

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 4 / 2023, Vol. 10, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/17SATS423.pdf>

DOI: 10.15862/17SATS423 (<https://doi.org/10.15862/17SATS423>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

Градиентная модель структурообразования в дисперсных системах

^{1, 2}Игнатъев А.А., ²Готовцев В.М.

¹ФАУ «Российский дорожный научно-исследовательский институт», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия

Автор, ответственный за переписку: Игнатъев Алексей Александрович, e-mail: Ignatievaa@rosdornii.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты исследований процесса структурообразования дисперсных систем, содержащих твердую и жидкую фазы, на основе использования аппарата механики сплошной среды в рамках модели несжимаемой жидкости. Рассмотрены схемы формирования системы межфазных слоев в тонких зазорах между твердыми частицами с образованием пристенных зон, в которых обеспечиваются условия межфазного контакта жидкой и твердой фаз, и ядра с постоянным межфазным давлением. Авторами получены выражения для значений расклинивающего давления в зависимости от толщины области перекрытия межфазных слоев, определяющие степень усиления межфазных контактов. Приведенные в работе зависимости составляют теоретическую основу нового подхода к моделированию поверхностных явлений с позиций равновесия механики сплошной среды. Приведен механизм обеспечения дальнего действия расклинивающего давления вне области системы межфазных слоев. Авторами приведены результаты моделирования одиночного межфазного слоя жидкость-твердое, ограниченного, с одной стороны,

твердой поверхностью, а, с другой — объемной фазой жидкости и результаты моделирования эффектов структурирования дисперсных систем на основе изучения жидкостного межфазного слоя, образованного в зазоре между твердыми поверхностями. В определенных условиях в таких системах проявляется эффект структурирования, приводящий к резкому повышению прочностных показателей дисперснонаполненных композиционных материалов, составляющий основу современных представлений нанотехнологий. Показан дуализм жидкой фазы, состоящий в способности проявлять свойства как жидкости, так и твердого тела. Доказано, что основным фактором структурообразования дисперсных систем является формирование мощных градиентов межфазных напряжений на толщине межфазных слоев.

Ключевые слова: межфазные напряжения; молекулярное давление; расклинивающее давление; кластер; мицелла; межмолекулярное дальнее действие; структурообразование

Cross-linking gradient model in disperse systems

^{1,2}Alexey A. Ignatyev, ²Valeriy M. Gotovtsev

¹Russian Road Scientific-Research Institute, Moscow, Russia

²Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Corresponding author: Alexey A. Ignatyev, e-mail: Ignatievaa@rosdomii.ru

Abstract. The article presents the research results of the disperse systems cross-linking process containing solid and liquid phase bases on the continuum mechanics apparatus use within the incompressible fluid model framework. The system formation schemes of interfacial layers in fine clearances between solid particles with wall-adjacent zones formation, in which conditions of liquid and solid phase interphase contact are provided, and the cores with constant interphase pressure are considered. The authors have obtained expressions for the values of wedging pressure depending on the thickness of the interfacial layers overlapping area, which determine the interfacial contacts strengthening degree. The dependences given in the paper are a theoretical basis for a new approach to modelling surface phenomena from the position of continuum mechanics equilibrium. The facilitating mechanism of the wedging pressure long-range action outside the interfacial layers system area is given. The authors present the modelling results of a

single liquid-solid interphase layer bounded, on the one side, by a solid surface and, on the other side, by a volume liquid phase and the results of modelling the effects of structuring disperse systems based on the liquid interphase layer study formed in the clearance between solid surfaces. Under certain conditions in such systems the effect of structuring, leading to a sharp increase in the strength properties of disperse-filled composite materials, which is the basis of modern nanotechnology concepts, is manifested. The dualism of the liquid phase, consisting in the ability to exhibit the properties of both liquid and solid body, is shown. It is proved that the main disperse systems structure formation factor is the formation of interphase stresses powerful gradients at the thickness of interphase layers.

Keywords: interfacial stresses; molecular pressure; wedging pressure; cluster; micelle; intermolecular long-range interaction; structure formation

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Структурообразование дисперсных систем в современном мире приобретает глобальное значение. Появляются огромное количество новых композиционных материалов, обладающих уникальными свойствами, в основе которых лежит эффект структурообразования или просто структурирования дисперсных систем. В последние годы в связи с интенсивным развитием нанотехнологий может сложиться ложное представление о том, что в основе принципа создания таких материалов является применение в качестве добавок в состав композита нано частиц, ассортимент которых достаточно обширен и постоянно пополняется. Однако, проявление эффекта структурообразования возможно и в более прозаических случаях при соблюдении определенных условий формирования структуры композиционного материала.

В середине прошлого столетия сформировалась новая отрасль знания — *физико-химическая механика твердых тел* и дисперсных структур, основной задачей которой является создание материалов с заданными свойствами и оптимальной для целей их применения структурой. В частности, физико-химическая механика ставит своей задачей повышение прочности материалов, что приводит к снижению массы и увеличению срока службы изделий, уменьшению расхода материалов на их изготовление и общему повышению экономической эффективности производства. Основы дисциплины, пограничной коллоидной химии и молекулярной физике твердого тела, заложены в работах П.А. Ребиндера. Он утверждал: *«Самый простой путь повышения прочности любого твердого тела почти до идеального потолка состоит в измельчении его до частиц, по порядку величины соответствующих расстояниям между опасными слабыми местами. Если такие частицы плотно упаковать или склеить тончайшими, а потому тоже высокопрочными после затвердевания, прослойками, полученный материал будет плотным, непроницаемым для жидкостей и газов, макрооднородным, высокопрочным и долговечным»*.¹

Для реализации предложенного пути необходимо знать, во-первых, до какой степени следует измельчать частицы дисперсной системы, а, во-вторых, каким образом организовать плотную упаковку дисперсных частиц в материале. Ответ на первый вопрос определяется наличием промышленно выпускаемых порошкообразных материалов с различной степенью дисперсности, а второй вопрос требует дополнительного

¹ Ребиндер, П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Ч. Физико-химическая механика. — М.: Наука, 1979. — 469 с.

обсуждения. Авторами работы предложен способ формирования упаковки дисперсных частиц путем гранулирования материала на жидком связующем методом окатывания во вращающемся барабане грануляторе. Частицы дисперсного материала в процессе окатывания подвергаются, с одной стороны, динамическому воздействию при движении материала, стремящемуся оторвать частицу при контакте с образовавшейся гранулой. С другой стороны, молекулярные капиллярные силы при достижении необходимой площади контакта частицы с гранулой обеспечивают ее прилипание, обеспечивая образование тончайших пленок связующего. Более подробную информацию по этому вопросу можно найти в работе [1].

Жидкостные прослойки с толщинами молекулярных размеров между дисперсными частицами приводят к образованию дополнительных молекулярных связей между ними с формированием структур, получивших название кластеров [2]. Процесс образования кластеров, обусловленный перекрытием межфазных слоев на твердых частицах, связан с возникновением расклинивающего давления, впервые обнаруженного Б.В. Дерягиным. *«Расклинивающее давление есть разность между давлением на обе поверхности тонкого слоя жидкости и давлением в объемной фазе, частью которой он является и с которой находится в состоянии термодинамического равновесия».*²

При перекрытии поверхностных зон значение расклинивающего давления зависит от характера поверхностных сил различной физической природы, включающих молекулярную или дисперсионную, ионно-электростатическую, адсорбционную и другие слагающие. В статье [3] отмечается, что в настоящее время в орбиту исследователей включен не один десяток различного рода поверхностных сил,^{3,4} как в физике в начале двадцатого века, когда для каждого явления вводились свои «собственные» силы. В дальнейшем было показано, что разнообразные силы (на молекулярном уровне) имеют фактически одну природу и являются производными от электромагнитных сил, действующих между электронами и ядрами.

В статье [4] сформулирован единый подход к моделированию поверхностных явлений основанный на применении уравнений механики сплошной среды с той лишь разницей, что вместо гидростатического давления используется внутреннее или молекулярное давление жидкости, отражающее характер межмолекулярного взаимодействия. Представление анизотропного тензора межфазных напряжений совокупностью шаровой и

² Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М.: Наука, 1986. 206 с.

³ Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985

⁴ Израелашвили Дж. Межмолекулярные и поверхностные силы. М.: Научный мир, 2011.

девиаторной составляющих с использованием модели несжимаемой жидкости позволило получить выражения для компонент тензора напряжений в межфазном слое, удовлетворяющие условиям равновесия. Таким образом, реализован подход, сформулированный Б.В. Дерягиным, состоящий в замене кулоновских и молекулярных (дисперсионных) сил системой натяжений, базирующийся на формальной эквивалентности электромагнитных сил системе натяжений.

Приведенные в работе [4] зависимости составляют теоретическую основу нового подхода к моделированию поверхностных явлений с позиций равновесия механики сплошной среды. Однако компоненты тензора межфазных напряжений действуют в пределах межфазных слоев, т. е. определяют межмолекулярные взаимодействия в зоне непосредственного контакта фаз. Формирование структур различного рода, обусловленное поверхностными явлениями, свидетельствует о наличии взаимодействий в дисперсных системах, существенно превышающих толщины межфазных слоев. Примером такого взаимодействия может служить расклинивающее давление, открытое Б.В. Дерягиным. Расклинивающее давление обнаружено в жидкостных прослойках между твердыми поверхностями, толщины которых несоизмеримо больше толщин межфазных слоев.

1. Материалы и методы

1. Materials and methods

С учетом изложенного тематика настоящей работы посвящена исследованию эффектов структурообразования в дисперсных системах, обусловленных действием межфазных напряжений, определяющих макроскопические свойства дисперсных систем. При этом наибольший интерес представляют механизмы формирования структур, позволяющие осуществить переход от микроописания среды на уровне межфазных слоев к макроописанию, формирующему конечные свойства исследуемых композиционных материалов.

Основу настоящей работы составляют результаты, изложенные в статье [4] при рассмотрении равновесия одиночного межфазного слоя жидкость-твердое. Для удобства приведем их вместе с основными зависимостями механики сплошной среды, использованными в работе. Как указывалось, тензор межфазных напряжений в жидкости представлен шаровой и девиаторной составляющими. Шаровая часть тензора определяет внутреннее или молекулярное давление P , отвечающее за изменение объема среды. В модели несжимаемой жидкости объем принимается постоянным, а компоненты анизотропного тензора межфазных напряжений определяют давление через соотношение:

$$P = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}, \quad (1)$$

где σ_{xx} , σ_{yy} и σ_{zz} — компоненты тензора напряжений в декартовой системе координат. Компоненты девиатора межфазных напряжений отвечают за деформацию среды при неизменном объеме, сводящую к требованию:

$$\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy} + \sigma'_{zz} = 0, \quad (2)$$

где напряжения со штрихами — компоненты девиатора напряжений. В результате тензор межфазных напряжений запишется в виде:

$$\sigma_{xx} = P + \sigma'_{xx}; \sigma_{yy} = P + \sigma'_{yy}; \sigma_{zz} = P + \sigma'_{zz}. \quad (3)$$

Установлен закон распределения межфазного давления P по толщине межфазного слоя жидкость-твердое:

$$P = P_0 \left[1 + \left(\frac{z}{R} \right)^3 \right], \quad (4)$$

где P_0 — внутреннее давление в объемной фазе жидкости; z — координата нормальная к межфазному слою, отсчитываемая от границы с объемной фазой; R — радиус дальнего действия молекул жидкости.

Тензор межфазных напряжений определяется следующими компонентами:

$$\sigma_{zz} = 0; \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{3\Delta P_e}{2}. \quad (5)$$

Координатные оси OX и OY расположены в плоскости межфазного слоя, ΔP_e — межфазное давление жидкости, избыточное по отношению к P_0 , определяется воздействием твердой фазы на жидкость. Значение этого давления максимально на твердой стенке в зоне образования, с убыванием по мере удаления от нее. С другой стороны, жидкость в межфазном слое подвергается воздействию граничащей с ней объемной фазы с формированием поля молекулярных сил ΔP_i противоположного направления, ослабевающего с приближением к твердой поверхности. В результате происходит образование уравновешенной системы сил, в которой $\Delta P_e = -\Delta P_i$, что гарантирует соблюдение условия $\sigma_{zz} = 0$ в уравнениях (5).

Возникновение молекулярных сил ΔP_i обусловлено деформацией объема среды под действием девиаторных компонент тензора, приводящей к изменению межмолекулярных расстояний в зависимости от расположения точки в межфазном слое. В условиях удовлетворительного смачивания при значениях краевого угла $\frac{\pi}{2} > \theta_0 > 0$ шаровой объем среды в межфазном слое трансформируется в эллипсоид, вытянутый вдоль оси Z и сжатый по двум другим координатным осям. Приведенные в (5)

компоненты тензора межфазных напряжений обеспечивают равновесие межфазного слоя ($\sigma_{zz} = 0$), обусловленное равенством $\Delta P_e = -\Delta P_i$ с образованием уравновешенной системы сил. Компоненты тензора σ'_{xx} и σ'_{yy} определяют деформацию объема среды, приводящую к формированию силового поля $\Delta P_i(z)$.

2. Результаты

2. Results

Приведенные выше результаты относятся к моделированию одиночного межфазного слоя жидкость-твердое, ограниченного, с одной стороны, твердой поверхностью, а, с другой — объемной фазой жидкости. Однако, при моделировании эффектов структурирования дисперсных систем больший интерес представляют жидкостные межфазные слои, образованные в зазорах между твердыми поверхностями. В определенных условиях в таких системах проявляется эффект структурирования, приводящий к резкому повышению прочностных показателей дисперснонаполненных композиционных материалов, составляющий основу современных представлений нанотехнологий.

Ключевую роль в формировании структурирования имеет расклинивающее давление, введенное в рассмотрение Б.В. Дерягиным. По представлениям автора расклинивающее давление есть разность между давлением на обе поверхности тонкого слоя жидкости и давлением в объемной фазе, частью которой он является и с которой находится в состоянии термодинамического равновесия. Расклинивающее давление возникает при перекрытии межфазных жидкостных слоев, образованных на твердых поверхностях.

На рисунке 1 представлена схема взаимодействия одиночных межфазных слоев в зазоре между твердыми поверхностями в случае их перекрытия. Область перекрытия межфазных слоев толщиной h обозначена на рисунке заливкой, зависимости 1 и 2, построенные по закону (4), определяют распределение межфазных давлений во взаимодействующих межфазных слоях. На рисунках 1 а, б показаны одиночные межфазные слои до их взаимного контакта, на рисунке 1 в — распределение межфазного давления при наложении слоев. Здесь использованы следующие обозначения: P_0 — внутреннее давление в объемной фазе жидкости, P_δ — давление жидкости на твердой поверхности, δ — толщина одиночного межфазного слоя, $\Pi(h)$ — расклинивающее давление. Начало отсчета координаты z на рисунке 1 в расположено на оси зазора в точке O .

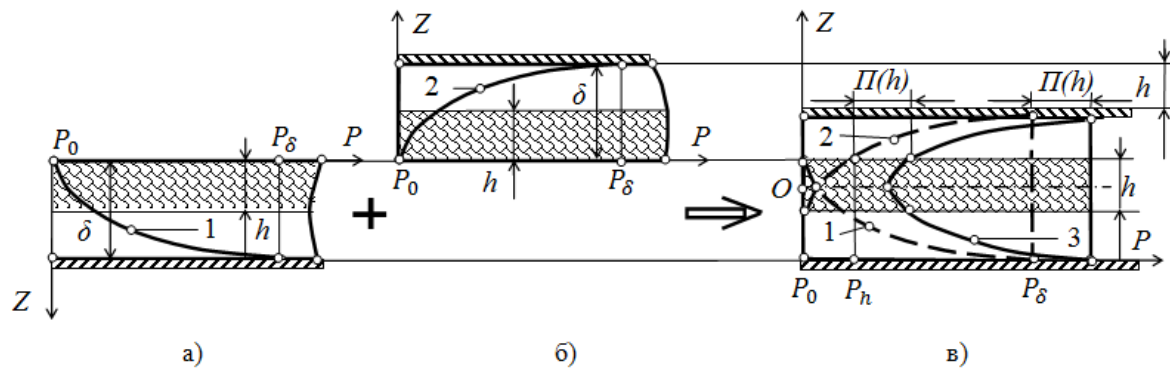


Рисунок 1. Схема взаимодействия
межфазных слоев при перекрытии (разработано авторами)

Figure 1. Diagram of interfacial layers
interaction at overlapping (developed by the authors)

На рисунке 1 в пунктирными линиями показано распределение давления в межфазных слоях, полученное путем переноса кривых 1 и 2 из схем 1 а и 1 б на схему 1 в. Как видно, наложение межфазных слоев приводит к уменьшению толщины объединенной системы слоев от значения 2δ до $2\delta - h$. В соответствии с этим использование зависимости (4) для определения давления жидкости на твердой стенке приведет к падению не только давления, но и градиента давления на стенке, т. е. нарушению условий адгезионного контакта жидкой и твердой фаз. Изменение давления в межфазной системе при использовании модели несжимаемой жидкости не оказывает влияния на условия адгезионного контакта фаз в отличие от градиента давления, который, как следует из результатов работы [8], является определяющим фактором в поверхностных явлениях.

Таким образом, перекрытие межфазных слоев в системе с использованием зависимостей для одиночного межфазного слоя приводит к нарушению условий контактного взаимодействия жидкой и твердой фаз, реализуемых в одиночных межфазных слоях. Для их сохранения необходимо, чтобы градиенты давлений в пристенных областях объединенной системы межфазных слое оставались такими же, как в одиночных слоях. Формально это связано с сохранением характера распределения давления в пристенных зонах зазора, приводящих к изменениям в центральной области системы межфазных слоев.

Отличие этих областей состоит в том, что центральная область, назовем ее ядром системы, находится в контакте только с жидкой фазой, т. е. для ее равновесия оказывается достаточным равенства давлений в плоскости контакта ядра с жидкостью в пристенных зонах системы. Характер межмолекулярного взаимодействия в ядре будет определяться тензором изотропного давления, компоненты которого одинаковы в каждой точке ядра независимо от их расположения. Однако давление в

плоскости контакта ядра с жидкостью в пристенных зонах системы, обозначенное на рисунке 1 в через P_h , выше давления в одиночных слоях в зоне заливки. Из этого следует, что образование ядра приводит к общему повышению давления в системе межфазных слоев.

На рисунке 2 приведена схема формирования ядра системы межфазных слоев. На рисунке 2 а показано в более крупном масштабе распределение давлений в одиночных слоях в случае их наложения. В области контакта ядра с жидкостью в пристенных зонах межфазное давление, в соответствии с рисунком 1 в, равно P_h . Для равновесия ядра необходимо, чтобы давления P_h были одинаковы в каждой его точке (рис. 2 б), что требует общего увеличения давления в системе на величину $\Pi(h)$. Для одиночного межфазного слоя такое увеличение эквивалентно повышению давления в объемной фазе жидкости, что в соответствии с определением Б.В. Дерягина, определяет возникновение расклинивающего давления. На рисунке 2 в показано распределение давления в системе межфазных слоев с учетом их перекрытия.

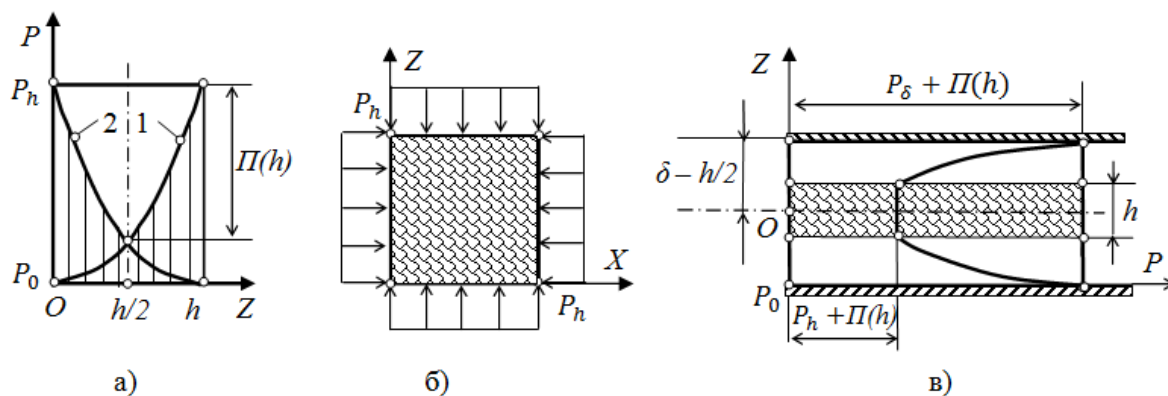


Рисунок 2. Формирование ядра межфазного слоя: а — распределение межфазных давлений в одиночных слоях; б — распределение давления в ядре системы; в — распределение давления в системе межфазных слоев (разработано авторами)

Figure 2. Formation of the interfacial layer core: a — interfacial pressures distribution in single layers; b — pressure distribution in the system core; c — pressure distribution in the interfacial layers system (developed by the authors)

Значение расклинивающего давления определяется исходя из схемы на рисунке 2 а, с использованием уравнения (4) для единичного межфазного слоя

$$\Pi(h) = \frac{P_0}{R^3} \left[h^3 - \left(\frac{h}{2} \right)^3 \right] = \frac{7}{8} P_0 \left(\frac{h}{R} \right)^3. \quad (6)$$

Увеличение внутреннего давления жидкости на величину расклинивающего давления приводит к росту сил межмолекулярного притяжения, обеспечивающих прочность связей в системе межфазных слоев, формируя эффект структурирования. Однако абсолютное значение

расклинивающего давления по зависимости (6) не дает представления о вкладе эффекта структурирования в показатели прочности рассматриваемой системы. Для оценки вклада расклинивающего давления введем параметр, равный $\chi = \frac{\Pi(h)}{P_0}$, тогда значение коэффициента K , определяющего повышение прочности связи между твердыми поверхностями при перекрытии межфазных слоев, составит:

$$K = P_0 \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{h}{R} \right)^3 \right]. \quad (7)$$

Как видно из полученного уравнения, коэффициент упрочнения резко возрастает с увеличением отношения $\frac{h}{R}$, достигая максимального значения $K_{max} = (1 + \frac{7}{8})$ при $h = R$.

Конечная цель проводимого исследования состоит в выявлении закономерностей структурирования, т. е. повышения прочности дисперснонаполненных композиционных материалов при организации плотной упаковки дисперсных частиц. В работе [4] приведена оценка толщины межфазного слоя жидкость-твердое, которая составляет несколько ангстрем, т. е. соизмерима с молекулярными размерами. Однако эксперимент показывает, что эффект структурирования проявляется при формировании жидкостных прослоек между твердыми частицами, существенно превышающими указанное значение. В связи с этим встает задача о дальном действии расклинивающего давления в объеме дисперсной системы.

Возникновение области повышенного внутреннего давления жидкости в межфазных слоях, обусловленного расклинивающим давлением, создает возмущение объемной фазы жидкости на выходе из зазора между дисперсными частицами системы. В соответствии с этим внутреннее давление жидкости в системе межфазных слоев составляет $P_0 + \Pi(h)$, в то время как в невозмущенной жидкой среде оно равно P_0 . Очевидно, что такой переход не может осуществляться скачкообразно, а приводит к формированию промежуточной области, в которой происходит изменение давления в указанных пределах. В работах А.И. Русанова образование такой области рассматривается как результат краевого эффекта — изменения поля поверхностных сил у края щели. Приводятся результаты расчета, выполненного на основе тензора напряжений Ирвинга-Кирквуда [5–7].

Характер изменения давления в этой области будет описываться уравнениями механики сплошной среды с той лишь разницей, что под давлением среды будет фигурировать внутреннее давление жидкости. Запишем уравнение равновесия сплошной среды в сферической системе

координат r, θ, ε полагая, что создаваемое возмущение распространяется во внешней полуплоскости от места возникновения:

$$(\text{Div}T)_r = \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial T_{r\varepsilon}}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{r} (2T_{rr} + T_{\theta r} \text{ctg} \theta - T_{\theta\theta} - T_{\varepsilon\varepsilon}) = 0 \quad (8)$$

В записанном уравнении через T_{ij} обозначены компоненты тензора напряжений в сферической системе координат. Уравнение существенно упрощается при рассмотрении равновесия жидкости. В этом случае касательные компоненты тензора обращаются в нуль, приводя исходное уравнение к следующему виду:

$$\frac{dT_{rr}}{dr} + \frac{1}{r} (2T_{rr} - T_{\theta\theta} - T_{\varepsilon\varepsilon}) = 0. \quad (9)$$

На рисунке 3 показано согласование используемой далее сферической системы координат декартовой системе, используемой при описании межфазных слоев. Напряжения σ_{xx} и σ_{yy} в межфазном слое в условиях удовлетворительного смачивания при $\theta_0 > 0$ работают на сжатие среды, а компонента $\sigma_{zz} = 0$ в соответствии с (5). Отличные от нуля компоненты тензора действуют в плоскости межфазного слоя, формируя расклинивающее давление $\Pi(h)$ при перекрытии межфазных слоев.

Примем допущение о том, что возмущение объемной фазы в переходной области, обусловленное разностью давлений, распространяется в виде фронта из набора полусфер при фиксированных значениях координаты r , ограниченных плоскостью, часть которой обозначена штриховкой на рисунке. Очевидно, что возмущение, создаваемое в зазоре, распространяется в объемную фазу, ослабевая по мере удаления от зоны формирования. Далее будем полагать, что давления на поверхности полусферы с фиксированным значением r равны в каждой точке поверхности.

Рассмотрим компоненты тензора напряжений, действующего в точках поверхности, показанные на рисунке 3. Напряжения T_{rr} направлены вдоль радиуса полусферы в сторону объемной фазы в связи с падением давления на поверхности с увеличением значения r . Компоненты $T_{\theta\theta}$ и $T_{\varepsilon\varepsilon}$ направлены в меридиональном и окружном направлении в сферической системе координат. Задача состоит в определении зависимости давления P в объемной фазе жидкости от координаты r . Найдем вклад каждой компоненты тензора напряжений на поверхности полусферы в значение давления. В соответствии с определением⁵ под давлением понимают напряжение, действующее по нормали к поверхности в точке. В рассматриваемом случае таким напряжением является компонента тензора T_{rr} , т. е. $P = T_{rr}$.

⁵ Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978.

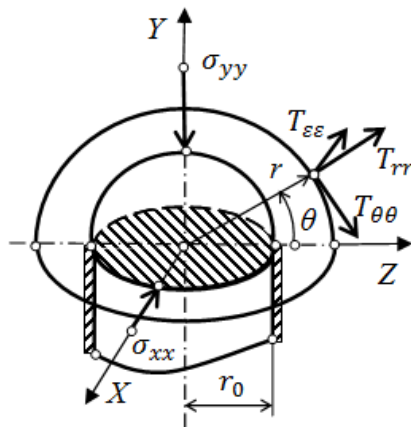


Рисунок 3. Согласование декартовой и сферической систем координат (разработано авторами)

Figure 3. Reconciliation of Cartesian and spherical coordinate systems (developed by the authors)

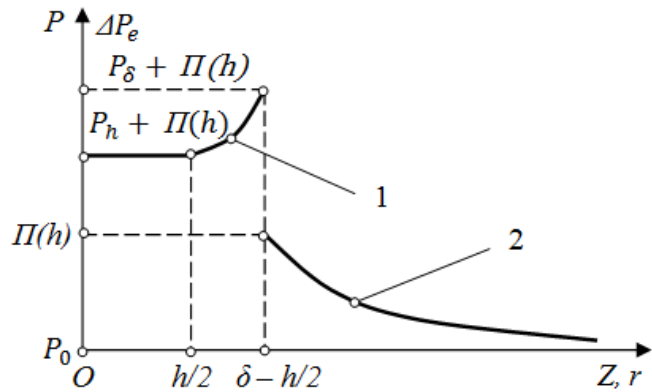


Рисунок 4. Распределение давлений в межфазном слое и его окрестности (разработано авторами)

Figure 4. Pressure distribution in the interfacial layer and its vicinity (developed by the authors)

В соответствии с допущением о равенстве давлений в каждой точке поверхности полусферы с фиксированным значением радиуса давление не может зависеть от угловых координат θ и ϵ сферической системы. Выполнение этого требования становится возможным при условии:

$$T_{rr} - T_{\theta\theta} - T_{\epsilon\epsilon} = 0 \quad (10)$$

в уравнении (9). Это означает, что присутствующие в уравнении напряжения при фиксированном значении r образуют уравновешенную систему сил. В соответствии с этим уравнение (9) преобразуется к виду:

$$\frac{dT_{rr}}{dr} + \frac{T_{rr}}{r} = 0 \quad (11)$$

с получением уравнения с разделяющимися переменными:

$$\frac{dT_{rr}}{T_{rr}} = -\frac{dr}{r} \text{ с решением } T_{rr} = \frac{C}{r}. \quad (12)$$

Константа интегрирования C определяется из граничного условия: при $r = r_0$ $T_{rr} = P = \Pi(h)$, что дает окончательное решение:

$$P = \Pi(h) \left(\frac{r_0}{r} \right). \quad (12)$$

Полученный результат, на первый взгляд, находится в противоречии с изложенными выше представлениями в связи с тем, что уменьшение значения $r_0 = \delta - h/2$ с ростом h приводит к снижению давления P . Однако сопоставление выражений (6) и (12) показывает, что увеличение расклинивающего давления $\Pi(h)$ с ростом значения h оказывается гораздо более сильным, чем уменьшение P в выражении (10), вызванное

изменением значения r_0 . Таким образом, увеличение зоны перекрытия межфазных слоев h приводит в конечном счете к росту значения P , что позволяет снять обозначенное выше противоречие.

На рисунке 4 показано распределение напряжений в системе межфазных слоев (зависимость 1) и в объемной фазе жидкости (зависимость 2). Начало отсчета координат Z и r расположено в центре заштрихованного на рисунке 3 круга. В интервале значений $h/2 \geq z \geq 0$ показано распределение давлений в ядре системы межфазных слоев, в интервале $\delta - h/2 \geq z \geq h/2$ — в пристенных областях межфазных слоев по зависимости (4). Для значений $z \geq \delta - h/2$ кривая 2 построена в соответствии с законом распределения (12).

Как видно из приведенных данных, распределение давления в объемной фазе жидкости существенно расширяет область влияния межфазных слоев на объемную фазу, увеличивая дальное действие расклинивающего давления. Разрыв давления при $z = \delta - h/2$ обусловлен тем, что тензор межфазных напряжений в пристенных зонах межфазной системы содержит как компоненты, вызванные воздействием твердых поверхностей на жидкость ΔP_e , так и уравнивающие компоненты ΔP_i , обусловленные действием молекулярных сил. При этом формируется уравновешенная система сил, не оказывающая воздействия на граничащую с межфазным слоем объемную фазу жидкости.

Приведенные на рисунке 4 данные свидетельствуют о том, что эффект структурирования дисперсных систем, приводящий к существенному усилению внутренних связей, проявляется не только в зоне наложения межфазных слоев в зазорах между твердыми частицами, но и на существенно больших расстояниях. При этом можно предположить, что реализация эффекта возможна даже при точечных контактах частиц дисперсной системы, что осуществляется в большинстве практически осуществляемых случаях их формирования.

3. Обсуждение результатов

3. Results and discussion

В работе предложен принципиально новый подход к описанию поверхностных явлений, основанный на уравнениях равновесия механики сплошной среды, который позволил определить тензор межфазных напряжений в межфазном слое жидкость-твердое и объяснить механизм формирования расклинивающего давления, лежащий в основе эффекта структурирования дисперснонаполненных композиционных материалов. Однако объективная оценка полученных результатов возможна только при

их сопоставлении с существующими представлениями в рассматриваемой сфере исследований.

Необходимость выработки единого подхода к моделированию поверхностных явлений в современных условиях отмечается в работах многих авторов. Так В.И. Ролдугин считает, что, поверхностные силы различной природы определяются осмотическим давлением тех или иных компонентов, присутствующих в системе [3]. Авторы работы [8] видят единый подход к расклинивающему давлению в рамках метода функционала плотности. Авторами настоящего исследования успешно реализован подход, предложенный Б.В. Дерягиным, состоящий в замене кулоновских и молекулярных сил системой натяжений.

Результаты проведенного исследования находятся в соответствии с известными положениями теории поверхностных явлений. В статье [9] приведены зависимости для определения расклинивающего давления:

$$P_m = -\frac{A_{132}}{6\pi h^3} \text{ и } P_m = -\frac{B}{h^4}. \quad (13)$$

Первое из приведенных выражений относится к прослойкам малой толщины $h < 15$ нм, второе — для прослоек большей толщины $h > 40\text{--}50$ нм. В записанных выражениях A_{132} — константа Гамакера, B — параметр, зависящий от разности диэлектрических констант взаимодействующих фаз. Эти соотношения были получены в середине прошлого столетия [10], но в дальнейшем подверглись критике. В работах [11; 12] отмечается, что закон h^{-3} дает заметное отклонение на расстояниях 2–3 нм, а корректность закона h^{-4} вызывает большие сомнения. Сопоставление приведенных зависимостей с результатами, полученными в настоящей работе (выражение 4), показывает их согласование.

Переходя к обсуждению проблемы структурообразования выделим следующее. В работе [13] отмечается, что в высокодисперсных системах с развитой межфазной поверхностью в результате межмолекулярных взаимодействий *самопроизвольно* возникают дисперсные пространственные структуры с повышенной прочностью. По классификации П.А. Ребиндера выделяют два класса структур — коагуляционные и конденсационные. Отличительной особенностью коагуляционных систем является существование между частицами дисперсной фазы прослоек дисперсионной среды, что соответствует рассматриваемой в настоящей работе проблематике.

В физико-химической механике дисперсных систем рассматривают два вида структурных образований — кластеры и мицеллы. Под *кластерами* понимают группу атомов или молекул, объединенных физическим взаимодействием в единый ансамбль, но сохраняющих внутри него индивидуальное поведение. *Мицеллы* — это коллоидные частицы,

которые образуются в виде агрегатов молекул поверхностно-активного вещества. Они диспергированы в жидкой среде и представляют собой жидкие коллоиды [14]. Работ, посвященных изучению особенностей мицелл достаточно много, среди которых можно выделить следующие [15–21]. Несмотря на то, что жидкая среда в межфазном слое между твердыми дисперсными частицами в общем случае не образует коллоидов, ее свойства находятся в соответствии с перечисленными далее свойствами мицеллообразных систем.

В статье [22] приводится подробный анализ особенностей таких структурных образований. Мицеллам свойственен полиморфизм — способность принимать и сохранять геометрическую форму. Таким свойством обладают только твердые тела, жидкость форму не держит. Мицелла — это замкнутый монослой, в котором движение в тангенциальном направлении всегда свободно, а в нормальном к поверхности мицеллы направлении движение стеснено. В соответствии с этим мицеллу можно условно назвать двумерно жидким и одномерно твердым объектом.

Материал, представленный в настоящей работе, подтверждает наличие таких свойств у жидкости структурированного межфазного слоя. В направлении, перпендикулярном к межфазному слою, компонента тензора межфазных напряжений $\sigma_{zz} = 0$ (см. формулу (5) в начале статьи), что свидетельствует о стесненности движения в этом направлении, т. е. проявлении свойств твердого тела. В плоскости межфазного слоя напряжения σ_{xx} и σ_{yy} отличны от нуля с проявлением свойств жидкости. Более того, в работе показано, что равновесие межфазного слоя обеспечивается деформацией объема жидкой фазы, способной сохранять свойства твердого тела. Таким образом, полученные в работе результаты укладываются в рамки существующих представлений о мицеллярном характере структурообразования дисперсных систем.

Отличительной особенностью предлагаемого подхода является использование внутреннего или молекулярного давления в уравнениях механики сплошной среды. Судя по имеющимся в литературных источниках данным, этот вопрос является наиболее проблемным в разрабатываемой модели. В статье [23] отмечается, что несмотря на использование этого понятия в течение последних 100 лет до настоящего времени, единого взгляда на природу внутреннего давления нет, о чем свидетельствуют различные его определения и дискуссии по этому вопросу. Так в работе А.И. Русанова [24] приводится информация о критике Ван-дер-Ваальсом вывода уравнения Лапласа. Указывается, что Лаплас при выводе своего известного уравнения использовал молекулярное вместо гидростатического давления. Кроме этого, показана

неприемлемость допущения Лапласа о несжимаемости жидкости и постоянства ее плотности.

В связи с тем, что эти положения составляют основу разработанного подхода, возникает необходимость более подробного их рассмотрения. В [24] приводится следующая трактовка современных представлений о тензоре давления P на основе представлений статистической механики:

$$P = \rho kT - K. \quad (14)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения называют кинетической частью давления, а второе соответствует молекулярному давлению Лапласа. Констатируется, что записанное уравнение устанавливает связь между гидростатическим и молекулярным давлениями, а с учетом большой плотности жидкостей при обычной температуре P , может быть разностью очень больших величин, так что $P \ll K$. В обычных условиях изотермические изменения гидростатического и молекулярного давления Лапласа практически совпадают по абсолютной величине, но имеют разные знаки.

В монографии ⁶ вводится понятие внутреннего давления, а приведенное выше уравнение с учетом термодинамических соотношений принимает вид:

$$P = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V - \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T, \quad (15)$$

где U и V — энергия и объем жидкости. Величину $P_k = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$ называют кинетическим давлением, а величину $P_i = - \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T$ статическим, внутренним, или молекулярным давлением. С учетом принятого в работе допущения о несжимаемости жидкости энергия системы зависит только от температуры, откуда следует, что второе слагаемое записанного уравнения обращается в нуль. Здесь следует обратить внимание на особенность определения внутренних силовых параметров системы, определяемых взаимодействием конкурирующих факторов, уравнивающих друг друга. Результирующим эффектом такого взаимодействия является отсутствие внешних проявлений от их наличия, в связи с чем поиск внутреннего давления по приведенной формуле на основе внешних проявлений заведомо обречен на провал.

В качестве подтверждения приведем результат работы [4] по определению контактного взаимодействия жидкой и твердой фаз. Конкурирующими факторами в этом случае являются силовые воздействия на жидкость межфазного слоя твердой фазы одной с стороны и объемной фазы жидкости — с другой. На рисунке 1 а приведены законы

⁶ Мелвин-Хьюз Э.А. Физическая химия, т. 2, Изд-во иностр. лит. М.: 1962. С. 537.

распределения напряжений по толщине слоя от их действия, откуда видна симметрия распределений по отношению к значению давления P_0 . Суммирование напряжений ΔP_e и ΔP_i , действующих в противоположных направлениях, приводит к формированию уравновешенной системы с конечным результатом $\sigma_{zz} = 0$. Таким образом, в уравновешенной системе сил их определение сводится к описанию условий формирования только одного из конкурирующих факторов — в рассматриваемом случае $\Delta P_e(z)$ с использованием объемной силы F_V .

В механике давление определяется как напряжение, нормальное к площадке в рассматриваемой точке, направленное в сторону, обратную внешней нормали к поверхности. В соответствии с этим определением под внутренним давлением жидкости следует понимать напряжения сил отталкивания, т. е. величину P_k в приведенной формуле. С другой стороны, в условиях равновесия (речь идет о внутренних напряжениях) силы притяжения должны быть равны по абсолютной величине и противоположны по направлению силам отталкивания с образованием уравновешенного силового поля межмолекулярных сил. Исходя из этого, не важно, какое из двух слагаемых в формуле будет называться внутренним, или молекулярным давлением.

По вопросу о различии гидростатического и молекулярного давлений отметим следующее. Гидростатическое давление жидкости обусловлено действием внешних по отношению к ней силовых факторов в отличие от молекулярного давления, реализуемого без внешних силовых воздействий под действием внутренних сил системы. Рассматриваемые давления действуют в системе одновременно, обеспечивая равновесие на различных уровнях — внутреннее на молекулярном, гидростатическое — на макроскопическом уровне. Однако с учетом их формирования отличие состоит в том, что внутреннее давление не может оказывать влияния на значение гидростатического, а гидростатическое может влиять на значение внутреннего. Однако в практических случаях значение внутреннего давления, как правило, существенно выше гидростатического в связи с чем этим влиянием пренебрегают.

Изложенные представления относились к изотропному тензору давления с одинаковыми компонентами, который обычно рассматривается как скаляр. Однако в работе [4] показано, что такое представление тензора межфазных напряжений не может обеспечить равновесия межфазного слоя, что обусловило представление тензора, как анизотропного, представленного совокупностью шаровой и девиаторной составляющих. В этом случае компоненты шаровой части тензора, соответствующие давлению, определяются уравнением (1). Отличные от нуля компоненты тензора межфазных напряжений σ_{xx} и σ_{yy} в выражениях (5)

обнаруживаются во внешних проявлениях, сводящихся к капиллярным эффектам поднятия и опускания жидкости в тонких трубках, а также изменением давления при искривлении свободной поверхности жидкости.

Представленная модель структурирования дисперсных систем показывает, что определяющим фактором в межфазных взаимодействиях является наличие градиентов межмолекулярных сил на толщине межфазного слоя. С учетом значений внутренних давлений, измеряемых в жидкостях тысячами и десятками тысяч атмосфер, на линейных размерах молекулярного масштаба значения градиентов достигают поистине астрономических величин. Как показано в работе [4], градиенты межфазных напряжений определяют характер распределения давления по толщине слоя, приводят к деформации объема среды, формируя в жидкости свойства твердого тела. Исходя из этого, понятие градиент присутствует в названии работы.

4. Заключение

4. Conclusion

Резюмируя изложенное, отметим, что в работе сформулирован принципиально новый подход к моделированию поверхностных явлений, основанный на использовании аппарата механики сплошной среды, пригодный к применению вне зависимости от природы сил, формирующих межфазные взаимодействия. Показан механизм формирования расклинивающего давления в жидкостных прослойках между твердыми поверхностями, приводящий к изменению внутреннего давления в объемной фазе жидкости, окружающей область перекрытия межфазных слоев. Установлены факторы, определяющие дальное действие эффектов структурообразования.

Выводы

Summary

Полученные в работе результаты можно коротко представить в виде следующего перечня.

1. Разработана схема формирования расклинивающего давления в узкой щели между поверхностями твердых частиц дисперсной системы. Получены аналитические выражения для определения значения расклинивающего давления, согласующиеся с известными результатами в этой области.

2. Показано, что перекрытие межфазных слоев в зазоре между твердыми поверхностями не приводит к изменению характера смачивания в зоне контакта фаз, но сопровождается формированием ядра межфазного слоя в центральной зоне зазора с постоянными значениями межфазных напряжений.

3. Показан мицеллярный характер структурообразования дисперснонаполненных композиционных материалов, когда в межфазном слое одновременно проявляются как свойства жидкости, так и твердого тела.

4. Установлен закон распространения возмущения, создаваемого наложением межфазных слоев, существенно увеличивающий область воздействия расклинивающего давления, определяющую макроскопические свойства дисперсной системы.

5. Доказано, что определяющим фактором в формировании поверхностных эффектов является наличие мощных градиентов межфазных напряжений на толщине межфазного слоя при сохранении постоянства давления. Такое, кажущееся на первый взгляд противоречие, связано с наличием градиента компонент девиатора напряжений, определяющих поверхностное натяжение межфазных слоев.

6. Полученные результаты подтверждают возможность использования общего подхода, основанного на аппарате механики сплошной среды, позволяющего рассматривать поверхностные явления вне зависимости от механизма формирования поверхностных сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Герасимов, Д.В.** Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона / Д.В. Герасимов, А.А. Игнатьев, В.М. Готовцев, И.В. Голиков // Дороги и мосты. — 2018. — № 2. — С. 304–315. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45648768>. — EDN KXRNTB. (дата обращения: 18.06.2023).
2. **Dzhemilev, N.Kh.** Fragmentation of sputtered Ta cluster ions over the time range of 1 ns to 0.1 ms: lifetime and internal energy distributions / N.Kh. Dzhemilev, A.M. Goldenberg, I.V. Veriovkin, S.V. Verkhoturov. — DOI [https://doi.org/10.1016/0168-1176\(94\)04112-K](https://doi.org/10.1016/0168-1176(94)04112-K) // International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes. — 1995. — Т 141. — № 3. — С. 209–215. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/016811769404112K>. — (дата обращения: 18.06.2023).

3. **Ролдугин, В.И.** О едином механизме действия поверхностных сил различной природы / В.И. Ролдугин. — DOI <https://doi.org/10.7868/S0023291215020160> // Коллоидный журнал. — 2015. — Т 77. — № 2. — С. 214. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22995156>. — EDN TJFHAT. (дата обращения: 18.06.2023).
4. **Игнатьев, А.А.** Модель контактного взаимодействия жидкой и твердой фаз / А.А. Игнатьев, В.М. Готовцев. — DOI <https://doi.org/10.15862/11SATS223> // Транспортные сооружения. — 2023. — Т 10. — № 2. — С. 11SATS223. — URL: <https://t-s.today/11SATS223.html>. — EDN IWQCHI. (дата обращения: 18.06.2023).
5. **Rusanov, A.I.** Stress tensor field near the edge of a slit with dispersion forces / A.I. Rusanov, F.M. Kuni. — DOI <https://doi.org/10.1063/1.3223158> // Journal of Chemical Physics. — 2009. — Т 131. — № 10. — С. 106101. — URL: <https://pubs.aip.org/aip/jcp/article-abstract/131/10/106101/906175/Stress-tensor-field-near-the-edge-of-a-slit-with?redirectedFrom=fulltext>. — (дата обращения: 18.06.2023).
6. **Русанов, А.И.** Расклинивающее давление у края плоскопараллельной щели между телами с дисперсионными силами / А.И. Русанов, Ф.М. Куни // Коллоидный журнал. — 2010. — Т 72. — № 1. — С. 54–60. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13044287>. — EDN KZLQVL. (дата обращения: 18.06.2023).
7. **Irving, J.H.** The Statistical Mechanical Theory of Transport Processes. IV. The Equations of Hydrodynamics / J.H. Irving, J.G. Kirkwood. — DOI <https://doi.org/10.1063/1.1747782> // Journal of Chemical Physics. — 1950. — Т 18. — № 6. — С. 817–829. — URL: <https://pubs.aip.org/aip/jcp/article-abstract/18/6/817/201367/The-Statistical-Mechanical-Theory-of-Transport?redirectedFrom=fulltext>. — (дата обращения: 18.06.2023).
8. **Щекин, А.К.** Единый подход к расклинивающему давлению в жидких и паровых прослойках в рамках метода функционала плотности / А.К. Щекин, Л.А. Гостева, Т.С. Лебедева, Д.В. Татьянаенко. — DOI <https://doi.org/10.31857/S002329122101012> // Коллоидный журнал. — 2021. — Т 83. — № 2. — С. 235–241. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44674839>. — EDN CTVDQO. (дата обращения: 18.06.2023).
9. **Чураев, Н.В.** Поверхностные силы и физикохимия поверхностных явлений / Н.В. Чураев // Успехи химии. — 2004. — Т 73. — № 1. — С. 26–38. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9082628>. — EDN HQTQKL. (дата обращения: 18.06.2023).
10. **Дзялошинский, Е.И.** Силы Ван-дер-Ваальса в жидких пленках / Е.И. Дзялошинский, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1959. — Т 37. — № 1. — С. 161–170. — URL: http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_010_01_0161.pdf. — (дата обращения: 18.06.2023).
11. **Бойнович, Л.Б.** Дальнодействующие поверхностные силы и их роль в развитии нанотехнологии / Л.Б. Бойнович // Успехи химии. — 2007. — Т 76. — № 5. — С. 471–488. — URL: <https://www.russchemrev.org/RCR3692pdf>. — EDN LKGQMJ. (дата обращения: 18.06.2023).

12. **Rabinovich, Y.I.** Theoretical calculation of the coagulation kinetics of emulsifierless acrylate lattices / Y.I. Rabinovich, T.G. Movchan, V.I. Eliseeva, T.R. Astamazova // Коллоидный журнал. — 1991. — Т 53. — №1. — С. 69–73. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31088025>. — EDN XOGZVK. (дата обращения: 18.06.2023).
13. **Урьев, Н.Б.** Физико-химическая динамика дисперсных систем / Н.Б. Урьев // Успехи химии. — 2004. — Т 73. — № 1. — С. 39–62. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9082629>. — EDN HQTQKV. (дата обращения: 18.06.2023).
14. **Aniansson, E.A.G.** Kinetics of step-wise micelle association / E.A.G. Aniansson, S.N. Wall. — DOI <https://doi.org/10.1021/j100603a016> // The Journal of Physical Chemistry. — 1974. — Т 78. — № 10. — С. 1024–1030. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/j100603a016>. — (дата обращения: 18.06.2023).
15. **Salem, J.K.** Utilization of surface Plasmon resonance band of silver nanoparticles for determination of critical micelle concentration of cationic surfactants / J.K. Salem, I.M. El-Nahhal, B.A. Najri, T.M. Hammad. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2016.10.025> // Chemical Physics Letters. — 2016. — Т 664. — С. 154–158. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009261416307941>. — (дата обращения: 18.06.2023).
16. **Middleton, J.M.** Micelle formation, structures, and metrology of functional metal nanoparticle compositions / J.M. Middleton, R.L. Siefert, M.H. James, A.M. Schrand, M.K. Kolel-Veetil. — DOI <https://doi.org/10.3934/matricsci.2021035> // AIMS Materials Science. — 2021. — Т 8. — № 4. — С. 560–586. — URL: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/matricsci.2021035>. — (дата обращения: 18.06.2023).
17. **Nesmerak, K.** Determination of Critical Micelle Concentration by Electrochemical Means / K. Nesmerak, I. Nemcova. — DOI <https://doi.org/10.1080/00032710600620302> // Analytical Letters. — 2006. — Т 39. — № 6. — С. 1023–1040. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00032710600620302>. — (дата обращения: 18.06.2023).
18. **Pérez-Rodríguez, M. A.** Comparative Study of the Determination of the Critical Micelle Concentration by Conductivity and Dielectric Constant Measurements / M. Pérez-Rodríguez, G. Prieto, C. Rega, L.M. Varela, F. Sarmiento [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1021/la980296a> // Langmuir. — 1998. — Т 14. — № 16. — С. 4422–4426. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la980296a>. — (дата обращения: 18.06.2023).
19. **Phillips, J.N.** The energetics of micelle formation / J.N. Phillips. — DOI <https://doi.org/10.1039/TF9555100561> // Transactions of the Faraday Society. — 1955. — Т 51. — С. 561–569. — URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1955/TF/tf9555100561>. — (дата обращения: 18.06.2023).
20. **Tanford, C.** Thermodynamics of Micelle Formation: Prediction of Micelle Size and Size Distribution / C. Tanford // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. — 1967. — Т 71. — № 5. — С. 1811–1815. — URL: <https://www.jstor.org/stable/63530>. — (дата обращения: 18.06.2023).

21. **Israelachvili, J.N.** Theory of self-assembly of hydrocarbon amphiphiles into micelles and bilayers / J.N. Israelachvili, D.J. Mitchell, B.W. Ninham. — DOI <https://doi.org/10.1039/F29767201525> // Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics. — 1976. — Т 72. — № 0. — С. 1525–1568. — URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1976/F2/f29767201525>. — (дата обращения: 18.06.2023).
22. **Русанов, А.И.** Удивительный мир мицелл / А.И. Русанов. — DOI <https://doi.org/10.7868/S0023291214020074> // Коллоидный журнал. — 2014. — Т 76. — № 2. — С. 139. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21194597>. — EDN RVUVOB. (дата обращения: 18.06.2023).
23. **Карцев, В.Н.** Межмолекулярные силы и внутреннее давление жидкостей / В.Н. Карцев, С.Н. Штыков, К.Е. Панкин, Д.В. Батов // Журнал структурной химии. — 2012. — Т 53. — № 6. — С. 1113–1118. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18807179>. — EDN OGKLLI. (дата обращения: 18.06.2023).
24. **Русанов, А.И.** О понятиях молекулярного давления и формулах теории капиллярности / А.И. Русанов, В.З. Кротов // Коллоидный журнал. — 1975. — Т 37, № 1. — С. 191–193.

Сведения об авторах:

Игнатъев Алексей Александрович — кандидат технических наук, доцент, директор департамента развития отраслевого образования, ФАУ «Российский дорожный научно-исследовательский институт», Москва, Россия, доцент кафедры «Гидротехническое и дорожное строительство», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия, e-mail: Ignatievaa@rosdornii.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1425-5330>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=652263
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAZ-2908-2021>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57223088598>

Готовцев Валерий Михайлович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление предприятием», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия, e-mail: gotovtsev_vm@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4272-9209>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=302357

Статья получена: 15.07.2023. Принята к публикации: 08.01.2024. Опубликовано онлайн: 22.01.2024.

REFERENCES

1. Gerasimov D.V., Ignatiev A.A., Gotovtsev V.M., Golikov I.V. Prospects for the Use of Phosphogypsum When Producing Asphalt Concrete. *Dorogi i mosty*. 2018; (2): 304–315. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45648768> (accessed 18th June 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Dzhemilev N.Kh., Goldenberg A.M., Veriovkina I.V., Verkhovurov S.V. Fragmentation of sputtered Ta cluster ions over the time range of 1 ns to 0.1 ms: lifetime and internal energy distributions. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*. 1995; 141(3): 209–215. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1176\(94\)04112-K](https://doi.org/10.1016/0168-1176(94)04112-K).

3. Roldughin V.I. On the unified mechanism of the action of surface forces of different natures. *Colloid Journal*. 2015; 77(2): 202–206. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061933X15020167>.
4. Ignatyev A.A., Gotovtsev V.M. Contact interaction model of liquid and solid phases. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023; 10(2): 11SATS223. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/11SATS223>.
5. Rusanov A.I., Kuni F.M. Stress tensor field near the edge of a slit with dispersion forces. *Journal of Chemical Physics*. 2009; 131(10): 106101. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3223158>.
6. Rusanov A.I., Kuni F.M. Disjoining pressure at the edge of plane-parallel slit between solids interacting by dispersion forces. *Colloid Journal*. 2010; 72(1): 49–55. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061933X10010072>.
7. Irving J.H., Kirkwood J.G. The Statistical Mechanical Theory of Transport Processes. IV. The Equations of Hydrodynamics. *Journal of Chemical Physics*. 1950; 18(6): 817–829. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1747782>.
8. Shchekin A.K., Gosteva L.A., Lebedeva T.S., Tatyanyanenko D.V. A Unified Approach to Disjoining Pressure in Liquid and Vapor Interlayer within the Framework of the Density Functional Theory. *Colloid Journal*. 2021; 83(2): 263–269. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061933X21010129>.
9. Churaev N.V. Surface forces and physicochemistry of surface phenomena. *Russian Chemical Reviews*. 2004; 73(1): 25–36. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2004v073n01ABEH000867>.
10. Dzyaloshinskii I.E., Lifshitz E.M., Pitaevskii L.P. van der Waals Forces in Liquid Films. *Soviet Physics JETP*. 1959; 37(1): 161–170. Available at: http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_010_01_0161.pdf (accessed 18th June 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Boinovich L.B. Long-range surface forces and their role in the progress of nanotechnology. *Russian Chemical Reviews*. 2007; 76(5): 471–488. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2007v076n05ABEH003692>.
12. Rabinovich Y.I., Movchan T.G., Eliseeva V.I., Astamazova T.R. Theoretical calculation of the coagulation kinetics of emulsifierless acrylate lattices. *Kolloidnyy Zhurnal*. 1991; 53(1): 69–73. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31088025> (accessed 18th June 2023). (In Eng.).
13. Uriev N.B. Physicochemical Dynamics of Disperse Systems. *Russian Chemical Reviews*. 2004; 73(1): 39–62. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9082629&ysclid=ljfprrh7y9268240947> (accessed 18th June 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Aniansson E.A.G., Wall S.N. Kinetics of step-wise micelle association. *The Journal of Physical Chemistry*. 1974; 78(10): 1024–1030. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1021/j100603a016>.
15. Salem J.K., El-Nahhal I.M., Najri B.A., Hammad T.M. Utilization of surface Plasmon resonance band of silver nanoparticles for determination of critical micelle concentration of cationic surfactants. *Chemical Physics Letters*. 2016; 664: 154–158. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2016.10.025>.

16. Middleton J.M., Siefert R.L., James M.H., Schrand A.M., Kolel-Veetil M.K. Micelle formation, structures, and metrology of functional metal nanoparticle compositions. *AIMS Materials Science*. 2021; 8(4): 560–586. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3934/matisci.2021035>.
17. Nesmerak K., Nemcova I. Determination of Critical Micelle Concentration by Electrochemical Means. *Analytical Letters*. 2006; 39(6): 1023–1040. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/00032710600620302>.
18. Pérez-Rodríguez M., Prieto G., Rega C., Varela L.M., Sarmiento F. et al. A Comparative Study of the Determination of the Critical Micelle Concentration by Conductivity and Dielectric Constant Measurements. *Langmuir*. 1998; 14(16): 4422–4426. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1021/la980296a>.
19. Phillips J.N. The energetics of micelle formation. *Transactions of the Faraday Society*. 1955; 51: 561–569. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1039/TF9555100561>.
20. Tanford C. Thermodynamics of Micelle Formation: Prediction of Micelle Size and Size Distribution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1967; 71(5): 1811–1815. Available at: <https://www.jstor.org/stable/63530> (accessed 18th June 2023). (In Eng.).
21. Israelachvili J.N., Mitchell D.J., Ninham B.W. Theory of self-assembly of hydrocarbon amphiphiles into micelles and bilayers. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics*. 1976; 72(0): 1525–1568. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1039/F29767201525>.
22. Rusanov A.I. The wonderful world of micelles. *Colloid Journal*. 2014; 76(2): 121–126. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061933X14020070>.
23. Kartsev V.N., Shtykov S.N., Pankin K.E., Batov D.V. Intermolecular forces and the internal pressure of liquids. *Journal of Structural Chemistry*. 2012; 53(6): 1087–1093. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0022476612060108>.
24. Rusanov A.I., Krotov V.Z. O ponyatiyakh molekulyarnogo davleniya i formulakh teorii kapillyarnosti [On the concepts of molecular pressure and formulas of the theory of capillarity]. *Kolloidnyj Zhurnal*. 1975; 37(1): 191–193. (In Russ.)

Information about the authors:

Alexey A. Ignatyev — Russian Road Scientific-Research Institute, Moscow, Russia, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia, e-mail: Ignatievaa@rosdornii.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1425-5330>

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=652263

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAZ-2908-2021>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57223088598>

Valeriy M. Gotovtsev — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia, e-mail: gotovtsev_vm@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4272-9209>

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=302357

Submitted: 15th July 2023. Revised: 8th January 2024. Published online: 22nd January 2024.