

РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О ПОВЕРХНОСТНЫХ СИЛАХ – ОТ КОНЦЕПЦИИ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ К СОВРЕМЕННЫМ НАНОТЕХНОЛОГИЯМ

© 2020 г. Л. Б. Бойнович^а, А. М. Емельяненко^{а,*}

^аРоссийская академия наук, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина, 119071 Москва, Россия

*e-mail: ame@phycr.ac.ru

Поступила в редакцию 04.07.2019 г.

После доработки 12.07.2019 г.

Принята к публикации 03.09.2019 г.

Дан краткий анализ этапов развития учения о поверхностных силах и тонких слоях жидкости. Представлен обзор основных достижений лаборатории поверхностных сил ИФХЭ РАН, связанных с физической химией поверхностных явлений, включая принципиально новые результаты, получаемые сотрудниками в настоящее время.

Ключевые слова: поверхностные явления, физическая химия

DOI: 10.31857/S004445372003005X

В марте 2020 года исполнится 85 лет со времени создания лаборатории тонких слоев в Коллоидно-электрохимическом институте АН СССР (позднее Институт физической химии АН СССР, с 2005 – Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук), организатором которой и руководителем в течение многих лет был замечательный советский и российский ученый Борис Владимирович Дерягин. Тематика лаборатории охватывала вопросы, связанные с исследованием свойств тонких слоев жидкостей. Была сформулирована концепция поверхностных сил, связанных с взаимодействием микро- и макротел через жидкие прослойки и исследовано изменение основной характеристики поверхностных сил – расклинивающего давления – с толщиной прослойки. Детальный анализ физической природы поверхностных сил, направленный на выявление области действия этих сил, позволил Б.В. Дерягину совместно с М.М. Кусаковым впервые выдвинуть идею о существовании измененной структуры жидкости в очень тонких водных прослойках [1]. В те же годы Б.В. Дерягиным совместно с М.М. Кусаковым, А.С. Титиевской и Л.С. Лебедевой [2–4] активно проводились экспериментальные исследования влияния полимолекулярных жидких прослоек на взаимодействие твердых поверхностей, устойчивости смачивающих пленок, образующихся между пузырьком газа и твердой подложкой.

В первые годы существования лаборатории Б.В. Дерягин выполнил ряд теоретических работ, впоследствии получивших широкое мировое признание и применение в коллоидной химии. Была создана теория агрегативной устойчивости и коагуляции лиофобных коллоидов и дисперсных систем (1935–1941 гг.) [5–8], основанная на совместном рассмотрении ван-дер-ваальсовых сил между телами и взаимодействия двойных электрических слоев. Построение этой теории было завершено в 1941 г. работой, выполненной Б.В. Дерягиным совместно с Л.Д. Ландау [8], где удалось строго рассмотреть случай сильно заряженных поверхностей и было теоретически обосновано эмпирическое правило Шульце–Гарди. В настоящее время эта теория излагается во всех монографиях по коллоидной химии и цитируется в тысячах статей.

К 1940 году А.Н. Фрумкиным [9] и Б.В. Дерягиным [10] была построена теория смачивания, позволяющая связать углы смачивания, образуемые жидким мениском на твердой подложке, с изотермами расклинивающего давления смачивающих пленок. Этот подход нашел применение при построении фундаментальных основ процесса флотации, капиллярных эффектов, управления смачиванием. Также к 1940 году была сформулирована теория капиллярной конденсации, выведено обобщенное уравнение сорбции и электрокапиллярное уравнение с учетом расклинива-

ющего действия в полимолекулярных жидких пленках [11,12]. Особое место в исследованиях первых лет существования лаборатории занимали работы, выполненные совместно с В.П. Лазаревым по механизму внешнего трения и его связи с силой прилипания [13]. С опорой на теорию трения и скольжения, разработанную Б.В. Дерягиным в 1934 г. [14], в лаборатории активно изучался механизм маслянистости смазочных веществ, проявляющийся при граничном трении. Экспериментально было изучено влияние на трение адсорбционных слоев при различном заполнении монослоя, и влияние полимолекулярных слоев Ленгмюра–Блоджетт на константы в двучленном законе трения, предложенном Б.В. Дерягиным [15].

В годы Великой Отечественной войны Институт был эвакуирован в Казань. Лаборатория, размещавшаяся в это время в здании Казанского университета, перестроила свою работу в соответствии с нуждами военного времени. Именно в этот период широкое развитие получили работы по улучшению смазочных свойств масел путем применения различных присадок, по изучению смазочных свойств минеральных масел из ишимбаевской нефти и масел-заменителей для самолетов. Для определения вязкостных свойств масел были разработаны новые варианты метода сдувания, впервые предложенного Б.В. Дерягиным и Г.М. Страховским в 1940 г. для изучения пристенной вязкости тонких слоев. Новые модификации метода сдувания, разработанные Б.В. Дерягиным в соавторстве с М.М. Кусаковым, К.С. Крым, Д.С. Малышевой, Н.Н. Захаваевой [16, 17] и впоследствии В.В. Карасевым [18], позволили определять распределение вязкости по толщине граничного слоя и получать информацию о структуре нанометровых слоев жидкости.

В Казани к лаборатории присоединилась новая группа сотрудников (П.С. Прохоров, И.С. Артемов, Г.Я. Власенко), принеся с собой новое, важное для обороны страны направление, связанное с изучением аэрозолей. Казанский период работы лаборатории озаглавлен началом исследований в области теории полива и ее практического применения. В 1943–1945 гг. Б.В. Дерягин разработал капиллярно-гидродинамическую теорию нанесения тонких слоев на движущуюся основу [19, 20]. Первая строгая проверка теории в лаборатории была выполнена А.С. Титиевской для вертикально ориентированной стенки [21]. Эта теория в дальнейшем стала научной базой процесса нанесения светочувствительных слоев на фабриках киноплёнки и фотобумаги. На основании этой же теории была разработана методика нанесения слоев жидкости заданной толщины на твердые поверхности.

После возвращения из эвакуации в Москву в 1943 г. лаборатория переименовывается в лабораторию поверхностных сил. В это время сотрудники лаборатории продолжают работы по дальнейшему развитию теории поверхностных сил, изучению их роли в устойчивости и кинетических явлениях в гетерогенных дисперсных системах, включая и аэрозоли.

Наряду с этим, тематика лаборатории продолжает расширяться. Начаты работы по созданию установки и прямому экспериментальному измерению молекулярного притяжения тел в функции расстояния между их поверхностями. Б.В. Дерягиным совместно с И.И. Абрикосовой был поставлен блестящий эксперимент по прямому измерению сил взаимодействия между телами, для которого была разработана установка микровесов с обратной связью, обеспечивающая требуемую точность измерений [22, 23]. Эта работа была удостоена Ломоносовской премии АН СССР за 1958 г. Проведенные измерения подтвердили электромагнитную природу молекулярных сил и привели, в дальнейшем, к созданию Е.М. Лифшицем с коллегами общей теории вандерваальсовых сил.

Исследование роли поверхностных сил в кинетических явлениях выполнялось как теоретическими методами, так и с применением новых объектов и экспериментальных методик. В 1947 г. Б.В. Дерягиным была разработана теория капиллярного осмоса [24], рассматривающая течение жидкости под действием градиента концентрации растворенного вещества, и теория обратного осмоса, при котором перенос молекул диффузионного слоя потоком жидкости приводит к возникновению разности концентраций. Следует отметить, что капиллярный осмос служит прямым подтверждением диффузности адсорбционных слоев в пленках растворов. Первые экспериментальные исследования новых явлений, связанных с капиллярным осмосом, обратным осмосом и термоосмосом, были проведены Б.В. Дерягиным совместно с Г.П. Сидоренковым, М.М. Коптеловой, С.В. Нерпиным и Ю. Шутором [24–26]. Позднее важность обнаруженных в лаборатории осмотических явлений отмечалась при исследовании самых разных физико-химических процессов в живых и неживых системах. Так, например, было показано, что капиллярный осмос играет важную роль в процессах мембранного транспорта, контролирующего обмен веществ между биологической клеткой и средой. Экспериментальные исследования диффузионных потоков в газах и жидкостях позволили открыть явление диффузиофореза, возникающего при движении взвешенных частиц относительно раствора. Это явление было теоретически проанализировано Б.В. Дерягиным, С.С. Духиным и С.П. Бакановым [27, 28]. Позднее явление диффузиофореза было использовано в работах лаборатории для

объяснения осаждения глобул суспензии латекса на поверхности с предварительно нанесенным слоем электролита, что позволило получать тонкие пленки латекса любой формы (метод ионного отложения, применяемый в заводских масштабах). Диффузиофорез взвешенных в растворе частиц позволил теоретически объяснить полное отсутствие захвата пузырьком гидрофобных частиц с размером, меньшим критического, что важно для теории и практики флотации. Совместно с М.А. Альтшулером, С.С. Духиным и В.Д. Сисиним была показана важность учета диффузиофореза в процессах извлечения нефти из пористых пород [29].

Цикл исследований по физико-химической механике аэрозолей, начатых Б.В. Дерягиным с С.П. Бакановым, Ю.И. Яламовым и С.С. Духиным, привел к построению теории термофореза и диффузиофореза взвешенных в газе летучих и нелетучих частиц [28, 30–33]. Теоретически полученные закономерности термо- и диффузиофореза позднее были подтверждены экспериментально в работах с Я.И. Рабиновичем и А.И. Сторожиловой [34–36] и легли в основу ряда прикладных расчетов конденсационных методов пылеулавливания.

С пятидесятых годов в лаборатории начинает активно развиваться направление, связанное с адгезией твердых тел. Б.В. Дерягиным совместно с Н.А. Кротовой были развиты представления о фундаментальной роли двойного электрического слоя, образующегося на границе раздела контактирующих тел, в явлениях адгезии. Формулируются основы электрической теории адгезии пленок к твердым поверхностям и дается ее экспериментальное обоснование [37]. Позднее совместно с В.П. Смилкой создается электронная теория адгезии металлов, разделенных полупроводниковой прослойкой [38, 39]. Развитые представления нашли экспериментальное подтверждение не только для случая прилипания пленок, что было показано в работах Н.А. Кротовой, Ю.М. Кирилловой и Л.П. Морозовой [40–42], но и в случае прилипания частиц порошков, детально изученном в работах И.Н. Алейниковой, Ю.П. Топорова, Л.Н. Бурта-Гапанович [43–45].

Влияние контактных деформаций на адгезию было впервые теоретически рассмотрено Б.В. Дерягиным в 1934 г. [46]. Общая строгая теория, учитывающая влияние деформации частиц при контакте на величину адгезии, была построена Б.В. Дерягиным, В.М. Муллером и Ю.П. Топоровым в 1975 г. и получила в литературе название теории ДМТ [47]. Позднее, в начале 80-х, совместные с В.М. Муллером и В.С. Ющенко работы привели к созданию теории, учитывающей влияние поверхностных сил на взаимное прилипание и деформацию упругих частиц [48]. Ключевая

роль контактной электризации в явлениях прилипания и отскока упругих частиц, следующая из основных положений этой теории, была впоследствии экспериментально подтверждена в работах сотрудников лаборатории Ю.П. Топорова, И.Н. Алейниковой и Г.И. Щербины [49].

Существование двойного электрического слоя в зоне адгезионного контакта приводит к эмиссии электронов высоких энергий при отслаивании полимерных пленок от поверхности стекла в вакууме. Явление эмиссии высокоэнергетических электронов при нарушении адгезионного контакта [50] было экспериментально обнаружено Б.В. Дерягиным совместно с Н.А. Кротовой и В.В. Карасевым в 1953 г. Последующие исследования с участием В.А. Клюева, Н.А. Кротовой, В.И. Анисимовой, Ю.П. Топорова, Ю.М. Кирилловой показали, что эмиссия связана с замедлением разряда двойного слоя при разрыве межмолекулярных связей. Это замедление может количественно объяснить как высокое значение работы, потраченной на отрыв пленки, так и ее зависимость от скорости отрыва и давления окружающего газа [51]. Позднее эмиссия электронов была обнаружена Б.В. Дерягиным, Н.А. Кротовой и Ю.А. Хрусталевым и при раскалывании кристаллов [52]. Явление эмиссии высокоэнергетических электронов со свежобразованных поверхностей при нарушении адгезионных и когезионных связей было официально зарегистрировано в качестве открытия и способствовало созданию нового направления науки, связанного с исследованием и использованием электроадгезионных и механоэмиссионных явлений. Открытие радиационного действия электронов, генерируемых при нарушении адгезионных и когезионных связей, связало механоэмиссию с механохимией.

Еще одно новое направление исследований, в области синтеза алмаза, появилось в лаборатории в пятидесятые годы и было связано с именами Б.В. Дерягина, Б.В. Спицына, В.М. Лукьяновича, Д.В. Федосеева, В.А. Рябова и А.В. Лавреньтьева. Развитие экспериментальных методов и теоретических представлений о выращивании алмаза из углеводородных газов привело сотрудников лаборатории к открытию нитевидных кристаллов алмаза [53]. Дальнейшие исследования с использованием многочисленных методов, включая ионные, плазменные и химического осаждения, выявили необходимость введения атомарного водорода в зону кристаллизации для подавления кристаллизации графита и получения моно- и поликристаллических алмазных пленок.

Кроме того, была показана возможность выращивания алмазных кристаллов размером до нескольких десятков микрон не только на затравочных кристаллах алмазов, но и на инородных подложках, и даже без подложки — гомогенно, в

объеме газовой фазы [54, 55]. Исследование влияния термической и электрической активации газовой фазы в процессе роста пленки с различными типами углеродных связей позволили выявить условия избирательного роста граней с преимущественно тетраэдрической координацией атомов углерода в алмазоподобных пленках. Эти исследования во многом определили основные тенденции в области создания алмазных и алмазоподобных пленочных материалов.

Несмотря на появление новых перспективных тематик из самых разных областей физической химии поверхностных явлений, расширение и углубление физических основ теории устойчивости коллоидов и тонких пленок оставалось приоритетным направлением работ лаборатории. На протяжении всего времени существования лаборатории это направление последовательно развивалось. Термодинамика и гидродинамика тонких пленок развивалась в работах Б.В. Дерягина, С.В. Нерпина, Г.А. Мартынова, Ю.В. Гутопа [56–58]. Ослабление дисперсионных взаимодействий в пленках электролитов за счет экранирования этих взаимодействий двойными электрическими слоями впервые было показано в работе В.Н. Горелкина и В.П. Смильги [59]. Учет возрастания вязкого сопротивления сферических частиц их сближению и дисперсионных взаимодействий сближающихся частиц при малом зазоре позволил В.М. Муллеру и Б.В. Дерягину уточнить теорию коагуляции с учетом влияния радиуса частиц на пороги коагуляции [60]. Для изучения основных закономерностей коагуляции коллоидов ряд сотрудников лаборатории под руководством Б.В. Дерягина разработал метод исследования взаимодействия скрещенных стеклянных нитей, чистых и покрытых пленками полимеров, в процессе их сближения и слипания в различных средах. В этих опытах впервые было исследовано явление поверхностной сольватации полимеров [61].

Изучение потенциальных барьеров при сближении металлических частиц было выполнено в работах с Т.Н. Воропаевой и Б.Н. Кабановым [62], использовавших в качестве модельной системы тонкие скрещенные металлические нити, погруженные в раствор электролита. Было получено строгое подтверждение теории коагуляции для малых концентраций электролитов. Позднее Б.В. Дерягиным совместно с Я.И. Рабиновичем был разработан еще один вариант метода, позволявший вести измерения в момент преодоления силового барьера [63]. Устойчивость и изотермы расклинивающего давления свободных пленок изучались А.С. Титиевской [64], смачивающих пленок растворов электролитов и полярных жидкостей З.М. Зориным [65, 66], смачивающих однокомпонентных металлических пленок на поверхности органических жидкостей Л.Ф. Леоновым [67]. Изучение устойчивости пленок

растворов полярных и неполярных веществ в неполярных жидкостях на диэлектрических подложках с различной шероховатостью и структурой было исследовано в работах Л.Б. Бойнович [68, 69]. Эти исследования показали возможность существования изотерм расклинивающего давления различной формы, что еще раз подтвердило необходимость рассмотрения, помимо дисперсионных и ионно-электростатических слагающих, и других типов поверхностных сил. Для описания устойчивости пленок растворов неполярных жидкостей Б.В. Дерягиным, Н.В. Чураевым и В.М. Старовым была построена теория адсорбционной составляющей расклинивающего давления, возникающей за счет перекрытия диффузных адсорбционных атмосфер [70, 71]. Экспериментальное подтверждение эта теория получила в работах Л.Б. Бойнович и Б.В. Дерягина [72].

Электронная составляющая расклинивающего давления, возникающая в тонких пленках ртути на поверхности алканов, была теоретически проанализирована в работах В.И. Ролдугина и Б.В. Дерягина [73]. Было показано, что, согласно принципу неопределенности Гейзенберга, ограничение пространства, доступного для движения электронов, приводит к повышению кинетической энергии электронов в металлической пленке с уменьшением ее толщины. Знак и величина электронной составляющей определяются состоянием поверхности и свойствами жидкой подложки. Были определены условия устойчивости однокомпонентных жидкометаллических пленок, хорошо согласующиеся с полученными Л.Ф. Леоновым экспериментальными данными [67].

Рассмотрение структурной составляющей расклинивающего давления было инициировано еще первыми работами в области устойчивости водных смачивающих пленок, выполненными Б.В. Дерягиным совместно с М.М. Кусаковым в сороковые годы [1]. Более поздние эксперименты Б.В. Дерягина с Н.В. Чураевым, З.М. Зориным, Я.И. Рабиновичем [65, 74, 75], перекликаясь с работами зарубежных коллег (Р.М. Пэшли, Дж.Н. Израелашвили, Дж.А. Китченера [76, 77]) привели к созданию концепции статических структурных сил, связанных со спецификой ориентации и взаимодействия молекул жидкости в тонкой пленке как между собой, так и с ограничивающими фазами. В начале 90-х Л.Б. Бойнович и А.М. Емельяненко теоретически развивают новый подход к анализу структурных сил, основанный на динамической структуре жидкостей, индуцированной пространственными ограничениями [78]. Суть подхода заключается в учете изменений в спектре молекулярных движений всех типов, включая колебательные, вращательные и трансляционные, при переходе от объемной жидкости к тонкой пленке. Вклад высококачественных акустических колебательных возбужде-

ний в устойчивость тонких пленок был назван фононной составляющей расклинивающего давления. Предложенный подход позволил объяснить появление как сил отталкивания, стабилизирующих водные прослойки, ограниченные гидрофильными твердыми поверхностями, так и дестабилизирующие силы притяжения, возникающие для водных слоев, зажатых между гидрофобными телами. Ключевыми факторами, обеспечивающими значительные силы, связанные с динамической структурой жидких пленок, являются сильные межмолекулярные взаимодействия внутри пленки и с ограничивающими фазами.

Борис Владимирович Дерягин был бессменным руководителем лаборатории с момента ее создания и до 1988 г., когда в рамках начавшихся в годы перестройки преобразований в науке был введен возрастной ценз для руководителей научных подразделений. С 1989 по 1995 год лабораторию возглавлял Владимир Максович Муллер, а с 1996 года по настоящее время – Александр Михайлович Емельяненко. Несмотря на тяжелое положение в российской науке в 90-е и начале 2000-х годов, лаборатория сохранила основные кадры и широкий спектр тематик.

Дальнейшее развитие получила теория адгезии с учетом вязкоупругого характера деформации тел при контакте (Б.В. Дерягин, В.М. Муллер, Ю.П. Топоров [79]). В теории обратимой коагуляции частиц со слабой связью [80], разработанной В.М. Муллером, были получены общие уравнения кинетики агрегации с учетом распада агрегатов и закономерности быстрой коагуляции гидрозолей в дальнем потенциальном минимуме. Описание в рамках предложенной теории условий появления S-образных кривых кинетики коагуляции и старения агрегатов позволило предложить подходы к оценке энергии связи частиц в агрегатах и высоты потенциального барьера взаимодействия частиц из опытов по коагуляции разбавленных дисперсий.

Анализ фазовых превращений в наноразмерных системах и на границах раздела сред позволил Л.Б. Бойнович и А.М. Емельяненко сформулировать и теоретически обосновать механизм сдвига тройной точки в пространственно-ограниченных системах с криволинейной поверхностью и на межфазных границах [81, 82]. Разработанный подход, с одной стороны, дал объяснение явлениям предплавления и предкристаллизации, наблюдаемым экспериментально для водных сред и углеводородных жидкостей, с другой стороны, раскрыл природу незамерзающих водных слоев в наноразмерных пористых средах.

В работах Г.А. Мартынова (при участии А.Г. Вомпе и Г.Н. Саркисова) были развиты новые подходы в статистической физике жидкости [83–87]. Построена общая теория фазовых пере-

ходов второго рода, основанная на анализе локального уравнения Орштейна–Цернике, описывающего состояние вещества внутри физической бесконечно малого объема корреляционной сферы. Предложенный локальный подход к теории критических явлений позволил продвинуться в понимании процессов, происходящих в критической точке и ее окрестности. Была показана единственность критической точки в жидкостях и объяснена причина возникновения в окрестности критической точки области подобия, существование которой было предсказано еще Ван-дер-Ваальсом. Кроме того, удалось получить универсальные уравнения состояния для давления, сжимаемости, теплоемкости и химического потенциала в окрестности критической точки и обобщить теорию критических явлений на случай растворов электролитов.

С приходом в лабораторию С.Ю. Крылова классическое рассмотрение проблем адгезии и трения твердых тел было дополнено анализом на уровне взаимодействий отдельных атомов и молекулярных ансамблей. Были рассмотрены различные механизмы диссипации энергии и импульса при трении, сопровождающем движение по поверхности с различными скоростями [88, 89]. Было обнаружено, что ключевой механизм возникновения силы трения связан не с переходом механической энергии в тепло, а с динамической хаотизацией, которая соответствует безвозвратной передаче части механической энергии в колебательные степени свободы твердого тела. Таким образом, при относительном движении тел полная механическая энергия системы сохраняется, но в среднем все большая ее часть локализуется в колебательных степенях свободы, а часть энергии относительного движения тел безвозвратно теряется.

Учет сил изображения, выполненный Л.Б. Бойнович и А.М. Емельяненко при развитии теории адсорбционной составляющей расклинивающего давления, позволил распространить применимость теории на случай более широкого класса растворов, в том числе, растворов полярных молекул в неполярных растворителях [90–92].

Экспериментальное исследование влияния структуры воды на свойства водных растворов электролитов в объемном состоянии и в поверхностных слоях привело к обнаружению Ф.М. Шагиевой и Л.Б. Бойнович специфического ионного эффекта в поведении динамической диэлектрической проницаемости растворов галогенидов щелочных металлов [93]. Этот же эффект наблюдался Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко и А.Д. Модестовым в коррозионной активности растворов при контакте с супергидрофобными покрытиями на алюминии [94], Е.В. Чулковой и Л.Б. Бойнович в изменении с температурой отношения по-

верхностного натяжения раствора к его плотности [95], и, наконец, А.М. Емельяненко и Л.Б. Бойнович в кинетике нуклеации сидящих капель растворов на супергидрофобных подложках [96].

С начала 90-х в лаборатории активно развивались численные методы исследования поверхностных явлений. Численное решение систем уравнений, описывающих поступательные и колебательные движения атомов и молекул, процессов переноса в объемных фазах и на межфазных границах, было использовано С.П. Бакановым и А.М. Емельяненко для описания термофореза в аэрозольных системах [97], В.И. Ролдугиным и А.М. Емельяненко для моделирования работы аэрозольных фильтров [98], Л.Б. Бойнович и А.М. Емельяненко при приложении модели связанных осцилляторов для расчетов фоновой составляющей расклинивающего давления [99]. Для численного исследования переходной зоны между каплей жидкости и смачивающей пленкой методом Монте-Карло А.М. Емельяненко и Л.Б. Бойнович был разработан подход, позволивший включить в рамки известной решеточной модели SOS (solid-on-solid, т.е., “твердое на твердом”) потенциал поля поверхностных сил фаз, ограничивающих модельную “жидкую” прослойку [100].

С 2005 года, с приходом Г.Г. Маленкова, было инициировано новое для лаборатории направление работ по численному моделированию. Используя молекулярно-динамическое моделирование тонких пленок воды, Г.Г. Маленков получил ряд интересных результатов, расширяющих наши представления о структуре воды и особенностях движения ее молекул, как в объеме пленки, так и в ее поверхностных слоях [101]. В частности, была установлена сильная шероховатость поверхности раздела вода – воздух и было показано, что коэффициент самодиффузии молекул воды вблизи поверхности заметно выше, чем в середине слоя и в объемной фазе. При этом диффузия поверхностных молекул оказалась практически изотропной, что также связывается с шероховатостью поверхности. Для воды было обнаружено существование кластеров с долгоживущими водородными связями, что указывает на существование корреляций между молекулами, входящими в кластеры. Исследования коллективных движений в низкомолекулярных жидких средах позволили выявить динамическую неоднородность объемной воды и аргона на наноразмерном уровне [102, 103]. Было показано, что коллективные движения молекулярных ансамблей, содержащих десятки и сотни молекул, приводят к формированию вихрей, перемещающихся по объему жидкости [104].

Значительное недофинансирование науки и, вследствие этого, невозможность обновлять и

модернизировать приборную базу привело к тому, что в лаборатории большое внимание уделялось и развитию экспериментальных методик, и созданию новых экспериментальных установок. Г.И. Щербиной, И.Н. Алейниковой и Ю.П. Топоровым в сотрудничестве с конструкторами ЛОМО, инженерами и программистами Вильнюсского СКТБ средств автоматизации и Тверского государственного университета был создан адгезионный зонд, позволяющий в условиях контролируемой деформации одновременно определять силу, необходимую для разрушения адгезионного контакта, и поверхностную плотность заряда в зоне контакта [105]. Для изучения динамической структуры тонких жидких пленок Л.Б. Бойнович и А.М. Емельяненко была разработана уникальная ячейка, с применением которой стало возможным исследование спектров пропускания жидких прослоек в процессе их утончения [106]. Ячейка позволяет работать с давлениями 1–11 атм, что обеспечивает возможность получения пленок толщиной от 10 мкм до 10 нм в рамках одного эксперимента. С использованием этой ячейки Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко, Е.И. Кочеткова, И.А. Гагина методом ИК-фурье-спектроскопии получили экспериментальные данные по эволюции спектров поглощения для ряда насыщенных спиртов и углеводов при утончении жидких прослоек, убедительно подтвердившие изменения в величине и характере внутри- и межмолекулярных взаимодействий, происходящие при пространственном ограничении жидкости [107–109]. С применением разработанной ячейки было также обнаружено, что для пленок нематических жидких кристаллов с толщинами менее микрона по мере утончения происходит изменение конформационного состава жидкости и ориентационное упорядочение фрагментов молекул относительно межфазной границы [108]. Обнаруженные структурные изменения позволили объяснить устойчивость исследованных симметричных прослоек (Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко).

Развитие теоретической базы эллипсометрических методов привело к разработке метода эллипсометрии многослойных свободных пленок [110]. Был дан теоретический анализ возможностей многоволновой эллипсометрии для определения оптических характеристик неоднородных по толщине покрытий и анизотропии многослойных планарных систем (Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко). Это позволило, с одной стороны, показать эффективность эллипсометрии для обнаружения и исследования начальных стадий образования новой фазы. С другой стороны, с использованием этих методов впервые были измерены показатели преломления и их изменение в нанометровых слоях жидкостей, определены интервалы применимости объемных значений оп-

тических параметров при проведении измерений классическими методами.

Была разработана и впоследствии по мере развития компьютерной и видеотехники регулярно совершенствовалась автоматизированная установка для измерения поверхностного и межфазного натяжения жидкостей в статическом и динамическом режимах, изучения статических и динамических углов смачивания, исследования физико-химических процессов, происходящих при длительном контакте твердых поверхностей с жидкими средами (А.М. Емельяненко, Л.Б. Бойнович, К.А. Емельяненко). По сегодняшний день эта установка остается одной из лучших в мире по точности измерений и возможностям одновременного определения широкого набора параметров как для сидящих и висящих капель, так и для капель на вертикальных нитях [111].

Детальное изучение смачивания поверхностей различной природы и формы позволило Л.Б. Бойнович и А.М. Емельяненко обобщить теорию смачивания, развитую Б.В. Дерягиным для плоских твердых поверхностей, на случай криволинейных твердых поверхностей, в том числе декорированных наночастицами или нанопористых [112]. На основании выполненного теоретического анализа удалось объяснить обнаруженные экспериментально особенности смачивания внутренних и внешних поверхностей нанотрубок и явление пропитки гидрофобных пор. В результате рассмотрения смачивания при равновесии двух ограниченно смешиваемых жидкостей К.А. Емельяненко, А.М. Емельяненко и Л.Б. Бойнович было выведено соотношение для расчета угла линзы, формируемой одной жидкостью на поверхности другой, с использованием изотерм расклинивающего давления [113]. Выполненный анализ позволил обосновать область корректного применения правила Антонова, широко используемого в коллоидной химии. Кроме того, была решена задача, обсуждаемая в литературе уже около 100 лет, о механизме явления растекания с последующим стягиванием в линзу органических жидкостей на водной поверхности. Теория сил изображения, возникающих в пленках органических жидкостей при растворении следовых количеств воды, была распространена К.А. Емельяненко, А.М. Емельяненко и Л.Б. Бойнович на случай масляных пленок, растекающихся по водным поверхностям [114]. Рассчитанные в рамках предложенной теории значения углов смачивания при различных значениях рН подстилающей среды качественно хорошо согласуются с имеющимися в литературе данными.

С середины 2000-х годов в лаборатории активно ведутся работы по созданию и исследованию супергидрофобных и супергидрофильных материалов. Была разработана стратегия получения

таких покрытий на поверхностях различных материалов и проанализировано влияние морфологии поверхности, структуры молекул гидрофобного агента и характера их адсорбции на химическую стойкость получаемых супергидрофобных покрытий при контакте с водными средами различного состава.

Цикл выполненных Л.Б. Бойнович и А.М. Емельяненко экспериментальных исследований показал, что фтороксисиланы с тремя функциональными концевыми группами, хемосорбирующиеся на текстурированную поверхность, образуют двумерную латерально сшитую пленку, что обеспечивает получение покрытий, стойких в водных средах с широким интервалом концентраций электролитов и кислотно-щелочных свойств [115]. Анализ старения супергидрофильных материалов в открытых условиях привел к открытию Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко и А.С. Пашининым явления спонтанной супергидрофобизации, связанной с адсорбцией органических веществ, загрязняющих атмосферу [116].

Особое место в исследованиях лаборатории занимали работы по взаимодействию супергидрофобных покрытий с переохлажденными водными средами и анализу использования таких покрытий в качестве противообледенительных для материалов, эксплуатирующихся в открытых атмосферных условиях. На основе детального анализа противообледенительных механизмов, связанных с гетерогенным режимом смачивания супергидрофобных покрытий, в лаборатории была создана серия покрытий для защиты от атмосферного обледенения конструкционных элементов летательных аппаратов и проводов линий электропередач [117]. В согласии с теоретическим анализом скоростей нуклеации на поверхностях с различным смачиванием, экспериментально была подтверждена возможность длительного поддержания водных капель, сидящих на супергидрофобных покрытиях, в метастабильном переохлажденном состоянии при низких отрицательных температурах [118]. Явление повышения адгезии капель к поверхности в процессе кристаллизации получило объяснение в рамках анализа рекалесцентной кристаллизации, выполненного Л.Б. Бойнович и А.М. Емельяненко [119]. Взрывное повышение давления паров вокруг капли, за счет ее нагрева на адиабатической стадии фазового перехода, приводит к их последующей капиллярной конденсации в область контакта капли с подложкой и к формированию ледяного гало на поверхности.

К 2016 году Л.Б. Бойнович и А.М. Емельяненко была построена теория противокоррозионной защиты материалов супергидрофобными покрытиями, позволяющая связать замедление различных стадий коррозионного процесса с уникальными свойствами супергидрофобного состояния

[120]. Механизмы противокоррозионного действия, включающие снижение площади реального контакта жидкости с покрытием, электростатическое отталкивание анионов от отрицательно заряженной супергидрофобной поверхности, ингибирующие свойства хемосорбированного гидрофобного агента и улучшенные барьерные свойства текстурированного поверхностного слоя в последующем были подтверждены экспериментально с участием А.Д. Модестова, А.Г. Домантовского, К.А. Емельяненко, В.Д. Соболева [94, 121–123]. В результате работ по противокоррозионной защите материалов супергидрофобными покрытиями удалось создать ряд уникальных покрытий для сплавов алюминия, меди и титана, характеризующихся чрезвычайно стойкими противокоррозионными свойствами даже в хлоридсодержащих средах.

В последние годы лаборатория привлекает молодые кадры и продолжает активно работать. Проводимые исследования по-прежнему охватывают широкий спектр тематик, включая разнообразные аспекты теоретического и экспериментального исследования поверхностных сил, применения полученных результатов для решения практических задач в области устойчивости коллоидных систем, анализа и управления смачиванием, обработки поверхностей материалов для придания требуемых функциональных свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дерягин Б.В., Кусаков М.М.* // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1937. Т. 5. № 6. С. 1119.
2. *Derjaguin B., Kussakov M., Lebedeva L.* // Comptes Rendus (Doklady) Acad. Sci. URSS. 1939. V. 23. № 7. P. 671.
3. *Derjaguin B., Kussakov M.* // Acta Physicochimica URSS. 1939. V. 10. № 2. P. 153.
4. *Кусаков М., Титиевская А.* // Докл. АН СССР. 1940. Т. 28. № 4. С. 333.
5. *Дерягин Б.В.* // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1937. Т. 5. № 6. С. 1153.
6. *Derjaguin B.* // Acta Physicochimica URSS. 1939. V. 10. № 3. P. 333.
7. *Derjaguin B.* // Trans. Faraday Soc. 1940. V. 36. Part 1. P. 203.
8. *Дерягин Б.В., Ландау Л.Д.* // Журн. эксп. теор. физ. 1941. Т. 11. № 2. С. 802, повторно напечатано там же. 1945. Т. 15. № 11. С. 6.
9. *Фрумкин А.Н.* // Журн. физ. химии. 1938. № 12. С. 33.
10. *Дерягин Б.В.* // Журн. физ. химии. 1940. Т. 14. № 2. P. 137.
11. *Дерягин Б.В.* // Коллоидн. журн. 1935. Т. 1. № 3. С. 219.
12. *Derjaguin B.* // Acta Physicochimica URSS. 1940. V. 12. № 2. P. 181.
13. *Дерягин Б., Лазарев В.* // Коллоидн. журн. 1935. Т. 1. № 4. С. 293.
14. *Дерягин Б.В.* // Журн. физ. химии. 1934. Т. 5. № 9. С. 116.
15. *Дерягин Б.В., Лазарев В.П.* // Вторая Всесоюзная конференция по трению и износу в машинах. Доклады, т. III. М., Ин-т машиноведения АН СССР, 1949. С. 106–124.
16. *Derjaguin B., Kussakov M., Krim K.* // Acta Physicochimica URSS. 1945. V. 20. № 1. P. 35.
17. *Дерягин Б.В., Захаваева Н.Н.* // Коллоидн. журн. 1949. Т. 11. № 4. С. 230.
18. *Дерягин Б.В., Карасев В.В.* // Успехи химии. 1988. Т. 57. № 7. С. 1110–1129.
19. *Derjaguin B.* // Comptes Rendus (Doklady) Acad. Sci. URSS. 1943. V. 39. № 1. P. 13.
20. *Derjaguin B.* // Acta Physicochim. URSS. 1943. V. 20. № 3. P. 349.
21. *Дерягин Б.В., Титиевская А.С.* // Докл. АН СССР. 1945. Т. 50. С. 307.
22. *Абрикосова И.И., Дерягин Б.В.* // Журн. эксп. теор. физ. 1951. Т. 21. № 8. С. 945.
23. *Дерягин Б.В., Абрикосова И.И.* // Там же. 1956. Т. 30. № 6. С. 9.
24. *Дерягин Б.В., Сидоренков Г.П., Зубащенко Е.А., Киселева Е.А.* // Коллоидн. журн. 1947. Т. 9. № 5. С. 335.
25. *Дерягин Б.В., Духин С.С., Коптелова М.М.* // Коллоидн. журн. 1969. Т. 31. № 3. С. 359
26. *Дерягин Б.В., Шутор Ю., Нерпин С.В., Арутюнян М.А.* // Докл. АН СССР. 1965. Т. 161. № 1. С. 147.
27. *Дерягин Б.В., Духин С.С.* // Там же. 1956. Т. 106. № 1. С. 851.
28. *Deryagin B.V., Bakanov S.P., Dukhin S.S., Batova G.A.* Diffusional phoresis of aerosol particles. In: *Deryagin B.V.* (Ed.) Research in Surface Forces. N.Y.: Consultants Bureau, 1963. P. 162–166.
29. *Дерягин Б.В., Альтшулер М.А., Духин С.С., Сисин В.Д.* // Докл. АН СССР. 1973. Т. 210. № 2. С. 398.
30. *Дерягин Б.В., Духин С.С.* // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1957. № 6. С. 779.
31. *Дерягин Б.В., Баканов С.П.* // Докл. АН СССР. 1962. Т. 147. № 1. С. 139.
32. *Яламов Ю.И., Дерягин Б.В.* // Там же. 1965. Т. 165. № 2. С. 364.
33. *Яламов Ю.И., Обухов Б.А., Дерягин Б.В.* // Там же. 1972. Т. 207. № 4. С. 824
34. *Дерягин Б.В., Рабинович Я.И.* // Там же. 1964. Т. 157. № 1. С. 154.
35. *Дерягин Б.В., Рабинович Я.И.* // Коллоидн. журн. 1964. Т. 36. № 5. С. 649.
36. *Дерягин Б.В., Сторожилова А.И.* // Там же. 1964. Т. 36. № 5. С. 583.
37. *Дерягин Б.В., Кротова Н.А.* // Успехи физ. наук. 1948. Т. 36. № 3. С. 387.
38. *Дерягин Б.В., Смилга В.П.* // Докл. АН СССР. 1958. Т. 121. № 5. С. 877.
39. *Духин С.С., Дерягин Б.В.* // Там же. 1958. Т. 121. № 3. С. 503.

40. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. // Там же. 1948. Т. 61. № 5. С. 849.
41. Кротова Н.А., Морозова Л.П., Дерягин Б.В. // Там же. 1959. Т. 129. № 1. С. 149.
42. Кротова Н.А., Кириллова Ю.М., Дерягин Б.В. // Журн. физ. химии. 1956. Т. 30. № 9. С. 1921.
43. Derjaguin B.V., Toporov Y.P., Aleinikova I.N. // J. Colloid Interface Sci. 1976. V. 54. № 1. P. 59.
44. Derjaguin B.V., Toporov Y.P., Muller V.M., Aleinikova I.N. // J. Colloid Interface Sci. 1977. V. 58. № 3. P. 528.
45. Derjaguin B.V., Toporov Y.P., Muller V.M., Aleinikova I.N. // Powder Technology. 1984. V. 37. № 1. P. 87.
46. Derjaguin B. // Kolloid Zeitschrift. 1934. B. 69. H. 2. S. 155.
47. Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Y.P. // J. Colloid Interface Sci. 1975. V. 53. № 2. P. 314.
48. Muller V.M., Yushchenko V.S., Derjaguin B.V. // Ibid. 1980. V. 77. № 1. P. 91.
49. Muller V.M., Aleinikova I.N., Shcherbina G.I., Toporov Y.P., Derjaguin B.V. // Prog. Surf. Sci. 1994. V. 45. P. 199.
50. Кротова Н.А., Карасев В.В., Дерягин Б.В. // Докл. АН СССР. 1953. Т. 83. № 5. С. 777.
51. Derjaguin B.V., Kluev V.A., Anisimova V.I., Toporov Y.P., Krotova N.A. // J. Colloid Interface Sci. 1980. V. 77. № 2. P. 472.
52. Khrustalev Y.A., Krotova N.A., Klyuev V.A. // Colloid J. 1977. V. 39. № 6. P. 1063.
53. Дерягин Б.В., Федосеев Д.В., Лукьянович В.М. и др. // Докл. АН СССР. 1968. Т. 181. № 5. С. 1094.
54. Spitsyn B.V., Bouilov L.L., Derjaguin B.V. // J. Crystal Growth. 1981. V. 52. P. 219.
55. Spitsyn B.V., Bouilov L.L., Derjaguin B.V. // Progress in Crystal Growth and Characterization. 1988. V. 17. № 2. P. 79–170.
56. Дерягин Б.В., Нерпин С.В. // Докл. АН СССР. 1954. Т. 100. № 1. С. 17.
57. Дерягин Б.В., Мартынов Г.А. // Там же. 1962. Т. 144. № 4. С. 825.
58. Дерягин Б.В., Гупон Ю.В. // Коллоидн. журн. 1962. Т. 24. № 4. С. 431.
59. Горелкин В.Н., Смилга В.П. // Там же. 1972. Т. 34. № 5. С. 685.
60. Дерягин Б.В., Муллер В.М. // Докл. АН СССР. 1967. Т. 176. № 4. С. 869.
61. Москвитин Н.И., Фуртман М.Ф., Дерягин Б.В. // Там же. 1955. Т. 105. № 4. С. 758.
62. Воропаева Т.Н., Дерягин Б.В., Кабанов Б.Н. // Там же. 1959. Т. 128. № 5. С. 981.
63. Дерягин Б.В., Рабинович Я.И. // Там же. 1968. Т. 179. № 6. С. 1373.
64. Дерягин Б.В., Титиевская А.С. // Коллоидн. журн. 1953. Т. 15. № 4. С. 416.
65. Дерягин Б.В., Зорин З.М. // Журн. физ. химии. 1955. Т. 29. № 10. С. 1755.
66. Дерягин Б.В., Зорин З.М., Чураев Н.В. // Коллоидн. журн. 1968. Т. 30. № 2. С. 308.
67. Дерягин Б.В., Леонов Л.Ф., Яшин В.Н. // Докл. АН СССР. 1983. Т. 273. № 1. С. 122.
68. Voinovich L.B., Derjaguin B.V. // Colloids Surf. 1988. V. 34. № 1. P. 43.
69. Voinovich L.B. // Adv. Colloid Interface Sci. 1992. V. 37. № 3–4. P. 177.
70. Дерягин Б.В., Старов В.М., Чураев Н.В. // Коллоидн. журн. 1976. Т. 38. № 3. С. 449.
71. Derjaguin B.V., Churaev N.V. // J. Colloid Interface Sci. 1977. V. 62. № 3. P. 369.
72. Бойнович Л.Б., Дерягин Б.В. // Коллоидн. журн. 1987. Т. 49. № 4. С. 631. [Voinovich L.B., Deryagin B.V. // Colloid J. 1987. V. 49. № 4. P. 552].
73. Ролдугин В.И., Дерягин Б.В. // Докл. АН СССР. 1983. Т. 270. № 3. С. 642.
74. Deryagin B.V., Churaev N.V. // Langmuir. 1987. V. 3. № 5. P. 607.
75. Дерягин Б.В., Рабинович Я.И., Чураев Н.В. // Изв. АН СССР. 1982. № 8. С. 1743.
76. Pashley R.M., Kitchener J.A. // J. Colloid Interface Sci. 1979. V. 71. № 3. P. 491.
77. Israelachvili J. // Accounts of Chemical Research. 1987. V. 20. № 11. P. 415.
78. Voinovich L.B., Emelyanenko A.M. // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1992. B. 178. H. 2. S. 229.
79. Муллер В.М. // Коллоидн. журн. 1996. Т. 58. № 4. С. 522. [Muller V.M. // Colloid J. 1996. V. 58. № 4. P. 497].
80. Муллер В.М. // Коллоидн. журн. 1996. Т. 58. № 5. С. 634.
81. Voinovich L.B., Emelyanenko A.M. // Mol. Phys. 2009. V. 107. № 17. P. 1745.
82. Voinovich L., Emelyanenko A. Colloids Surf. A. 2007. V. 300. № 3. P. 321.
83. Vompe A.G., Martynov G.A. // J. Chem. Phys. 1997. V. 106. № 14. P. 6095.
84. Tikhonov D.A., Kiselyov O.E., Martynov G.A., Sarkisov G.N. // J. Mol. Liq. 1999. V. 82, № 1–2. P. 3.
85. Martynov G.A., Sarkisov G.N., Vompe A.G. // J. Chem. Phys. 1999. V. 110. № 8. P. 3961.
86. Martynov G.A. // J. Chem. Phys. 2008. V. 129. № 24. Article ID 244509.
87. Martynov G.A. // High Temperature. 2017. V. 55. № 4. P. 611.
88. Krylov S.Y., Jinesh K.B., Valk H., Dienwiebel M., Frenken J.W. // Phys. Rev. E. 2005. V. 71. № 6. Article ID 065101.
89. Krylov S.Y., Frenken J.W. // Phys. Status Solidi B. 2014. V. 251. № 4. P. 711.
90. Voinovich L.B., Emelyanenko A.M. // Adv. Colloid Interface Sci. 2003. V. 104. № 1–3. P. 93.
91. Emelyanenko A.M., Voinovich L.B. // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. V. 20, № 49. Article ID 494227.
92. Voinovich L.B., Emelyanenko A.M. // Adv. Colloid Interface Sci. 2009. V. 147. P. 44.
93. Shagieva F.M., Voinovich L.B. // J. Chem. Phys. 2013. V. 138. № 21. Article ID 214502.
94. Voinovich L.B., Emelyanenko A.M., Modestov A.D. et al. // Corros. Sci. 2016. V. 112. P. 517.
95. Чулкова Е.В., Емельяненко А.М., Емельяненко К.А., Бойнович Л.Б. // Журн. физ. химии. 2020. Т. 94. № 3. С. @.

96. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Emelyanenko K.A., Maslakov K.I.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2016. V. 18. P. 3131.
97. *Vakanov S.P., Emelyanenko A.M.* // J. Aerosol Sci. 1993. V. 24. Suppl. I. P. S153.
98. *Ролдугин В.И., Кириш А.А., Емельяненко А.М.* // Коллоидн. журн. 1999. Т. 61 № 4. С. 530 [Roldughin V.I., Kirsh A.A., Emel'yanenko A.M. // Colloid J. 1999. V. 61 № 4. P. 492].
99. *Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б.* // Там же. 1994. Т. 56. № 3. С. 362. [Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. // Colloid J. 1994. V. 56. № 3. P. 299].
100. *Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б.* // Там же. 1999. Т. 61. № 2. С. 198. [Emel'yanenko A.M., Boinovich L.B. // Colloid J. 2001. V. 63. № 2. P. 159–172].
101. *Malenkov G.G., Tytik D.L., Zheligovskaya E.A.* // J. Mol. Liq. 2003. V. 106. № 2–3. P. 179.
102. *Voloshin V.P., Malenkov G.G., Naberukhin Y.I.* // J. Struct. Chem. 2013. V. 54. Suppl. 2. P. 233.
103. *Malenkov G.G.* // J. Struct. Chem. 2013. V. 54. Suppl. 2. P. 252.
104. *Anikeenko A.V., Malenkov G.G., Naberukhin Y.I.* // J. Chem. Phys. 2018. V. 148. № 9. Article ID 094508.
105. *Shcherbina G.I., Toropov Y.P., Akimov A.V., Alejnikova I.N.* // Instrum. Exp. Tech. 1999. V. 42. № 3. P. 420.
106. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M.* // Surf. Interface Anal. 1991. V. 17. № 11. P. 764.
107. *Бойнович Л.Б., Гагина И.А., Емельяненко А.М.* // Коллоидн. журн. 1995. Т. 57. № 6. С. 897. [Boinovich L.B., Gagina I.A., Emel'yanenko A.M. // Colloid J. 1995. V. 57. № 6. P. 851].
108. *Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М., Кочеткова Е.И.* // Коллоидн. журн. 2001. Т. 63. № 4. С. 445. [Boinovich L.B., Emel'yanenko A.M., Kochetkova E.I. // Colloid J. 2001. V. 63. № 4. P. 402].
109. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M.* // Adv. Colloid Interface Sci. 2002. V. 96. № 1–3. P. 37.
110. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M.* // Surf. Sci. 1990. V. 225. № 1–2. P. 206.
111. *Emelyanenko A.M., Ermolenko N.V., Boinovich L.B.* // Colloids Surf. A. 2004. V. 239. № 1–3. P. 25.
112. *Boinovich L., Emelyanenko A.* // Colloids Surf. A. 2011. V. 383. № 1–3. P. 10.
113. *Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.* // Colloids Surf. A. 2017. V. 522. P. 601.
114. *Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.* // Materials. 2016. V. 9. Article ID 177.
115. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M.* // Adv. Colloid Interface Sci. 2012. V. 179–182. P. 133.
116. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Pashinin A.S. et al.* // Langmuir. 2012. V. 28. № 2. P. 1206.
117. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Emelyanenko K.A., Modin E.B.* // ACS Nano. 2019. V. 13. № 4. P. 4335.
118. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Korolev V.V., Pashinin A.S.* // Langmuir. 2014. V. 30. № 6. P. 1659.
119. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M.* // Langmuir. 2014. V. 30. № 42. P. 12596.
120. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Modestov A.D. et al.* // Mendeleev Commun. 2017. V. 27. № 3. P. 254.
121. *Boinovich L.B., Sobolev V.D., Maslakov K.I. et al.* // Colloids Surf. A. 2018. V. 537. P. 76.
122. *Boinovich L.B., Modin E.B., Sayfutdinova A.R. et al.* // ACS Nano. 2017. V. 11. № 10. P. 10113.
123. *Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G. et al.* // Adv. Mater. Interfaces. 2018. V. 5. № 21. Article ID 1801099.