошка диоксида кремния и результаты исследований элементного анализа проведенного методом EDAX-анализа. Результаты EDAX-анализа показывают присутствие в порошке 77% диоксида кремния и 23% углерода, которое образуется при горении силиконового отхода.

Были проведены работы по созданию антиобледенительного покрытия на основе полученного наноразмерного порошка диоксида кремния. На рисунке 4 показана фотография демонстрирующее поведение капель воды на поверхности полученного антиобледенительного покрытия. Полученная поверхность обладает супергидрофобным свойством с углом смачивания 165-170°. В лабораторных исследованиях антиобледенительное покрытие получали следующим образом. Клей полиуретановый УР-600 объемом  $V=0,3$  мл растворяется в 100 мл этилацетате. Растворение производили на водяной бане при температуре 60-70°C в течение 10-15 мин. В полученный раствор добавляли в разных процентных соотношениях нанодисперсный порошок полученный сжиганием силикона (диоксид кремния). Полученный коллоидный раствор наносили на поверхность пульверизатором. На рисунке 4 показана фотография демонстрирующее поведение капель воды на поверхности полученного антиобледенительного покрытия на поверхности оцинкованного металла.



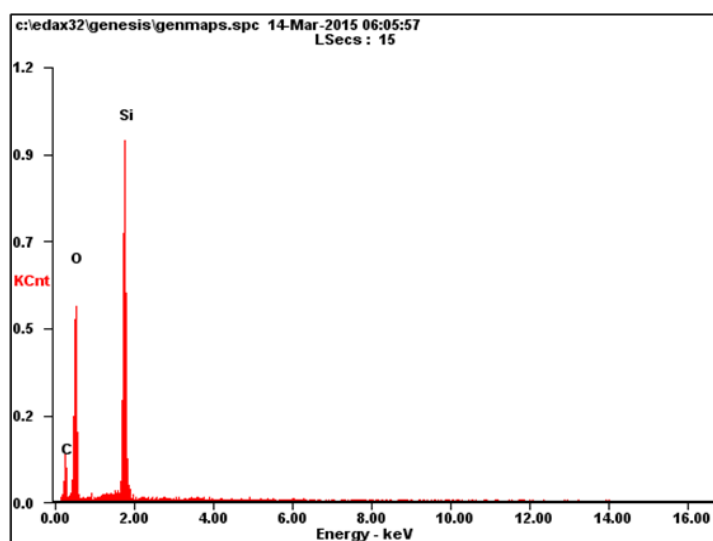


Рис. 3 – Внешний вид полученного из силиконовых отходов нанодисперсного порошка диоксида кремния и результаты исследований элементного анализа проведенного методом EDAX-анализа



Рис. 4 – Фотография демонстрирующее поведение капель воды на поверхности полученного антиобледенительного покрытия

### Результаты и обсуждение

Проведены исследование свойств и управляющих факторов, влияющих на антиобледенительные свойства полученного покрытия.

Выявлено, что для создания антиобледенительного покрытия, оптимальным соотно-

шением содержания диоксида кремния в коллоидном растворе этилацетат+полиуретановый клей+диоксид кремния, является 1.8%.

Полученное покрытие обладает абсолютным гидрофобным свойствам. Были проведены исследования скатывания водяных капель с поверхности антиобледенительного по-

крытия нанесенную на железную пластину при разных углах наклона. В результате проведенных исследований определено, что минимальным углом для полного скатывания капель воды с поверхности антиобледенительного покрытия является  $8^\circ$ . Были проведены лабораторные исследования по намерзанию водяных капель воды на поверхности антиобледенительного покрытия при разных углах наклона поверхности, при минусовой температуре окружающей среды.

Исследования проводились в холодильной камере при температуре  $-15^\circ\text{C}$  с частотой капания капель воды 0,5 с, с длиной пробега по антиобледенительной поверхности в 40 см. Проведенные исследования показали, что при угле наклона менее  $8^\circ$  происходит образование ледяной корки, которая легко отходит с поверхности при наложении небольшого усилия и при оттаивании легко скатывается с антиобледенительной поверхности в виде капель воды без повреждения структуры покрытия. При угле наклона свыше  $8^\circ$  образование ледяной корки полностью отсутствует.

В результате проведенных исследований по замерзанию ледяной корки при минусовых температурах также выявлено, что созданное антиобледенительное покрытие не теряет антиобледенительных и антиадгезионных свойств (к металлической поверхности) при многократном цикле охлаждения и нагревания.

### Заключение

В результате проведенных исследований по отработке режимов горения для синтеза наноматериалов в пламени с заранее заданными свойствами разработан метод получения сажи обладающей повышенным гидрофобным свойством в пламени бытовой пропан-бутановой смеси, путем воздействия на пламя электрическим полем.

Разработана технология получения нанодисперсного супергидрофобного диоксида кремния методом сжигания силиконовых отходов. На основе полученного нанодисперсного супергидрофобного диоксида кремния и полифенилен сульфида используемого в качестве связующего разработана и создана технология изго-

товления антиобледенительных покрытий на металлических и шиферных поверхностях.

### Литература

1. Гусев Н.И., Кубасов Е.А. Конструктивные решения по предотвращению наледей на крышах // Региональная архитектура и строительство. - 2011. - № 1. - С. 100-107.
2. Гусев Н.И., Кубасов Е.А., Кочеткова М.В. Средства для удаление наледи с крыш // Региональная архитектура и строительство. - 2011. - № 2. - С. 104-108.
3. Пат. 2063272-РФ-В05D5/08. Способ формирования антифрикционного и антиобледенительного покрытия / Панюшкин А.В., Сергачева Н.А.; опубл. 10.07.1996, Заявитель Петербургский государственный университет путей сообщения. - 93043773/26 - Заяв. - 31.08.1993.
4. Пат. 2156786МПК C09K3/18. Гидрофобная антиобледенительная композиция / Красильникова Л.Н., Чуппина С.В., Кротиков В.А., Шнурков Н.В., Фокина Л.Т.; опубл. 27.09.2000, Заявитель и патентообладатель Институт химии силикатов РАН, Научно-исследовательский институт специальных полимеров и коррозии. - Заяв. - 30.12.1998.
5. Харитонов Н.П., Красильникова Л.Н., Войнова Т.И. Сб. трудов "Исследования в области физики и химии каучуков и резин". - Л.: 1975. - С. 205.
6. Пат. 2162872 РФ МПК C09K3/18. Гидрофобная антиобледенительная композиция / Алесковская Е.В., Дубинский Я.А., Токарев В.В.; опубл. 10.02.2001, Заявитель и патентообладатель ООО Фирма "Северная пирамида"; - 99114484/04. Заяв. 07.07.1999.
7. Под редакцией Шульженко Ю.П. Полимерные кровельные и гидроизоляционные материалы. - М.: ВНИИЭСМ, 1993. - 353 с.
8. Паршина К.С., Гусев Н. И., Кочеткова М. В. Вестник магистратуры. - 2014. - №1(28). - С. 13-15.
9. Лесбаев Б.Т., Арапова А.К., Байдаулова Д.К., Мансуров З.А. Синтез супергидрофобных углеродных поверхностей при горении ацетилен воздушной смеси. Журнал Поиск. Серия естественных и технических наук, ISSN 1560-1730. №1(1), Алматы, 2012. - С. 10-14.

**МҰЗ ЖАМЫЛҒЫЛАРЫНЫҢ ТҮЗІЛУІНІҢ ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ ЖӘНЕ МҰЗДЫҢ ҚАТУЫНА ҚАРСЫ ЖАБЫНДЫЛАРДЫ ЖАСАУ БОЙЫНША ДАЙЫНДАМАЛАРЫ****Тұрғанбай А., Нәжіпқызы М., Есбосын А., Лесбаев Б.Т., Исанбекова А.Т.**<sup>1</sup>Жану проблемалар институты, Бөгенбай батыр көшесі, 172, 480012, Алматы, Қазақстан<sup>2</sup>әл-Фараби атындағы ҚазҰУ

E-mail: anar.turganbaeva@mail.ru

**Аннотация**

Соңғы жылдары зерттеушілер гидрофобты және аса гидрофобты нанокұрылымданған беттердің қасиеттерін зерттеуге, сонымен қатар олардың дайындалу әдістерінің жасалуына үлкен қызығушылық тудырып отыр. Мұздануға қарсы жабынды жасау мәселесі өзінің өзектілігін жоғалтқан жоқ, мұндай материалдарды жетілдіру жұмыстары ұсынылған мақалада жалғасын табады. Бұл жұмыста электр өрісі қатысында көмірсутектердің жануы кезінде жоғары гидрофобты қасиеттерге ие күйенің түзілу үдерісін зерттеу және екінші үдеріс силикон қалдықтарын жағу әдісі арқылы наноөлшемді кремний диоксидінің ұнтағын алу жұмыстары жүргізілді. Сонымен бірге алынған наноөлшемді кремний диоксиді ұнтағының негізінде мұздануға қарсы жабынды дайындау әдістемесі жасалды.

**Кілт сөздер:** жану, күйе, аса гидрофобты, мұздануға қарсы жабындылар, наноматериалдар

**THEORETICAL FOUNDATIONS OF FORMATION ICE COVER AND NEW DEVELOPMENTS ON THE CREATION OF DEICING COATINGS****Turganbay A., Nazhipkyzy M., Esbosyn A., Lesbayev B.T., Isanbekova A.T.**<sup>1</sup>Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbai Batyr St., 480012, Almaty,

The Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>KazNU al-Farabi

E-mail: anar.turganbaeva@mail.ru

**Annotation**

In recent years, researchers are showing great interest in the study of the properties of hydrophobic and superhydrophobic nanostructured surfaces, as well as to the development of methods for their manufacture. The problem of creating deicing coatings does not lose its relevance, the work on improving these materials continues in this article. In this work was carried out a study of soot formation process having high hydrophobic properties during the combustion of hydrocarbons in an electric field and a second process for producing nano-sized silicon dioxide powder by incineration of waste silicone. Also it was developed technique for creating anti-icing coating on the basis of the obtained nano-sized silicon dioxide powder.

**Key words:** combustion, soot, superhydrophobic, antiice coatings, nanomaterials