

# ВЛИЯНИЕ ПАРОВ ДЕКАНОЛА НА ЗАМЕДЛЕНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДНЫХ КАПЕЛЬ НА СУПЕРГИДРОФОБНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М., Емельяненко К.А.

*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН, Москва, Россия)*

[boinovich@mail.ru](mailto:boinovich@mail.ru)

## Введение

Интенсивная работа в области создания противообледенительных систем для авиации, судостроения, электроэнергетики и других областей экономики инициирует концентрирование усилий научного сообщества на исследовании факторов, снижающих обледенение и накопление снега и льда на конструкциях, эксплуатирующихся в тяжелых погодных условиях [1-4]. Одним из наиболее важных направлений работ здесь является анализ механизмов, способствующих значительному замедлению кристаллизации капель переохлажденной воды, попадающих на поверхности конструкций при отрицательных температурах. Результаты многочисленных исследований, проводимых во всем мире в последние годы, указывают, что на супергидрофобных поверхностях при температурах ниже  $-8^{\circ}\text{C}$  время замедления при кристаллизации сидящих капель переохлажденной воды может варьироваться от десятков секунд до десятков часов [4-6]. При этом, как было показано в литературе [1, 2, 4-8], величина времени замедления зависит от размеров капель, особенностей текстуры поверхности, ее смачивания, влажности воздуха и скорости воздушного потока. Здесь следует отметить, что значительное влияние влажности окружающей среды и скорости воздушного потока связано, главным образом, с испарением капли в условиях недосыщения и соответствующим понижением температуры ее поверхности [8, 9]. Такое снижение температуры капли относительно температуры окружающей среды способствует увеличению вероятности спонтанной кристаллизации переохлажденной воды и, соответственно, сокращению времени замедления кристаллизации. Интенсивные исследования, выполненные ранее (см., например, монографию [10]), убедительно показали, что замедление испарения водных капель в атмосферных условиях может быть эффективно достигнуто с применением монослоев нерастворимых ПАВ. Для таких ПАВ должны быть характерны низкая проницаемость по отношению к воде, склонность к образованию плотноупакованных монослоев и сильные межмолекулярные взаимодействия внутри монослоя. При этом, с учетом экологических факторов, стоимости и эффективности, монослои средне- и длинноцепочечных насыщенных спиртов и кислот рассматриваются, как наиболее привлекательные поверхностно активные вещества для понижения испарения воды. Поскольку применение таких ПАВ может обеспечить дополнительный льдофобный эффект супергидрофобных поверхностей за счет снижения скорости испарения воды, в данной работе мы исследовали влияние адсорбции паров деканола на поведение сидящих капель воды на супергидрофобных поверхностях. Мы покажем, что присутствие паров деканола существенно влияет на угол смачивания и поверхностное натяжение водных капель. Будут представлены данные по статистике кристаллизации капель переохлажденной воды, однозначно указывающие на то, что присутствие монослоя деканола на поверхности водных капель способствует еще более значительному замедлению кристаллизации воды на супергидрофобных поверхностях при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ , по сравнению с каплями воды, свободными от ПАВ.

### Экспериментальная часть

В данной работе нами было проведено два типа исследований. В экспериментах первого типа исследовалось влияние адсорбции паров деканола на параметры капли воды, помещенной на супергидрофобную поверхность. Для этого капля деионизованной воды помещалась на супергидрофобное покрытие на алюминиевой пластине, находящейся внутри экспериментальной ячейки. Ячейка, состоящая из двух вложенных друг в друга стеклянных кювет (более подробное описание ячейки было приведено ранее [11]), обеспечивала насыщенное давление водяных паров и находилась при комнатной температуре  $T=22^{\circ}\text{C}$ . После выдержки капли воды в закрытой ячейке в парах в течение 15 минут, во внутреннюю кювету также помещался резервуар с н-деканолом. Затем ячейка вновь закрывалась. Оптическое изображение капли воды на подложке в процессе эволюции ее параметров записывалось в память компьютера и в дальнейшем обрабатывалось с применением цифровой обработки видеоизображения, как описано в [12]. Такая обработка позволяет определять временную эволюцию различных параметров сидящей капли, включая угол смачивания, поверхностное натяжение, объем и площадь поверхности водной капли. Анализировалась форма водных капель с объемом 15 мкл. Для характеристики смачивания образца в целом, в отдельном эксперименте измерялись углы смачивания и скатывания на пяти различных участках поверхности образца.

Второй тип эксперимента представлял собой изучение замедления кристаллизации капель деионизованной воды, нанесенных на супергидрофобную подложку, в присутствии паров деканола. Для этого на супергидрофобную подложку, находящуюся внутри тонкостенной герметичной ячейки из нержавеющей стали с прозрачной крышкой из полиметилметакрилата толщиной 2 см помещалось 98-120 водных капель объемом 18 мкл каждая. Низкая теплопроводность крышки обеспечивала защиту от конденсации воды при медленном охлаждении ячейки в условиях атмосферы насыщенных водяных паров. Кроме того, прозрачность крышки позволяла визуально отслеживать фазовое состояние воды с помощью видеорегистратора BestDVR-405 LightNet. Кристаллизация капли определялась по изменению внешнего вида – от прозрачного с ярким отражением от жидкой поверхности к непрозрачному с матовой поверхностью (рис. 1).

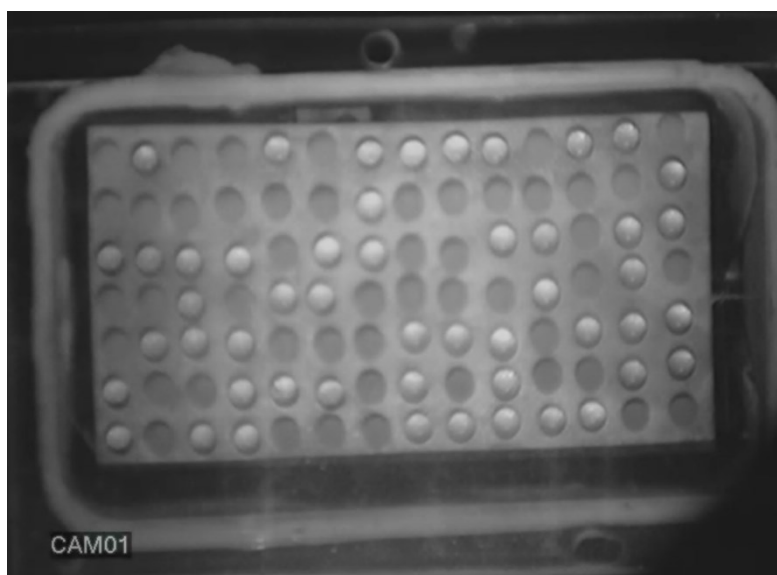


Рис.1. Кадр с видеорегистратора, содержащий изображение подложки с каплями. Хорошо видно различие внешнего вида переохлаждённых жидких и закристаллизовавшихся капель.

Ячейка помещалась в климатическую камеру Binder MK53 на антивибрационную подставку. Насыщение водяных паров внутри ячейки при температуре выше  $0^{\circ}\text{C}$  достигалось с помощью слоя воды толщиной 2 мм на дне ячейки. После нанесения на супергидрофобную подложку капель воды и выдерживания капель в парах в течение 30 мин при  $T=22^{\circ}\text{C}$ , под крышку помещался резервуар с тонким слоем деканола. Далее ячейка выдерживалась при комнатной температуре 30 минут, резервуар с деканолом извлекали из ячейки, и затем температуру климатической камеры снижали до  $T = -15^{\circ}\text{C}$  в течение 15 мин. Равновесная температура внутри ячейки устанавливалась за счет теплообмена между ячейкой и климатической камерой. Температура поверхности супергидрофобного образца измерялась с помощью термодатчика DS1921 (Термохрон-РЭЛСИБ) с точностью  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Для достижения требуемой отрицательной температуры внутри ячейки обычно требовалось 90-120 минут с момента начала охлаждения камеры. В течение всего последующего эксперимента температура в системе поддерживалась постоянной. Время с момента установления требуемой температуры подложки до момента кристаллизации отдельной капли принималось за время замедления кристаллизации данной капли. Важно отметить, что кристаллизация слоя воды на дне ячейки происходила при достижении температуры ячейки от 0 до  $-4^{\circ}\text{C}$ , что фиксировалось временным ростом показаний температуры термодатчика, погруженной в воду. Кристаллизация водяного слоя приводила к тому, что относительная влажность воздуха внутри ячейки оказывалась зависящей от температуры, при температуре в ячейке ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . Последнее объясняется тем, что при одинаковых отрицательных температурах давление пара над переохлажденной водой превышает давление пара над льдом [13]. Согласно этим данным, относительная влажность воздуха в ячейке при  $T = -15^{\circ}\text{C}$  оказывается не ниже 87%.

Для изготовления супергидрофобной подложки в данной работе использовались пластины алюминиевого сплава АМГ с размером  $100\text{ мм} \times 50\text{ мм} \times 1\text{ мм}$ . Предварительная подготовка поверхности включала обработку в растворе гидроксида калия для обезжиривания и промывание в дистиллированной воде. Подготовленные пластины подвергали лазерному текстурированию на воздухе с использованием наносекундного лазера мощностью 20 мВт и длиной волны 1.064 мкм. Для создания хемосорбционно-активных мест текстурированная пластина обрабатывалась в озонаторе Bioforce Nanosciences (модель UV.PC.220), в присутствии УФ излучения с интенсивностью  $14\text{ мВт/см}^2$ , в течение 30 мин. После озонирования образец гидрофобизовали хемосорбцией метокси- $\{3-[(2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8\text{-пентадекафтороктил})\text{-окси}]\text{-пропил}\}$ -силана из раствора в декане, как описано в [4]. Последующая тепловая обработка образца при температуре  $120\text{-}140^{\circ}\text{C}$  в присутствии паров воды приводила к образованию на поверхности нанометрового кросс-сшитого слоя фтороксисилана, обеспечивающего низкую поверхностную энергию подложки и устойчивое супергидрофобное состояние. Морфологию супергидрофобного покрытия изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Supra 40 VP при ускоряющем напряжении 5 кВ.

### Обсуждение результатов

Морфология поверхности супергидрофобных покрытий на алюминии, которые использовались в качестве подложек в данном исследовании, представлена на рис. 2 при двух различных увеличениях.

Представленные SEM изображения четко указывают, что используемый метод лазерного текстурирования позволяет получать многомодальную шероховатость поверхности, включающую периодическую гребнеобразную структуру с периодом порядка нескольких десятков микрон. Каждый гребень покрыт микронного размера

агрегатами, состоящими из наночастиц. Характерные углы смачивания используемых супергидрофобных подложек составляли  $169 \pm 2.0^\circ$ , а углы скатывания не превышали  $5^\circ$ .

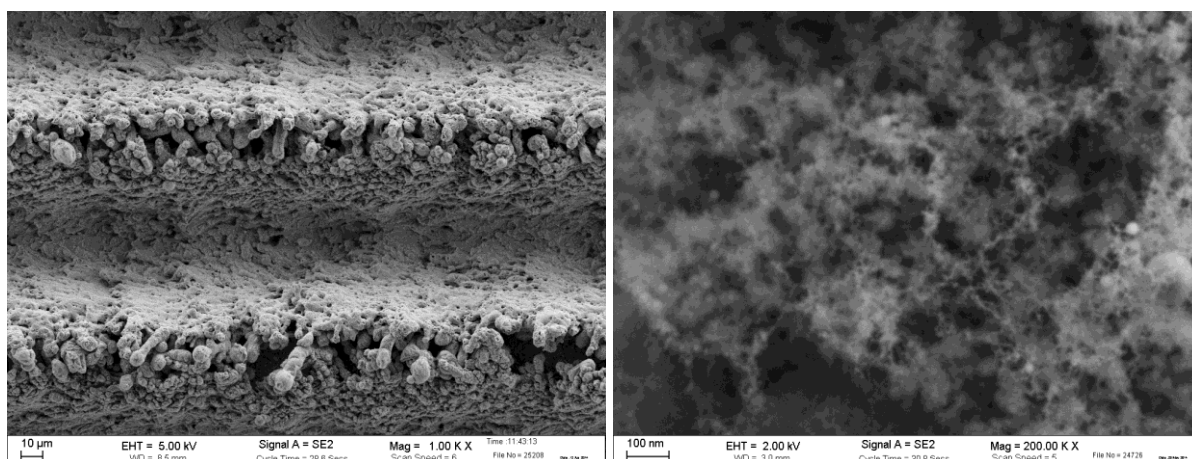


Рис.2 Морфология супергидрофобных покрытий на алюминии, полученных ИК лазерной обработкой. Представлены изображения для двух различных увеличений.

На описанных покрытиях мы исследовали и кинетику адсорбции ПАВ на поверхность капли, и статистику кристаллизации сидящих капель деионизованной воды и воды с поверхностным монослоем ПАВ при отрицательных температурах.

### **Влияние адсорбции ПАВ на параметры сидящей капли воды**

В литературе высказывалось мнение, что оптимальными ПАВ для подавления испарения воды и вызываемого им охлаждения капли являются гексадеканол и октадеканол [14], как спирты, образующие плотноупакованные монослои и характеризующиеся значительным межмолекулярным связыванием. Такое связывание реализуется через водородные связи и через латеральные межцепочечные взаимодействия. Кроме того, достаточная длина углеводородного хвоста при его планарной конформации снижает проницаемость монослоя и, следовательно, транспорт воды через монослой. Однако в данной работе мы использовали н-деканол. Такой выбор определялся следующими факторами. Жидкое состояние н-деканола при комнатных температурах, с достаточно высоким давлением паров, позволяет наносить плотно упакованный монослой деканола на поверхность воды адсорбцией из паров. Поскольку исследуется влияние адсорбированного спирта на снижение испарения воды при отрицательных температурах, при которых деканол находится в кристаллическом состоянии, логично ожидать низкой проницаемости адсорбированного монослоя к транспорту молекул воды. На рис. 3 представлены данные по эволюции параметров водной капли от времени контакта капли с супергидрофобной подложкой. Данные получены при двух различных вариантах проведения эксперимента. В первом варианте в закрытую стеклянную кювету, в которой находилась исследуемая водная капля, помещали плоскую емкость с деканолом на 30 минут, затем деканол удаляли. Эволюция углов смачивания (зеленые треугольники) и поверхностного натяжения капли (зеленые ромбы), анализировалась как во время нахождения емкости с деканолом в кювете, так и после ее удаления. Изменение указанных параметров во времени определяется закономерностями адсорбции н-деканола из паров на поверхность капли и на границу вода/подложка. Из этих данных следует, что хотя перенос молекул деканола лимитирован диффузией в газовой фазе [15], падение поверхностного натяжения на границе вода/пар наблюдается уже в первые секунды

после помещения деканола в кювету. Короткий интервал времени, на котором происходит резкое падение поверхностного натяжения воды, сопровождается одновременным ростом угла смачивания. Снижение поверхностного натяжения продолжается в течение всего времени нахождения источника паров деканола вблизи подложки с каплей, достигая значения 41 мН/м. После удаления источника паров из кюветы имеет место частичная десорбция молекул деканола с границы вода/ пар, в связи как с переходом деканола в объем капли, так и с переносом части молекул на границу подложка/вода.

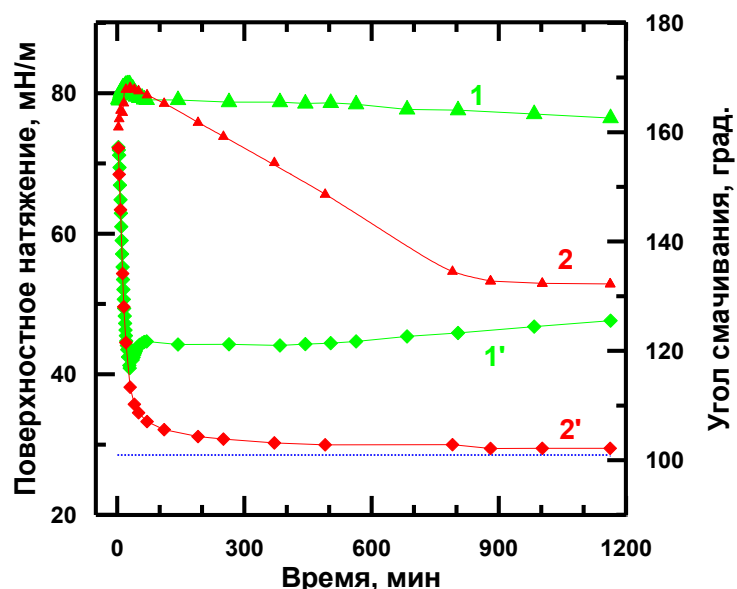


Рис. 3. Изменение во времени угла смачивания (треугольники) и поверхностного натяжения капли воды (ромбы) после помещения в кювету источника паров n-деканола на 30 минут (1, 1') и на 20 часов (2, 2').

Максимальная концентрация деканола в воде при комнатной температуре, согласно данным работы [18], составляет  $2.69 \times 10^{-4}$  моль/л, что соответствует поверхностному натяжению 28 мН/м (пунктирная линия на рис. 3).

Важно отметить, что монослойная адсорбция деканола из паров на супергидрофобную подложку маловероятна, поскольку такая адсорбция должна сопровождаться ростом поверхностной энергии подложки. Это является следствием того, что поверхностная энергия соединений с фторированными цепями ниже, чем у углеводородов [16, 17]. В то же время, поскольку используемая нами супергидрофобная подложка смачивается деканолом, при значительном давлении паров деканола в системе становится возможной капиллярная конденсация в поры супергидрофобной подложки.

Для адсорбции деканола на границе супергидрофобная подложка/вода ситуация отличается. Согласно правилу полярностей Ребиндера, адсорбция деканола на указанной границе с ориентацией гидроксильных групп вглубь водной фазы должна способствовать снижению межфазной энергии. Таким образом, при удалении источника деканола из системы стремление системы к равновесному состоянию должно приводить к перераспределению молекул деканола между поверхностями вода/пар и подложка/вода с частичным растворением деканола. Примененный здесь анализ хорошо согласуется с поведением поверхностного натяжения и угла смачивания, показанным на рис. 3. Действительно, после удаления источника деканола поверхностное натяжение вновь возрастает до  $\sigma_{LV}=48.6$  мН/м, в то время, как угол смачивания медленно падает и через 20 часов достигает значения  $\theta=162^\circ$ . Для более

детального понимания процессов, происходящих при адсорбции деканола на границу подложка/вода, полученные данные по эволюции поверхностного натяжения и угла смачивания были проанализированы согласно методу, предложенному нами ранее [19, 20]. При таком анализе, применимом для гетерогенного режима смачивания подложки, экспериментальные данные откладываются в координатах  $\cos\theta = F(1/\sigma_{LV})$ . Для временных участков эволюции параметров капли, при которых изменение поверхностного натяжения капли не сопровождается изменением доли смоченной площади  $f$  под каплей или вариацией напряжения смачивания ( $\sigma_{SV}-\sigma_{SL}$ ), косинус угла смачивания будет линейно зависеть от обратного поверхностного натяжения капли. Как было показано в [19, 20], изменение параметров  $f$  или ( $\sigma_{SV}-\sigma_{SL}$ ) приводит к переходу от одного линейного участка на указанной зависимости к другому.

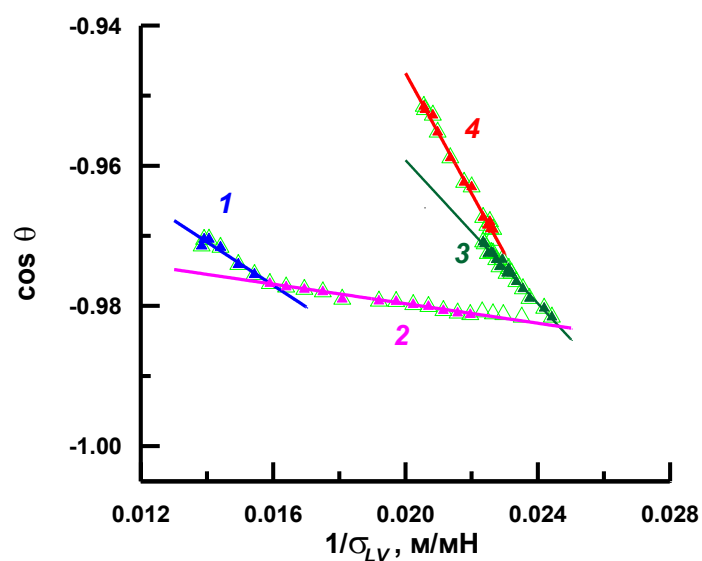


Рис. 4. К определению параметров контакта водных капель с супергидрофобной подложкой на основе метода, предложенного в [19, 20].

На рис. 4 обсуждаемые данные представлены в соответствующих координатах для случая, когда емкость с деканолом находилась в кювете в течение 30 мин. Наличие четырех участков, характеризуемых линейной зависимостью косинуса угла смачивания от обратного поверхностного натяжения, позволяет проследить изменения параметров контакта капля/подложка. Из углов наклона каждого линейного участка и отрезка, отсекаемого на оси ординат, нами были определены величины доли смоченной площади под каплей и произведения коэффициента шероховатости  $r_{SL}$  на напряжение смачивания ( $\sigma_{SV}-\sigma_{SL}$ ) для различных временных интервалов контакта капли с супергидрофобной подложкой. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры линейных участков зависимости, представленной на рис. 4.

Участок	Время контакта, мин	Доля смоченной площади, $f$	$r_{SL}(\sigma_{SV}-\sigma_{SL})$ , мН/м
1	0-5	0.07	-44
2	6-23	0.04	-22
3	26-70	0.14	-37
4	261-1400	0.23	-37

Из отрицательности знака  $r_{SL}(\sigma_{SV}-\sigma_{SL})$  следует, что для капли с адсорбированным деканолом юнговский угол смачивания (угол смачивания в зоне трехфазного контакта)

больше  $90^\circ$ . При этом, благодаря интенсивной адсорбции деканола и падению поверхностного натяжения капли, доля смоченной площади вначале падает, а затем начинает расти в процессе адсорбции молекул деканола на границе подложка/вода. Последнее ведет к снижению межфазной энергии на границе подложки с водой и разность  $(\sigma_{SV}-\sigma_{SL})$  становится менее отрицательной.

Однако здесь следует также учитывать, что снижение доли смоченной площади может также вызывать падение коэффициента шероховатости. Совместное действие указанных двух факторов (а именно, снижение по абсолютной величине напряжения смачивания и уменьшение коэффициента шероховатости) дают резкое снижение параметра  $r_{SL}(\sigma_{SV}-\sigma_{SL})$  на втором линейном участке. Третий линейный участок устанавливается после удаления емкости с деканолом из системы. На этом временном участке контакта капли с подложкой в процессе стремления системы к равновесию имеет место перенос части молекул деканола с границы капля/пар в объем капли и на межфазную границу подложка/вода. Этот процесс сопровождается ростом поверхностного натяжения капли, и установлением адсорбционного равновесия на границе подложка/капля, характеризуемого параметром  $r_{SL}(\sigma_{SV}-\sigma_{SL})=-37$  мН/м. Наконец, на 4-м временном участке с временами контакта между каплей и подложкой 4-23 часа, доля смоченной площади оказывается 23%, при этом величина параметра  $r_{SL}(\sigma_{SV}-\sigma_{SL})$  совпадает с таковой для третьего участка. Следует подчеркнуть, что после 24 часов контакта капли с подложкой, в условиях присутствия в газовой фазе паров деканола, по-прежнему имеет место гетерогенный режим смачивания и подложка ведет себя, как супергидрофобная, по отношению к капле.

Описанные закономерности установления адсорбционного равновесия в системе водная капля/супергидрофобная подложка хорошо воспроизводятся от одного эксперимента к другому. Интересно отметить, что если проводить описанный эксперимент в условиях небольшого наклона подложки к горизонту и помещать на поверхность ансамбль капель одинакового размера, то происходит интересное явление. Через 5-7 минут контакта капель с подложкой начинается самопроизвольное скатывание капель с подложки, что еще раз подтверждает установление режима смачивания, характерного для 2-го участка, с малой долей смоченной площади и малым углом скатывания.

Проведение эксперимента по второму варианту соответствует ситуации, когда емкость с деканолом стационарно помещается в кювету с сидящей каплей. Как следует из данных рис. 3, стационарный источник паров деканола способствует образованию достаточно плотно упакованного монослоя деканола на границе капля/пар с поверхностным натяжением 29.6 мН/м. Последнее значение хорошо согласуется с литературными данными для плотноупакованного монослоя  $\sigma_{LV}=28$  мН/м [18]. При этом время установления равновесных значений поверхностного натяжения и угла смачивания составляет около 15 часов. Однако, при стационарном высоком содержании паров ПАВ в системе угол смачивания падает до значений  $\theta=132^\circ$ . При этом капли перестают скатываться с поверхности образца при его наклоне, что указывает на значительный рост гистерезиса смачивания. Сравнение параметров смачивания капель воды в двух обсужденных выше вариантах контакта капли с парами однозначно указывает на то, что кратковременное контактирование капель с парами позволяет нанести малорастворимый ПАВ на поверхность капли без одновременного значительного снижения угла смачивания. Поэтому в дальнейших экспериментах по изучению статистики кристаллизации сидящих капель мы использовали предварительный 30 минутный контакт ансамбля капель с насыщенными парами деканола до начала охлаждения системы.



### Влияние адсорбции ПАВ на статистику кристаллизации сидящих капель воды

Целью наших исследований являлось изучение влияния поверхностно-активных веществ, адсорбированных на границе капля/пар, на статистику кристаллизации в ансамбле сидящих капель. С этой целью, на супергидрофобной подложке детально исследовались статистики кристаллизации для капель чистой воды и воды с адсорбированным монослоем деканола. Данные, полученные на одной подложке после многократных экспериментов, представлены на рис. 5 в координатах  $\lg(N/N_0) = F(t)$ , где  $N$  – количество капель, оставшихся в состоянии переохлажденной жидкости к моменту времени  $t$ ,  $N_0$  – общее количество капель в исследуемом ансамбле.

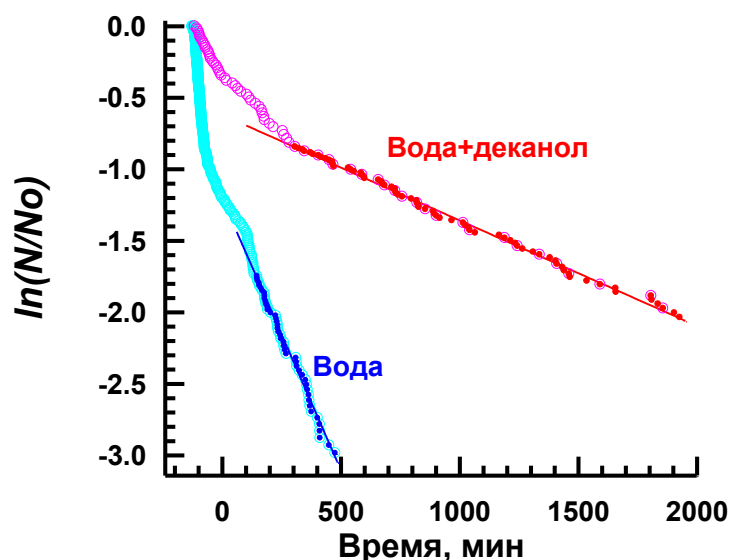


Рис. 5. Кинетика кристаллизации капель воды в присутствии и отсутствии паров деканола при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Анализ данных рис. 5 позволяет заключить, что кинетика нуклеации капель чистой воды и воды с ПАВ на супергидрофобных подложках имеет нестационарный характер для малых времен с выходом на линейную зависимость при длительных временах нахождения капель в переохлажденном состоянии. Линейный характер зависимости указывает на стационарность процесса нуклеации. При этом, скорости нуклеации при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$  для капель с адсорбированным деканолом существенно меньше, чем для капель чистой воды. Кинетику нуклеации сидящих капель, характеризующую суммарными скоростями гомогенной и гетерогенной нуклеации [4], удобно количественно характеризовать углом наклона  $k$  линейной зависимости в координатах рис. 5.

В таблице 2 представлены значения констант для обеих изученных систем.

Таблица 2. Константы, характеризующие скорости нуклеации в ансамбле сидящих капель деионизованной переохлажденной воды и капель воды с адсорбированным деканолом при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Деионизованная вода		Деионизованная вода с адсорбированным деканолом	
Временной интервал, мин	$k$ , $\text{мин}^{-1}$	Временной интервал, мин	$k$ , $\text{мин}^{-1}$
140-630	$3.7 \times 10^{-3}$	300-2300	$7.3 \times 10^{-4}$



Анализ результатов, представленных на рис. 5 и в таблице 2, позволяет заключить, что присутствие ПАВ на поверхности капель значительно увеличивает время нахождения капель воды в переохлажденном состоянии. При этом стационарные скорости нуклеации значительно ниже в присутствии молекул деканола. Такой результат нами прогнозировался, в связи с тем, что адсорбция среднецепочечных ПАВ, за счет снижения скорости испарения воды, препятствует инициированному испарением дополнительному охлаждению капель. В результате, при одинаковых условиях по температуре и влажности окружающей среды, капли с адсорбированным ПАВ будут иметь более высокую температуру. Следовательно, согласно классической теории нуклеации [21], для них скорость нуклеации будет меньше. Кроме того, из рис. 5 следует, что присутствие ПАВ в капле вызывает возрастание индукционного времени для установления стационарного распределения зародышей по размерам. Это, по-видимому, связано с двумя факторами. С одной стороны, перенос ПАВ с границы вода/пар на границу вода/подложка является длительным по времени даже при комнатной температуре (см. эксперименты по эволюции параметров сидящей капли, рис. 3). Очевидно, что при низких температурах адсорбционное равновесие достигается при существенно больших временах. С другой стороны, адсорбция деканола на границе вода/подложка позволяет блокировать часть ядер гетерогенной нуклеации на подложке. Таким образом, в процессе адсорбции ПАВ мы наблюдаем снижение величины нестационарной скорости нуклеации и замедление установления стационарного режима, вызванного медленностью установления адсорбционного равновесия.

### **Заключение**

В данной работе мы исследовали влияние адсорбции деканола на параметры водной капли, сидящей на супергидрофобной подложке, а также на особенности кинетики нуклеации на супергидрофобных поверхностях в ансамблях капель переохлажденной воды при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ . Исследования проводились в условиях, когда относительная влажность воздуха в экспериментальной ячейке при указанной температуре была не ниже 87%. Показано, что адсорбция деканола приводит к формированию монослоя ПАВ на поверхности капель, способствующего снижению испарения воды при недосыщении атмосферы водяными парами. Кроме того, имеет место адсорбция ПАВ и на границе вода/супергидрофобная подложка, что, при недостатке деканола в системе, ведет к незначительному увеличению доли смоченной площади при сохранении гетерогенного режима смачивания. Указанные особенности адсорбционных процессов обеспечивают дополнительный противообледенительный эффект супергидрофобных поверхностей за счет снижения скорости испарения воды и блокирования части ядер гетерогенной нуклеации на подложке.

Выполнен сравнительный анализ статистик кристаллизации на супергидрофобных поверхностях для больших ансамблей капель деионизованной переохлажденной воды с адсорбированным деканолом и без него. Обнаружено, что на супергидрофобных поверхностях имеет место значительное запаздывание кристаллизации. Кроме того, адсорбция деканола на поверхность водных капель способствует увеличению вероятности поддержания капель в состоянии переохлажденной жидкости без кристаллизации в течение десятка часов. Явление очень значительного замедления кристаллизации переохлажденной воды на супергидрофобных поверхностях в присутствии ПАВ обнаружено впервые и может найти широкое применение на практике.

## Литература

1. T.M. Schutzius, S. Jung, T. Maitra, P. Eberle, C. Antonini, C. Stamatopoulos, D. Poulikakos. *Langmuir*, DOI: 10.1021/la502586a
2. L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko. *Mendeleev Commun.* 2013, **23**, 3–10.
3. D. Attinger, C. Frankiewicz, A. Betz, T.M. Schutzius, R. Ganguly, A. Das, C.-J. Kim, C.M. Megaridis. *MRS Energy Sustain.* 2014, **1**, E4 (40 p.). DOI: 10.1557/mre.2014.9.
4. L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, V.V. Korolev, A.S. Pashinin. *Langmuir*, 2014, **30**, 1659–1668.
5. P. Eberle, M.K. Tiwari, T. Maitra, D. Poulikakos. *Nanoscale*, 2014, **6**, 4874–4881.
6. Л.Б. Бойнович, А.Г. Домантовский, А.М. Емельяненко, А.Б. Миллер, Ю.Ф. Потапов, А.Н. Ходан. *Известия Академии наук. Сер. хим.*, 2013, № 2, 383–390.
7. Y.H. Yeong, A. Steele, E. Loth, I. Bayer, G. De Combarieu, C. Lakeman. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**, 053112.
8. S. Jung, M.K. Tiwari, N.V. Doan, D. Poulikakos. *Nat. Commun.*, 2012, **3**, 615.
9. Н.А. Фукс. *Испарение и рост капель в газообразной среде*. Изд-во АН СССР, Москва, 1958, 92 с.
10. *Retardation of evaporation by monolayers: Transport processes*. Ed. by V.K. La Mer, Academic Press, N.Y., London, 1962, 276 p.
11. L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, A.S. Pashinin. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010, **2**, 1754–1758.
12. A.M. Emel'yanenko, L.B. Boinovich. *Colloid J.*, 2001, **63**, 159–172.
13. D.M. Murphy, T. Koop. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2005, **131**, 1539–1565.
14. N.L. Jarvis, C.O. Timmons, W.A. Zisman. In: *Retardation of evaporation by monolayers: Transport processes*. Ed. by V.K. La Mer, Academic Press, N.Y., London, 1962, p.41–58.
15. C.A. MacLeod, C.J. Radke. *J. Colloid Interface Sci.*, 1994, **166**, 73–88.
16. L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko. *Usp. Khim.*, 2008, **77**, 619–638.
17. M.P. Krafft, J.G. Riess. *Chem. Rev.*, 2009, **109**, 1714–1792.
18. J.R. Hommelen. *J. Colloid Sci.*, 1959, **14**, 385–400.
19. L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2012, **179**, 133–141.
20. L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko. *Chem. Lett.*, 2012, **41**, 1241–1243.
21. В.П. Скрипов, В.П. Коверда. *Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей*. Наука, Москва, 1984, 232 с.