УДК 544.72:544.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ АДГЕЗИОННОГО КОНТАКТА ЛЬДА НА ПОВЕРХНОСТЯХ С РАЗЛИЧНЫМ СМАЧИВАНИЕМ

© 2022 г. Е. В. Чулкова^{1,} *, К. А. Емельяненко¹, А. М. Емельяненко¹, Л. Б. Бойнович¹

¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский проспект 31, г. Москва, 119071 Россия *e-mail: chulkova_liza@mail.ru Поступила в редакцию 09.02.2022 г. После доработки 24.02.2022 г. Принята к публикации 26.02.2022 г.

В настоящей работе представлен новый подход к исследованию прочности адгезионного контакта, позволяющий получать статистически надежные результаты и основанный на измерении центробежной силы, приводящей к сдвигу льда на твердой поверхности. Разработанная экспериментальная установка применена для исследования влияния температуры среды и длительности выдержки льда после кристаллизации на измеренную адгезионную прочность для образцов с различным смачиванием. Для гидрофильных, гидрофобных и супергидрофобных образцов алюминиевого сплава была обнаружена заметная температурная зависимость сдвиговой прочности адгезионного контакта льда к твердой поверхности. Также установлено, что для супергидрофобных поверхностей характерны значительно меньшие значения сдвиговой прочности адгезии, которые уменьшаются с увеличением времени релаксации льда.

Ключевые слова: адгезия, лед, смачивание, супергидрофобная, гидрофильная и гидрофобная поверхности.

DOI: 10.31857/S0023291222020033

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатирующиеся в открытых атмосферных условиях металлические материалы и конструкции часто подвержены воздействию атмосферных осадков, что, несомненно, влияет на их функциональные свойства. Наибольшее влияние на долговечность свойств металлических материалов оказывает накопление на их поверхности льда или мокрого снега. Адгезия льда может вызывать критические повреждения важных элементов инфраструктуры, таких как самолеты, морские и речные суда, высоковольтные линии электропередач, телекоммуникационное оборудование, ветроэлектрические установки и множество других систем. Следствием этого могут быть не только большие экономические потери, но и человеческие жертвы.

Последние десятилетия очень остро стоит проблема предотвращения обледенения наружных металлических конструкций. В настоящий момент можно отметить несколько основных путей ее решения [1]: пассивные противообледенительные покрытия, механические методы, термические методы, химические и электрические методы. Наиболее привлекательным способом сокращения накоплений льда на металлических поверхностях-является применение противообледенительных покрытий, в первую очередь, благодаря тому, что не требуется эксплуатационное обслуживание таких материалов. Экологичность и экономичность производства также являются преимуществами таких покрытий по сравнению с другими широко распространенными методами. В литературе было отмечено [2], что лучшими льдофобными свойствами обладают покрытия с низкой поверхностной энергией. Перечисленными свойствами поверхности обладают гидрофобные и супергидрофобные покрытия.

Тем не менее, в литературе можно найти множество противоречивых сообщений о противообледенительных свойствах гидрофобных и супергидрофобных покрытий и влиянии шероховатости на прочность адгезионного контакта льда к поверхности [3–5]. Как было отмечено в работах [6, 7], на прочность адгезионного контакта льда к поверхности, помимо шероховатости, влияют множество параметров, в том числе способ формирования межфазной границы, тип льда и скорость соударения капель с поверхностью, поэтому сравнение различных результатов нужно проводить с осторожностью. Кроме того, неоднозначные данные о льдофобных свойствах супергидрофобных и гидрофобных покрытий могут быть вызваны недостаточной точностью используемых в исследованиях методов оценки прочности адгезионного контакта, что приводит к зависимости результатов измерений от применяемого метода. Так, например, экспериментальные данные по прочности адгезионного контакта льда к различным видам поверхностей для методов со схожим способом формования льда, представленные в литературе, указывают на существующий разброс значений в одной экспериментальной серии от 15 до 30% [3, 5, 6, 8]. Поэтому многие фундаментальные вопросы как о величине прочности адгезии льда на разных поверхностях, так и ее зависимости от различных факторов остаются нерешенными.

Основные методы измерения адгезии льда основаны на создании напряжений нормального отрыва или сдвига в зоне трехфазного контакта лед-подложка-воздух под действием приложенной нагрузки. Как было отмечено в работах [6, 9], характерными проблемами большинства активно используемых в настоящее время методов измерения прочности адгезионного контакта являются значительная вероятность когезионного разрыва льда в ходе эксперимента и большой разброс полученных экспериментальных данных. В связи с этим литературные данные о прочности адгезионного контакта при сдвиге и ее зависимости от температуры противоречивы и не позволяют провести точное сравнение различных покрытий, изготовленных в разных лабораториях.

Из всего многообразия существующих методов оценки адгезии своей точностью и информативностью выделяются те, что основаны на анализе центробежных сил [10]. Однако представленные в литературе вариации этого метода не позволяют получать статистически надежные значения адгезии из-за небольшого числа образцов, используемых в одном эксперименте, и ненадежного контроля и поддержания температуры, как образца, так и окружающей среды [11]. Кроме того, применяемые методы для оценки величины центробежной силы использовали не прямое измерение скорости вращения образца в момент отрыва от него льда, а расчет скорости, основанный на величине задаваемого ускорения центрифуги с образцом [11, 12].

Одной из основных задач данной работы было создание экспериментальной установки, в которой можно было бы точно контролировать температуру образца со льдом на всех этапах эксперимента, от формирования ледяной втулки на образцах с различным смачиванием до момента ее отрыва от образца. Кроме того, необходимо было разработать метод, позволяющий одновременно работать с большим числом образцов, что увели-

КОЛЛОИДНЫЙ ЖУРНАЛ том 84 № 2 2022

чивает статистическую достоверность получаемых результатов, и точно измерять центробежную силу непосредственно в момент отрыва каждого из образцов. Наконец, разрабатываемая установка должна была позволять исследовать влияние времени выдержки льда при целевых отрицательных температурах на прочность адгезионного контакта. До настоящего времени ни одна из описанных в литературе методик и установок не позволяли одновременно решать все поставленные задачи.

Также представляло большой практический интерес сравнение адгезии льда на образцах с различной шероховатостью и смачиванием при одинаковых экспериментальных условиях и надежное определение влияния температуры на сдвиговую прочность адгезионного контакта для образцов с разным смачиванием.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе исследовалась сдвиговая прочность адгезионного контакта льда, получаемого кристаллизацией дистиллированной воды внутри втулки из полистирола, к поверхности исследуемого образца. Три типа образцов с различным смачиванием — гидрофильные, гидрофобные и супергидрофобные — были изготовлены из пластин алюминиевого сплава AMg2M размерами 80 × 10 × 3 мм³. В каждом эксперименте адгезия льда изучалась одновременно к 12 образцам.

Гидрофильное состояние поверхности алюминиевых пластин достигалось с помощью их полировки до появления зеркального отражения. Для изготовления гидрофобных образцов, пластины с гидрофильной поверхностью обрабатывались озоном и ультрафиолетовым излучением в установке "Bioforce UV cleaner" для увеличения концентрации поверхностных хемосорбционно-активных центров. Далее образцы помещались в закрытый контейнер с парами $CF_3(CF_2)_7CH_2O(CH_2)_3Si(OCH_3)_3$ и выдерживались при температуре 105°С в течение 1 ч. На следующем этапе образцы подвергались температурной обработке в сушильном шкафу при температуре 150°С для формирования двумерного кросс-сшитого слоя хемосорбированного фтороксисилана. Методика изготовления супергидрофобных покрытий на алюминиевом сплаве была детально описана в наших недавних работах [13, 14]. Вкратце, процедура изготовления заключалось в лазерной наносекундной обработке поверхности образца для придания многомодальной шероховатости поверхности с последующим нанесением фтороксисилана из паров, аналогично тому, как это описано выше для гидрофобных образцов.

Для измерения углов смачивания использовалась описанная ранее [15, 16] установка, основан-

Образец	Угол смачивания, $^{\circ}$	Угол скатывания/соскальзывания, °
Гидрофильные	75 ± 1.5	Нет
Гидрофобные	110 ± 1.5	40 ± 5
Супергидрофобные	171.9 ± 0.9	1.9 ± 0.5

Таблица 1. Углы смачивания и скатывания/соскальзывания на гидрофильных, гидрофобных и супергидрофобных образцах, исследуемых в данной работе

ная на цифровой обработке видеоизображений сидящих капель и оптимизационном подборе параметров уравнения Лапласа, описывающего форму капель. Для измерения углов скатывания сидящие капли помещали на образец, прикрепленный к вращающемуся держателю. После установления равновесной формы капли держатель подложки плавно наклоняли до тех пор, пока капля не начинала катиться по поверхности. Как углы смачивания, так и углы скатывания были измерены для капель объемом 15 мкл по меньшей мере в десяти различных местах на поверхности для каждого образца. Результаты измерения углов смачивания и скатывания на полученных образцах представлены в табл. 1.

Для исследования прочности адгезионного контакта льда с полученными образцами была разработана установка, фотография и принципиальная схема которой представлены на рис. 1а и 16. В рабочее пространство климатической камеры 13 (Binder MK53, Binder, Германия) помещается серводвигатель 1 (EMJ-010ASA, Estun, Китай), установленный в защитный кожух 2. На вертикально ориентированной оси серводвигателя закреплен вращающийся диск 3 диаметром 250 мм. На поверхности диска сделаны резьбовые отверстия для крепления исследуемых образцов 4, с возможностью их размещения на разном расстоянии от центра диска. Для регистрации температуры поверхности диска с образцами на стадиях охлаждения и установления постоянной температуры используется термодатчик 6 (iButton DS1922L F5, Maxim Integrated, США) с точностью измерения температуры 0.5°С. Светодиодный стробоскоп 7 (Testo 477, Testo, США) применяется для освещения вращающегося диска импульсами, синхронизированными с вращением диска. Таким образом, цифровая видеокамера 8 фиксирует изображение диска с образцами, как неподвижное. Частота вращения отображается на цифровом дисплее блока управления 12 (Servo EP-4, Estun, Китай) и фиксируется другой видеокамерой 9. Видеопотоки с обеих камер сохраняются на жестком диске 10 и отображаются на мониторе 11. Внутри рабочей зоны климатической камеры установлена демпфирующая обшивка 14, предназначенная для защиты стенок климатической камеры от повреждения оторвавшимися втулками со льдом в процессе работы устройства.

Разработанная экспериментальная установка позволяет одновременно проводить измерения адгезионной прочности для 24 втулок со льдом в одинаковых температурных условиях. Вкратце опишем процедуру экспериментальных измерений. Двенадцать исследуемых металлических образцов фиксировались по периметру вращающегося диска на одинаковом расстоянии от центра. Полипропиленовые втулки помещались на образцы, по две на каждый образец, в них заливалось по 250 мкл воды. В случае с гидрофильными и гидрофобными образцами, чтобы вода не вытекала из втулок в процессе их заполнения, образцы были предварительно охлаждены до -30°С. После заполнения втулок водой климатическую камеру закрывали и температуру в ней понижали до -40°С, выдерживали до момента кристаллизации воды, после чего температуру в камере устанавливали на целевую для конкретного эксперимента. Время выдержки льда при заданной температуре отсчитывалось с момента кристаллизации последнего образца.

Поскольку объем заливаемой жидкости составлял 0.25 мл, т.е., кристаллизация происходила в объемной воде, времена кристаллизации в разных втулках различались не более чем на 7 минут. Прочность адгезионного контакта льда равна центробежной силе F_c приложенной к единице площади втулки со льдом в момент отрыва льда. Эта сила для каждого образца рассчитывалась по измеренной частоте вращения центрифуги, соответствующей моменту отрыва каждой из втулок со льдом, по соотношению $F_c = (2\pi v)^2 mR/S$. Здесь R — это расстояние между центром втулки и осью вращения, m — масса втулки со льдом, v — частота вращения в соответствующий момент отрыва, Sплощадь контакта между льдом и образцом. По окончании эксперимента поверхность исследуемых образцов тщательно проверялась на отсутствие остатков льда, а случаи когезионного разрыва льда были исключены из обработки статистических данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С применением описанного выше экспериментального метода были получены температурные зависимости адгезии льда к гладким гидрофильным, гладким гидрофобным и шероховатым





Рис. 1. Фотографии (а) и схема (б) экспериментальной установки.

супергидрофобным образцам. Результаты измерения для гидрофильных образцов показаны на рис. 2. *Черными квадратами* на графике отмечены точки, которые были получены усреднением по 24 образцам льда, отрывающимся в одном цикле измерений при соответствующей температуре после двухчасовой выдержки льда при постоянной температуре. Как видно из полученных данных, разброс средних значений прочности адгезии в одном цикле измерений значительно меньше, чем изменение средних значений на всем исследованном температурном интервале, что указывает на заметную температурную зависимость адгезии льда к гидрофильным образцам. Стоит отметить, что анализ многочисленных экспериментальных данных, полученных в разных лабораториях и на разных установках, выполненный в [6], из-за очень большого разброса данных не позволил сделать надежные выводы об изменении прочности адгезионного контакта при понижении температуры. Полученная нами зависимость прочности адгезионного контакта льда с

КОЛЛОИДНЫЙ ЖУРНАЛ том 84 № 2 2022

гидрофильными образцами однозначно соответствует росту адгезии со снижением температуры и имеет линейный вид. Такая зависимость определяется температурной зависимостью поверхностных сил, плотностью дефектов на границе раздела лед-твердое тело и толщины квазижидкого слоя [9]. Для выявления влияния релаксации межфазного слоя лед/подложка при различных отрицательных температурах, нами были измерены прочности адгезионного контакта после длительной выдержки льда на образцах при целевой температуре. Серыми треугольниками отмечены результаты измерения прочности адгезионного контакта льда, выдержанного при постоянной температуре 15–17 часов. Хотя некоторая тенденция увеличения прочности контакта со временем наблюдается и согласуется с выводами, сделанными в работе [17], из-за значительного разброса измеряемых величин для каждого цикла измерений, эти данные все же не могут однозначно подтвердить рост адгезии при низкотемпературной релаксации межфазных дефектов и старении льда на границе с гидрофильными образцами.

Для гидрофобных образцов измеренная температурная зависимость сдвиговой адгезионной прочности от температуры льда, выдерживаемого в течение 2 часов, представлена на рис. За черными квадратами. Полученные данные также свидетельствуют о возрастании адгезионной прочности контакта лед-гидрофобный образец при снижении температуры. Однако, стоит подчеркнуть два факта. Во-первых, нанесение гидрофобного агента на гладкую металлическую поверхность при одинаковой температуре значиуменьшает прочность адгезионного тельно контакта льда, по сравнению с гидрофильными образцами. Во-вторых, температурный градиент адгезионной прочности для гидрофильных образцов значительно больше. Серыми кружками показаны результаты измерения прочности адгезионного контакта, полученные при времени выдержки льда 14-24 часа. Эти данные указывают на отсутствие значимого влияния времени релаксации. Для того чтобы удостовериться в правильности сделанных выводов, была детально исследована зависимость прочности адгезионного контакта с гидрофобными гладкими образцами от времени выдержки льда при постоянной температуре -10°С (см. рис. 3б). Как следует из полученных данных, релаксация льда на гладких гидрофобных образцах практически не влияет на величину сдвиговой прочности адгезионного контакта.

Представляло интерес изучение влияния режима смачивания гидрофобных образцов на величину прочности адгезионного контакта со льдом. Для этого была проведена серия экспериментов с супергидрофобными образцами, имеющими тот же химический состав поверхностного



Рис. 2. Температурная зависимость сдвиговой прочности адгезионного контакта льда к гладкой гидрофильной поверхности (черные квадраты). Экспериментальные данные прочности адгезионного контакта льда к чистому алюминию, представленные в литературе: светло-серая звезда [20], светло-серый ромб [21], незаполненные круги [9], незаполненный треугольник [5].

слоя, что и гидрофобные образцы, но отличающимися режимом смачивания. Так, благодаря многомодальной шероховатости поверхности [18]. гомогенный режим смачивания, наблюдающийся на гидрофобных образцах, переходит в гетерогенный режим на супергидрофобных подложках. Температурное изменение прочности адгезионного контакта льда к супергидрофобным подложкам показано на рис. 4. Обращает на себя внимание резкое снижение прочности адгезионного контакта при переходе от гомогенного контакта льда с гидрофильными и гидрофобными подложками к гетерогенному контакту для супергидрофобных подложек. Так, прочность контакта с супергидрофобным образцом при -25°C оказывается того же порядка, что и прочность контакта для гидрофильного образца при ≈ -9° C. Сравнение значений прочности адгезионного контакта льда, выдержанного в течении 2 часов при постоянной температуре -10°С на трех типах исследуемых образцов, представлено в табл. 2. Видно, что придание поверхности гидрофобных и супергидрофобных свойств снижает прочность адгезионного контакта льда к твердой поверхности почти в 2 и 4 раза соответственно.

Помимо значительно более низких значений адгезии льда после двух часов выдержки при исследуемой температуре (*черные квадраты*) обнаружилось сильное влияние времени выдержки после кристаллизации льда на величину адгезии. На рис. 4 также показаны значения сдвиговой



Рис. 3. (а) Температурная зависимость сдвиговой прочности адгезионного контакта льда к гладкой гидрофобной поверхности; (б) Зависимость прочности адгезионного контакта льда к гладкой гидрофобной поверхности от времени выдержки льда при постоянной температуре -10°С.

прочности адгезионного контакта после 14 (серые круги) и 30 (незаполненные круги) часов выдержки при температуре –25°С. Представленные данные показывают снижение прочности контакта при низких отрицательных температурах более чем вдвое за 30 часов выдержки. При этом значение



Рис. 4. Температурная зависимость сдвиговой прочности адгезионного контакта льда к супергидрофобной поверхности.

прочности контакта оказывается уже достаточно низким, чтобы способствовать самопроизвольному удалению льда под действием, например, воздушного потока или приложенных вибраций. Таким образом, полученные данные позволяют с оптимизмом оценивать возможность самопроизвольного удаления льда со временем на элементах инфраструктуры, эксплуатирующихся в открытых атмосферных условиях.

Линии на представленных графиках представляют собой линейную аппроксимацию экспериментальных значений с помощью метода наименьших квадратов (МНК), выполненную в программе Origin. Обработка экспериментальных данных с помощью МНК позволила получить линейные аппроксимации зависимости адгезионной прочности льда от температуры среды для гидрофильных, гидрофобных и супергидрофобных образцов, а также проанализировать влияние времени выдержки льда при постоянной температуре на величину адгезии льда к гидрофобным образцам.

Таблица 2. Сравнение измеренных значений сдвиговой прочности адгезии льда к поверхностям с различным смачиванием при постоянной температуре -10°C

прочность адгезионного контакта, кпа		
гидрофильные	гидрофобные	супергидрофобные
242.6 ± 24	140.7 ± 18.5	60.3 ± 10.5

прочность адгезионного контакта, і	контакта, кГ	контакта, кП
------------------------------------	--------------	--------------

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в данной работе более низкие значения прочности адгезионного контакта льда к гидрофобным и супергидрофобным поверхностям по сравнению с гидрофильной поверхностью определяются множеством факторов. На адгезию льда к твердым телам, как гладким, так и шероховатым, влияют поверхностные силы, наличие квазижидкого слоя и структура приповерхностного слоя льда [9].

Прежде всего, гидрофобный агент на поверхности создает диэлектрический слой и вызывает экранирование ван-дер-ваальсовых и электростатических сил взаимодействия между твердым телом и льдом, что приводит к ослаблению адгезии льда к поверхности гладкого гидрофобного образца, по сравнению с гидрофильным.

Большое влияние на прочность адгезионного контакта льда с различными поверхностями оказывает квазижидкий слой воды, существующий межлу льдом и твердым телом при отрицательных температурах. Экспериментальные данные, представленные в некоторых источниках [9], свидетельствуют о влиянии смачиваемости поверхности на толщину и температуру кристаллизации квазижидкого слоя воды. Согласно этим данным, толщина квазижидкого слоя, при заданной температуре, больше у более гидрофобных твердых тел, и температура замерзания этого слоя тем ниже, чем гидрофобнее поверхность. Квазижидкий слой на поверхности гидрофобных и супергидрофобных материалов выступает в роли смазки, снижая сопротивление скольжению льда по поверхности и значительно облегчает его удаление. то есть способствует снижению алгезионной прочности контакта льда.

Наконец, супергидрофобные поверхности изза многомодальной шероховатости и низкой поверхностной энергии имеют меньшую площадь, реально контактирующую с водой. Этот фактор также снижает измеряемую адгезию за счет частичного сохранения гетерогенного режима смачивания при кристаллизации воды и меньшей площади контакта льда с твердым телом.

Однако, супергидрофобные подложки, легко сохраняющие гетерогенный режим смачивания при переохлаждении воды, могут переходить в гомогенный режим даже при не очень значительных пересыщениях водяных паров. Это приводит к увеличению доли смоченной площади. В таком случае ожидается образование замороженного гало и мениска вокруг области контакта капли с подложкой и внутри микропористой текстуры под каплей, при этом в нанотекстуре вода будет находиться в переохлажденном состоянии. Перечисленные процессы, конечно, могут приводить к увеличению прочности адгезионного контакта льда с подложкой, как за счет увеличения площади реального контакта лед/твердое тело, так и за счет механического сцепления льда с элементами текстуры. Однако на супергидрофобных противообледенительных покрытиях закристаллизовавшиеся в нанопористой текстуре мениски воды и гало вокруг основания капли, образующиеся на квазиадиабатической стадии кристаллизации воды, находятся в метастабильном состоянии [19]. Это вызывает самопроизвольную сублимацию воды/льда как из пористой текстуры, так и из замерзшего гало после того, как температура воды/льда примет значение температуры окружающей среды и давление паров вокруг мениска станет равновесным. Хотя этот процесс может занимать несколько часов. он способствует снижению фактической прочности адгезионного контакта льда к супергидрофобной поверхности и может быть эффективно использован на практике для облегчения очистки поверхности ото льла.

выводы

Новая экспериментальная установка, разработанная в данной работе, позволила получить статистически надежные значения прочности адгезионного контакта льда к поверхностям гидрофильных, гидрофобных и супергидрофобных подложек в широком интервале температур. Представленные экспериментальные данные показали существование заметной температурной зависимости для всех исследуемых типов образцов. Также установлено, что придание поверхности гидрофобных и супергидрофобных свойств в разы снижает прочность адгезионного контакта льда к твердой поверхности. Помимо значительно более низких значений прочности адгезии льда к супергидрофобным образцам, обнаружилось, что для них также характерно уменьшение этих значений с увеличением времени релаксации льда. Наблюдаемое явление может быть объяснено образованием метастабильных ледяных менисков внутри бороздок шероховатой поверхности во время квазиадиабатической стадии замерзания воды с последующей их сублимацией при релаксации межфазной зоны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-29-13011).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

КОЛЛОИДНЫЙ ЖУРНАЛ том 84 № 2 2022

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Makkonen L. // Journal of Adhesion Science and Technology. 2012. V. 26. № 4–5. P. 413–445.
- 2. *Menini R., Farzaneh M.* // Journal of Adhesion Science and Technology. 2011. V. 25. № 9. P. 971–992.
- 3. *Chen J., Liu J., He M. et al.* // Applied Physics Letters. 2012. V. 101. № 11. P. 111603.
- 4. *Kulinich S.A., Farhadi S., Nose K. et al.* // Langmuir. 2011. T. 27. № 1. P. 25–29.
- 5. Bharathidasan T., Vijay Kumar S., Bobji M.S. et al. // Applied Surface Science. 2014. V. 314. P. 241–250.
- Work A., Lian Y. // Progress in Aerospace Sciences. 2018. V. 98. P. 1–26.
- 7. *Rønneberg S., He J., Zhang Z. //* Journal of Adhesion Science and Technology. 2020. V. 34. № 3. P. 319–347.
- Laforte C., Laforte J.L., Carrière J.C. // Proceedings of the International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS. 2002. V. 6.
- 9. Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. // Coatings. 2020. V. 10. № 7. P. 648.
- Rønneberg S., Zhuo Y., Laforte C. et al. // Coatings. 2019. V. 9. № 10. P. 678.

- Laforte C., Beisswenger A. // Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS, Montreal, QC, Canada, 2005. P. 12–16.
- Höhne S., Hoch C., Böhm C. et al. // Langmuir. 2020. V. 36. P. 4465–4476.
- Чулкова Е.В., Емельяненко А.М., Емельяненко К.А. и др. // Журнал физической химии. 2020. Т. 94. № 3. С. 436-442.
- Boinovich L.B., Emelyanenko K.A, Emelyanenko A.M. // Journal of Colloid and Interface Science. 2022. V. 606. P. 556–566.
- 15. Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. // Коллоидный журнал. 2001. Т. 63. № 2. С. 178–193.
- Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. // Inorganic Materials. 2011. V. 47. P. 1667–1675.
- 17. Work A.H. // AIAA Aviation 2020 Forum. 2020. P. 2801.
- 18. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 7. С. 619–638.
- Boinovich L., Emelyanenko A.M. // Langmuir. 2014.
 V. 30. № 42. P. 12596–12601.
- 20. Wang F., Lv F., Liu Y. et al. // Journal of Adhesion Science and Technology. 2013. V. 27. № 1. P. 58–67.
- 21. Zou M., Beckford S., Wei R. et al. // Applied surface science. 2011. V. 257. № 8. P. 3786–3792.