
ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ / CHEMISTRY

УДК 544.7; 544.77.022.532; 544.77.051; 544.722.8; 544.723.2.

МЕХАНИЗМ МОЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ В ХИМИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Д. В. Белов¹, С. Н. Беляев²

1 – Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт «Буревестник», (АО «ЦНИИ «Буревестник»), 603950, Россия, г. Нижний Новгород, Сормовское шоссе, 1а, e-mail: belov.denbel2013@yandex.ru;

2 – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», 603950, Россия, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

Моющее действие поверхностно-активных веществ — это совокупность множества явлений и состоит из ряда параллельно и последовательно протекающих процессов. Детальное установление механизма моющего действия — это сложная задача, имеющая важнейшее научно-теоретическое и практическое значение. Теория моющего действия проливает свет на ряд процессов и явлений, широко распространенных в природе и практической деятельности человека.

Ключевые слова: моющее действие, поверхностно-активные вещества (ПАВ), поверхностное натяжение, мицелла, смачивание, адсорбция, эмульгирование, детергент, синтетические моющие средства (СМС).

Введение

Согласно современным представлениям механизм моющего действия — это сложный комплекс коллоидно-химических процессов: смачивание, пептизация, эмульгирование, стабилизация загрязнений и другие. Они определяются поверхностной активностью мыл, повышенной механической прочностью их адсорбционных слоев, устойчивостью коллоидных систем и многими другими характеристиками поверхностных явлений.

Одним из предметов исследований химии поверхностных явлений являются загрязнения. Необходимо понять, что собой представляют загрязнения тела человека, его одежды, окружающих предметов быта, хозяйственных вещей и посуды, технологического и промышленного оборудования, а также определить характер связи загрязнений с поверхностью, на которой они находятся.

Наиболее распространенные виды загрязнений — пыль, сажа (продукты неполного сгорания топлива и его присадок в двигателях), неорганические материалы и минеральные вещества (почва, песок, глина, цемент и др.), масла, жиры, смазочные материалы, потовыделения (смесь солей, жиров, липидов, органических кислот, различных азотсодержащих соединений и др.). Одежда задерживает на себе большую часть загрязнений с поверхности кожи тела человека. Различные бытовые загрязнения осаждаются на внешние

поверхности тканей одежды. За счет адсорбции и других межмолекулярных взаимодействий частицы загрязнений закрепляются на этих поверхностях, забивают и заклеивают мельчайшие поры. Основными загрязнителями посуды и бытовых вещей являются жировые загрязнения. Как известно, соблюдение надлежащего санитарного состояния посуды и столовых приборов на пищевых объектах имеет большое значение в профилактике кишечных инфекций и пищевых отравлений.

Моющее действие можно условно разделить на две стадии. На первой стадии происходит смачивание и пептизация (расщепление агрегатов, возникших при коагуляции или слипании дисперсных систем, на более мелкие частицы под действием жидкой среды, например, воды) твердых и жирных загрязнений. Вторая стадия моющего действия сводится к образованию устойчивых эмульсий из маслообразных, сажевых и других загрязнений, что предотвращает их прилипание к отмываемой поверхности. Механические и температурные воздействия (трение, перемешивание, кипячение и др.) способствуют лучшему взаимодействию моющих средств с загрязненной поверхностью [1, 10].

Определим, какие силы межмолекулярных взаимодействий заставляют загрязнения прочно сцепляться с различными поверхностями.

Было замечено, что между конденсированными телами, разделенными достаточно тонкой прослойкой газа или жидкости, наблюдается определенное силовое взаимодействие. Соответствующие силы получили название **поверхностных сил**.

Одним из основных явлений в рассматриваемом нами комплексе взаимодействий является **когезия** (лат. *cohaesus* — связанный, сцепленный). Это связывание между одинаковыми молекулами (атомами, ионами) внутри тела в пределах одной термодинамической фазы. Основой когезии являются силы межмолекулярного взаимодействия. Когезия — это внутреннее свойство вещества. Оно обусловлено взаимным притяжением одинаковых частиц, вызывает перераспределение их электронной плотности и создает электрическое притяжение, способное образовывать микроскопические структуры (агломераты), что определяет совокупность физических и физико-химических свойств вещества: агрегатное состояние, летучесть, растворимость и т. д. Когезия характеризует прочность тела и его способность противостоять внешнему воздействию. Хорошо известен наглядный опыт. Если сильно прижать плоскости двух свинцовых цилиндров, то они прочно «прилипнут» друг к другу. Этот эксперимент показывает действие межмолекулярных сил [2, 7, 9].

Наиболее сильно когезия проявляется в конденсированных средах (в твердых телах и жидкостях), где расстояния между молекулами (атомами, ионами) малы и составляют несколько ангстрем. Мерой интенсивности такого типа межмолекулярных взаимодействий является плотность энергии когезии. Она эквивалентна работе удаления взаимно притягивающихся молекул на бесконечно большое расстояние друг от друга. Работа когезии по абсолютной величине равна работе, необходимой для разделения тела на две части. Эта работа определяет энергию когезии.

Следующим фундаментальным явлением является **адгезия** (от лат. *adhaesio* — прилипание)¹. По физическому смыслу адгезия — это взаимодействие между приведенными

¹ см.: Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга: АН СССР, Ин-т физ. химии. М.: Наука, 1973. 278 с.; Берлин А. А., Басин В. Е. Основы адгезии

в контакт поверхностями конденсированных фаз разной природы (Рис. 1). Адгезия обеспечивается физическими или химическими силами взаимодействия [7, 9].



Рис. 1. Вектора сил, действующих на каплю жидкости, находящуюся на твердой подложке в воздушной атмосфере

Адгезия представляет собой обратимую термодинамическую работу сил, направленных на разделение приведённых в контакт разнородных (гетерогенных) фаз — твердой (тв), жидкой (ж) и газообразной (г). Она описывается следующим уравнением [7, 9]:

$$W_A = \sigma_{тв-г} + \sigma_{ж-г} - \sigma_{тв-ж},$$

где $\sigma_{тв-г}$ — поверхностное натяжение на границе «твёрдое тело — газ», $\sigma_{ж-г}$ — поверхностное натяжение на границе «жидкость — газ», $\sigma_{тв-ж}$ — межфазное натяжение на границе «твёрдое тело — жидкость».

В некоторых случаях адгезия оказывается сильнее когезии. То есть сцепление между материалами сильнее, чем внутри однородных материалов. Поэтому при приложении разрывающего усилия происходит когезионный разрыв в объёме менее прочного из соприкасающихся материалов.

Наиболее наглядно картина межмолекулярного взаимодействия демонстрируется в явлении поверхностного натяжения.

Поверхностное натяжение является одной из фундаментальных характеристик материи. Возникновение поверхностного натяжения обусловлено тем обстоятельством, что молекулы вещества, находящегося на границе раздела фаз («жидкость — газ», «жидкость — жидкость», «твёрдое тело — жидкость»), обладают избыточной энергией по сравнению с молекулами, находящимися в объёме фаз. Основная причина особых свойств поверхности раздела фаз заключается в том, что она имеет структуру, отличную от структуры внутреннего объёма этих фаз (для одного и того же вещества) [6, 7, 9].

Наличие поверхностного натяжения, как параметра поверхностного слоя, объясняется наличием асимметричного силового поля, действующего на молекулы, расположенные в

узкой мономолекулярной области между двумя фазами. Действительно, молекулы, находящиеся в объёме жидкости (молекулы В) окружены со всех сторон себе подобными молекулами (Рис. 2), а значит, силы, действующие на каждую из них, взаимно компенсируются. Иная ситуация возникает в приповерхностной области: асимметрия силового поля обусловлена тем, что молекулы поверхностного слоя (молекулы А) взаимодействуют с такими же молекулами в объёме жидкости и с молекулами в газовой фазе. Очевидно, что силы взаимодействия между молекулами жидкой фазы превышают силы взаимодействия между молекулами газа и жидкости и это приводит к «втягиванию» молекул внутрь жидкой фазы, то есть к стремлению жидкости сократить свою свободную поверхность.

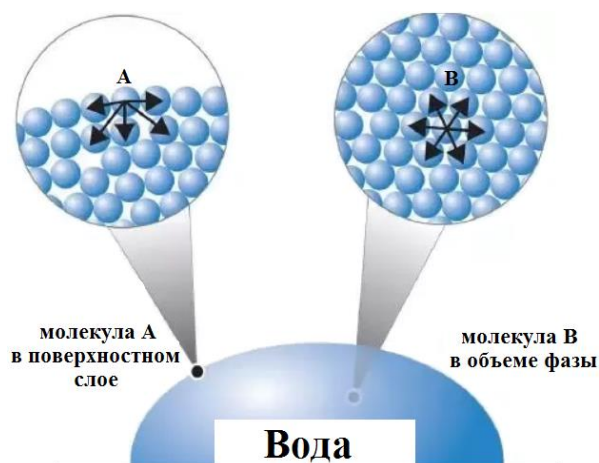


Рис. 2. Природа поверхностного натяжения. Показано различие между молекулами А в объеме фазы и молекулами В в поверхностном слое

Нескомпенсированность сил межмолекулярного взаимодействия на границе раздела фаз приводит к тому, что поверхностные молекулы перемещаются в объем жидкости. В результате возникает сила, действующая по касательной (тангенциально) к поверхности раздела фаз. Под действием этой силы поверхность жидкости становится предельно гладкой и сокращается до минимальных размеров.

Поверхностное натяжение с энергетической (термодинамической) точки зрения — это удельная работа увеличения поверхности при её растяжении при постоянстве температуры. Поверхностное натяжение (σ) равно работе изотермического процесса (G_s , индекс «s» указывает на поверхностную величину, от англ. *surface* — поверхность), затрачиваемой на создание единицы новой поверхности (S) [6, 7, 9]:

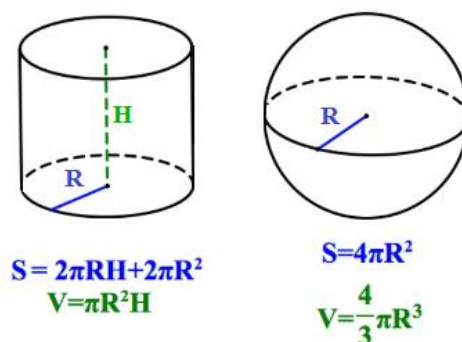
$$\sigma = \frac{G_s}{S} = \frac{W}{S}, \text{ [Дж/м}^2\text{] или [мН/м].}$$

С механической точки зрения поверхностное натяжение — это сила, действующая на единицу длины линии, которая ограничивает поверхность жидкости².

Так как появление новой поверхности конденсированной среды требует совершения работы, каждая среда стремится уменьшить площадь своей поверхности. Так в невесомости капля жидкости принимает сферическую форму, поскольку сфера имеет наименьшую

² см.: Хайдаров Г.Г., Хайдаров А.Г., Машек А.Ч. Физическая природа поверхностного натяжения жидкости // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4 (Физика, химия) 2011. Вып. 1. С. 3–8.

площадь поверхности среди всех тел одинакового объема. Это несложно доказать на следующем примере.



Приравняем объемы цилиндра и сферы: $V_{\text{цил}} = V_{\text{сф}}$, тогда $\pi R^2 H = \frac{4}{3}\pi R^3$. Выразим отсюда высоту цилиндра H : $H = \frac{4}{3}R$. Далее определим площади поверхностей: $S_{\text{цил}} = 2\pi R^2 + 2\pi RH = 2\pi R^2 + \frac{8}{3}\pi R^2$, при $R = 1$ см, $S_{\text{цил}} = 2\pi + \frac{8}{3}\pi = 14,7$ см²; $S_{\text{сф}} = 4\pi R^2$, при $R = 1$ см, $S_{\text{сф}} = 4\pi = 12,6$ см².

Аналогично можно сравнить площади поверхностей других тел при их одинаковых объемах. При этом величина площади сферы также окажется минимальной.

То же самое происходит с каплями жидкости, помещаемой внутрь другой несмешивающейся с ней жидкости, такой же плотности. Это явление демонстрирует опыт Плато (Рис. 3).

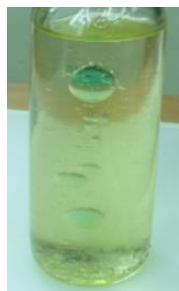


Рис. 3. Опыт Плато. Капли одной жидкости в объеме другой жидкости, несмешивающейся с первой

Струя воды «сливается» в цилиндр, который затем разбивается на шаровидные капли. Маленькие предметы, имеющие плотность большую, чем плотность жидкости, способны «плавать» на поверхности жидкости, так как сила тяготения уравнивается силой поверхностного натяжения. На многих несмачиваемых гидрофобных поверхностях вода собирается в капли (Рис. 4).



Рис. 4. Капли воды на гидрофобных поверхностях листьев растений

Поверхностное натяжение непосредственно связано с работой когезии. Работа когезии определяется затратой энергии на обратимый изотермический разрыв тела по сечению, равному единице площади (Рис. 5). Поскольку при разрыве образуется поверхность в две единицы площади, то работа когезии равна удвоенному значению поверхностного натяжения на границе с газовой фазой [7, 9]:

$$W_K = 2 \sigma_{\text{ТВ-Г.}}$$

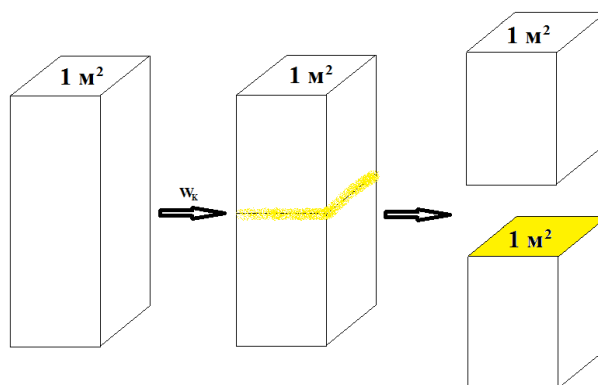


Рис. 5. Удвоение площади при когезионном разрыве тела

Поверхностное натяжение используется для объяснения капиллярности (поднятие жидкости в капилляре), смачивания (нахождение жидкости на твердой поверхности в виде капель или растекание по ней) и многих других явлений. Большую роль поверхностное натяжение играет в процессах ректификации, например при образовании пузырька газа при кипении. Огромное значение поверхностное натяжение оказывает на всех стадиях моющего действия поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Поверхностно-активные вещества или **ПАВ**³ — это химические соединения, которые, концентрируясь на поверхности раздела термодинамических фаз (например, поверхность раздела «раствор — воздух»), вызывают снижение поверхностного натяжения [1, 3, 8].

На рис. 6 схематично показано действие ПАВ в объеме раствора и в поверхностном слое. Снижение поверхностного натяжения молекулами ПАВ можно объяснить

³ см.: Абрамзон А. А., Гаевой Г. М. (ред.) Поверхностно-активные вещества. Л.: Химия, 1979. 376 с.; Плетнев М. Ю. (ред.) Поверхностно-активные вещества и композиции. Справочник. М.: ИД «Косметика и медицина», 2002. 752 с.; Chemistry and Technology of Surfactants / Edited by Richard J. Farn. Blackwell Publishing Ltd, 2006. 315 p.

нескомпенсированностью сил межмолекулярного взаимодействия. Результирующий вектор этих сил (F_2) в случае нахождения молекул ПАВ в поверхностном слое направлен в объем фазы, тем самым, показывая стремление системы к уменьшению ее поверхности.

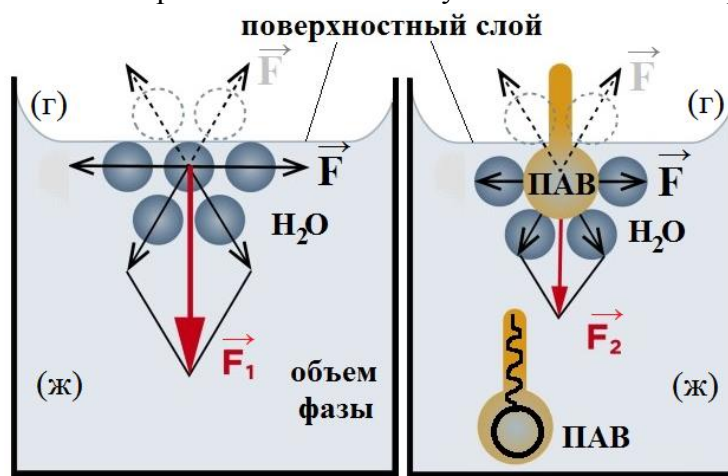


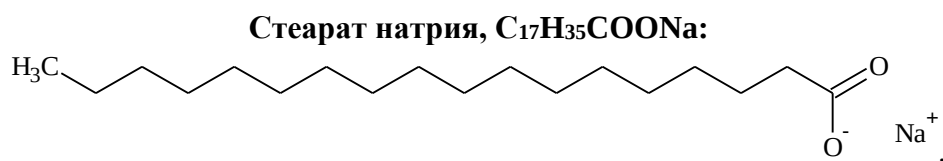
Рис. 6. Схема механизма снижения поверхностного натяжения в водном растворе под влиянием ПАВ

В присутствии ПАВ в воде понижается поверхностное натяжение раствора и улучшается смачивание ткани или отмываемой поверхности моющим раствором. Это способствует проникновению моющего раствора в поры на твердой поверхности или в тонкие капилляры загрязненной ткани, в которые чистая вода проникнуть не может [8].

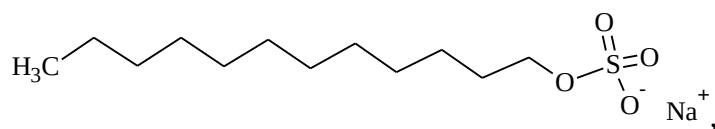
Мыла. Согласно классическому определению, мыло — это твёрдый или жидкий продукт, содержащий поверхностно-активные вещества, который в сочетании с водой используется в качестве косметического средства для очищения кожи и ухода за ней, либо как средство бытовой химии, обладающего моющим действием. Основными компонентами мыла являются растворимые соли предельных (насыщенных) жирных кислот, например, стеарат натрия. Именно эти соли являются поверхностно-активными веществами [7, 9].

Детергент (лат. *detergeo* — мою) или моющее средство — это профессиональные химические средства и средства бытовой химии, представляющие собой концентраты или растворы, готовые к применению, предназначенные для мытья, чистки от загрязнений и уходу за поверхностями. Действующими компонентами являются поверхностно-активные вещества.

Так называемые, мыльные продукты и синтетические моющие средства (СМС) изготавливаются на основе синтетических поверхностно-активных веществ, которые производятся из растительных жиров, например, лаурилсульфат натрия, или из продуктов химической переработки нефти, например, алкилбензолсульфонаты (сульфонолы) (рис. 7).



Лаурилсульфат (додecilсульфат) натрия, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$:



Додecilбензолсульфонат натрия, $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$:

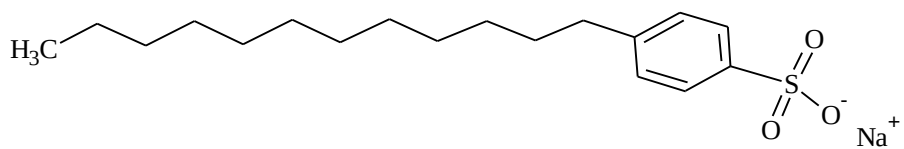


Рис. 7. Структурные формулы некоторых ПАВ

На рис. 8 схематически показано строение молекулы ПАВ. Кружком обозначают полярную группу — гидрофильный компонент (функциональные группы $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{SO}_2\text{OH}$, $-\text{OSO}_2\text{H}$ и т. д., или их соли), ломаный хвост обозначает неполярную (гидрофобную или липофильную) углеводородную часть молекулы⁴.

Такое строение молекул ПАВ называется **дифильным** или **амфифильным** и означает, что молекула обладает сродством к двум различным по полярности фазам (фильность — сродство). Такие молекулы способны ориентироваться (адсорбироваться) на границе раздела фаз, выравнивая полярности этих фаз, тем самым, снижая поверхностное натяжение между ними [1, 3, 8].

Понятия **лиофильность** и **лиофобность** (от др.-греч. λύω — растворяю, φίλέω — люблю и φόβος — страх) характеризуют способность веществ или тел к межмолекулярному взаимодействию с жидкостями [9]. Лиофильность характеризует сильное взаимное притяжение молекул вещества (твёрдого тела) и контактирующей с ним жидкости, а лиофобность характеризует сильное отталкивание между ними. При взаимодействии вещества с водой лиофильность и лиофобность называются **гидрофильностью** и **гидрофобностью** (от др.-греч. ὕδωρ — вода), а в случае масел и/или жиров — **липофильностью** (от др.-греч. λίπος — жир)⁵. Эти характеристики являются проявлением сил Ван-дер-Ваальса.

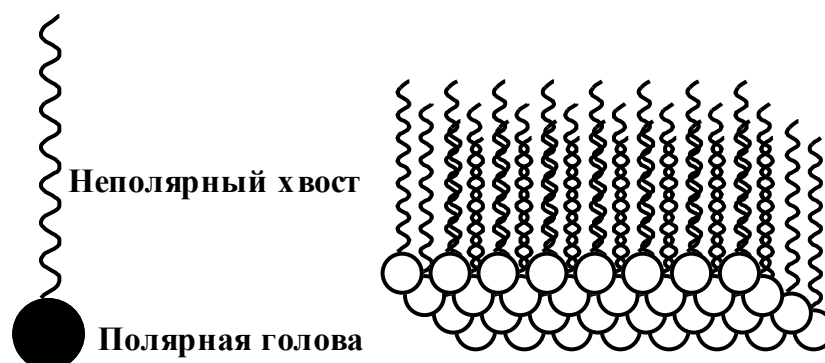


Рис. 8. Схематическое строение молекулы ПАВ и расположение ПАВ в поверхностном слое

⁴ см.: Абрамзон А. А., Гаевой Г. М. (ред.) Поверхностно-активные вещества. Л.: Химия. 1979. 376 с.; Ostroumov S. A. Biological effects of surfactants. 2006. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton. 279 p.

⁵ см.: Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1988. 464 с.; Arie Ben-Naim. Hydrophobic Interactions. Springer US. 1980. P. 320. DOI: 10.1007/978-1-4684-3545-0.

Попав в воду, молекулы мыла на пограничной поверхности располагаются так, что гидрофильные группы карбоксильных анионов направлены в воду, а углеводородные гидрофобные выталкиваются из нее. В результате поверхность воды покрывается «частоколом» из молекул ПАВ (Рис. 9) [2, 4].

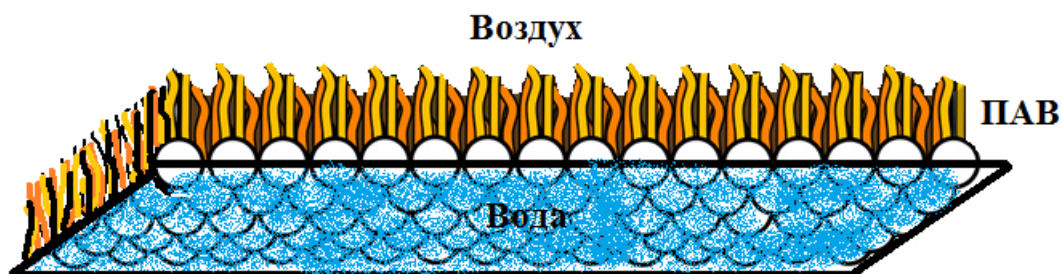


Рис. 9. Расположение молекул ПАВ в поверхностном слое при его полном насыщении

На границе раздела фаз к воде (к полярной фазе) ориентируется гидрофильная группа, а к маслу (к неполярной фазе) или воздуху — углеводородный радикал. Благодаря силам межмолекулярного притяжения, в водной среде при определенной концентрации молекул ПАВ происходит их ассоциация (объединение) с образованием **мицелл** (уменьшительное от лат. *mīsa* — частица, крупинка) [5]. Прямая мицелла формируется в водной среде. В прямой мицелле все углеводородные группы находятся в центре мицеллы, а гидрофильные группы — снаружи. На капле масла будут адсорбироваться молекулы ПАВ, ориентируя неполярные хвосты к капле масла, а полярные головы в водную среду (Рис. 10). В случае обратных мицелл гидрофильные полярные группы будут ориентироваться вокруг капли воды, а гидрофобные углеводородные радикалы будут снаружи, в среде масла [7, 9].

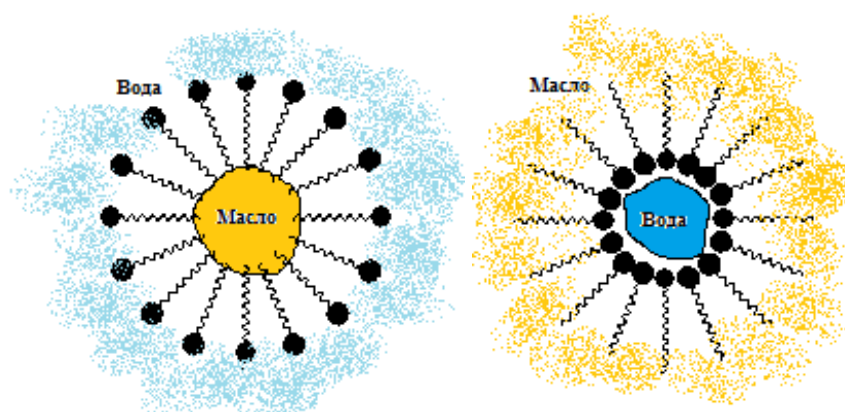


Рис. 10. Схематическое представление строения мицелл: прямой, типа «масло в воде» (слева) и обратной, типа «вода в масле» (справа)

Мыла с загрязняющими веществами (практически — это жиры с различными включениями) также образуют мицеллы. Жировые загрязнения будем обозначать далее по тексту условным термином «масло» (рис. 11) [5].

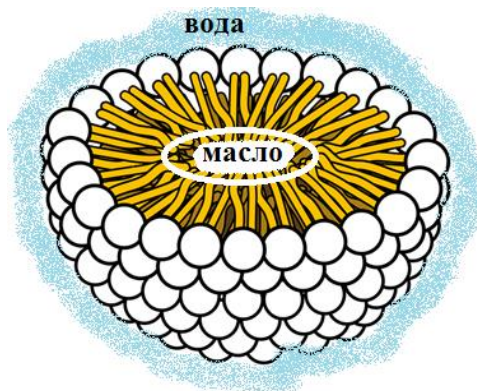


Рис. 11. Схематическое представление строения сферической мицеллы ПАВ типа «масло в воде» (боковое сечение)

Липофильная часть молекулы мыла (ПАВ) растворяется в загрязняющем веществе (в масляной фазе), а гидрофильная часть формирует поверхность мицеллы, которая находится в объеме воды.

Вернемся к рассмотрению вопроса химии поверхностно-активных веществ и рассмотрим **классификацию ПАВ** [1]. По характеру использования ПАВ можно подразделить на моющие средства, эмульгаторы, смачиватели, солюбилизаторы. К моющим средствам относят вещества или смеси веществ, применяемые в водных растворах для очистки поверхности твёрдых тел от загрязнений. Эмульгаторы обеспечивают создание эмульсий из несмешивающихся жидкостей. Смачиватели вызывают пептизацию или диспергирование, то есть измельчение твёрдых тел на мелкие частички или жидкой фазы на мелкие капельки. Солюбилизаторы помогают повысить растворение частиц твердого вещества, слабо растворимого в данной жидкой среде. По способности к диссоциации в водных растворах ПАВы подразделяются на ионогенные и неионные. Ионогенные могут быть анионными, катионными и амфотерными [3, 8].

ПАВ имеет предел растворимости или так называемую **критическую концентрацию мицеллообразования** или **ККМ**. При достижении этой величины и при дальнейшем добавлении ПАВ в раствор его концентрация на границе раздела фаз остаётся постоянной, но при этом происходит самоорганизация молекул ПАВ в объеме раствора — мицеллообразование или агрегация (Рис. 12) [5].

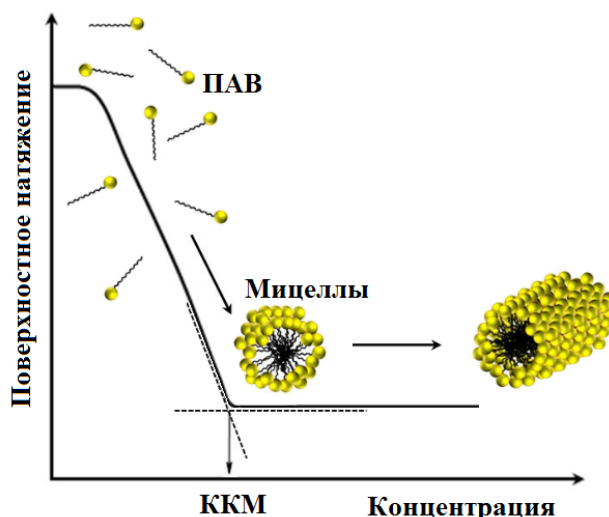


Рис. 12. Зависимость величины поверхностного натяжения от концентрации ПАВ в растворе

Причиной мицеллообразования в водных растворах является гидрофобный эффект. С ростом концентрации ПАВ в растворе меняется структура мицелл. Они могут укрупняться и образовывать агрегаты. Способность молекул ПАВ образовывать мицеллы сферической, цилиндрической, нитевидной формы с одинаковым составом, но разной структурой и внешней формой носит название **полиморфизма** мицелл (Рис. 13) [5].

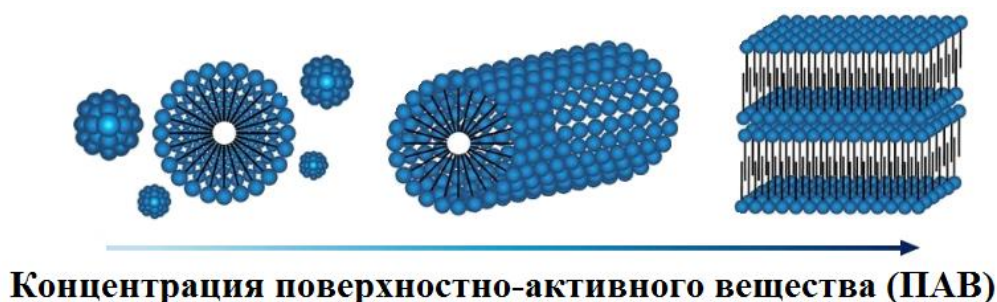


Рис. 13. Эволюция мицеллярной структуры с ростом концентрации поверхностно-активного вещества: сферическая мицелла, цилиндрическая мицелла, плоский бислой.

Отличительным признаком мицеллообразования является помутнение раствора. Водные растворы ПАВ приобретают голубоватый оттенок за счёт преломления света мицеллами (Рис. 14). Это явление носит название **опалесценция**. Так проявляется эффект Тиндаля (**рассеянии Тиндаля**) — оптический эффект, представляющий собой рассеивание света при прохождении светового пучка через оптически неоднородную среду. Его можно наблюдать в виде светящегося конуса (конуса Тиндаля), видимого на тёмном фоне. Этот эффект характерен для растворов коллоидных (дисперсных) систем, в которых частицы и окружающая их среда различаются по показателю преломления [7, 9].

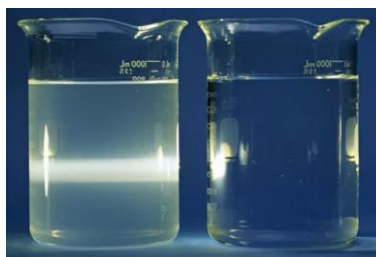


Рис. 14. Эффект Тиндаля: светящийся конус при прохождении светового пучка через дисперсную систему (слева). Справа для сравнения стакан с водой, в котором не наблюдается светового рассеяния

Движущей силой мицеллообразования является устранение контакта между гидрофобными частями молекул ПАВ и водой. Чем крупнее сферическая мицелла, тем более эффективно это устранение. В этом случае увеличивается отношение объема мицеллы к ее поверхности. Углеводородные «хвосты» ПАВ упаковываются в мицелле с максимальным уменьшением контакта с водой. Такому агрегированию препятствует отталкивание между гидрофильными полярными группами на поверхности мицеллы. Образующаяся структура является результатом баланса между полярными и неполярными частями молекулы ПАВ [5].

С явлением адгезии неразрывно связан важный физико-химический процесс — смачивание. **Смачивание и растекание** — это адгезионные взаимодействия между жидким и твердым телом [6].

Если адгезия обуславливает связь между твёрдым телом и контактирующей с ним жидкостью, то результатом этого взаимодействия является смачивание. Уравнение Дюпре — Юнга показывает отношение между адгезией и смачиванием [9, 11]:

$$W_A = \sigma_{ж-г} \cdot (1 + \cos\theta),$$

где $\sigma_{ж-г}$ — поверхностное натяжение на границе раздела двух фаз (жидкость — газ), $\cos\theta$ — косинус краевого угла смачивания, W_A — обратимая работа адгезии.

Уравнение Дюпре — Юнга позволяет вычислять работу адгезии жидкости к твёрдому телу, поскольку входящие в неё величины (θ и $\sigma_{ж-г}$) могут быть достаточно легко определены экспериментально, в отличие от величин $\sigma_{тв-ж}$ и $\sigma_{тв-г}$.

Прочность адгезионных контактов зависит не только от работы отрыва гетерогенных поверхностей, но и от формы контакта. Контакты сложной формы начинают разрываться с краёв, фронт отрыва затем распространяется к центру контакта вплоть до достижения некоторой критической конфигурации, при которой происходит мгновенная потеря контакта.

Смачивание. Пусть капля жидкости находится на плоской поверхности твёрдого тела (твёрдая подложка). В этом случае необходимо учитывать три граничащие фазы и три величины поверхностных натяжений соответственно (Рис. 15) [6, 7].

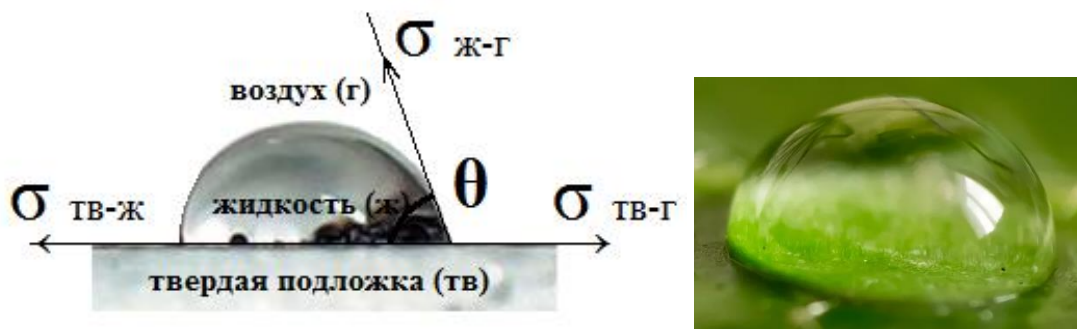


Рис. 15. Смачивание жидкостью (ж) гидрофильной твердой подложки (тв):

$$0^\circ < \theta < 90^\circ, 0 < \cos\theta < 1, \sigma_{тв-г} > \sigma_{тв-ж}.$$

Первые количественные исследования формы поверхности жидкости, соприкасающейся с твердой поверхностью, относятся к началу XIX века, когда был сформулирован закон постоянства краевого угла смачивания, предложенный английским ученым Томасом Юнгом (*Thomas Young*, 13.06.1773 — 10.05.1829) в 1805 году. Это, по сути, условие механического равновесия капли жидкости на твердой поверхности.

Связь между величинами поверхностных натяжений и равновесным краевым углом смачивания (углом, который образуют капля на твёрдой поверхности) определяется уравнением Юнга [6, 7, 11]:

$$\sigma_{тв-г} = \sigma_{тв-ж} + \sigma_{ж-г} \cdot \cos\theta.$$

Уравнение Юнга можно также интерпретировать как уравнение баланса сил на линии трёхфазного контакта: поверхностное и межфазные натяжения изображаются в виде векторов сил, действующих на границе раздела трёх фаз (Рис. 16) [10].

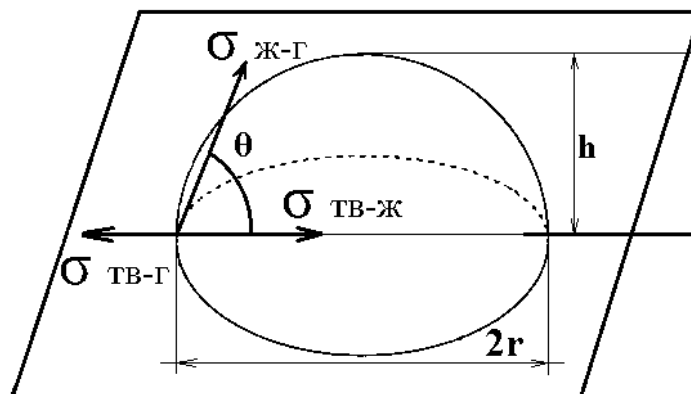


Рис. 16. Взаимодействие сил, определяющих форму капли

При $\theta < 90^\circ$ и если известны геометрические параметры капли (высота капли h и радиус площади контакта капли с исследуемой поверхностью r), то краевой угол смачивания можно определить по формуле:

$$\cos\theta = \frac{r^2 - h^2}{r^2 + h^2}.$$

При $\theta > 90^\circ$ необходимо воспользоваться формулой:

$$\cos\theta = \frac{1 - h}{r}.$$

В теории моющего действия целесообразно рассматривать систему взаимодействия «твердая подложка — капля масла — вода». В этой системе моделируется поведение отрыва жирового загрязнения от твердой поверхности в объеме воды (Рис. 17) [2, 6, 11].

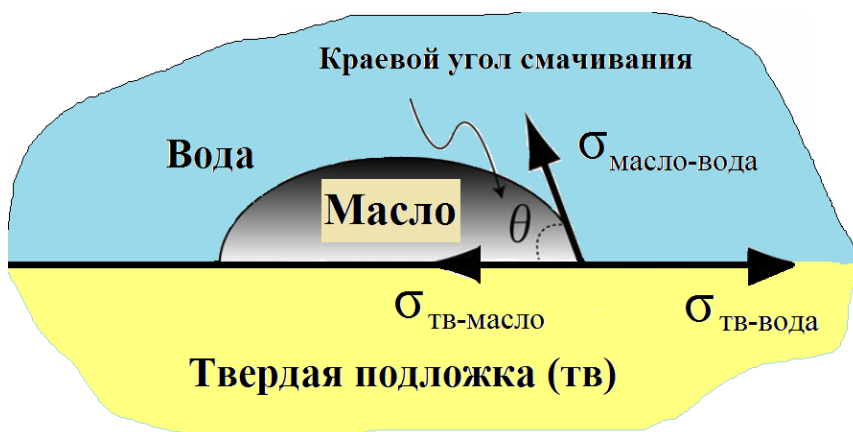


Рис. 17. Взаимодействие системы трех контактирующих фаз

Изменение свободной поверхностной энергии при отрыве частицы грязи от поверхности равно [6, 7, 9]:

$$\Delta G = \sigma_{\text{масло-вода}} + \sigma_{\text{тв-вода}} - \sigma_{\text{тв-масло}}.$$

Самопроизвольный отрыв частицы возможен если, $\Delta G \leq 0$ или при условии:

$$\sigma_{\text{тв-масло}} \geq \sigma_{\text{масло-вода}} + \sigma_{\text{тв-вода}}.$$

Если загрязняющая смесь представляет собой жидкость, то для ее удаления необходимо, чтобы краевой угол смачивания водной фазы θ был как можно меньше. Данное

условие выполняется при $\theta \geq 0$, т. е. нулевом или положительном коэффициенте растекания водной фазы.

Как показывает анализ этого уравнения, чтобы адгезия жирового загрязнения к твердой поверхности была нулевой или отрицательной, необходимо максимально уменьшить величины $\sigma_{\text{масло} - \text{вода}}$ и $\sigma_{\text{ТВ} - \text{вода}}$, минимально меняя при этом величину $\sigma_{\text{ТВ} - \text{масло}}$. По этой причине можно ожидать, что эффективным моющим действием должны обладать ПАВ, адсорбирующиеся как на поверхности раздела «масло — вода», так и на поверхности раздела «твердое тело — вода» [7, 9].

Определим связь краевого угла с работой адгезии и когезии. Исходя из выражения $W_A = \sigma_{\text{ТВ-Г}} + \sigma_{\text{Ж-Г}} - \sigma_{\text{ТВ-Ж}}$, и зная, что $\sigma_{\text{ТВ-Г}} = \sigma_{\text{ТВ-Ж}} + \sigma_{\text{Ж-Г}} \cdot \cos\theta$ и $W_K = 2 \sigma_{\text{ТВ-Г}}$, получим следующее выражение:

$$\cos\theta = \frac{2 W_A - W_K}{W_K}.$$

Уравнение Юнга можно представить в следующем виде [11]:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{\text{ТВ-Г}} - \sigma_{\text{ТВ-Ж}}}{\sigma_{\text{Ж-Г}}}.$$

Эта величина является количественной характеристикой. Если $\cos\theta > 0$, то поверхность хорошо смачивается жидкостью, если $\cos\theta < 0$, то жидкость плохо смачивает поверхность. Иными словами, если краевой угол смачивания находится в пределах $0^\circ < \theta < 90^\circ$, то поверхность является гидрофильной, если краевой угол смачиваемости $\theta > 90^\circ$, то поверхность гидрофобная.

Аналогично можно проанализировать уравнение [11]:

$$W_A = \sigma_{\text{Ж-Г}} \cdot (1 + \cos\theta).$$

Это уравнение выражает баланс изменения поверхностной энергии системы при отрыве жидкой плёнки от твёрдой поверхности. При этом исчезает поверхность «ТВ – Ж», но появляются две новые «ТВ – Г» и «Ж – Г». Из уравнения следует, что работа адгезии увеличивается с ростом поверхностного натяжения отдельных фаз и уменьшается с ростом межфазного натяжения. Физический смысл этого утверждения в том, что свободная энергия уменьшается за счёт работы сил взаимодействия.

Из этого уравнения видна разница между явлениями адгезии и смачивания. Разделив обе части уравнения на 2 и зная, что $W_K = 2 \sigma_{\text{Ж-Г}}$, получим выражение [2, 7, 9]:

$$\frac{W_A}{W_K} = \frac{1 + \cos\theta}{2}.$$

Так как смачивание количественно характеризуется величиной косинуса краевого угла ($\cos\theta$), то в соответствии с этим уравнением оно определяется отношением работы адгезии к работе когезии для смачивающей жидкости. Различие между адгезией и смачиванием в том, что смачивание имеет место при наличии контакта трех фаз. Анализ этого уравнения позволяет сделать следующие выводы [6, 7, 9]:

1. При $\theta = 0^\circ$, $\cos\theta = 1$, $W_A = W_K$; наблюдается полное смачивание и растекание капли по поверхности (Рис. 18).



Рис. 18. Смачивание жидкостью твердой поверхности (слева) и растекание жидкости в результате полного смачивания поверхности (справа)

При $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $0 < \cos\theta < 1$, $\frac{1}{2} W_K < W_A < W_K$; в этом случае наблюдается смачивание (Рис. 18, слева).

2. При $\theta = 90^\circ$, $\cos\theta = 0$, $W_A = \frac{1}{2} W_K$; это состояние неполного смачивания (Рис. 19).

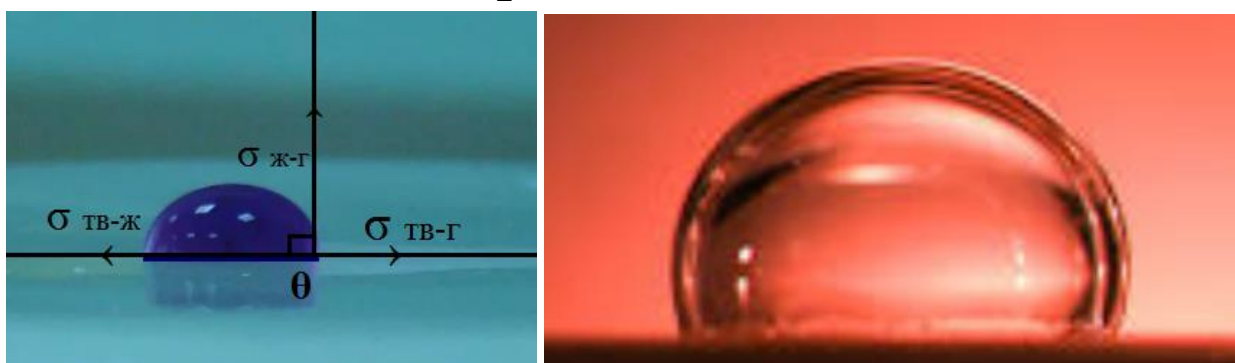


Рис. 19. Неполное смачивание. Краевой угол смачивания $\theta = 90^\circ$.

3. При $90^\circ < \theta < 180^\circ$, $-1 < \cos\theta < 0$, $\sigma_{ТВ-Г} < \sigma_{ТВ-Ж}$; это состояние несмачивания жидкостью гидрофобной твердой поверхности (Рис. 20, 21). При этом работа адгезии меньше работы когезии: $0 < W_A < \frac{1}{2} W_K$.

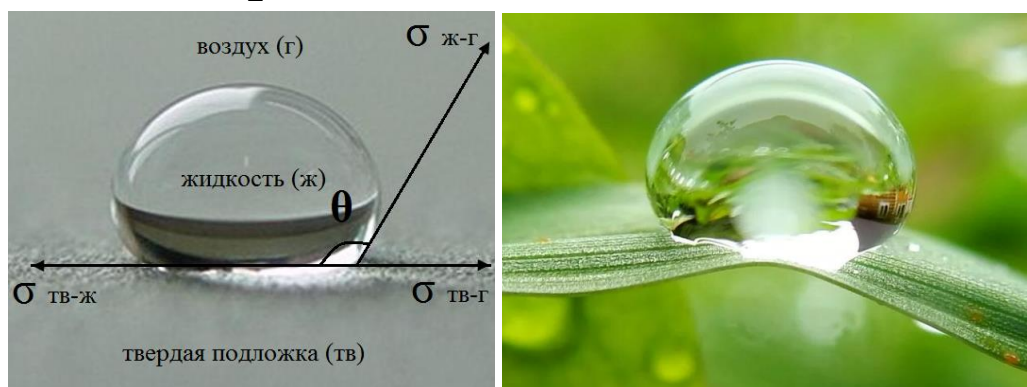


Рис. 20. Несмачивание жидкостью (ж) гидрофобной твердой подложки (тв)



Рис. 21. Капля ртути на несмачиваемой ею поверхности

4. При $\theta = 180^\circ$, $\cos\theta = -1$, $W_A = 0$. Это соотношение не имеет физического смысла [6, 8, 9].

Для экспериментального нахождения значения краевого угла смачивания (рис. 22) необходимо найти граничные точки контактов капли с подложкой: 1 и 2. На сферической линии поверхности капли выберем произвольную точку 3. Затем из середин линий, соединяющих эти точки в виде хорд, проведем перпендикуляры. Из точки пересечения перпендикуляров 0 (центр сферы) проведем радиус, например в точку 2, а затем перпендикуляр к радиусу в точке 2. Угол между горизонтальной поверхностью контакта или подложкой и этим перпендикуляром составляет краевой угол смачивания θ .

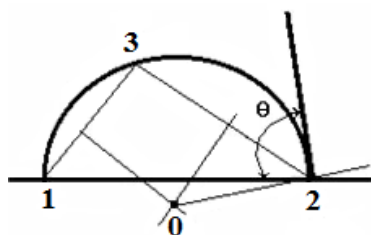
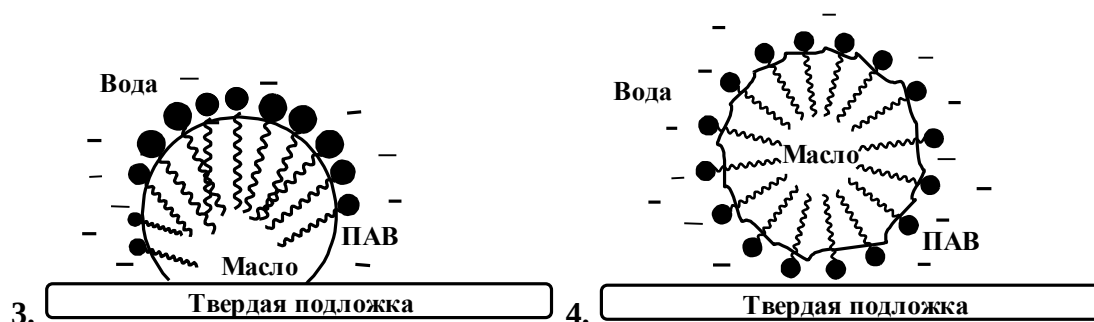


Рис. 22. Схема измерения краевого угла смачивания

Чтобы смочить загрязненную поверхность, моющий раствор должен обладать достаточно низким поверхностным натяжением (30 – 40 мН/м) по сравнению с чистой водой (72,8 мН/м). Моющее действие определяется способностью моющих веществ (ПАВ) и их растворов удалять прилипшие (адсорбированные) к различным поверхностям (ткань, металл, стекло и т. д.) загрязнения и переводить их во взвешенное состояние [6].

На рис. 23 приведена схема удаления жировой частицы (загрязнения) с очищаемой поверхности. Показана адсорбция ПАВ на поверхности загрязнений и образование мицелл [1, 4].





1 — загрязнение только частично покрыто адсорбированным слоем молекул ПАВ; 2 — загрязнение полностью покрывается адсорбционным слоем ПАВ; 3 — загрязнение почти полностью смочено, но еще держится на твердой поверхности; 4 — отрыв загрязнения от твердой поверхности и переход образовавшейся мицеллы в водную фазу

Рис. 23. Схема и стадии моющего действия ПАВ

Мицеллообразование является, своего рода, альтернативой адсорбции на межфазных границах. Оно приводит к устранению контакта гидрофобных групп с водой, в результате чего свободная энергия системы понижается.

Адсорбция ПАВ⁶. Адсорбцией называют самопроизвольное изменение (как правило, повышение) концентрации вещества вблизи поверхности раздела фаз. Она обозначается буквой греческого алфавита Γ (гамма) и имеет единицу измерения $[\text{моль}/\text{м}^2]$.

Адсорбция может быть положительной (вызвана повышением концентрации в поверхностном слое по сравнению с объемной концентрацией), и отрицательной (вызвана понижением концентрации у поверхности). Движущей силой адсорбции ПАВ на поверхностях и на межфазных границах является снижение свободной энергии границы раздела фаз.

Поверхностные силы вызывают перераспределение компонентов: в результате один из компонентов (или несколько) может оказаться в избытке в поверхностном слое. В этом случае говорят об адсорбции этого компонента на межфазной поверхности.

Работа адсорбции ($W_{\text{адс}}$) — это работа, совершаемая при переносе одного моля ПАВ из объема фазы в адсорбционный слой (при положительной адсорбции) [2, 8].

Зависимость величины адсорбции ПАВ от его концентрации в растворе в изотермических условиях (при постоянной температуре) называется изотермой адсорбции (Рис. 24).

⁶ см.: Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1989. 464 с.; Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир, 1984. 310 с.; Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир. 1979. 568 с.; Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др. Введение в физику поверхности / Под ред. В. И. Сергиенко. М.: Наука, 2006. 490 с.

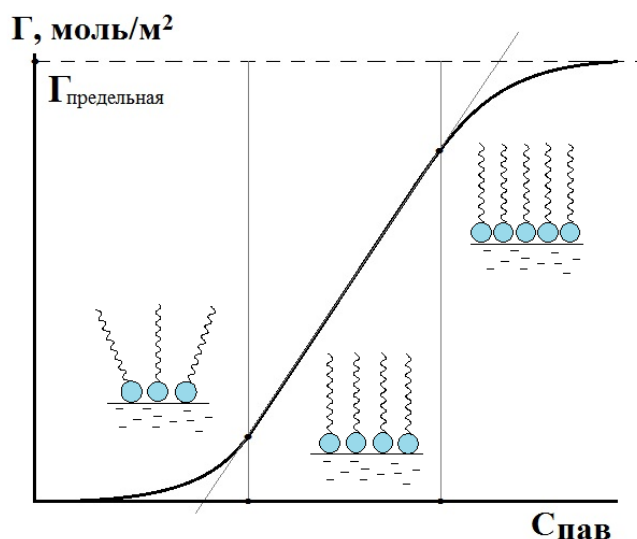


Рис. 24. Вид изотермы адсорбции

Поверхностное натяжение растворов мицеллообразующих ПАВ зависит от кинетики формирования межфазного адсорбционного слоя ПАВ на границе «жидкость — газ». Адсорбция ПАВ — процесс длительный. Поэтому при образовании новой поверхности раздела «жидкость — газ» постоянное равновесное значение σ устанавливается по истечении определенного промежутка времени, за которое завершается формирование адсорбционного слоя [5, 6].

Молекулы ПАВ, адсорбируясь на поверхности твердых тел и волокон ткани, а также на поверхностях твердых или жидких загрязнений, создают хорошо гидратированный адсорбционный слой, что обуславливает возникновение **расклинивающего давления** (англ. *disjoining pressure*) (Рис. 25) [7, 9].

Это термодинамический параметр, характеризующий состояние тонкого слоя (плёнки) жидкости между поверхностями тел. По сути, это избыточное давление в тонкой плёнке жидкости по сравнению с гидростатическим давлением в ее большем объеме.

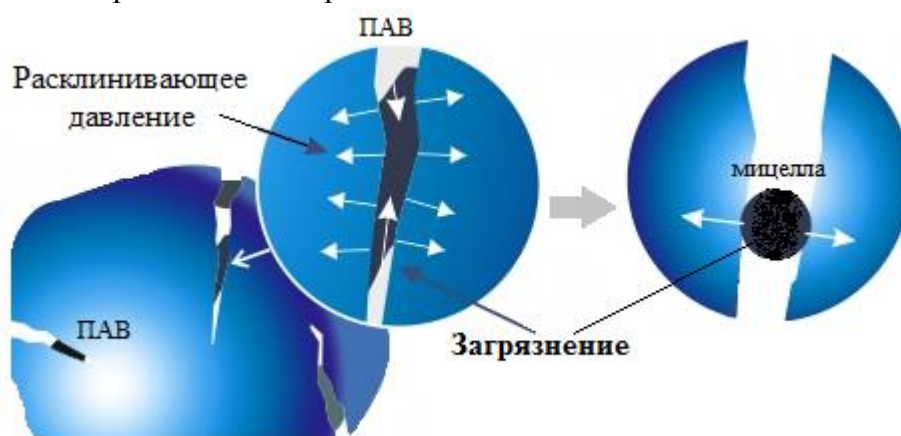


Рис. 25. Схема, иллюстрирующая возникновение расклинивающего давления при адсорбции ПАВ на загрязнении

Это понятие ввел русский физико-химик Б. В. Дерягин (27.07.1902 — 16.05.1994) [6]. Возникновение расклинивающего давления связано с поверхностными силами электрической, магнитной, межмолекулярной природы, которые действуют в тонком

поверхностном слое между двумя граничащими фазами. Расклинивающее давление способствует отрыву частиц загрязнений от поверхности волокна и переходу их в моющую жидкость.

Считается, что адсорбция и мицеллообразование это конкурирующие процессы. Мицеллообразование в объеме раствора может снижать концентрацию ПАВ в поверхностном слое.

Адсорбционные пленки на поверхности частиц загрязнений придают этим частицам высокую агрегативную устойчивость и предупреждают их прилипание к поверхности в другом месте.

Моющее действие ПАВ связано со способностью частиц загрязнений, особенно если они имеют жировой характер, солюбилизоваться в их растворах. Это подтверждается тем, что моющее действие обнаруживается лишь при концентрациях, превышающих ККМ.

Поскольку хорошие ПАВ обязательно образуют дисперсные системы, можно предположить, что мицеллы должны оказывать непосредственное влияние на моющее действие. Одним из основным факторов моющего действия считают солюбилизацию [1, 5].

Солюбилизация (от лат. *solubilis* – «растворимый») – это процесс самопроизвольного и обратимого проникновения вещества с низкой молекулярной массой, как правило, неполярного (гидрофобного), или **солюбилизата**, внутрь мицелл солюбилизатора поверхностно-активного вещества [6, 7, 9]. Солюбилизация сопровождается равновесным распределением солюбилизата между водной фазой и мицеллой (Рис. 26). Процесс растворения солюбилизата в мицеллах ПАВ условно можно разделить на следующие стадии:

- 1) распределение солюбилизата в воде;
- 2) диффузия его молекул из объема раствора к мицеллам ПАВ;
- 3) проникновение и распределение солюбилизата внутри мицелл.

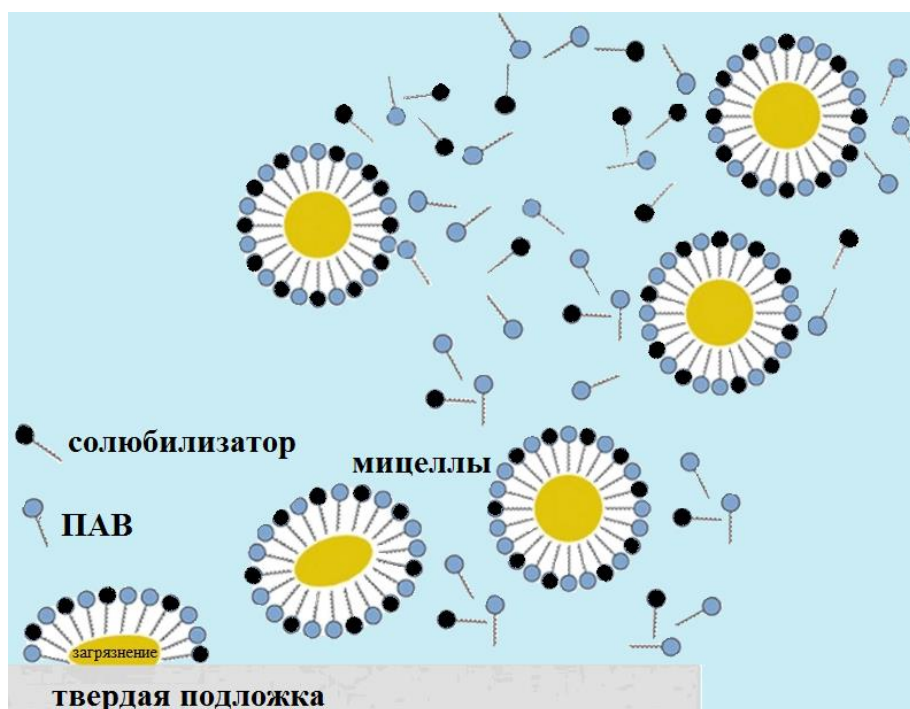


Рис. 26. Схематическое представление процесса солюбилизации

Процесс солюбилизации является медленным и равновесие может устанавливаться в течение нескольких суток. Перемешивание и повышение температуры интенсифицируют этот процесс. При интенсивном перемешивании лимитирующей будет третья стадия процесса, а степень солюбилизации будет определяться количеством вакантных мест в мицеллах и факторами, влияющими на структуру сольватных оболочек. Повышение температуры увеличивает растворимость веществ в воде, ускоряет диффузию и облегчает проникновение солюбилизата в мицеллы вследствие снижения плотности упаковки мицеллы из-за теплового движения [1, 7].

При стирке добавленные в воду ПАВ адсорбируются на жировых загрязнениях. Прилипшие к ткани загрязнения скатываются в шарики, которые затем легко отрываются от поверхности нити (Рис. 27).

Этот эффект можно объяснить неуклонным уменьшением краевого угла на трехфазной границе «масло — вода — твердое тело» с увеличением концентрации ПАВ. Такое изменение краевого угла должно быть обусловлено уменьшением либо $\sigma_{\text{вода-масло}}$ или $\sigma_{\text{тв-вода}}$, либо обоих вместе. Это означает, что ПАВ должен адсорбироваться на соответствующих поверхностях раздела. ПАВы адсорбируются на тканях, что приводит к уменьшению $\sigma_{\text{тв-вода}}$ [2, 6].

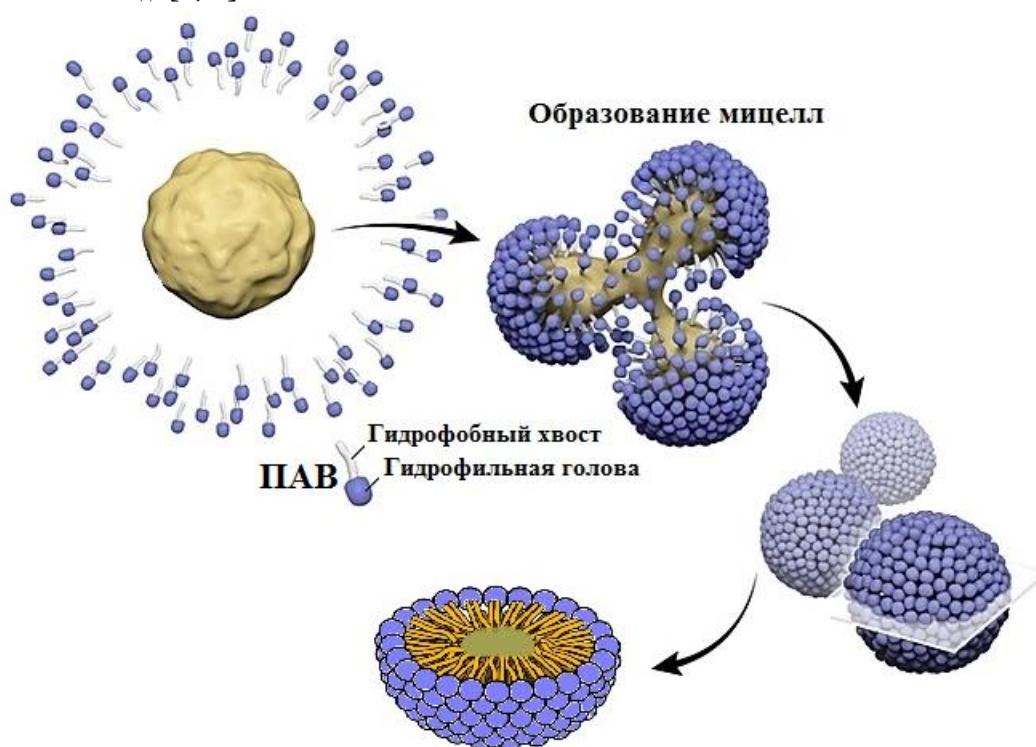


Рис. 27. Схема процесса адсорбции на поверхностях жировых загрязнений молекул ПАВ с образованием мицелл и их солюбилизация

Аналогично, молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности «масло — вода», в результате чего уменьшается $\sigma_{\text{вода-масло}}$. Таким образом, если ткань загрязнена жидкостью, то изменение межфазного натяжения под действием ПАВ приводит к значительному уменьшению адгезии между грязью и тканью. При обработке ПАВ жиры могут удаляться не только вследствие образования капелек, легко отрывающихся от поверхности, но и в

результате самопроизвольного эмульгирования. В этом случае жир переходит в раствор и перестает существовать в виде отдельной фазы [2, 5, 10].

Эффективность ПАВ определяется не только способностью отрывать жиры от поверхности, но и способностью удерживать жиры после этого в растворе в суспендированном состоянии и, таким образом, предотвращать их повторное осаждение. Не будь этого, при мойке грязь не удалялась бы, а перераспределялась. Поэтому ПАВ должны обладать суспендирующей способностью. Так, суспензия сажи, быстро осаждающаяся в обычных условиях, в присутствии ПАВ становится абсолютно устойчивой. Очевидно, что ПАВ адсорбируется на поверхности раздела «твердая частица — раствор». По-видимому, суспендирующее действие ПАВ обусловлено дефлокуляцией (распадом агрегатов с образованием коллоидно-устойчивых суспензий или эмульсий) агрегированных частиц и отчасти изменением их поверхностного заряда. Если не учитывать отталкивания одноименно заряженных поверхностей, наличие адсорбированных длинноцепочечных молекул предотвращает коалесценцию частиц, подобно тому, как граничная смазка устраняет непосредственный контакт трущихся поверхностей. **Коалесценция** (от лат. *coalesco* — срастаюсь, соединяюсь) — это самопроизвольный процесс слияния частиц (капель или пузырей) внутри подвижной среды (жидкости, газа) или на поверхности тела, обусловленный действием сил межмолекулярного притяжения и сопровождающийся укрупнением частиц⁷.

В моющие средства добавляют карбоксиметилцеллюлозу, способствующую суспендированию жиров. Действие этого агента также связано с адсорбцией на поверхности частиц, однако более прочной, чем в случае ПАВ, поскольку полимерное вещество образует толстые трудно отрывающиеся от поверхности адсорбированные пленки. Для эффективного удаления с тканей твердых частиц хороший детергент должен обладать также защитным действием, выражающимся в предотвращении прилипания частиц к отмываемой поверхности.

Мицелла способна «захватывать» частички трудно растворимых в воде веществ и создавать стойкие эмульсии, поскольку слипанию мицелл препятствует одноименный заряд их поверхностей. ПАВ эмульгируют загрязнения, после чего эмульсия легко смывается водой [5, 8]. **Эмульгирование** (от лат. *emulgeo* — выдаивать) — это процесс получения устойчивых высокодисперсных эмульсий. **Эмульсия** — это дисперсная система, состоящая из микроскопических капель жидкости (дисперсная фаза), распределенных в другой жидкости (дисперсионная среда). Благодаря образованию эмульсий частицы загрязнений остаются в растворе и не осаждаются на ткань. Для увеличения устойчивости эмульсий используют ПАВ, понижающие межфазное поверхностное натяжение между частицами загрязнений и воды.

Моющее действие различных ПАВ также связано с **пенообразованием** [7, 9]. В присутствии ПАВ в моющей жидкости образуется пена, содействующая механическому

⁷ См.: Ребиндер П. А., Фигуровский Н. А. Коллоидная химия, в кн.: Развитие физической химии в СССР / Под ред. Я. И. Герасимова. М. 1967. 239 с.; Песков Н. П. Физико-химические основы коллоидной науки / Проф. Н. П. Песков. 2-е изд., испр. и доп. М., Л.: Гос. хим.-техн. изд-во. 1934. 456 с.; Думанский А. В. Учение о коллоидах. 3-е изд. М., Л. Издательство: ГНТИХЛ. 1948. 418 с.; Пасынский А. Г. Коллоидная химия. 3-е изд. М. 1968. 232 с.

уносу загрязнений, частицы которых вследствие пониженной способности к смачиванию прилипают к пузырькам воздуха.

Важными параметрами, на которые опираются при оценке эффективности данных средств, являются количественные характеристики пенообразования — максимальный объем пены, ее устойчивость и т. д. (Рис. 28).

Устойчивое и обильное пенообразование препятствует оседанию загрязнений на очищаемые поверхности.

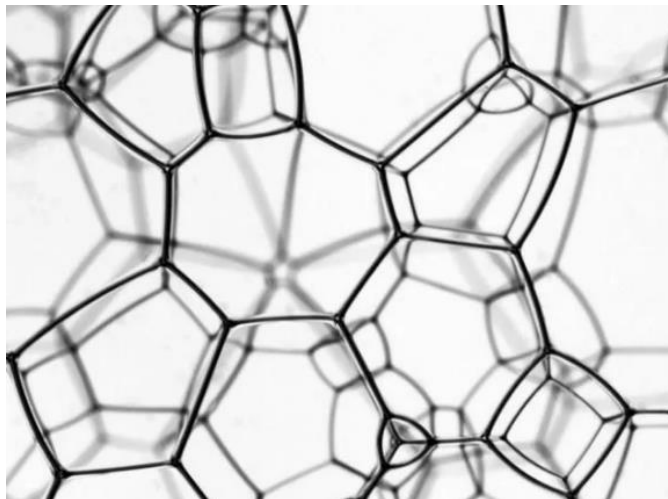


Рис. 28. Схематическое представление структуры пены

Устойчивая пена образуется в присутствии стабилизатора — пенообразователя, от природы и концентрации которого зависит время существования пены. Воздушно-механическая пена образуется при механическом смешении воздуха, воды и пенообразователя. В ней содержится около 90 % (по объему) воздуха и 10 % водного раствора пенообразователя. В качестве пенообразователей применяют ПАВ с достаточно длинными углеводородными радикалами. Пенообразователь с длинной молекулярной цепью адсорбируется на границе «раствор — воздух» и образует высоковязкую структурированную пленку, препятствующую стеканию жидкости [7, 9]. При этом толщина слоя жидкости между пузырьками газа уменьшается медленно, и пена существует длительное время (Рис. 29).

Прочность и время существования пен зависит от механических (упругих) свойств каркаса пленки, которые определяются природой и количеством присутствующего в системе пенообразователя, который адсорбируется с обеих сторон пленки жидкости. Со временем пленки между пузырьками газа вследствие стекания жидкости утончаются, пузырьки лопаются и пены разрушаются.

Синтетические моющие средства (СМС) — это высокоэффективные многофункциональные моющие препараты, содержащие в своем составе от 10 до 40 % поверхностно-активных веществ, а также различные добавки, повышающие моющую способность средства.

Моющие средства представляют собой композиции, основной частью которых являются моющие вещества [1, 3, 8].

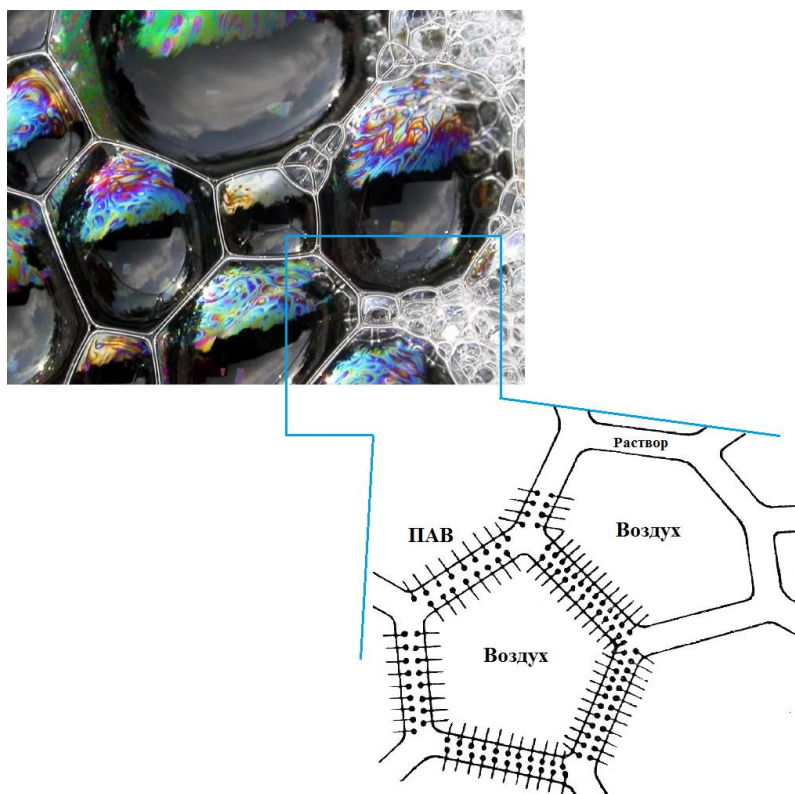


Рис. 29. Схема строения пены. Гидрофильная часть молекул ПАВ распространяется в водную фазу (раствор), неполярная часть молекулы ПАВ ориентируется в газовую фазу (воздух)

Современные порошкообразные СМС представляют собой многокомпонентные системы. Каждая составляющая системы обладает своим механизмом действия. СМС содержат в своем составе поверхностно-активные вещества (ПАВ), комплексоны для устранения жесткости воды (ЭДТА, триполифосфат натрия и др.), электролиты (Na_2SO_4), ферментные препараты, регуляторы кислотности, грануляторы (Na_2SiO_3), оптические и химические отбеливатели, стабилизаторы пены (алкилолаамиды) и др. Для устранения повторного осаждения загрязнений (ресорбции) в состав синтетических моющих средств вводят карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ). Влияние пирофосфата натрия $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ объясняется связыванием катионов, обуславливающих жесткость воды. Щелочные электролиты (Na_2CO_3 , фосфаты) повышают адсорбционную способность ПАВ и снижают поверхностное натяжение растворов, снижают критическую концентрацию мицеллообразования и усиливают структурно-механические свойства адсорбционных слоев и пленок в пенах (способствуют получению более прочных адсорбционных пленок моющего вещества вокруг частиц загрязнения).

В состав моющих средств или детергентов в зависимости от необходимых потребительских свойств могут входить: абразивы для механического удаления загрязнения и/или полировки очищаемой поверхности; кислоты для очистки от ржавчины или щёлочи для разрушения органических соединений; ингибиторы коррозии, противодействующие ржавлению отмываемой поверхности, а также рабочих поверхностей моечных и стиральных машин; для посудомоечных машин компоненты, противодействующие вспениванию; компоненты, увеличивающие или уменьшающие вязкость моющего раствора; хлорные и/или

кислородные окислители для отбеливания, дезинфекции и разрушения органических соединений; компоненты, влияющие на эстетические свойства отмываемых материалов («синька», оптические отбеливатели, смягчители ткани); парфюмерные отдушки; косметические компоненты, уменьшающие вред для кожи человека; консерванты, предотвращающие порчу компонентов моющих средств. Это далеко не исчерпывающий список компонентов современных моющих средств [1, 3, 8, 9].

В настоящее время постоянно ищут способы повышения качества СМС путем регулирования их моющей способности, что открывает новые возможности оптимизации состава моющих средств.

Литература

1. Волков В. А. Поверхностно-активные вещества в моющих средствах и усилителях химической очистки. М.: Легпромбытиздат. 1985. 200 с.
2. Джейкок М., Парфит Дж. Химия поверхностей раздела фаз. М.: Мир. 1984. 269 с.
3. Ланге К. Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение. Под науч. ред. Л. П. Зайченко. Справочник. СПб.: Издательство «Профессия». 2007. 240 с.
4. Охрименко И. С., Верхованцев В. В. Химия и технология пленкообразующих веществ: Учебное пособие для вузов. Л.: Химия. 1978. 392 с.
5. Русанов А. И., Щёкин А. К. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. 2-е изд., доп. СПб.: Издательство «Лань». 2016. 612 с.
6. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия. 1976. 232 с.
7. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. Л.: Химия. 1984. 386 с.
8. Холмберг К., Йёнссон Б., Кронберг Б., Линдман Б. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. Пер. с англ. 3-е изд. М.: Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний». 2007. 528 с.
9. Щукин Е. Д. Коллоидная химия. Учеб. для университетов и химико-технолог. вузов / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. М.: Высш. шк. 2004. 445 с.
10. Quere D. Wetting and Roughness. *Annual Review of Materials Research*. 2008. V. 38. № 1. P. 71–99. doi:10.1146/annurev.matsci.38.060407.132434.
11. Thomas Young. An Essay on the Cohesion of Fluids. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 1805. V. 95. P. 65–87. doi: 10.1098/rstl.1805.0005.

MECHANISM OF DETERGENT EFFECT IN CHEMISTRY OF SURFACE PHENOMENA

D.V. Belov¹, S.N. Belyaev²

1 — Joint stock company Central research institute BUREVESTNIK, Sormovskoye shosse, 1a, Nizhny Novgorod, 603950, Russia.

2 — *Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS). 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia.*

The detergent effect of surfactants is a combination of variety of phenomena and consists of a number of parallel and sequential processes. Detailed determination of the mechanism of the detergent effect is a complex challenge that possesses the most important scientific, theoretical and practical significance. The theory of detergent effect sheds light on a number of processes and phenomena that are widespread in nature and human activities.

Keywords: detergent effect, surface-active substances (surfactants), surface tension, micelle, wetting, adsorption, emulsionizing, detergent agent, detergents.