Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ

Лабораторный практикум

Рекомендовано
учебно-методическим объединением
по химико-технологическому образованию
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования
по химико-технологическим специальностям

Минск 2022

УДК 544.77(076.5)
ББК 24я73
К51

А в т о р ы :
А. И. Клындюк, *С. В. Шевченко*,
А. В. Тарасевич, *Е. А. Чижова*

Р е ц е н з е н т ы :
кафедра химии Белорусского государственного педагогического университета (заведующий кафедрой кандидат химических наук, доцент *А. Л. Козлова-Козыревская*, старший преподаватель *Е. Н. Мицкевич*);
доцент кафедры естественнонаучных дисциплин Белорусского аграрного технического университета кандидат химических наук, доцент *С. В. Слонская*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Клындюк, А. И.

К51 **Поверхностные явления и дисперсные системы. Лабораторный практикум** : учеб.-метод. пособие для студентов химико-технологических специальностей / А. И. Клындюк [и др.]. – Минск : БГТУ, 2022. – 77 с.

ISBN 978-985-897-007-9.

Учебно-методическое пособие содержит описание десяти многовариантных лабораторных работ, посвященных исследованию различных поверхностных явлений и дисперсных систем при помощи лабораторного модуля «Коллоидная химия» учебно-лабораторного комплекса «Физическая и коллоидная химия» (ООО «НПО Унитех»), а также включает в себя краткий теоретический материал и описание методик выполнения лабораторных работ.

УДК 544.77(076.5)
ББК 24я73

ISBN 978-985-897-007-9

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2022
© Клындюк А. И., Шевченко С. В., Тарасевич А. В., Чижова Е. А., 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Поверхностные явления и дисперсные системы» имеет большое значение для инженеров-химиков-технологов, поскольку эффективное управление разнообразными технологическими процессами, а также успешное решение вопросов по защите окружающей среды невозможно без знаний свойств дисперсных систем, методов их получения, стабилизации и разрушения, а также условий и закономерностей протекания различных поверхностных явлений, происходящих как на межфазной поверхности внутри дисперсных систем, так и на протяженных поверхностях раздела фаз.

Выполнение предлагаемого лабораторного практикума позволит студентам приобрести навыки получения лиофильных и лиофобных дисперсных систем, освоить некоторые методы стабилизации и разрушения этих систем, а также научиться изучать при помощи разнообразных методов исследования (фотоколориметрия, турбидиметрия, кондуктометрия и др.) различные физико-химические и коллоидно-химические свойства дисперсных систем, определять их количественные характеристики, а также исследовать поверхностные явления, протекающие на различных межфазных границах. В ходе выполнения практикума студенты приобретут навыки экспериментальных исследований: научатся работать с лабораторными установками и оборудованием, обрабатывать результаты эксперимента, в том числе с построением графических зависимостей, а также делать на основании полученных данных аргументированные и обоснованные выводы.

В лабораторном практикуме описано десять многовариантных лабораторных работ. Восемь из них выполняются при помощи лабораторного модуля «Коллоидная химия» учебно-лабораторного комплекса «Физическая и коллоидная химия» (ООО «НПО Унитех») по следующим разделам дисциплины: поверхностные явления на межфазных границах «жидкость – газ» и «твердое тело – жидкость», методы получения, стабилизации и разрушения лиофильных и лиофобных дисперсных систем. Предложенные разработчиками комплекса методики выполнения лабораторных работ и сами лабораторные работы [1] существенно модифицированы авторами практикума с учетом многолетнего опыта преподавания дисциплины «Поверхностные

явления и дисперсные системы» на кафедре физической, коллоидной и аналитической химии БГТУ. Две разработанные авторами на основании рекомендаций [2] многовариантные лабораторные работы посвящены получению лиофобных дисперсных систем (гидрозолей) методами химической конденсации и пептизации, а также исследованию этих дисперсных систем.

Лабораторный практикум содержит минимальный теоретический материал, необходимый для осмысленного выполнения лабораторных работ и анализа результатов, полученных в ходе их выполнения, детальное описание методики эксперимента, включающее работу непосредственно с лабораторным модулем «Коллоидная химия», а также контрольные вопросы по каждой из лабораторных работ, способствующие лучшему усвоению материала. Лабораторный практикум соответствует образовательным стандартам и учебным программам учреждения высшего образования по дисциплине «Поверхностные явления и дисперсные системы».

Предложения и замечания по содержанию данного пособия будут с благодарностью приняты авторами и учтены в дальнейшем при усовершенствовании как собственно входящих в практикум лабораторных работ, так и их описания.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

В – вода (полярная жидкость)
ВМС – высокомолекулярное соединение
ГЛБ – гидрофильно-липофильный баланс
ДС – дисперсная система
ДСр – дисперсионная среда
ДФ – дисперсная фаза
ДЭС – двойной электрический слой
ИЭТ – изоэлектрическая точка
ОВР – окислительно-восстановительная реакция
ККМ – критическая концентрация мицеллообразования
М – масло (неполярная жидкость)
ПАВ – поверхностно-активное вещество
ПИ – противоионы
ПОИ – потенциалопределяющие ионы
СЕГ – структурная единица гидрозоля

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Оформление отчета

Отчет оформляется в тетради для лабораторных работ и состоит из следующих частей. В начале отчета указывается название лабораторной работы и дата ее выполнения.

Цель работы должна отражать тему работы, а также конкретное задание, поставленное преподавателем перед студентом (при необходимости – с указанием варианта и выполняемых разделов работы).

В разделе «Приборы, оборудование, реактивы» следует указать только то, что в соответствии с вариантом и заданием было использовано при выполнении работы.

Раздел «Краткие теоретические сведения» должен содержать минимальный теоретический материал по лабораторной работе: основные понятия, определения, формулы, а также размерности используемых в отчете величин.

В разделе «Экспериментальная установка и методика эксперимента» приводится схема установки с кратким описанием ее работы, методика эксперимента, процесс получения данных и способы их обработки.

Раздел «Экспериментальные результаты» должен включать как непосредственно данные, полученные при помощи экспериментальной установки, так и значения величин, найденные при их последующей обработке. Значения сводят в таблицы и иллюстрируют графическими зависимостями, причем графики должны быть построены на миллиметровой бумаге простым карандашом. Следует привести подробные примеры расчета всех величин, а также оценить погрешность полученных результатов. Если этого требует задание, отчет иллюстрируют рисунками, которые для наглядности могут быть выполнены в цвете.

Раздел «Анализ результатов работы» включает подробный анализ результатов, их интерпретацию на основании известных и относящихся к лабораторной работе физико-химических законов и закономерностей. Если обнаружено несоответствие полученных

результатов и теоретических расчетов или литературных данных, то необходимо обсудить возможные причины этих несоответствий.

Выводы содержат краткое описание результатов работы с указанием конкретных значений, полученных в работе, а также, по возможности, краткие комментарии.

Приближенные величины и действия с ними

Любые данные, полученные путем измерений, всегда являются приближенными и имеют определенные погрешности, которые должны быть видны из записи величин. Если погрешности не указаны явно, значит неточной является последняя значащая цифра.

Например, запись «25,2 ± 0,1°C» либо «25,2°C» значит, что погрешность последней значащей цифры составляет ±0,1. Не следует чрезмерно округлять величины (в частности, отбрасывая последние нули), а также указывать избыточное число значащих цифр. Если измерять температуру, причем с погрешностью ±0,1°C, то правильно записать обозначение «20,0°C», а не «20°C» (где погрешность ±1°C, т. е. завышена) или «20,00°C» (где погрешность ±0,01°C, т. е. занижена).

При выполнении арифметических действий (сложение, вычитание, умножение, деление) с приближенными величинами конечный результат не должен иметь больше знаков после запятой, чем у члена с наименьшим числом знаков.

При возведении в степень или извлечении корня в результате следует оставить столько значащих цифр, сколько их содержалось в исходном числе.

Ошибки измерений

Систематические ошибки одинаковы по знаку и обусловлены постоянно действующими факторами, которые можно исключить или учесть (смещение нуля прибора, неверная настройка).

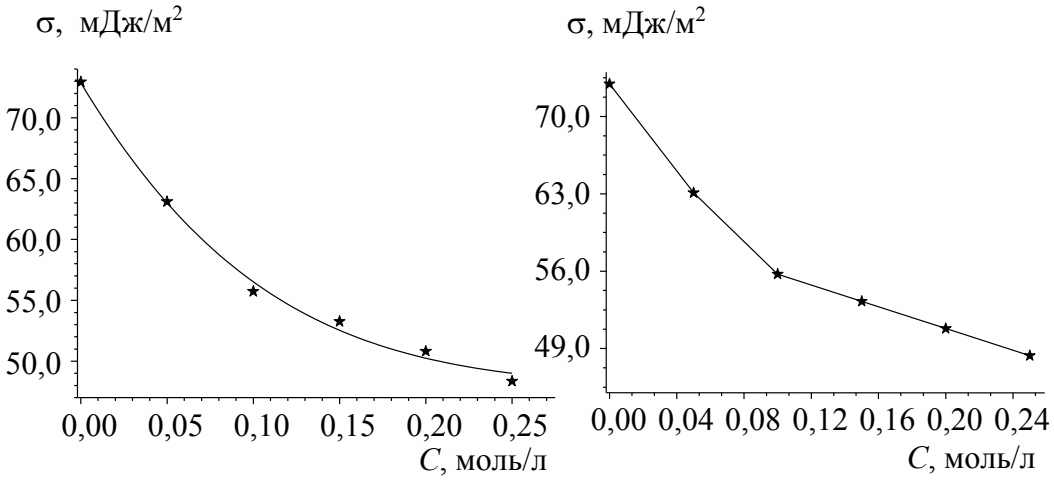
Случайные ошибки – непредсказуемые по знаку и величине отклонения результатов измерений от среднего значения. Они подчиняются закону нормального распределения, согласно которому, вероятность крупных ошибок меньше, чем мелких.

Промахи представляют собой грубые ошибки, вызванные нарушением условий эксперимента или небрежностью в работе. Результаты с грубыми ошибками отбрасывают, если на то есть основание.

Систематические ошибки можно исключить, используя для контроля стандартные или эталонные образцы. Случайные ошибки исключить нельзя, но можно минимизировать, увеличивая количество измерений.

Графическое отображение экспериментальных данных

Графическая форма является наиболее выразительной, информативной и удобной формой представления экспериментальных данных. Построение графика начинают с выбора его размеров и масштаба координатных осей. В целях сокращения неиспользуемой площади оси не следует начинать с нуля, если это не является необходимым (например, известно, что функция или аргумент начинаются от нуля либо необходимо найти значение функции путем экстраполяции графика к нулевому значению аргумента). Масштаб выбирают удобный для работы. Например, 1 см по оси отвечает 0,2, 0,5, 1,0, 5,0 или 10,0 единицы, но не 0,12, 0,17, 0,3, 0,53 либо 2,33 (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Изотерма поверхностного натяжения
водного раствора изопропанола при температуре 298 К:
а – правильный вид; *б* – неправильный вид

Оси необходимо обозначать с указанием размерностей откладываемых на них величин. Если величины многоразрядные, то для удобства их записывают на оси следующим образом. Например, по оси абсцисс откладывают значение концентрации раствора, которая

изменяется в пределах от 0 до 0,000010 моль/л. Тогда ось подписывают как «$10^6 \cdot C$, моль/л», а по оси подписывают значения «0, 2, 4, 6, 8, 10». При нанесении на один график нескольких зависимостей во избежание путаницы точки на различных зависимостях обозначают различными символами.

По экспериментальным точкам строят линию – функциональную зависимость. Поскольку случайные ошибки неизбежны, точки могут располагаться на графике с некоторым разбросом около линии, которую проводят так, чтобы она проходила как можно ближе к точкам, а точки располагались равномерно по обе стороны от нее. Прямые обычно строят при помощи линейки, кривые – с помощью лекал. Подпись к рисунку должна содержать номер рисунка, название зависимости и расшифровку условных обозначений графика.

Лабораторная работа № 1
ПОЛУЧЕНИЕ ЭМУЛЬСИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Теоретическая часть

Эмульсии представляют собой дисперсные системы типа Ж/Ж. Формально радиус капель (частиц) дисперсной фазы может быть любым, однако эмульсии с размером частиц менее 100 нм (ультрамикрогетерогенные системы) обычно относят к золям, а собственно эмульсиями считают системы типа Ж/Ж с размером частиц дисперсной фазы (капель) более 100 нм.

По природе веществ дисперсной фазы и дисперсионной среды различают прямые и обратные эмульсии. В прямых неполярная жидкость (масло – М) диспергирована в полярной (вода – В), их обозначают М/В. В обратных полярная жидкость диспергирована в неполярной, их обозначают – В/М.

По концентрации вещества дисперсной фазы эмульсии делят:

– на разбавленные ($\varphi_{дФ} < 0{,}1$ об. %);

– концентрированные (0,1 об. % $< \varphi_{дФ} <$ 74 об. %);

– высококонцентрированные ($\varphi_{дФ} >$ 74 об. %).

Разбавленные эмульсии являются свободнодисперсными системами, а высококонцентрированные (желатинированные) – связнодисперсными. Если концентрированные эмульсии по концентрации близки к высококонцентрированным, то они будут связнодисперсными, если к разбавленным, то свободнодисперсными.

Тип эмульсии (прямая или обратная) на практике определяют различными способами: по разбавляемости, смачиваемости, окрашиваемости, впитываемости, а также по электропроводности. Прямые эмульсии (М/В) разбавляются водой, обратные – маслом. Прямые эмульсии смачивают полярные поверхности и не смачивают (плохо смачивают) неполярные, обратные – наоборот. Жирорастворимые (гидрофобные) красители в прямых эмульсиях окрашивают капли дисперсной фазы, а в обратных – сплошную дисперсионную среду, тогда как водорастворимые (гидрофильные) дисперсную фазу окрашивают в обратных эмульсиях (В/М), а в прямых – сплошную дисперсионную среду. Электропроводность прямых эмульсий, как правило,

значительно выше, чем обратных. Фильтровальной бумагой прямые эмульсии впитываются гораздо лучше, чем обратные.

Основными характеристиками, определяющими свойства эмульсии, помимо ее типа и концентрации дисперсной фазы, являются дисперсность эмульсии и ее устойчивость во времени.

Дисперсность эмульсии определяется размером образующих дисперсную фазу капель: для полидисперной эмульсии можно говорить о среднем радиусе капель (более точно характеризуют полидисперную эмульсию, приводя кривую распределения частиц дисперсной фазы по размерам).

Устойчивость эмульсий во времени характеризуют по скорости (времени) ее расслоения, а также времени жизни отдельных капель. Скорость расслоения определяют, измеряя высоту отслоившейся в пробирке фазы через определенный промежуток времени после получения эмульсии (или помещения ее в пробирку). Время жизни отдельных капель фиксируют, наблюдая в микроскоп за каплей, помещенной на межфазную (ДФ/ДСр) границу, подводя ее к границе со стороны дисперсионной среды и фиксируя промежуток времени, через который она сольется с другой каплей дисперсной фазы.

Получают эмульсии конденсационными (конденсация из паров, замена растворителя) и диспергационными методами (механическое встряхивание – прерывистое встряхивание, использование блендеров и гомогенизаторов, эмульгирование ультразвуком или электрическими методами).

В методе замены растворителя вещество дисперсной фазы будущей эмульсии вначале растворяют в «хорошем» растворителе с образованием истинного раствора. Если затем к полученному раствору добавить «плохой» растворитель (в котором вещество дисперсной фазы плохо растворяется), то растворенное вещество, объединившись в капли, образует дисперсную фазу эмульсии, а «плохой» растворитель – ее дисперсионную среду.

Метод прерывистого встряхивания позволяет получить эмульсии с размером капель порядка 50–100 мкм.

Обратные эмульсии являются лиофобными дисперсными системами, которые термодинамически неустойчивы и способны существовать до разрушения очень ограниченное время. Для придания таким эмульсиям устойчивости к ним на стадии приготовления добавляют специальное вещество – *эмульгатор* (*стабилизатор*). В качестве таких веществ при получении (стабилизации) эмульсий могут

выступать неорганические электролиты и коллоидные поверхностно-активные вещества (ПАВ), высокомолекулярные соединения (ВМС), а также порошки.

Электролиты стабилизируют эмульсии за счет электростатического фактора устойчивости, при адсорбции их ионов на межфазной границе (ДФ/ДСр) формируется двойной электрический слой (ДЭС). Действие коллоидных ПАВ основано на адсорбционно-сольватном факторе устойчивости – при адсорбции ПАВ на межфазной поверхности снижается ее поверхностное натяжение, что повышает устойчивость системы и уменьшает ее склонность к коагуляции (коалесценции). Стабилизирующее действие ПАВ определяется *правилом Банкрофта*: при эмульгировании системы дисперсионной средой становится та из жидкостей, в которой лучше растворимы молекулы ПАВ (эмульгатора). Ориентация молекул ПАВ на межфазной границе следует правилу уравнивания полярностей Ребиндера – полярные группы обращены к воде (полярная фаза), неполярные – к маслу (неполярная фаза). Добавляемые к эмульсии ВМС стабилизируют их за счет структурно-механического фактора устойчивости, при этом макромолекулы полимера окружают частицы дисперсной фазы эмульсии плотными слоями, как бы «капсулируя» их.

Замена эмульгатора может привести к обращению эмульсии. Так, при добавлении к прямой эмульсии (М/В), стабилизированной натриевым мылом, хлорида кальция происходит переход эмульгатора в кальциевую форму, которая лучше растворима в масле, и прямая эмульсия превращается в обратную (В/М).

Разрушение эмульсий достигается двумя путями – седиментацией и коалесценцией. Разделение фаз эмульсии при коалесценции видно невооруженным глазом. В промышленных масштабах эмульсии разрушают осаждением под действием силы тяжести (отстаивание) и центробежных сил, химическими (добавление деэмульгаторов), термическими (нагрев или замораживание) и электрическими методами.

Порядок выполнения работы

Цель работы: получение эмульсий различными способами, определение их типа, изучение их устойчивости.

Приборы, оборудование, реактивы: USB-микроскоп, штатив для пробирок, пробирки (10 шт.), стеклянная палочка, парафинированная

стеклянная пластинка, предметные стекла, фарфоровая ступка с пестиком, промывалка с дистиллированной водой, неполярная жидкость (толуол, масло, бензол), водный раствор стабилизатора (лаурилсульфат натрия (C = 0,02 моль/л)), раствор масла в ацетоне (ω = 1 мас. %), водный раствор NaOH (ω = 10 мас. %), раствор красителя «Судан-IV» в толуоле, водный раствор пирокатехинового фиолетового, водный раствор стеарата натрия (ω = 2 мас. %), водный раствор $CaCl_2$ (ω = 2 мас. %), желатоза, мерный цилиндр на 25 мл, мерные пипетки на 5 мл (2 шт.), весы аналитические, мерная груша.

Ход работы

Опыт № 1
Получение эмульсии методом диспергирования

А. В 2 чистые пробирки налить по 10 мл дистиллированной воды и добавить по 10 капель неполярной жидкости. В одну из пробирок добавить 1 мл раствора NaOH с концентрацией 10 мас. %. Содержимое пробирок периодически встряхивать (энергично) в течение минуты, после чего пробирки установить в штатив и наблюдать за расслоением эмульсий (эмульсия с добавкой щелочи должна быть более устойчивой).

Б. При помощи аналитических весов взвесить 0,1 г желатозы и в течение минуты растирать его в фарфоровой ступке с 2 мл масла. Далее добавить в ступку 2 мл дистиллированной воды и продолжить растирать смесь в течение минуты. Полученную таким образом эмульсию перелить в пробирку и провести оценку ее устойчивости к расслоению.

В. В чистую пробирку налить 6 мл толуола и добавить 4 мл водного раствора стабилизатора. Содержимое пробирки встряхивать в течение шести серий по три толчка в каждой, выдерживая между сериями промежуток времени приблизительно 10 с. После встряхивания поставить пробирку с полученной эмульсией в штатив и определить промежуток времени, через который эмульсия начнет расслаиваться.

Опыт № 2
Получение эмульсии методом замены растворителя

В чистую пробирку налить 10 мл дистиллированной воды и при энергичном взбалтывании по каплям добавить 2–3 мл раствора масла в ацетоне с концентрацией 1 мас. %. Должна образоваться устойчивая тонкодисперсная система.

Опыт № 3
Определение типа эмульсии методом окрашивания

Эмульсию из опыта № 2 разделить на три приблизительно одинаковые части. К одной части добавить несколько капель гидрофильного красителя пирокатехинового фиолетового и энергично встряхивать пробирку в течение одной минуты. К другой части эмульсии добавить несколько капель гидрофобного красителя «Судан-IV» и также встряхивать в течение одной минуты. Третья часть остается для выполнения опытов № 4–6 и 8.

При помощи стеклянной палочки нанести по капле каждой из окрашенных эмульсий на предметное стекло и рассмотреть их под микроскопом. Схематически зарисовать капли эмульсий, окрашенные различными красителями, сделать вывод об их типе.

Опыт № 4
Определение типа эмульсии методом слияния с каплей воды (по разбавляемости)

Каплю эмульсии, полученной в опыте № 2, при помощи стеклянной палочки осторожно нанести на предметное стекло. Затем рядом с ней нанести на предметное стекло каплю воды. Осторожно наклоняя стекло, привести капли в соприкосновение. По наличию или отсутствию слияния капель сделать вывод о типе эмульсии.

Опыт № 5
Определение типа эмульсии методом впитывания фильтровальной бумагой

На небольшой листок фильтровальной бумаги нанести каплю эмульсии, полученной в опыте № 2. По характеру поведения капли (по ее впитываемости) сделать вывод о типе эмульсии. Зарисовать наблюдаемую картинку.

Опыт № 6
Определение типа эмульсии методом смачивания гидрофобной поверхности

На поверхность парафинированной стеклянной пластинки осторожно нанести стеклянной палочкой каплю эмульсии из опыта № 2

диаметром 2–3 мм. Рассмотреть каплю сбоку (под микроскопом), определив, смачивает капля пластинку или нет. Схематически зарисовать каплю, показать на рисунке угол смачивания. Сделать аргументированный вывод о типе эмульсии.

Опыт № 7
Обращение фаз эмульсии

В чистую сухую пробирку налить приблизительно 2 мл 2%-ного раствора стеарата натрия и 2 мл масла, добавив несколько капель раствора красителя «Судан-IV». Содержимое пробирки интенсивно встряхивать в течение минуты. Каплю полученной жидкости нанести при помощи стеклянной палочки на предметное стекло и рассмотреть под микроскопом. Схематически изобразить наблюдаемую картинку, сделать вывод о типе эмульсии.

К оставшейся в пробирке эмульсии добавить несколько капель раствора хлорида кальция с концентрацией 2 мас. % и снова интенсивно периодически встряхивать в течение одной минуты. Каплю полученной эмульсии также осторожно нанести на предметное стекло и рассмотреть под микроскопом. Схематически изобразить наблюдаемую картинку и определить тип полученной эмульсии.

Опыт № 8
Коалесценция

В тонкодисперсную эмульсию, полученную в опыте № 2, по каплям добавлять раствор хлорида кальция до тех пор, пока не произойдет расслоение. Нанести каплю расслаивающейся эмульсии на предметное стекло и рассмотреть ее под микроскопом, наблюдая коалесценцию капель эмульсии.

Контрольные вопросы

1. Что называют эмульсией? На какие типы и по каким признакам делят эмульсии?
2. Какими методами можно определить тип эмульсии? Пояснить, на чем основан каждый из методов.
3. Какие основные характеристики определяют свойства эмульсии?

4. Как на практике определяют (характеризуют) устойчивость эмульсий?

5. При помощи каких методов получают эмульсии? Охарактеризовать особенности этих методов.

6. Какие вещества (материалы) используют в качестве эмульгаторов для стабилизации эмульсий? За счет каких факторов устойчивости стабилизируют эмульсии в каждом из случаев?

7. Какое правило определяет действие коллоидных ПАВ как эмульгаторов? Как ориентируются молекулы ПАВ, выступающие в качестве эмульгаторов (стабилизаторов) на межфазной границе (ДФ/ДСр)?

8. В чем заключается явление обращения фаз эмульсий? Каким образом и вследствие чего оно происходит?

9. Какими методами осуществляют на практике разрушение эмульсий?

Лабораторная работа № 2
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА КОАГУЛЯЦИИ ГИДРОЗОЛЯ ГИДРОКСИДА ЖЕЛЕЗА

Теоретическая часть

Гидрозоль представляет собой ультрамикрогетерогенную лиофобную дисперсную систему, дисперсионной средой которой является вода. Устойчивость гидрозоля обеспечивается, как правило, за счет электростатического фактора устойчивости в результате адсорбции потенциалопределяющих ионов на поверхности частиц дисперсной фазы и формирования на их поверхности двойного электрического слоя (ДЭС). Строение частицы дисперсной фазы (структурной единицы гидрозоля (СЕГ)) описывается следующим образом (на примере гидрозоля $Fe(OH)_3$, стабилизированного $FeCl_3$):

$$\{[Fe(OH)_3]_m\ n Fe^{3+}\ (3n - x)Cl^-\}^{x+}\ x Cl^-,$$

где $[Fe(OH)_3]_m$ – компактный агрегат (КА); $n\ Fe^{3+}$ – потенциалопределяющие ионы (ПОИ) в количестве n; $[Fe(OH)_3]_m\ nFe^{3+}$ – ядро коллоидной частицы; $(3n - x)Cl^-$ – противоионы (ПИ) адсорбционного слоя в количестве $(3n - x)$, которые довольно прочно удерживаются заряженной поверхностью компактного агрегата; $x\ Cl^-$ – противоионы диффузного слоя в количестве x, они не закреплены прочно, свободно перемещаются и могут обмениваться на другие противоионы, находящиеся в дисперсионной среде; $\{[Fe(OH)_3]_m\ nFe^{3+}\ (3n - x)Cl^-\}^{x+}$ – коллоидная частица (КЧ), имеющая заряд (x^+).

Знак и величину заряда коллоидных частиц характеризуют при помощи ζ-потенциала (электрокинетического потенциала). В изоэлектрической точке (ИЭТ) величина ζ-потенциала равна нулю.

Потеря устойчивости гидрозолей приводит к агрегации их частиц – слипанию частиц в рыхлые агрегаты неправильной формы. Процесс образования агрегатов называют коагуляцией. Коагуляция гидрозолей протекает под действием различных факторов: повышения (кипячения) и понижения (вымораживания) температуры, облучения светом, встряхивания, а также (чаще всего) добавления электролитов. В последнем случае говорят о так называемой электролитной

коагуляции. Электролит, вызывающий коагуляцию гидрозоля, называют *электролитом-коагулятором*, а тот из его ионов, который вызывает коагуляцию – *ионом-коагулятором*. Количественно коагуляцию характеризуют при помощи *порога коагуляции* (γ), который на практике определяют как минимальное количество электролита-коагулятора, добавление которого к 1 л дисперсной системы (гидрозоля) за определенный промежуток времени вызывает видимый эффект коагуляции (помутнение, сопровождающееся выпадением осадка, изменение окраски). Выражают порог коагуляции в молях на литр золя (моль/л золя), чтобы отличать его от собственно концентрации электролита-коагулятора в дисперсной системе, при которой наблюдают коагуляцию и единицы измерения которой моль на литр (моль/л):

$$\gamma = \frac{n_{эл}}{V_{золя}}, \quad \frac{моль}{л\ \ золя}, \qquad (1)$$

где $n_{эл}$ – количество электролита-коагулятора, моль; $V_{золя}$ – объем золя, л.

Величина порога коагуляции зависит от времени и способа наблюдения (фиксации), температуры, концентрации дисперсной фазы, а также природы электролита-коагулятора. Электролитная коагуляция подчиняется следующим закономерностям.

1. Коагуляцию вызывает тот ион электролита-коагулятора (ион-коагулятор), заряд которого по знаку противоположен заряду коллоидной частицы (*первое правило Шульце – Гарди*).

2. Коагуляция гидрозоля наступает, когда его электрокинетический потенциал снижается до критического значения, которое для водной среды при температуре, близкой к комнатной, составляет приблизительно ±30 мВ.

3. Величина порога коагуляции гидрозоля уменьшается при увеличении заряда иона-коагулятора, причем пороги коагуляции гидрозолей под действием одно-, двух- и трехзарядных ионов-коагуляторов относятся как сотни, десятки и единицы (*второе правило Шульце – Гарди*).

4. Величина порога коагуляции гидрозоля под действием ионов-коагуляторов с одинаковой величиной заряда уменьшается при увеличении радиуса иона-коагулятора.

5. Коагулирующее действие органических ионов-коагуляторов выражено сильнее ввиду их большей поляризуемости и адсорбционной способности.

Коагулирующую способность электролитов (β) определяют как величину, обратную порогу коагуляции (γ):

$$\beta = \frac{1}{\gamma} = \frac{V_{\text{золя}}}{n_{\text{эл}}}, \quad \frac{\text{л золя}}{\text{моль}}. \qquad (2)$$

Она показывает, какой объем гидрозоля может коагулировать при добавлении к нему одного моля электролита-коагулятора.

К особым явлениям, наблюдающимся при коагуляции гидрозолей электролитами, относятся: явление неправильных рядов, антагонизм и синергизм ионов-коагуляторов при коагуляции, а также коллоидная защита.

Явление неправильных рядов наблюдается при добавлении к гидрозолю электролитов-коагуляторов, содержащих многозарядные ионы-коагуляторы. Оно заключается в том, что при добавлении к отдельным порциям (объемам) гидрозоля различных, все возрастающих количеств электролита-коагулятора золь сначала устойчив, затем с добавлением бóльших количеств электролита-коагулятора происходит коагуляция, при добавлении еще больших количеств электролита-коагулятора золь вновь становится устойчивым и, наконец, при дальнейшем увеличении количества электролита-коагулятора происходит коагуляция гидрозоля. Это так называемое явление чередования зон устойчивости и коагуляции.

При воздействии на гидрозоль смеси электролитов-коагуляторов может наблюдаться три эффекта: аддитивность, антагонизм и синергизм. Аддитивность обычно проявляют близкие по свойствам и одинаковые по заряду ионы-коагуляторы (K^+ и Na^+, Cl^- и Br^-). При антагонизме суммарный эффект коагулирующего действия электролитов меньше, чем при аддитивности. Может также наблюдаться ситуация, при которой в коагулирующей смеси содержание каждого электролита превышает величину, отвечающую его порогу коагуляции. Антагонизм объясняется изменением активности ионов при смешении электролитов, взаимодействием между ними с образованием комплексных ионов, а также адсорбционными эффектами. Так, например, антагонизм наблюдается при коагуляции золей AgI смесями $Al(NO_3)_3$ и K_2SO_4, $Th(NO_3)_3$ и Na_2SO_4. Усиление коагулирующего действия одних электролитов при добавлении других называется синергизмом.

Устойчивость гидрозолей при введении в них небольших количеств некоторых высокомолекулярных соединений (ВМС) может значительно возрастать. Это явление называется *коллоидной защитой*. Для гидрозолей такую защиту способны обеспечивать белки, пектины, а для золей с неводной (неполярной) дисперсионной средой – каучук. Коллоидная защита обусловлена возрастанием устойчивости гидрозолей

вследствие образования вокруг их частиц оболочек из ВМС, «капсулирующих» частицы и мешающих их слипанию. В данном случае говорят о структурно-механическом факторе устойчивости. Для характеристики защитного действия ВМС Зигмонди предложил так называемое «золотое число» – количество миллиграммов ВМС, которое необходимо добавить к 10 мл красного золя золота, чтобы предотвратить его посинение (коагуляцию) при введении в систему 1 мл 10%-ного раствора NaCl.

Порядок выполнения работы

Цель работы: определение порога коагуляции гидрозоля гидроксида железа под действием различных электролитов-коагуляторов, проверка выполнимости правила Шульце – Гарди.

Приборы, оборудование, реактивы: штатив для пробирок (2 шт.), пробирки (24 шт.), гидрозоль гидроксида железа (полученный гидролизом $FeCl_3$), растворы NaCl ($C = 2{,}5$ моль/л), Na_2SO_4 ($C = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ моль/л), $K_3[Fe(CN)_6]$ ($C = 5{,}0 \cdot 10^{-4}$ моль/л), пипетка на 5 мл, мерная пипетка на 5 мл (3 шт.).

Ход работы

1. В 12 пробирок поместить по 5 мл гидрозоля гидроксида железа. В других 12 пробирках приготовить растворы электролитов-коагуляторов с различной концентрацией (и содержащие различное количество электролита-коагулятора) в соответствии с данными табл. 1.

Таблица 1

№ опыта	V_{H_2O}, мл	$V_{эл}$, мл	Помутнение через 30 мин		
			NaCl	Na_2SO_4	$K_3[Fe(CN)_6]$
1	4,5	0,5			
2	4,0	1,0			
3	3,5	1,5			
4	3,0	2,0			

2. Смешать попарно содержимое пробирок с гидрозолем и растворами электролитов и оставить на 30 мин, после чего отметить, в каких пробирках содержимое помутнело (т. е. произошла явная коагуляция). Отметить минимальное количество электролита-коагулятора, необходимое для наступления коагуляции. Содержимое пробирок вылить в раковину, пробирки ополоснуть дистиллированной водой.

3. Для более точного определения порога коагуляции провести вторую серию опытов. В двенадцать пробирок поместить по 5 мл гидрозоля гидроксида железа, а в других 12 приготовить растворы электролитов-коагуляторов в соответствии с заданиями табл. 2. Количество воды рассчитывают как $V_{H_2O} = 5 \text{ мл} - V_{эл}$.

Таблица 2

Минимальный объем раствора электролита, добавление которого к гидрозолю вызвало его коагуляцию в первой серии опытов, мл	Объемы раствора электролита для более точного определения порога коагуляции гидрозоля во второй серии опытов, мл
0,5	0,1; 0,2; 0,3; 0,4
1,0	0,6; 0,7; 0,8; 0,9
1,5	1,1; 1,2; 1,3; 1,4
2,0	1,6; 1,7; 1,8; 1,9
Коагуляция не наблюдалась	2,1; 2,2; 2,3; 2,4

4. Смешать попарно содержимое пробирок с гидрозолем и растворами электролитов и оставить на 30 мин, после чего отметить, в каких пробирках содержимое помутнело (т. е. произошла явная коагуляция). Занести результаты в табл. 3, отметив минимальное количество электролита-коагулятора, необходимое для наступления коагуляции гидрозоля гидроксида железа.

Таблица 3

Электролит	$V_{эл}$, мл	V_{H_2O}, мл	Помутнение через 30 мин
NaCl			
Na_2SO_4			
$K_3[Fe(CN)_6]$			

5. Используя уравнения (3) и (4), рассчитать значения порогов коагуляции и коагулирующей способности электролитов-коагуляторов:

$$\gamma = \frac{C_{эл} \cdot V_{эл}}{V_{золя}}, \quad \frac{\text{моль}}{\text{л золя}}; \qquad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{\gamma}, \quad \frac{\text{л золя}}{\text{моль}}. \qquad (4)$$

Занести результаты в табл. 4.

Таблица 4

Электролит-коагулятор	Ион-коагулятор	Порог коагуляции, моль/л золя	Коагулирующая способность, л золя/моль
NaCl			
Na_2SO_4			
$K_3[Fe(CN)_6]$			

6. Записав уравнения реакций, протекающих при гидролизе $FeCl_3$, установить строение СЕГ гидрозоля гидроксида железа и определить, какие ионы электролитов-коагуляторов являются ионами-коагуляторами. Проверить выполнимость правила Шульце – Гарди.

Контрольные вопросы

1. Что такое гидрозоль? За счет какого фактора обычно обеспечивается устойчивость гидрозолей?

2. Какое строение имеет частица дисперсной фазы гидрозоля? Из каких элементов она состоит?

3. Что характеризует электрокинетический потенциал? В каких единицах измеряют его величину?

4. Что такое порог коагуляции? В каких единицах он измеряется? От чего зависит его величина?

5. Что такое коагулирующая способность?

6. Каким основным закономерностям подчиняется электролитная коагуляция?

7. Сформулировать правила Шульце – Гарди, пояснить, как они могут быть применены на практике.

8. В чем заключается явление неправильных рядов?

9. Что представляют собой антагонизм и синергизм коагулирующего действия электролитов-коагуляторов?

10. Что представляет собой явление коллоидной защиты?

11. Что такое «золотое число»? Что оно характеризует?

12. За счет какого фактора повышается устойчивость гидрозолей при добавлении к ним ВМС?

Лабораторная работа № 3
ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРОЗОЛЕЙ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОЙ КОНДЕНСАЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Теоретическая часть

Гидрозоли, представляющие собой лиофобные дисперсные системы, на практике обычно получают при помощи метода *химической конденсации*, в ходе которого частички новой фазы в системе образуются в результате протекания в ней химической реакции (*ионного обмена*, *гидролиза*, *окисления-восстановления* (ОВР)), приводящей к образованию труднорастворимого соединения:

$$NaCl + AgNO_3 \rightarrow AgCl\downarrow + NaNO_3 \text{ (реакция ионного обмена);}$$

$$FeCl_3 + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3\downarrow + 3HCl \text{ (реакция гидролиза);}$$

$$8KMnO_4 + 3Na_2S_2O_3 + H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow 8MnO_2\downarrow + 3K_2SO_4 + 2KOH + 3Na_2SO_4 \text{ (ОВР).}$$

Для того чтобы в ходе химической реакции образовался золь (высокодисперсная система), а не суспензия (или осадок), необходимо, чтобы скорость образования частиц новой фазы существенно превышала скорость их роста. Добиваются этого либо сливанием разбавленных растворов, либо добавлением по каплям концентрированного раствора к разбавленному.

Поскольку сами по себе гидрозоли агрегативно неустойчивы, их необходимо каким-либо образом стабилизировать. При использовании метода химической конденсации стабилизацию осуществляют за счет электростатического фактора устойчивости. Один из электролитов, участвующих в реакции, берут в некотором избытке по сравнению со стехиометрическим (по уравнению реакции) соотношением, при этом избыток электролита и будет стабилизировать частицы дисперсной фазы, формируя на их поверхности двойной электрический слой и выступая в качестве электролита-стабилизатора.

Если гидрозоль получают по реакции ионного обмена, то в избытке можно взять любой из электролитов, участвующих в реакции. В зависимости от природы электролита, который будет выступать

в роли электролита-стабилизатора, коллоидные частицы образующегося гидрозоля будут заряжаться положительно либо отрицательно. При получении гидрозолей реакцией гидролиза в избытке будет вода, являющаяся не только участником реакции, но и средой, в которой протекает реакция. Знак заряда коллоидных частиц гидрозоля в этом случае определяется природой гидролизующейся соли. Так, например, коллоидные частички гидрозоля, формирующегося при гидролизе $FeCl_3$ (образованного слабым основанием ($Fe(OH)_3$) и сильной кислотой (HCl)), будут заряжены положительно.

Знак заряда окрашенных частиц дисперсной фазы гидрозоля (коллоидных частиц) можно определить при помощи капиллярного (капельного) метода, который основан на том, что поверхность волокон фильтровальной бумаги (поверхность ее пор) в водной среде заряжается отрицательно.

Положительно заряженные коллоидные частицы за счет кулоновских сил притягиваются к поверхности волокон и закрепляются на ней, тогда как отрицательно заряженные коллоидные частицы относительно легко перемещаются в поровом пространстве фильтровальной бумаги вместе с дисперсионной средой.

При капиллярном анализе узкую полоску фильтровальной бумаги опускают на 2–3 мм в гидрозоль и следят за тем, как окрашивается пропитанная дисперсионной средой (водой) полоска бумаги. Если окрашивается вся пропитанная часть полоски, то коллоидные частицы заряжены отрицательно, если же окрашена только узкая часть полоски внизу, то частицы дисперсной фазы гидрозоля заряжены положительно.

При использовании капельного анализа каплю гидрозоля помещают в центр фильтровальной бумаги и следят за окрашиванием распространяющегося пятна на бумаге. Если окрашивается все пятно, то коллоидные частицы заряжены отрицательно, если окрашена только его внутренняя часть (а бóльшая внешняя не окрашена), то частицы заряжены положительно.

Еще один способ определения знака заряда коллоидных частиц основан на явлении гетерокоагуляции (взаимной коагуляции). При сливании гидрозолей с одинаково (положительно либо отрицательно) заряженными частичками образующаяся смесь, как правило, будет агрегативно устойчивой. Если сливать золи с противоположно заряженными коллоидными частицами, то будет интенсивно протекать их взаимная коагуляция (гетерокоагуляция).

На практике для определения знака заряда коллоидных частиц исследуемого гидрозоля к нему добавляют гидрозоль, знак заряда коллоидных частиц которого известен (например, они заряжены положительно). Если при сливании гидрозолей интенсивно протекает коагуляция, сопровождающаяся быстрым образованием осадка, значит, частички исследуемого гидрозоля имеют знак заряда, противоположный знаку заряда частиц добавляемого гидрозоля (в данном случае они будут заряжены отрицательно). Если коагуляция и образование осадка не наблюдаются, следовательно, коллоидные частички исследуемого и добавляемого гидрозолей заряжены одинаково (в данном случае – положительно).

Порядок выполнения работы

Цель работы: получение гидрозолей при помощи метода химической конденсации, оценка их устойчивости, определение знака заряда коллоидных частиц гидрозолей.

Приборы, оборудование, реактивы: мерные стаканы на 100 мл, 150 мл, 200 мл, штатив с лапкой, стеклянная палочка, дистиллированная вода, гидрозоль гидроксида железа (полученный гидролизом $FeCl_3$), мерные пипетки, резиновая груша, насыщенные растворы $FeCl_3$, $CuSO_4$, водные растворы $K_4[Fe(CN)_6]$ (ω = 20 мас. %), $Co(NO_3)_2$ (ω = 2 мас. %), $K_3[Fe(CN)_6]$ (ω = 20 мас. %), $KMnO_4$ (ω = 1,5 мас. %), $Na_2S_2O_3$ (ω = 1,0 мас. %), штатив для пробирок, пробирки (6 шт.), фильтровальная бумага, полоски фильтровальной бумаги.

Ход работы

Опыт № 1. Получение гидрозоля берлинской лазури

В мерный стакан на 150 мл налить 100 мл дистиллированной воды и добавить к ней 1,5 мл 20%-ного раствора $K_4[Fe(CN)_6]$, после чего тщательно перемешать жидкость стеклянной палочкой. К полученному раствору по каплям, тщательно перемешивая, добавить соответствующий варианту (табл. 5) объем насыщенного раствора $FeCl_3$.

Таблица 5

№ варианта	1	2	3	4	5	6
V_{FeCl_3}, мл	0,05	0,07	0,09	0,50	0,70	0,90

Заполнить пробирку полученным гидрозолем и следить за ним в течение 10 мин. По наличию/отсутствию коагуляции и седиментации сделать вывод об устойчивости гидрозоля.

Записать уравнение реакции образования осадка берлинской лазури и возможные формулы СЕГ.

Опыт № 2. Получение гидрозоля гексацианоферрата (II) меди (II)

В мерный стакан на 200 мл налить 150 мл дистиллированной воды и добавить к ней 1,5 мл 20%-ного раствора $K_4[Fe(CN)_6]$, после чего тщательно перемешать жидкость стеклянной палочкой. К полученному раствору по каплям, тщательно перемешивая, добавить соответствующий варианту (табл. 6) объем насыщенного раствора $CuSO_4$.

Таблица 6

№ варианта	1	2	3	4	5	6
V_{CuSO_4}, мл	0,05	0,07	0,09	0,50	0,70	0,90

Заполнить пробирку полученным гидрозолем и наблюдать за ним в течение 10 мин. По наличию/отсутствию коагуляции и седиментации сделать вывод об устойчивости гидрозоля.

Записать уравнение реакции образования осадка гексацианоферрата (II) меди (II) и возможные формулы СЕГ.

Опыт № 3. Получение гидрозоля гексацианоферрата (II) кобальта (II)

В мерный стакан на 150 мл налить 100 мл дистиллированной воды и добавить к ней 2 мл 20%-ного раствора $K_4[Fe(CN)_6]$, после чего тщательно перемешать жидкость стеклянной палочкой. К полученному раствору по каплям, тщательно перемешивая, добавить соответствующий варианту (см. табл. 7) объем 2%-ного раствора $Co(NO_3)_2$.

Таблица 7

№ варианта	1	2	3	4	5	6
$V_{Co(NO_3)_2}$, мл	0,30	0,40	0,50	3,00	4,00	5,00

Заполнить пробирку полученным гидрозолем и наблюдать за ним в течение 5 мин. По наличию/отсутствию коагуляции и седиментации сделать вывод об устойчивости гидрозоля.

Записать уравнение реакции образования осадка гексацианоферрата (II) кобальта (II) и возможные формулы СЕГ.

Опыт № 4. Получение гидрозоля турнбулевой сини

В мерный стакан на 200 мл налить 100 мл дистиллированной воды и добавить к ней 2 мл 20%-ного раствора $K_3[Fe(CN)_6]$, после чего тщательно перемешать жидкость стеклянной палочкой. К полученному раствору по каплям, тщательно перемешивая, добавить соответствующий варианту (табл. 8) объем насыщенного раствора $FeSO_4$.

Таблица 8

№ варианта	1	2	3	4	5	6
V_{FeSO_4}, мл	0,10	0,20	0,30	0,60	0,80	1,00

Заполнить пробирку полученным гидрозолем и наблюдать за ним в течение 15 мин. По наличию/отсутствию коагуляции и седиментации сделать вывод об устойчивости гидрозоля.

Записать уравнение реакции образования осадка турнбулевой сини и возможные формулы СЕГ.

Опыт № 5. Получение гидрозоля диоксида марганца

В мерный стакан на 100 мл налить 50 мл дистиллированной воды и добавить к ней 5 мл 1%-ного раствора $KMnO_4$, после чего тщательно перемешать жидкость стеклянной палочкой. К полученному раствору медленно по каплям, тщательно перемешивая его, добавить 1,5–2,0 мл 1%-ного раствора $Na_2S_2O_3$. Заполнить пробирку полученным гидрозолем и наблюдать за ним в течение 20 мин. По наличию/отсутствию коагуляции и седиментации сделать вывод об устойчивости гидрозоля.

Записать уравнение реакции образования осадка диоксида марганца и возможные формулы СЕГ.

Опыт № 6. Определение знака заряда коллоидных частиц гидрозоля при помощи капиллярного анализа

В гидрозоль, полученный в опыте № 1 (№ 2–5), опустить на 2–3 мм полоску фильтровальной бумаги, закрепленную в лапке на штативе,

и подождать 3 мин, пока жидкость будет за счет капиллярного впитывания подниматься по полоске. Зарисовать наблюдаемую картинку. По характеру окрашивания полоски фильтровальной бумаги сделать вывод о знаке заряда коллоидных частиц. Записать строение СЕГ, указать, какой из электролитов, использованных при получении гидрозоля в опыте № 1 (№ 2–5), выступает в роли электролита-стабилизатора (был взят в избытке).

Опыт № 7. Определение знака заряда коллоидных частиц гидрозоля при помощи капельного анализа

Каплю гидрозоля, полученного в опыте № 1 (№ 2–5), поместить в центре бумажного фильтра и подождать, пока она впитается. Зарисовать наблюдаемую картинку. По характеру окрашивания пятна сделать вывод о знаке заряда коллоидных частиц. Записать строение СЕГ, указать, какой из электролитов, использованных при получении гидрозоля в опыте № 1 (№ 2–5), выступает в роли электролита-стабилизатора (был взят в избытке).

Опыт № 8. Определение знака заряда коллоидных частиц гидрозоля при помощи взаимной коагуляции (гетерокоагуляции)

Смешать в пробирке 5 мл гидрозоля, полученного в опыте № 4 (№ 5), с 5 мл гидрозоля гидроксида железа, полученного гидролизом $FeCl_3$, и наблюдать за смесью в течение 10 мин.

По наличию/отсутствию взаимной коагуляции сделать вывод о знаке заряда коллоидных частиц исследуемого гидрозоля. Записать строение СЕГ исследуемого гидрозоля и гидрозоля гидроксида железа, указать, какие электролиты выступают в роли электролитов-стабилизаторов для этих гидрозолей.

Контрольные вопросы

1. Реакции каких типов могут быть использованы при получении гидрозолей методом химической конденсации?

2. Какие условия должны соблюдаться (выполняться), чтобы при использовании метода химической конденсации можно было получить именно гидрозоль, а не, например, суспензию или осадок?

3. На чем основана возможность определения знака заряда коллоидных частиц при помощи метода капиллярного (капельного) анализа?

4. Что такое электролит-стабилизатор? Какие электролиты могут выступать в этом качестве?

5. Как при помощи капиллярного (капельного) анализа определяют знак заряда коллоидных частиц гидрозоля?

6. В чем заключается явление взаимной коагуляции (гетерокоагуляции)?

7. Что определяет знак заряда коллоидных частиц гидрозоля, полученного по реакции ионного обмена, гидролиза, окислительно-восстановительным реакциям?

8. Почему, используя метод химической конденсации, гидрозоль по реакции ионного обмена нельзя получить путем сливания концентрированных растворов электролитов?

Лабораторная работа № 4
ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРОЗОЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ПЕПТИЗАЦИИ

Теоретическая часть

Пептизация, или физико-химическое диспергирование, представляет собой, по сути, перевод свежего осадка в золь (во взвешенное состояние). Осадок обязательно должен быть свежим, поскольку при выдерживании его в течение некоторого времени между частичками осадка образуются более или менее крепкие связи, что препятствует их переводу во взвешенное состояние. Можно выделить три вида пептизации – адсорбционную, диссолюционную и химическую.

При адсорбционной пептизации к свежему осадку, частицы которого не содержат ДЭС, добавляют электролит, ионы которого способны адсорбироваться на поверхности частиц осадка, заряжая и тем самым стабилизируя их. Этот электролит называют *электролитом-стабилизатором* или в данном случае *пептизатором*.

Например, перевести свежий осадок $Fe(OH)_3$ во взвешенное состояние (в золь) можно при добавлении к нему раствора $FeCl_3$:

$$\{[Fe(OH)_3]_m\}^0 + nFeCl_3 \rightarrow \{[Fe(OH)_3]_m\, nFe^{3+}\, (3n-x)Cl^-\}^{x+}\, xCl^-.$$

Коллоидные частицы гидрозоля в этом случае заряжаются положительно.

При диссолюционной пептизации свежий осадок, содержащий ДЭС, просто промывают большим количеством дистиллированной воды. При этом размывается адсорбционный слой противоионов и часть ионов оттуда переходит в дисперсионную среду, формируя диффузный слой противоионов:

$$\{[Fe(OH)_3]_m\, nFe^{3+}\, 3nCl^-\}^0 \xrightarrow{H_2O} \{[Fe(OH)_3]_m\, nFe^{3+}\, (3n-x)Cl^-\}^{x+}\, xCl^-.$$

Коллоидные частицы гидрозоля при этом заряжаются, и он приобретает относительную устойчивость.

При химической пептизации к свежему осадку, частицы которого не содержат ДЭС, добавляют электролит, растворяющий тонкий поверхностный слой частиц осадка, в результате чего образуется электролит-пептизатор, стабилизирующий золь:

$$\{[Fe(OH)_3]_m\}^0 + 3n HCl \rightarrow \{[Fe(OH)_3]_{m-n}\}^0 + n FeCl_3 + 3H_2O;$$

$$\{[Fe(OH)_3]_{m-n}\}^0 + n FeCl_3 \rightarrow$$
$$\rightarrow \{[Fe(OH)_3]_{m-n}\, n Fe^{3+}\, (3n - x)Cl^-\}^{x+}\, x Cl^-.$$

Порядок выполнения работы

Цель работы: получение гидрозолей при помощи адсорбционной и диссолюционной пептизации.

Приборы, оборудование, реактивы: колба Бунзена, воронка Бюхнера, бумажные фильтры, мерные колбы на 50 и 100 мл, мерный стакан на 200 мл, насыщенный раствор $FeCl_3$, водные растворы Na_2CO_3 ($NaHCO_3$) (ω = 20 мас. %), $K_4[Fe(CN)_6]$ (ω = 20 мас. %), $CuCl_2$ (ω = 2 мас. %), $(COOH)_2$ (C = 0,05 моль/л), стеклянная палочка, пипетки.

Ход работы

Опыт № 1. Получение гидрозоля гидроксида железа методом адсорбционной пептизации

При помощи мерной колбы на 50 мл отмерить 50 мл H_2O и перелить ее в мерную колбу на 100 мл, добавить 2 мл насыщенного раствора $FeCl_3$, жидкость перемешать стеклянной палочкой. Добавлять по каплям к полученной жидкости 20%-ный раствор Na_2CO_3 ($NaHCO_3$) до тех пор, пока выпадающий осадок $Fe(OH)_3$ не перестанет растворяться при встряхивании. Для пептизации осадка добавить в колбу немного капель насыщенного раствора $FeCl_3$ и встряхивать колбу до полного исчезновения осадка.

При помощи капельного анализа (см. лабораторную работу № 3, с. 28, опыт № 7) определить знак заряда коллоидных частиц гидрозоля.

Записать уравнение реакции образования осадка $Fe(OH)_3$, уравнение адсорбционной пептизации и строение СЕГ.

Опыт № 2. Получение гидрозоля берлинской лазури методом адсорбционной пептизации

В мерный стакан на 200 мл налить 100 мл дистиллированной воды и 1,5 мл 20%-ного раствора $K_4[Fe(CN)_6]$, тщательно перемешать жидкость стеклянной палочкой. К полученному раствору добавить 0,5 мл насыщенного раствора $FeCl_3$. Выпавший осадок переместить на фильтр, промыть дистиллированной водой и залить 0,05 М раствором щавелевой кислоты. Осадок быстро пептизируется и через фильтр будет проходить синий золь берлинской лазури.

При помощи капельного анализа (см. лабораторную работу № 3, с. 28, опыт № 7) определить знак заряда коллоидных частиц гидрозоля.

Записать уравнение реакции образования осадка берлинской лазури, уравнение адсорбционной пептизации и строение СЕГ образующегося гидрозоля.

Опыт № 3. Получение гидрозоля берлинской лазури методом диссолюционной пептизации

В мерном стакане на 200 мл смешать 3 капли насыщенного раствора хлорида железа (III) с 1 каплей 20%-ного раствора $K_4[Fe(CN)_6]$. Образуется паста берлинской лазури. Размешать пасту стеклянной палочкой и разбавить большим количеством воды. Образуется синий золь берлинской лазури, при этом часть осадка может не перейти во взвешенное состояние.

При помощи капельного анализа (см. лабораторную работу № 3, с. 28, опыт № 7) определить знак заряда коллоидных частиц гидрозоля.

Записать уравнение образования осадка, схему диссолюционной пептизации, а также строение СЕГ до и после пептизации.

Опыт № 4. Получение гидрозоля гексацианоферрата (II) меди (II) методом диссолюционной пептизации

В мерном стакане на 50 мл смешать 1 мл 20%-ного раствора $K_4[Fe(CN)_6]$ и 5 мл 2%-ного раствора $CuCl_2$. Образуется осадок $Cu_2[Fe(CN)_6]$. Перенести осадок на фильтр и промыть дистиллированной водой. Вначале фильтрат будет бесцветным, затем через фильтр медленно начнет проходить золь красно-бурого цвета.

При помощи капельного анализа (см. лабораторную работу № 3, с. 28, опыт № 7) определить знак заряда коллоидных частиц гидрозоля.

Записать уравнение реакции образования осадка, схему диссолюционной пептизации, а также строение СЕГ до и после пептизации.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой пептизация? На какие виды она делится?
2. Почему пептизации могут быть подвергнуты только свежие осадки?
3. Какие свежие осадки могут быть переведены во взвешенное состояние методами: а) адсорбционной; б) диссолюционной; в) химической пептизации? Привести конкретные примеры.
4. Что общего между адсорбционной и химической пептизацией и чем они отличаются?

Лабораторная работа № 5
КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИИ ФУРАЦИЛИНА НА УГЛЕ

Теоретическая часть

Адсорбция представляет собой перераспределение вещества между объемом фазы и поверхностным слоем. Если адсорбция протекает на поверхности твердого тела, то это тело называют *адсорбентом*, а концентрирующееся на его поверхности вещество – *адсорбатом*. Находящееся в объемной фазе и потенциально способное к адсорбции вещество называют *адсорбтивом*. Обратный адсорбции процесс называют *десорбцией*.

Количественно адсорбцию выражают двумя способами: как абсолютную и избыточную.

Абсолютная адсорбция, или адсорбция по Лэнгмюру, представляет собой абсолютное количество молей адсорбата, приходящееся на единицу площади поверхности адсорбента или единицу его массы:

$$a = \frac{n_S}{S}, \quad \frac{\text{моль}}{\text{м}^2}, \tag{5}$$

или

$$a = \frac{n_S}{m}, \quad \frac{\text{моль}}{\text{г}}, \tag{6}$$

где n_S – количество молей адсорбата на поверхности, моль; S – площадь поверхности адсорбента, м^2; m – масса адсорбента, г.

Избыточная адсорбция, или адсорбция по Гиббсу (Г), представляет собой избыточное количество молей адсорбата в поверхностном слое по сравнению с количеством молей этого вещества в таком же объеме фазы раствора, приходящееся на единицу площади поверхности:

$$\Gamma = \frac{n_S - n_V}{S} = \frac{(C_S - C_V)V}{S}, \quad \frac{\text{моль}}{\text{м}^2}, \tag{7}$$

где n_S и n_V – количество молей адсорбата в единице объема поверхностного слоя и в единице объема внутри фазы, моль; S – площадь

межфазной поверхности, м^2; C_S и C_V – поверхностная и объемная концентрации адсорбата, моль/л.

При малых концентрациях адсорбата $C_V \approx 0$ (весь адсорбат находится на межфазной поверхности), вследствие чего $a \approx \Gamma$.

По интенсивности взаимодействия адсорбата с адсорбентом различают *физическую и химическую адсорбцию*. В первом случае взаимодействие слабое, осуществляется за счет образования ван-дерваальсовых связей, адсорбция протекает быстро и обратимо. При химической адсорбции (хемосорбции) между адсорбатом и адсорбентом образуются прочные химические связи, адсорбция протекает медленно и необратимо.

По тому, в каком виде адсорбат адсорбируется на поверхности адсорбента, различают молекулярную (вещество адсорбируется в виде молекул) и ионную адсорбцию (вещество адсорбируется в виде ионов), а также ионный обмен (адсорбент обменивается с раствором эквивалентным количеством катионов или анионов).

Одной из первых адсорбционных теорий, детально разработанной Лэнгмюром для описания адсорбции молекул из газовой фазы на поверхности твердого вещества (адсорбента), является *теория мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра*, базирующаяся на следующих основных положениях:

1) адсорбция протекает на активных центрах, всегда существующих на поверхности адсорбента, причем активные центры энергетически эквивалентны;

2) каждый активный центр может адсорбировать только одну молекулу адсорбата, в результате чего адсорбция прекращается после заполнения поверхности слоем адсорбата толщиной в одну молекулу (мономолекулярным слоем адсорбата);

3) адсорбировавшиеся молекулы не взаимодействуют друг с другом и не переходят от центра к центру;

4) адсорбция носит физический характер, она обратима. Наряду с адсорбцией происходит десорбция, причем в состоянии равновесия скорости этих процессов одинаковы.

Основное уравнение теории мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра имеет вид (8):

$$a = a_\infty \frac{K \cdot C}{1 + K \cdot C}, \qquad (8)$$

где a – адсорбция по Лэнгмюру, моль/м^2 (или моль/г); a_∞ – предельная адсорбция по Лэнгмюру (емкость адсорбционного монослоя),

моль/м^2 (или моль/г); K – константа адсорбционного равновесия, л/моль; C – равновесная концентрация адсорбата, моль/л.

Типичный вид изотермы адсорбции по Лэнгмюру показан на рис. 2.

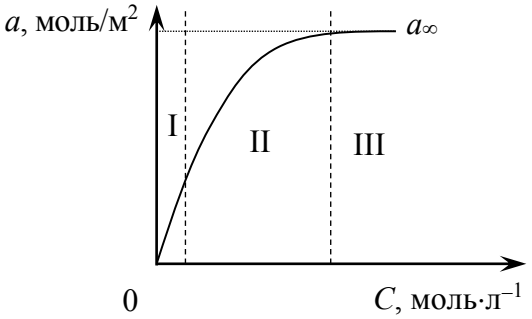


Рис. 2. Изотерма адсорбции по Лэнгмюру
в координатах $a = f(C)$

Как показано на рис. 2, всю изотерму можно условно разбить на три области. В области I (области малых концентраций) $KC << 1$, $a = a_\infty KC = K_\Gamma C$ (K_Γ – константа Генри), адсорбция линейно возрастает при увеличении концентрации адсорбата и описывается уравнением Генри. В области II (области средних концентраций) адсорбция нелинейно возрастает при увеличении концентрации адсорбата. В области III (области больших концентраций) $KC >> 1$ и $a \approx a_\infty$, т. е. адсорбция достигает предельного значения.

Значения констант в уравнении Лэнгмюра (a_∞ и K) обычно определяют графически, используя линейные формы уравнения изотермы адсорбции Лэнгмюра (рис. 3):

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{a_\infty} + \frac{1}{Ka_\infty} \cdot \frac{1}{C} \qquad (9)$$

или

$$\frac{C}{a} = \frac{1}{a_\infty \cdot K} + \frac{1}{a_\infty} \cdot C. \qquad (10)$$

Уравнение изотермы адсорбции Лэнгмюра было выведено для описания процесса адсорбции веществ из газовой фазы на твердой поверхности, однако хорошо выполняется при описании адсорбции, происходящей из жидкой фазы (из раствора) на твердых ад-

сорбентах.

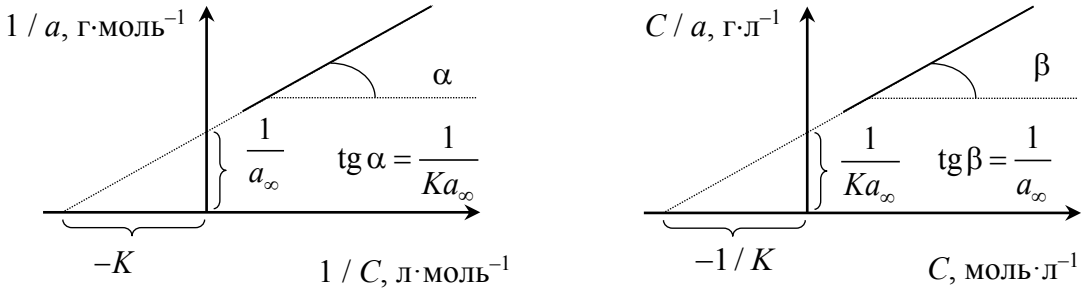


Рис. 3. Графическое определение констант
в уравнении Лэнгмюра (a_∞ и K)
при помощи зависимостей $1 / a = f(1 / C)$ либо $C / a = f(C)$

Для описания мономолекулярной адсорбции часто используют также эмпирическое уравнение Фрейндлиха:

$$a = kC^{1/n}, \qquad (11)$$

где a – адсорбция, моль/м^2 (или моль/г); C – равновесная концентрация адсорбата, моль/л; k и n – константы, определяемые опытным путем. Константа k по физическому смыслу представляет собой значение адсорбции при единичной концентрации адсорбата. Показатель степени $1 / n$ характеризует степень отклонения изотермы адсорбции от прямой линии (как правило, $0{,}2 \le 1 / n \le 0{,}7$).

Константы уравнения Фрейндлиха (k и $1 / n$) определяют графически (рис. 4), логарифмируя это уравнение:

$$\ln a = \ln k + \frac{1}{n} \cdot \ln C. \qquad (12)$$

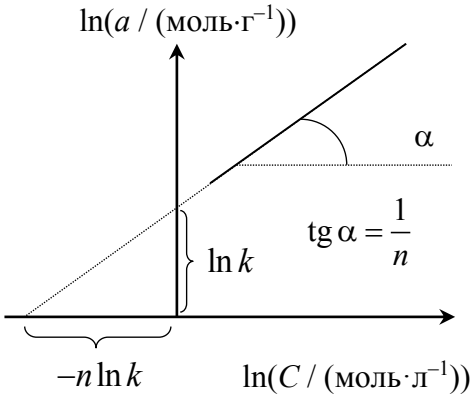


Рис. 4. Графическое определение констант
в уравнении Фрейндлиха при помощи зависимости $\ln a = f(\ln C)$

Порядок выполнения работы

Цель работы: колориметрически изучив адсорбцию фурацилина на активированном угле, определить значения констант в уравнениях изотерм адсорбции Лэнгмюра и Фрейндлиха.

Приборы, оборудование, реактивы: лабораторный модуль «Коллоидная химия», фотоколориметр 470 нм, соединительный кабель к датчику, штатив с лапками (1 шт.), сетевой кабель, весы аналитические, уголь активированный БАУ-А, раствор фурацилина ($C_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ моль/л), фильтровальная бумага, стаканчик на 50 мл (1 шт.), промывалка с дистиллированной водой, мерные колбы с пробками на 100 мл (6 шт.), мерный цилиндр на 50 (100) мл (1 шт.), колбы конические на 100 мл (6 шт.), воронки (6 шт.), мешалка, извлекатель магнитной мешалки.

Ход работы

1. Используя исходный раствор фурацилина с концентрацией $C_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, приготовить по 100 мл рабочих растворов с концентрациями $C_1 = 5{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $C_2 = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $C_3 = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $C_4 = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $C_5 = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $C_6 = 3{,}0 \cdot 10^{-4}$ моль/л, произведя расчеты по формуле

$$C_{\text{приг}} V_{\text{приг}} = C_{\text{исх}} V_{\text{исх}}. \qquad (13)$$

2. При помощи аналитических весов взвесить 6 навесок активированного угля массой 1 г и поместить навески в конические колбы, после чего добавить в них по 50 мл приготовленных растворов, интенсивно взболтать и оставить на 20–30 мин для установления адсорбционного равновесия, периодически встряхивая колбы с углем и растворами каждые 3–5 мин.

3. В лапке закрепленного на лабораторном модуле штатива закрепить фотоколориметр и при помощи соединительного кабеля подсоединить его к лабораторному модулю. В мерный стаканчик на 50 мл налить 30–40 мл дистиллированной воды, поместить стаканчик на лабораторный модуль и опустить в него фотоколориметр так, чтобы измерительная часть датчика была расположена по центру жидкости, поместить в стаканчик магнитную мешалку.

4. Подключить лабораторный модуль к сети и включить его тумблером, расположенным на правой стороне модуля. Нажать центральную кнопку и в качестве типа эксперимента выбрать «Одиночное измерение». Во вкладке «Устройства» выделить «Мешалку» и «Фотоколориметр». Перейти во вкладку «Параметр», в качестве единицы измерения дополнительного параметра задать «моль/л» и установить шаг изменения дополнительного параметра равным нулю.

5. Подключить мешалку, перейти во вкладку «Проверка» и выделить «Фотоколориметр». Во вкладке «Калибровка» ввести нулевое значение оптической плотности дистиллированной воды. После калибровки нажать кнопку «Начать эксперимент». При измерении оптической плотности следует убедиться, что в измерительной части фотоколориметра нет пузырьков воздуха. При их наличии для удаления пузырьков можно поднять измерительную часть датчика и вновь опустить ее.

6. Выключить магнитную мешалку, извлечь из измерительного стаканчика фотоколориметр и мешалку, вылить из него дистиллированную воду и налить раствор фурацилина с концентрацией C_1.

В окне «Дополнительный параметр» установить значение концентрации первого раствора $C_1 = 5{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/л и через 1–2 мин, когда значение оптической плотности перестанет изменяться, зафиксировать результат нажатием кнопки «Измерить» и занести его в табл. 9 (колонка $D_{нач}$).

Таблица 9

№ раствора	$C_{нач} \cdot 10^4$, моль/л	$C_{равн} \cdot 10^4$, моль/л	$D_{нач}$	$D_{равн}$
1	0,5			
2	1,0			
3	1,5			
4	2,0			
5	2,5			
6	3,0			

7. Отключить мешалку, установив интенсивность перемешивания на «0», после этого извлечь ее и фотоколориметр из раствора, вылить исследованный раствор и, последовательно заполняя стаканчики растворами № 2–6, аналогичным образом измерить их оптическую плотность. Поскольку измерения проводятся в порядке возрастания концентраций растворов, стаканчики, магнитную мешалку и фотоколориметр в процессе измерений можно не ополаскивать дистиллированной водой. Занести полученные результаты в табл. 9.

Просмотреть результаты измерений можно во вкладке «Результаты» (численные значения) или «Графики» (графические зависимости). Полученные данные можно сохранить на внешний носитель информации (в формате *.csv или *.txt) или распечатать, подключив к лабораторному модулю внешний носитель информации (верхний USB-порт) или принтер.

По окончании первой серии измерений ополоснуть стаканчики, магнитную мешалку и фотоколориметр дистиллированной водой. Ополоснуть дистиллированной водой мерные колбы, в которых были приготовлены растворы фурацилина, и затем дать воде вытечь из них.

По результатам измерений на миллиметровой бумаге построить градуировочный график в координатах $D = f(C)$. Убедиться в линейности графика.

8. Содержимое колб с растворами красителя и активированным углем отфильтровать в мерные колбы через складчатые фильтры. По приведенной выше схеме измерить значения оптической плотности растворов в порядке возрастания их концентрации, занести результаты измерений в табл. 9 (колонка $D_{\text{равн}}$), после чего при помощи градуировочного графика определить равновесные концентрации растворов и также занести их в табл. 9.

9. По уравнению

$$a_i = \frac{C_{\text{нач},i} - C_{\text{равн},i}}{m} \cdot V, \qquad (14)$$

где m – масса навески адсорбента, г; V – объем раствора красителя, л, рассчитать значения адсорбции фурацилина на угле и также занести данные в табл. 10.

10. Рассчитать значения $1 / a$, $1 / C_{\text{равн}}$, $\ln a$, $\ln C_{\text{равн}}$, занести их в табл. 10 и по полученным данным построить графики в координатах $1 / a = f(1 / C_{\text{равн}})$, $\ln a = f(\ln C_{\text{равн}})$, из которых определить значения констант в уравнении Лэнгмюра (a_∞ и K) и Фрейндлиха (k и $1 / n$).

Таблица 10

№ раствора	$C_{\text{нач}} \cdot 10^4$, моль/л	a, моль/г	$1 / a$, г/моль	$10^{-4} / C_{\text{равн}}$, л/моль	$\ln a$	$\ln C_{\text{равн}}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Точность полученных констант проверить, рассчитав с их помощью значения адсорбции фурацилина при различных равновесных концентрациях и сравнив их с найденными экспериментально.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения понятиям «адсорбция», «десорбция», «адсорбат», «адсорбент», «адсорбтив».

2. Какие бывают виды адсорбции? Чем они отличаются друг от друга?

3. Укажите способы выражения адсорбции? В чем заключается различие между этими способами?

4. Сформулируйте основные положения теории мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра, указав области ее применимости.

5. Запишите уравнение изотермы адсорбции Лэнгмюра, назовите входящие в него величины, укажите их размерности и физический смысл.

6. Каким образом можно определить значения констант в уравнении Лэнгмюра? Изобразите соответствующие графики и приведите схемы расчетов.

7. Какой вид имеет изотерма адсорбции Лэнгмюра? На какие области она может быть условно разделена?

8. Запишите уравнение Фрейндлиха, поясните смысл входящих в него величин, укажите их размерности.

9. Каким образом графически можно определить значения констант в уравнении Фрейндлиха?

10. Чем физическая адсорбция отличается от химической?

11. В чем отличие молекулярной адсорбции от ионной? Чем от них отличается ионный обмен и что общего у него с указанными выше видами адсорбции?

Лабораторная работа № 6
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТОЧКИ БЕЛКА

Теоретическая часть

Белки являются одновременно высокомолекулярными соединениями и полиэлектролитами, в связи с чем проявляют ряд специфических физико-химических и коллоидно-химических свойств, к которым относятся амфотерность, набухаемость, растворимость, способность к денатурации, высаливанию и др.

Амфотерность белков обусловлена тем, что входящие в их состав аминокислоты содержат как карбоксильные (–COOH), так и аминогруппы ($–NH_2$), способные в водной среде к диссоциации:

$$–R–COOH + H_2O \leftrightarrows –R–COO^- + H_3O^+;$$

$$–R–NH_2 + H_2O \leftrightarrows –R–NH_3^+ + OH^-.$$

Заряд частиц белка в растворах зависит от соотношения в них количеств кислых и основных аминокислот. Аналогично аминокислотам, белки заряжаются положительно при низких pH и отрицательно – при высоких. В растворе, pH которого соответствует *изоэлектрической точке* (ИЭТ) белка, заряд частиц белка равен нулю – они электронейтральны.

Если в белке (или пептиде) преобладают кислые аминокислоты (глутамат и аспартат), то белок является кислым, в нейтральной среде заряд частиц белка будет отрицательным, а его ИЭТ находится в кислой среде. Для большинства природных аминокислот ИЭТ находится в пределах 4,8–5,4, что свидетельствует о преобладании в их составе глутаминовой и аспарагиновой аминокислот. Если в белке преобладают основные аминокислоты (лизин и аргинин), то в нейтральной среде частицы белка будут заряжены положительно, а изоэлектрическая точка находится в щелочной среде.

Амфотерность белков обусловливает, в частности, их буферные свойства. Так, белки крови стабилизируют значение ее pH вследствие способности присоединять ионы H^+ при закислении крови и отдавать при ее защелачивании.

Разный аминокислотный состав белков, обеспечивающий отличия в знаке и величине заряда их частиц в растворе, позволяет разделять белки по заряду (при помощи электрофореза) либо, изменяя величину pH среды, направленно осаждать из нее тот или иной белок.

Наличие в молекулах белка большого количества полярных групп, способных к диссоциации, обусловливает водорастворимость белков, которая, однако, определяется не только наличием заряда в водной среде и взаимным отталкиванием частиц белка, но и гидратацией белков – чем больше полярных и заряженных групп в белке, тем сильнее он связывает воду. Так, например, 100 г белка альбумина способны связать 30–50 г воды. Растворимость белков в воде снижается при добавлении к их растворам электролитов (высаливание), а также при уменьшении pH среды. В последнем случае при закислении среды (уменьшении pH) ниже изоэлектрической точки ионы H^+ присоединяются к отрицательно заряженным функциональным группам глутаминовой и аспарагиновой кислот и нейтрализуют их, в результате чего заряд частиц белка становится положительным. При защелачивании среды (возрастании pH) выше изоэлектрической точки концентрация ионов H^+ снижается и положительно заряженные функциональные группы лизина и аргинина теряют заряд, в результате чего частицы белка становятся заряженными отрицательно. В изоэлектрической точке заряд частиц белка равен нулю.

Порядок выполнения работы

Цель работы: определение значений изоэлектрической точки (ИЭТ) различных белков.

Приборы, оборудование, реактивы: лабораторный модуль «Коллоидная химия», фотоколориметр 470 нм, pH-метр, соединительный кабель к датчику (2 шт.), комбинированный pH-электрод, штатив с лапками (2 шт.), магнитная мешалка, извлекатель магнитной мешалки, химический стакан объемом 50 мл (8 шт.), растворы альбумина (ω = 1 мас. %), желатина (ω = 1 мас. %) и казеина (ω = 0,4 мас. %), этанол, изопропанол, растворы лимонной кислоты (C = 0,1 моль/л), гидрофосфата натрия Na_2HPO_4 (C = 0,2 моль/л), уксусной кислоты (C = 0,2 моль/л), ацетата натрия (C = 0,2 моль/л) и танина, стеклянная палочка, дистиллированная вода.

Ход работы

Опыт № 1. Определение изоэлектрической точки альбумина

1. Для определения ИЭТ альбумина необходимо приготовить буферные смеси с различными значениями pH, для чего в шесть стаканчиков на 50 мл налить заданные (табл. 11) объемы растворов гидрофосфата натрия и лимонной кислоты.

Таблица 11

№ стаканчика	Объем 0,2 М раствора Na_2HPO_4, мл	Объем 0,1 М раствора лимонной кислоты, мл	pH буфера
1	2,5	7,5	3,2
2	3,4	6,6	3,7
3	4,1	5,9	4,2
4	4,8	5,2	4,7
5	5,4	4,6	5,2
6	6,6	3,4	5,7

2. В каждый стаканчик к 10 мл буферного раствора добавить по 5 мл раствора альбумина ($\omega = 1$ мас. %) и по 20 мл этилового (или изопропилового) спирта в качестве водоотнимающего средства. Содержимое стаканчиков перемешать стеклянной палочкой и через 30–40 мин измерить pH и оптическую плотность содержимого каждого из шести стаканчиков.

3. В лапках закрепленных на лабораторном модуле штативов зафиксировать фотоколориметр и комбинированный pH-электрод, после чего подключить pH-электрод и pH-метр, присоединить датчик и лабораторный модуль при помощи соединительного кабеля. На рабочую поверхность модуля установить стаканчик с дистиллированной водой, поместить в него магнитную мешалку и опустить фотоколориметр и pH-электрод так, чтобы их измерительные части располагались по центру стаканчика.

4. Подключить лабораторный модуль к сети и включить его тумблером, расположенным на правой стороне модуля. Нажать центральную кнопку и в качестве типа измерения выбрать «Одиночное измерение». Во вкладке «Устройства» выделить «Мешалку», «Фотоколориметр» и «pH-метр».

5. Подключить мешалку (скорость перемешивания 3–5), перейти на вкладку «Проверка» и выделить «Фотоколориметр». Ввести нужное

значение оптической плотности дистиллированной воды во вкладке «Калибровка». После этого выделить «pH-метр» и откалибровать его. После калибровки нажать кнопку «Начать эксперимент». При измерении оптической плотности необходимо убедиться, что в измерительной части фотоколориметра нет пузырьков воздуха. При их наличии для удаления пузырьков воздуха можно приподнять измерительную часть датчика и вновь опустить ее.

Отключить магнитную мешалку, извлечь из стаканчика магнитную мешалку, pH-электрод, фотоколориметр, после чего поместить их в стаканчик № 1 с исследуемым раствором и через несколько минут, когда значения оптической плотности и pH среды перестанут изменяться, зафиксировать результаты нажатием кнопки «Измерить» и занести полученные данные в табл. 12.

Таблица 12

№ стаканчика	1	2	3	4	5	6
D						
pH						

6. Аналогичным образом провести измерение оптической плотности и pH растворов в стаканчиках № 2–6, занести данные в табл. 12. Просмотреть результаты измерений можно во вкладке «Результаты» (численные значения) или «Графики» (графические зависимости). Полученные данные можно сохранить на внешний носитель информации (в формате *.csv или *.txt) либо распечатать, подключив к лабораторному модулю внешний носитель информации (верхний USB-порт) или принтер. В последней можно также графическим способом определить изоэлектрическую точку белка альбумина.

7. По результатам измерений построить зависимость $D = f(\text{pH})$ и определить по ней значение изоэлектрической точки белка альбумина.

Опыт № 2. Определение изоэлектрической точки желатина

1. Для определения изоэлектрической точки желатина приготовить буферные смеси с различными значениями pH, для чего в пять стаканчиков на 50 мл налить заданные (табл. 13) объемы растворов ацетата натрия и уксусной кислоты.

Таблица 13

№ стаканчика	Объем 0,2 М раствора CH_3COONa, мл	Объем 0,2 М раствора уксусной кислоты, мл	pH буфера
1	2,0	18,0	3,8
2	4,0	16,0	4,2
3	10,0	10,0	4,8
4	16,0	4,0	4,4
5	18,0	2,0	5,7

2. В каждый стаканчик к 20 мл буферной смеси добавить по 5 мл раствора желатина (ω = 1 мас. %) и по 10 мл раствора танина. Содержимое стаканчиков перемешать стеклянной палочкой и через 30–40 мин измерить их оптическую плотность и pH таким же образом, как и в опыте № 1, занести результаты измерений в табл. 14.

Таблица 14

№ стаканчика	1	2	3	4	5
D					
pH					

3. По результатам измерений построить зависимость $D = f(\text{pH})$ и определить по ней значение изоэлектрической точки белка желатина.

Опыт № 3. Определение изоэлектрической точки казеина

1. Для определения изоэлектрической точки казеина приготовить смеси уксусной кислоты и воды, для чего в семь стаканчиков на 50 мл налить заданные объемы уксусной кислоты и воды (табл. 15).

Таблица 15

№ стаканчика	Объем H_2O, мл	Объем 0,2 М раствора уксусной кислоты, мл	*D*	pH
1	8,0	32,0		
2	24,0	16,0		
3	32,0	8,0		
4	36,0	4,0		
5	38,0	2,0		
6	38,8	1,2		
7	39,4	0,6		

2. В каждый стаканчик к 40 мл приготовленной смеси добавить по 4 мл раствора казеина (ω = 0,4 мас. %). Содержимое стаканчиков перемешать стеклянной палочкой и через 30–40 мин измерить их pH и оптическую плотность содержимого семи стаканчиков таким же образом, как и в опыте № 1, занести полученные результаты в табл. 15.

3. По результатам измерений построить зависимость $D = f(\text{pH})$ и определить по ней значение изоэлектрической точки белка казеина.

Контрольные вопросы

1. Что такое белки? Какие специфические физико-химические и коллоидно-химические свойства проявляют растворы белков?

2. Что такое изоэлектрическая точка белка? Какие значения принимают изоэлектрические точки белков и почему?

Лабораторная работа № 7
КОАГУЛЯЦИЯ ЖЕЛАТИНА ПУТЕМ ДЕГИДРАТАЦИИ ЕГО СПИРТОМ В ИЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТОЧКЕ

Теоретическая часть

Белки представляют собой высокомолекулярные полиэлектролитные соединения и в водных растворах частицы белка, как правило, имеют заряд, возникающий за счет диссоциации функциональных групп аминокислот, входящих в их состав. В зависимости от величины pH заряд частиц белка в водной среде может изменяться от положительного (в кислых средах, при низких pH) до отрицательного (в щелочных средах, при высоких pH), проходя через нулевое значение в изоэлектрической точке.

Отсутствие заряда у частиц белка в изоэлектрической точке соответствует его изоэлектрическому состоянию, в котором белок обладает наименьшей устойчивостью, наименьшей вязкостью, минимальным осмотическим давлением и минимальной способностью к набуханию.

Устойчивость белков в изоэлектрической точке обусловлена только их гидратацией, поэтому введение в раствор водоотнимающего агента (например, этилового спирта) вызывает дегидратацию, в результате чего дестабилизированные макромолекулы белка агрегируют, образуя хлопья, с течением времени выпадающие в осадок.

Порядок выполнения работы

Цель работы: изучить процесс коагуляции белка путем дегидратации его спиртом в изоэлектрической точке, установить наличие заряда у частиц белка при различных значениях pH среды.

Приборы, оборудование, реактивы: штатив для пробирок, пробирки (9 шт.), водные растворы желатина (ω = 1 мас. %), ацетата натрия (C = 0,1 моль/л), уксусной кислоты (C = 0,1 моль/л, 1,0 моль/л), этиловый спирт, изопропиловый спирт, промывалка с дистиллированной водой, мерные пипетки, бюретки.

Ход работы

1. В девять пронумерованных сухих пробирок, размещенных в ряд в штативе, поместить заданные объемы растворов желатина, электролитов и дистиллированной воды (табл. 16).

Таблица 16

№ пробирки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Объем 0,1 М раствора CH_3COONa, мл	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Объем 0,1 М раствора CH_3COOH, мл	0,12	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	–	–	–
Объем 1,0 М раствора CH_3COOH, мл	–	–	–	–	–	–	0,80	1,60	3,20
Объем H_2O, мл	3,88	3,75	3,50	3,00	2,00	–	3,20	2,40	0,80
Объем 1%-ного раствора желатина, мл	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
pH смеси	6,0	5,6	5,3	5,0	4,7	4,4	4,1	3,8	3,5

2. Прилить из бюретки изопропиловый (или этиловый) спирт к содержимому пробирки № 5 (содержащей желатин в изоэлектрическом состоянии при pH = 4,7) до начала легкого помутнения. После этого аналогичные объемы изопропилового (или этилового) спирта добавить к содержимому остальных пробирок при перемешивании.

Результаты записывать через 30–40 мин, когда помутнение в пробирке № 5 заметно усилится, а в соседних с ней пробирках № 4 и 6 начнется выпадение хлопьев. Отметить образование хлопьев и выпадение их в осадок спустя некоторое время после наступления помутнения. Полученные данные хорошо иллюстрируют теорию устойчивости гидрофильных коллоидов, согласно которой их устойчивость зависит от двух факторов – заряда частиц и степени их гидратации. В изоэлектрической точке частицы белка не имеют заряда, их устойчивость обеспечивается только гидратацией. В присутствии водоотнимающего агента (в данном случае – изопропилового (этилового) спирта) происходит дегидратация и частицы, дестабилизированные по обоим факторам, агрегируют, образуя вначале мелкие (помутнение), а затем более крупные агрегаты (хлопья), которые со временем под действием силы тяжести выпадают в осадок.

3. Желатин в растворе № 5, pH которого соответствует изоэлектрической точке желатина, наименее устойчив, под действием

изопропилового (этилового) спирта (водоотнимающего агента) его макромолекулы быстро агрегируют и образуют хлопья, с течением времени выпадающие в осадок. В состоянии, близком к изоэлектрическому, белок обладает некоторой устойчивостью, но с течением времени под влиянием находящихся в растворе электролитов его макромолекулы агрегируют, а сами агрегаты впоследствии выпадают в осадок (пробирки № 3, 4, 6 и 7). В растворах, pH которых далеки от изоэлектрической точки, частицы белка несут достаточно большой заряд, поэтому спирт, несмотря на его сильное дегидратирующее действие, и входящие в состав растворов электролиты не способны вызвать агрегацию молекул белка (пробирки № 1 и 9).

Контрольные вопросы

1. Как величина заряда частиц белка влияет на их устойчивость в присутствии электролита и водоотнимающего агента?
2. Что в большей степени обеспечивает устойчивость белка в водных средах – величина заряда его частиц или гидратация их молекулами воды?

Лабораторная работа № 8
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГИДРОЗОЛЯ МЕТОДОМ МАКРОЭЛЕКТРОФОРЕЗА

Теоретическая часть

Электрокинетические явления протекают в дисперсных системах, в которых на границе раздела фаз ДФ/ДСр возникает двойной электрический слой. По причинно-следственной связи электрокинетические явления делят на *прямые* и *обратные*. К прямым относятся явления, при которых перемещение одной фазы дисперсной системы относительно другой происходит под действием приложенной к системе разности потенциалов (электрофорез, электроосмос). При *электрофорезе* частицы дисперсной фазы перемещаются в неподвижной дисперсионной среде, при *электроосмосе* дисперсионная среда перемещается через неподвижный слой, образованный связанными друг с другом частицами дисперсной фазы. К обратным относятся явления, при которых движение одной фазы относительно другой вызывает возникновение в системе разности потенциалов (потенциал течения, потенциал оседания (седиментации)). *Потенциал течения* возникает в результате перемещения (течения) дисперсионной среды через неподвижный слой частиц дисперсной фазы, *потенциал оседания* (седиментации) возникает при оседании частиц дисперсной фазы в неподвижной дисперсионной среде.

В свободнодисперсных системах протекают такие электрокинетические явления, как электрофорез и потенциал оседания, в связнодисперсных − электроосмос и потенциал течения (в них подвижная дисперсионная среда перемещается относительно неподвижной дисперсной фазы).

Для гидрозолей, являющихся свободнодисперсными ультрамикрогетерогенными системами, характерно такое электрокинетическое явление, как электрофорез. При помощи электрофореза на практике, в частности, определяют такую важную характеристику частиц дисперсной фазы, как электрокинетический потенциал (ζ), по знаку и величине которого судят о знаке и величине заряда коллоидных частиц.

Величину электрокинетического потенциала (ζ) коллоидных частиц можно рассчитать при помощи уравнения Гельмгольца – Смолуховского (15):

$$\zeta = \frac{\eta \upsilon}{\varepsilon \varepsilon_0 H} = \frac{\eta u}{\varepsilon \varepsilon_0}, \qquad (15)$$

где η – вязкость дисперсионной среды, Па·с (для воды при комнатной температуре $\eta = 10^{-3}$ Па·с); υ – линейная скорость перемещения частиц, м/с; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воды при комнатной температуре ε = 81); ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума ($\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); H – напряженность электрического поля, В/м; u – электрокинетическая подвижность, м^2/В·с.

Опытные значения электрокинетической подвижности и электрокинетического потенциала гидрозоля составляют обычно 10^{-8}–10^{-9} м^2/(В·с) и 80–150 мВ соответственно.

Определенные на практике значения u и ζ часто оказываются меньше расчетных (ожидаемых), что обусловлено двумя эффектами, тормозящими движение коллоидных частиц, – электрофоретическим и релаксационным. Электрофоретическое торможение обусловлено сопротивлением движению частиц обратным потоком противоионов, увлекающих за собой жидкость (дисперсионную среду). Релаксационное торможение происходит из-за нарушения симметрии диффузного слоя противоионов, находящихся вокруг коллоидной частицы, при ее движении в электрическом поле.

Электрокинетический потенциал коллоидных частиц гидрозоля можно определить при помощи микро- и макроэлектрофореза. В первом случае при помощи микроскопа (ультрамикроскопа) непосредственно наблюдают перемещение отдельных коллоидных частиц в электрическом поле. Во втором случае гидрозоль помещают в U-образную трубку, сверху в оба ее колена наливают так называемую боковую (контактную) жидкость (раствор электролита, не вызывающий коагуляцию гидрозоля), опускают в нее электроды и после наложения на систему электрического поля наблюдают за перемещением границы раздела «золь – контактная жидкость». В одном колене трубки граница будет подниматься, поскольку коллоидные частицы переходят в боковую жидкость, в другом – опускаться, поскольку частицы смещаются вглубь коллоидного раствора.

Боковая жидкость должна удовлетворять двум следующим требованиям.

1. Она не должна вызывать коагуляцию частиц дисперсной фазы гидрозоля и должна быть как можно ближе по составу к дисперсионной среде гидрозоля (в противном случае при переходе коллоидных частиц в боковую жидкость будет изменяться толщина диффузного слоя противоионов и величина электрокинетического потенциала, вследствие чего будет изменяться величина электрофоретической подвижности коллоидных частиц).

2. Для получения четкой границы раздела «золь – боковая жидкость» электропроводность последней должна быть равна или немного больше электропроводности гидрозоля.

Наилучшей боковой жидкостью является дисперсионная среда гидрозоля (интермицеллярная жидкость).

Электрофоретическую скорость рассчитывают по формуле (16):

$$\upsilon = \frac{h}{t}, \tag{16}$$

где h – путь, пройденный границей раздела, м; t – время, с.

Напряженность электрического поля (H) вычисляют как

$$H = \frac{E}{l}, \tag{17}$$

где E – приложенная к электродам разность потенциалов, В; l – расстояние между кончиками электродов, м.

Рассчитать электрофоретическую подвижность можно по уравнению

$$u = \frac{\upsilon}{H}, \tag{18}$$

где υ – электрофоретическая скорость, м/с; H – напряженность электрического поля, В/м.

Порядок выполнения работы

Цель работы: методом электрофореза определить величину электрокинетического потенциала гидрозоля гидроксида железа.

Приборы, оборудование, реактивы: источник постоянного напряжения, сетевой кабель, соединительный провод с двумя зажимами типа «крокодил», электроды из нержавеющей стали (2 шт.), штатив с лапкой и зажимом, U-образная трубка с боковым отводом, гидрозоль гидроксида железа, боковая жидкость – раствор NH_4Cl (ω = 4 мас. %).

Ход работы

1. Открыв кран на боковом отверстии U-образной трубки, заполнить сосуд гидрозолем через воронку так, чтобы вытеснить воздух из нижней части трубки и крана и заполнить их гидрозолем. Затем закрыть кран, заполнить боковое отверстие гидрозолем, а в U-образную трубку (по другую сторону от крана) налить боковую жидкость.

2. Открыть кран, заполнить гидрозолем U-образную трубку так, чтобы граница «золь – боковая жидкость» достигла нулевой отметки в обоих коленах.

3. Поместить в верхнее отверстие трубки электроды из нержавеющей стали и при помощи соединительного провода подсоединить их к источнику постоянного напряжения. Замерить расстояние между кончиками электродов (учитывая форму трубки).

4. При помощи сетевого кабеля подключить источник постоянного напряжения, выставляя на нем при помощи ручки заданную преподавателем величину прикладываемого к системе напряжения, и пропускать ток через жидкость указанное преподавателем время, наблюдая за скоростью поднятия границы «золь – боковая жидкость» в одном колене и опускания – в другом.

5. По истечении заданного отрезка времени рассчитать среднее (по данным для двух колен U-образной трубки) смещение границы «золь – боковая жидкость» и провести все необходимые расчеты, определив в конечном итоге величину электрофоретической подвижности и электрокинетического потенциала коллоидных частиц.

6. По тому, к какому из электродов (положительному или отрицательному) поднималась граница «золь – контактная жидкость», определить знак заряда коллоидных частиц. Записать строение СЕГ, указав все ее элементы.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрокинетические явления? В каких дисперсных системах они могут протекать?

2. Чем прямые электрокинетические явления отличаются от обратных? Назовите парные электрокинетические явления.

3. Какие электрокинетические явления характерны для свободнодисперсных, а какие – для связнодисперсных систем?

4. Чем метод микроэлектрофореза отличается от макроэлектрофореза?

5. Записать уравнение Гельмгольца – Смолуховского, назвать входящие в него величины, указать их размерности.

6. Почему определяемые на практике методом макроэлектрофореза значения электрофоретической подвижности и электрокинетического потенциала оказываются заниженными?

7. В чем заключается причина релаксационного и электрофоретического торможения коллоидных частиц?

8. Какие требования предъявляются к боковой жидкости? Почему?

9. Что такое электрофорез? В каких дисперсных системах он может происходить?

Лабораторная работа № 9
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ ПАВ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ «ЖИДКОСТЬ – ГАЗ»

Теоретическая часть

Методы определения поверхностного натяжения жидкостей можно разделить на три основные группы: *статические*, *полустатические* и *динамические*. При использовании статических методов поверхностное натяжение определяют при неподвижной равновесной межфазной границе. К этим методам относятся *метод капиллярного поднятия* и *метод лежащей* или *висящей капли*. При использовании полустатических методов измерение поверхностного натяжения производится в момент наступления равновесия в системе, но это состояние сохраняется очень короткий промежуток времени и периодически нарушается. К полустатическим методам относят *метод отрыва кольца* или *рамки* (*метод Дю Нуи*), *метод втягивания пластинки* (*метод Вильгельми*), *метод подсчета и взвешивания капель* (*сталагмометрический метод*), *метод наибольшего давления в пузырьке воздуха* (*метод Ребиндера*). При использовании динамических методов, к которым относятся *метод капиллярных волн* и *метод колеблющихся струй*, измерение поверхностного натяжения жидкости производится в условиях, когда эта поверхность неравновесна.

Выбор метода определения поверхностного натяжения жидкости определяется, в частности, необходимой плотностью и достоверностью результатов, скоростью установления равновесия на межфазной границе «жидкость – газ» («жидкость – жидкость»), а также вязкостью (текучестью) жидкости. При исследовании поверхностного натяжения водных сред незаменимы динамические методы, наиболее высокую точность измерений обеспечивают статические методы, для определения поверхностного натяжения маловязких сред широкое применение на практике находят полустатические методы ввиду их относительной простоты и удобства использования (измерения). Одним из наиболее распространенных полустатических методов определения поверхностного натяжения жидкости является метод

наибольшего давления в пузырьке воздуха (метод Ребиндера). При исследовании этим методом поверхностного натяжения растворов ПАВ необходимо, чтобы время формирования поверхности пузырька было достаточно для установления на этой поверхности адсорбционного равновесия. Для низкомолекулярных ПАВ такое равновесие обычно устанавливается меньше, чем за минуту. В растворах ПАВ более сложного строения это время чаще всего составляет от нескольких минут до нескольких десятков минут.

При продавливании пузырька воздуха в жидкости через кончик капилляра необходимо, чтобы избыточное давление, прилагаемое к поверхности жидкости со стороны газовой фазы, было равно капиллярному, рассчитываемому по уравнению Лапласа:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}, \qquad (19)$$

где ΔP – избыточное (капиллярное) давление, Па; σ – поверхностное натяжение жидкости, Дж/м^2; R – радиус кривизны поверхности жидкости, м.

Измерение поверхностного натяжения жидкости методом наибольшего давления в пузырьке воздуха проводят при помощи установки, разработанной П. А. Ребиндером (рис. 5).

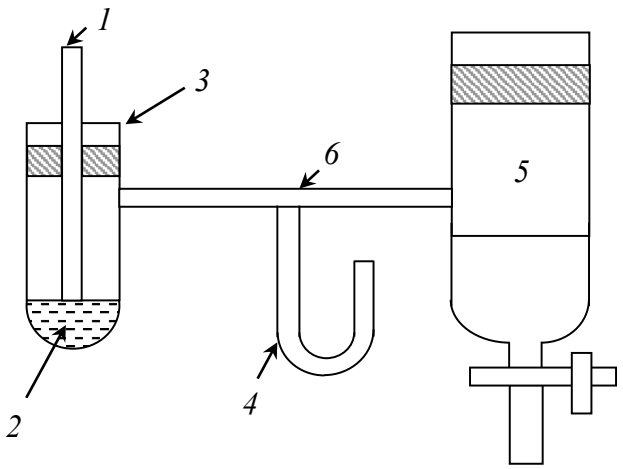


Рис. 5. Схема установки для измерения поверхностного натяжения жидкости при помощи метода Ребиндера:
1 – капилляр; *2* – исследуемая жидкость; *3* – измерительная ячейка; *4* – наклонный манометр; *5* – делительная воронка (аспиратор); *6* – отвод

Главная часть измерительной установки – кончик капилляра, который в процессе измерений только касается поверхности жидкости,

но не погружен в нее (чтобы исключить гидростатическое давление столба жидкости). В пространстве над жидкостью в пробирке с помощью аспиратора или вакуумного насоса создается разрежение и атмосферное давление продавливает пузырек воздуха через кончик капилляра в жидкость.

В процессе образования пузырька воздуха в жидкости избыточное давление (высота уровня жидкости в наклонном манометре) вначале растет (радиус пузырька уменьшается), достигает в момент отрыва пузырька максимума (при этом радиус пузырька (R) будет равен радиусу капилляра (r)), после чего вновь уменьшается (радиус пузырька уменьшается и он отрывается от кончика капилляра). Схематически изменение показаний измерительного прибора со временем имеет вид, изображенный на рис. 6.

Максимальное (экстремальное) значение избыточного давления можно зафиксировать с довольно высокой точностью, уравнение Лапласа для момента достижения максимального избыточного давления (ΔP_{max}) имеет вид

$$\Delta P_{max} = \frac{2\sigma}{r}, \tag{20}$$

где r – радиус капилляра, м.

Определив максимальное избыточное давление (ΔP_{max}) и зная радиус капилляра (r), можно рассчитать поверхностное натяжение жидкости:

$$\sigma = \frac{\Delta P_{max} r}{2}. \tag{21}$$

Поскольку точное значение радиуса капилляра обычно неизвестно, поверхностное натяжение исследуемой жидкости определяют, проведя эксперимент со стандартной жидкостью (водой):

$$\Delta P_{max,\,\text{ст}} = \frac{2\sigma_{\text{ст}}}{r}. \tag{22}$$

Значение поверхностного натяжения стандартной жидкости (воды) можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{H_2O} = [72,72 - 0,15(T - 293)] \cdot 10^{-3},\ \text{Дж/м}^2, \tag{23}$$

где T – температура опыта, К.

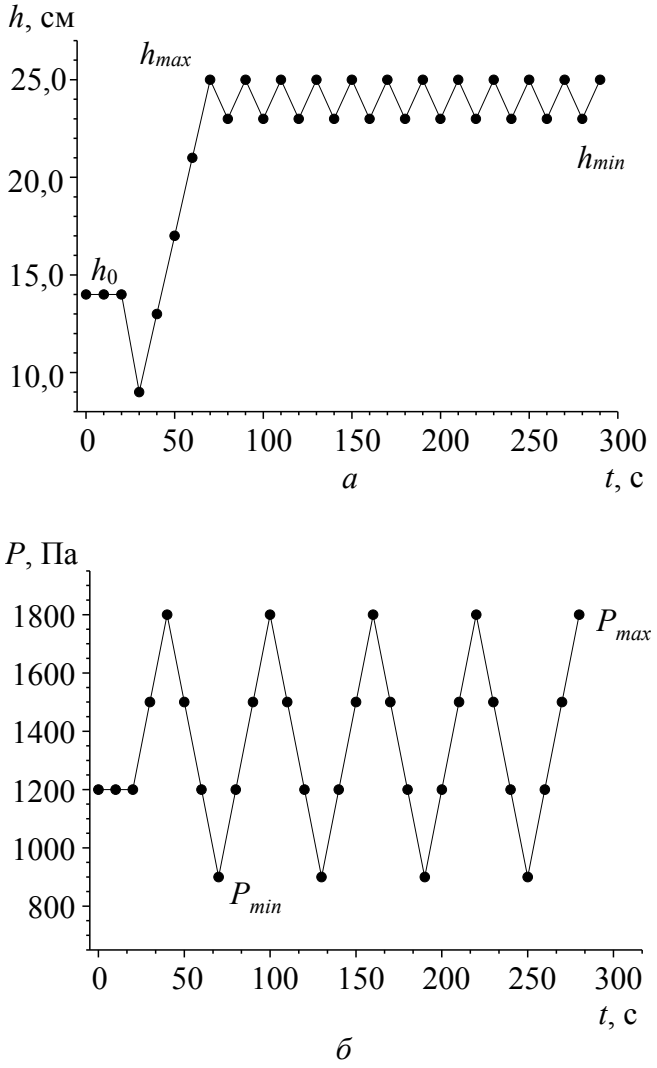


Рис. 6. Временные зависимости исследуемого параметра при проскакивании пузырька воздуха через капилляр в жидкость: *а*) высота уровня жидкости в наклонном манометре $h = f(C)$; *б*) показания датчика давления учебно-лабораторного модуля «Коллоидная химия»

Тогда поверхностное натяжение исследуемой жидкости можно рассчитать по формуле

$$\sigma = \sigma_{\text{ст}} \frac{\Delta P_{max}}{\Delta P_{max,\,\text{ст}}}. \qquad (24)$$

Определив значения поверхностного натяжения серии растворов ПАВ, можно получить изотерму поверхностного натяжения этих растворов (рис. 7).

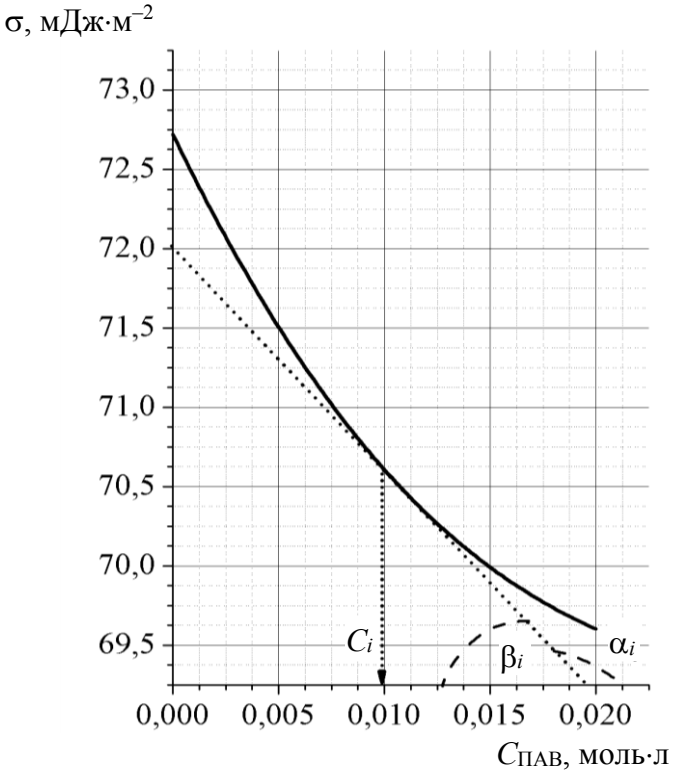


Рис. 7. Изотерма поверхностного натяжения раствора ПАВ (нонановая кислота, $T = 293$ К) в координатах $\sigma = f(C_{ПАВ})$

ПАВ – это поверхностно-активные вещества, снижающие поверхностное натяжение растворителя и адсорбирующиеся вследствие этого на поверхности жидкости (положительная адсорбция).

Величину избыточной адсорбции (адсорбции по Гиббсу) ПАВ можно рассчитать при помощи уравнения изотермы адсорбции Гиббса:

$$\Gamma_{C_i} = -\frac{C_i}{RT}\left(\frac{d\sigma}{dC}\right)_{C_i}, \text{ моль/м}^2, \qquad (25)$$

определив значение $\frac{d\sigma}{dC}$ графически из зависимости $\sigma = f(C_{ПАВ})$, построив касательную к изотерме в точке C_i:

$$\left(\frac{d\sigma_i}{dC}\right)_{C_i} = \operatorname{tg}\alpha_i = -\operatorname{tg}\beta_i, \text{ Дж·л/(м}^2\text{·моль)}, \qquad (26)$$

откуда

$$\Gamma_{C_i} = \frac{C_i}{RT}\cdot \operatorname{tg}\beta_i. \qquad (27)$$

При малых концентрациях ПАВ практически все растворенное вещество находится на поверхности, его объемная концентрация близка к нулю и избыточная адсорбция (адсорбция по Гиббсу) практически равна абсолютной (адсорбции по Лэнгмюру):

$$\Gamma_{C_i} = a_{C_i}. \tag{28}$$

Поэтому для описания адсорбции можно наряду с уравнением изотермы адсорбции Гиббса использовать уравнение изотермы адсорбции Лэнгмюра:

$$a_i = a_\infty \frac{KC_i}{1 + KC_i}, \tag{29}$$

где a_i – абсолютная адсорбция, моль/м^2; a_∞ – предельная абсолютная адсорбция, моль/м^2; K – константа адсорбционного равновесия, л/моль; C_i – концентрация ПАВ, моль/л.

Используя линейную форму уравнения изотермы адсорбции Лэнгмюра

$$\frac{C}{a} = \frac{1}{Ka_\infty} + \frac{C}{a_\infty}, \tag{30}$$

из зависимости $C / a = f(C)$ определяют значения констант в уравнении изотермы адсорбции Лэнгмюра (K и a_∞) (рис. 8):

$$a_\infty = \frac{1}{\mathrm{tg}\beta}.$$

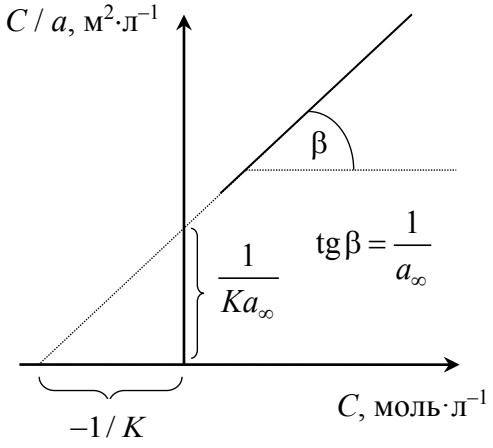


Рис. 8. Изотерма адсорбции Лэнгмюра
в координатах $C / a = f(C)$

Используя найденные экспериментально значения предельной адсорбции (a_∞), можно определить площадь, занимаемую молекулой ПАВ в поверхностном слое (S_0) и длину молекулы ПАВ (δ):

$$S_0 = \frac{10^{20}}{N_A a_\infty},\ \text{Å}^2, \tag{31}$$

$$\delta = 10^4 \frac{a_\infty M}{\rho},\ \text{Å}, \tag{32}$$

где M – молярная масса ПАВ, г/моль; ρ – плотность жидкого ПАВ, г/см^3 [5].

Порядок выполнения работы

Цель работы: при помощи метода Ребиндера получить изотерму поверхностного натяжения раствора исследуемого ПАВ, рассчитать значения адсорбции ПАВ по Гиббсу и по Лэнгмюру, графически определить значения констант в уравнении Лэнгмюра (K и a_∞), рассчитать площадь, занимаемую молекулой ПАВ (S_0) в поверхностном слое и длину молекулы ПАВ (δ).

Приборы, оборудование, реактивы: лабораторный модуль «Коллоидная химия», сетевой кабель, вакуумный насос, датчик давления, соединительный кабель, штатив с лапкой и зажимом, измерительная ячейка (колба с отводом и закрепленный в ней в пробке капилляр), силиконовые трубки, промывалка с дистиллированной водой, растворы ПАВ: изопропанола (C = 1,0 моль/л), изобутанола (C = 0,5 моль/л), пентанола (C = 0,2 моль/л), мерные колбы на 50 мл (5 шт.), мерный цилиндр на 25 мл (1 шт.), резиновая груша, зажим металлический, стеклянный тройник, аспиратор (делительная воронка с пробкой и газоотводной трубкой), наклонный манометр.

Ход работы

Вариант А

1. В соответствии с вариантом задания (табл. 17) приготовить 5 растворов ПАВ объемом по 50 мл. Вспомогательные расчеты провести по формуле

$$C_{\text{исх}} V_{\text{исх}} = C_{\text{приг}} V_{\text{приг}}.$$

Таблица 17

Вариант	ПАВ	Концентрация, моль/л				
		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1	и-C_3H_7OH	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
2	и-C_4H_9OH	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
3	$C_5H_{11}OH$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10

2. Соединить отводную трубку колбы (измерительной ячейки), датчик давления и вакуумный насос силиконовыми шлангами через тройник, заполнить пробирку дистиллированной водой и закрыть ее пробкой с капилляром, убедившись в том, что капилляр только касается поверхности воды.

3. Включить вакуумный насос и при помощи металлического зажима создать такую разницу между атмосферным давлением и давлением внутри колбы, чтобы пузырек воздуха через капилляр в жидкость проскакивал с периодичностью не чаще одного пузырька в 5–30 с. После установления стабильной скорости проскакивания пузырька приступить к измерениям.

4. Подключить датчик давления к лабораторному модулю при помощи соединительного кабеля, после чего включить модуль. Выбрать тип эксперимента «Кинетика». На вкладке «Устройства» выбрать «Датчик давления», а на вкладке «Режим измерений» – «Кинетика» (результаты измерений можно просматривать во вкладке «Измерение»). На вкладке измерений задать интервал измерений 1 раз в секунду, а общее количество точек – 120 и нажать кнопку «Запись». Результаты измерений можно просмотреть во вкладке «Результаты», а точку, отвечающую минимуму давления (внутри системы) можно определить графически во вкладке «Графики». Полученные данные можно сохранить на внешний носитель информации (в формате *.csv или *.txt) либо распечатать, подключив к лабораторному модулю внешний носитель информации (верхний USB-порт) или принтер. Занести результаты в табл. 18 (P_{min}) и выключить вакуумный насос.

5. Извлечь пробку с капилляром из пробирки и получить по описанной выше схеме показания датчика давления, которые занести в табл. 18 ($P_{атм}$).

6. Вылить из пробирки дистиллированную воду и по описанной выше схеме провести эксперимент с растворами ПАВ в порядке возрастания их концентраций, занося результаты эксперимента в табл. 18 (P_{min} и $P_{атм}$). После окончания измерений тщательно промыть капилляр и пробирку дистиллированной водой.

Таблица 18

C, моль/л	P_{min}, Па	$P_{атм}$, Па	ΔP_{max}, Па	$\sigma \cdot 10^3$, Дж/м^2
0				

7. Рассчитать значение поверхностного натяжения стандартной жидкости (дистиллированной воды) при температуре опыта по формуле (23) и значения поверхностного натяжения всех исследованных растворов ПАВ по формуле (24). Полученные данные занести в табл. 18 и построить по ним зависимости $\sigma = f(C)$.

8. Рассчитать значения ΔP_{max} по формуле

$$\Delta P_{max} = P_{атм} - P_{min} \qquad (33)$$

и занести значения в табл. 18.

9. Графически определить значения $d\sigma / dC$ при концентрациях ПАВ C_6, C_7, C_8, указанных в табл. 19, после чего найти значения адсорбции по Гиббсу и занести результаты в табл. 20.

Таблица 19

Раствор	и-C_3H_7OH	и-C_4H_9OH	$C_5H_{11}OH$
C_6, моль/л	0,10	0,04	0,01
C_7, моль/л	0,12	0,06	0,02
C_8, моль/л	0,14	0,08	0,03

Таблица 20

C, моль/л	$d\sigma / dC$, Дж·л/(м^2·моль)	$\Gamma = a$, моль/м^2	C / a, м^2/л

10. Приравняв значения Г и a, рассчитать значения C / a, занести их в табл. 20, после чего, построив зависимости $C / a = f(C)$, определить значения констант в уравнении изотермы адсорбции Лэнгмюра (K и a_∞).

11. Рассчитать площадь, занимаемую молекулой ПАВ в поверхностном слое (S_0), и длину молекулы ПАВ (δ).

Вариант Б

Работа выполняется способом, описанным в варианте А, только вместо вакуумного насоса для создания разрежения в системе используется аспиратор (делительная воронка с рабочей жидкостью).

Вариант В

Работа выполняется способом, описанным в варианте А, только вместо лабораторного модуля «Коллоидная химия» для определения максимального давления, необходимого для образования пузырька воздуха в жидкости, используют наклонный манометр. В этом случае вместо значений $P_{атм}$, P_{min} следует определить значения h_0 и h_{max} (см. рис. 6 на с. 59) и занести их в табл. 21.

Таблица 21

Результаты измерений по методу Ребиндера

$C_{ПАВ}$, моль/л	Высота поднятия жидкости в манометре					$\sigma \cdot 10^3$, Дж/м^2
	h_0, мм	h, мм				
		1	2	3	среднее	
0 (H_2O)						

Рассчитать по уравнению (23) значение σ (H_2O) при температуре опыта, после чего по формуле (34) вычислить значения поверхностных натяжений каждого из исследуемых растворов ПАВ (σ_i) и занести полученные значения в табл. 21.

$$\sigma_i = \sigma_{H_2O} \cdot \frac{h_i - h_{0,i}}{h_{H_2O} - h_0}, \text{ Дж/м}^2. \qquad (34)$$

Дальнейшие расчеты провести так же, как указано в варианте А.

Вариант Г

При выполнении работы для создания разрежения в системе вместо вакуумного насоса используется аспиратор (делительная воронка),

а для определения максимального давления, необходимого для образования пузырька воздуха в жидкости – наклонный манометр. Работа в данном случае выполняется по методике, описанной в издании [4, с. 22–25].

Контрольные вопросы

1. На какие группы делят методы определения поверхностного натяжения?
2. Приведите примеры статических, полустатических и динамических методов определения поверхностного натяжения жидких сред.
3. На основании чего осуществляется выбор метода измерения поверхностного натяжения той или иной жидкости?
4. Описать схему установки для определения поверхностного натяжения жидкости методом Ребиндера.
5. Привести формулы, используемые при определении поверхностного натяжения жидкости методом наибольшего давления в пузырьке воздуха.
6. Как экспериментально определяют значения избыточной адсорбции (адсорбции по Гиббсу) для растворов ПАВ?
7. Каким образом можно экспериментально определить значения констант в уравнении Лэнгмюра?
8. Как на основании результатов исследования адсорбции ПАВ на поверхности жидкости можно определить размер молекул этих ПАВ?

Лабораторная работа № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МИЦЕЛЛООБРАЗОВАНИЯ ИОНОГЕННОГО ПАВ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Теоретическая часть

Поверхностно-активными веществами называют вещества, снижающие поверхностное натяжение (σ) растворителя (например, воды). По способности к диссоциации ПАВ делят на *неионогенные*, которые в растворителе (воде) существуют только в виде молекул, и *ионогенные*, которые при растворении частично или полностью распадаются на ионы. По растворимости ПАВ делят на *истинно растворимые*, которые в растворе существуют только в виде молекул (или ионов), и *коллоидно-растворимые* (или просто *коллоидные*) ПАВ, которые при определенной концентрации способны образовывать агрегаты – *мицеллы*. Способностью к самоорганизации (*мицеллообразованию*) обладают ПАВ, которые имеют оптимальное соотношение гидрофобной (углеводородный радикал) и гидрофильной (полярная группа) частей, определяемое *гидрофильно-липофильным балансом* (ГЛБ). Значения ГЛБ для большинства ПАВ изменяются в пределах от 1 до 40, причем единице равен ГЛБ олеиновой кислоты ($C_{17}H_{15}COOH$), ГЛБ олеата натрия ($C_{17}H_{15}COONa$) составляет 18, а для додецилсульфата натрия ($C_{12}H_{25}OSO_3Na$) величина ГЛБ равна 40. Способность к мицеллообразованию проявляется у ПАВ при ГЛБ ≥ 12 (13), что наблюдается для веществ, углеводородный радикал которых содержит 8–18 атомов углерода.

Образование в растворах ПАВ мицелл сопровождается резким изменением различных физико-химических свойств раствора (рис. 9): возрастает светорассеяние (мутность (τ)), поверхностное натяжение (σ) перестает уменьшаться, на концентрационных зависимостях осмотического давления (π), показателя преломления (*n*), удельной (æ) и эквивалентной (λ) электропроводности появляются изломы.

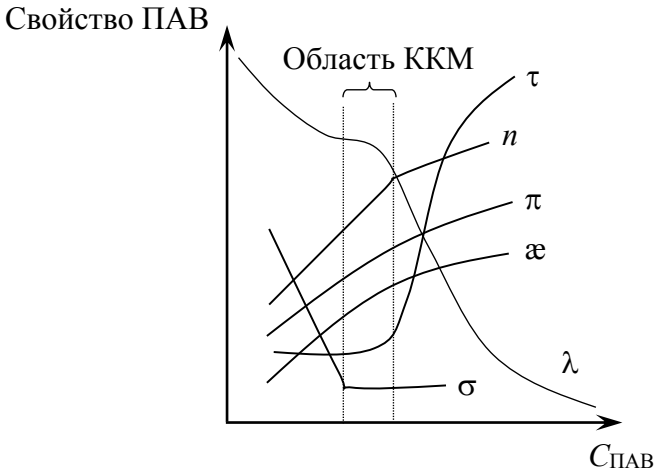


Рис. 9. Концентрационные зависимости различных свойств раствора коллоидного ПАВ:
τ – мутность; π – осмотическое давление;
æ – удельная электропроводность; *n* – показатель преломления;
λ – эквивалентная электропроводность;
σ – поверхностное натяжение

Концентрация ПАВ, при которой на изменении какого-либо физико-химического свойства раствора можно констатировать образование в нем мицелл, называется *критической концентрацией мицеллообразования* (ККМ). Для большинства коллоидных ПАВ величина ККМ находится в пределах 10^{-1}–10^{-4} моль/л, причем ее значение зависит (иногда весьма существенно) от метода определения ККМ.

Температура оказывает существенное влияние на величину ККМ, приводя к ее повышению вследствие возрастания растворимости ПАВ. Минимальной температурой, при которой в растворе ПАВ могут образовываться мицеллы, называется *температура (точка) Крафта*.

Строение мицелл определяется природой растворителя и концентрацией ПАВ в растворе. В полярных растворителях образуются прямые мицеллы, в которых к растворителю обращены полярные части молекул ПАВ, а неполярные (углеводородные радикалы) образуют ядро мицеллы (рис. 10). В неполярных растворителях формируются обратные мицеллы, ядро которых состоит из полярных групп, а к растворителю обращены углеводородные радикалы (рис. 10). При возрастании концентрации коллоидного ПАВ в растворе в нем образуются сферические мицеллы (*мицеллы Гартли*), которые при дальнейшем увеличении содержания ПАВ в растворе объединяются и образуют цилиндрические (палочкоообразные), дискообразные, пластинчатые мицеллы (*мицеллы Мак-Бена*) (рис. 10).

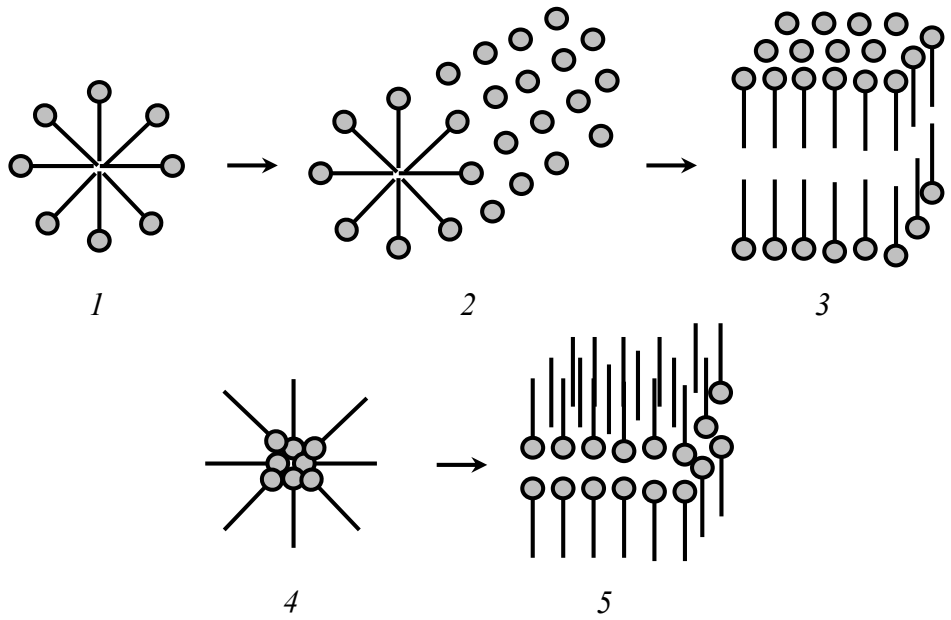


Рис. 10. Строение прямых (*1–3*) и обратных (*4–5*) сферических (*1*, *4*), цилиндрических (*2*) и пластинчатых (*3*, *5*) мицелл коллоидных ПАВ

Одним из важнейших свойств мицеллярных растворов коллоидных ПАВ является их способность к *солюбилизации*, представляющей собой аккумулирование мицеллами внутри себя значительного количества веществ, которые нерастворимы (практически нерастворимы) в дисперсионной среде (растворителе). Прямые мицеллы солюбилизируют неполярные вещества из полярных сред (прямая солюбилизация), а обратные – полярные из неполярных (обратная солюбилизация). Поглощенное мицеллами вещество называют *солюбилизатом*, а коллоидный ПАВ, образующий мицеллы, – *солюбилизатором*.

Количественно солюбилизацию характеризуют при помощи *солюбилизационной емкости*, которая представляет собой число молей солюбилизата, приходящееся на один моль коллоидного ПАВ, образующего мицеллы. Солюбилизационная емкость может быть достаточно большой. Так, растворимость октана (C_8H_{18}) в воде (H_2O) составляет около 0,0015%, а в 10%-ном растворе олеата натрия ($C_{17}H_{35}COONa$) она возрастает до 2%, увеличиваясь более чем на три порядка.

Солюбилизирующая способность мицелл и расположение солюбилизата в мицелле зависит от формы (строения) мицеллы и природы солюбилизата. Солюбилизирующая способность прямых мицелл выше, чем обратных ввиду большой величины внутренней части мицеллы, и возрастает при усложнении строения мицеллы. Углеводороды концентрируются в ядре прямой мицеллы, образуя там,

по сути, нанокапли солюбилизата. Вода аккумулируется во внутренней части обратной мицеллы. Малополярные вещества при солюбилизации располагаются вблизи поверхности мицеллы (изнутри), при удлинении углеводородного радикала солюбилизат перемещается во внутреннюю часть ядра мицеллы.

Порядок выполнения работы

Цель работы: кондуктометрическим методом определить критическую концентрацию мицеллообразования ионогенного коллоидного ПАВ.

Приборы, оборудование, реактивы: лабораторный модуль «Коллодиная химия», сетевой кабель, термодатчик, кондуктометр, соединительный кабель к датчику (2 шт.), магнитная мешалка, извлекатель магнитной мешалки, штатив с лапками (2 шт.), водный раствор додецилсульфата натрия (C_0 = 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,10 моль/л), водный раствор KCl (C_{KCl} = 0,01 моль/л), мерная колба на 50 мл (1 шт.), промывалка с дистиллированной водой.

Ход работы

1. Используя исходный раствор додецилсульфата натрия (концентрацию раствора указывает преподаватель) при помощи мерной колбы и мерного цилиндра путем последовательного разбавления приготовить и поместить в 10 пронумерованных стаканчиков раствор додецилсульфата натрия с концентрациями $C_0^{(10)}$, $C_0/2^{(9)}$, $C_0/4^{(8)}$, $C_0/8^{(7)}$, $C_0/16^{(6)}$, $C_0/32^{(5)}$, $C_0/64^{(4)}$, $C_0/128^{(3)}$, $C_0/250^{(2)}$ и $C_0/512^{(1)}$ (в скобках указан номер раствора (стаканчика)). Значения концентраций растворов занести в табл. 22.

2. В лапках закрепленных на лабораторном модуле штативов зафиксировать термодатчик и кондуктометр и при помощи соединительных кабелей подключить их к лабораторному модулю.

3. В чистый стаканчик на 50 мл залить приблизительно 30–40 мл раствора KCl для калибровки кондуктометра и опустить туда промытые дистиллированной водой термодатчик и кондуктометр так, чтобы они находились приблизительно в центре раствора и не касались дна стаканчика. Поместить в стаканчик магнитную мешалку.

Таблица 22

№ раствора	$C_{ПАВ}$, моль/л	$\ln(C_{ПАВ}$ / моль/л)	æ, См/м	ln(æ / См/м)	$\lambda \cdot 10^4$, $\frac{См \cdot м^2}{моль\ экв}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

4. Подключить лабораторный модуль к сети и включить его тумблером, расположенным на правой стороне модуля. Нажать центральную кнопку и в качестве типа эксперимента выбрать «Одиночное измерение». На вкладке «Устройства» выделить «Мешалку» и «Термодатчик». Перейти на вкладку «Проверка» и нажать «Начать эксперимент». Включить магнитную мешалку (скорость перемешивания 3–5) и через 1–2 мин измерить температуру раствора.

5. Длительным нажатием кнопки ◄ вернуться в меню выбор эксперимента, вновь выбрать «Одиночное измерение» и на вкладке «Устройства» подключить «Мешалку», «УЭП» и «Термодатчик». Перейти во вкладку «Проверка» и выбрать «УЭП». Во вкладке «Калибровка» ввести соответствующее температуре значение удельной электропроводности 0,01 н раствора KCl [5]. После калибровки кондуктометра нажать кнопку «Начать эксперимент».

6. Отключить мешалку, извлечь из раствора кондуктометр, термодатчик и магнитную мешалку и постепенно ополоснуть их дистиллированной водой, после чего поместить в раствор, находящийся в стакане № 1 ($C = C_0 / 512$).

Длительным нажатием кнопки ◄ вернуться в меню выбор эксперимента, вновь выбрать «Одиночное измерение» и на вкладке «Параметр» установить единицу измерения дополнительного параметра «моль/л», а шаг изменения дополнительного параметра выбрать равным нулю. Перейти во вкладку «Проверка» и нажать кнопку «Начать эксперимент».

Включить магнитную мешалку, в окне «Дополнительный параметр» установить значение концентрации первого раствора и через 1–2 мин, когда значение УЭП престанет изменяться, зафиксировать результат нажатием кнопки «Измерить», занести его в табл. 22.

7. Отключить мешалку, извлечь из исследованного раствора № 1 кондуктометр, термодатчик и магнитную мешалку, после чего поместить их в раствор № 2, аналогичным образом измерить его электропроводность и занести результат в табл. 22.

8. Повторить эксперимент с растворами № 3–10 в порядке возрастания их электропроводности.

Просмотреть результаты измерений можно во вкладке «Результаты» (численные значения) или «Графики» (графические зависимости). Полученные данные можно сохранить на внешний носитель информации (в формате *.csv или *.txt) либо распечатать, подключив к лабораторному модулю внешний носитель информации (верхний USB-порт) или принтер.

9. Отключить мешалку, извлечь термодатчик и кондуктометр из раствора, после чего тщательно промыть их дистиллированной водой. Отключить термодатчик и кондуктометр от лабораторного модуля и вернуть их и соединительные кабели в контейнер.

10. Вылить исследованные растворы и тщательно ополоснуть всю использованную в лабораторной работе посуду дистиллированной водой.

11. Рассчитать значение $\ln C$, $\ln æ$ и λ, используя формулу (35):

$$æ = 10^3 C\lambda, \qquad (35)$$

после чего занести полученные данные в табл. 22 и по ним построить зависимости $æ = f(C)$, $\lambda = f(C)$, $\ln æ = f(\ln C)$ и $\lambda = f(C^{0,5})$. По излому кривых на зависимостях определить величину критической концентрации мицеллообразования додецилсульфата натрия при температуре эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Что такое коллоидные ПАВ? Чем они отличаются от истинно растворимых?

2. На какие виды можно разделить ПАВ?

3. На основании какого параметра можно судить о способности данного ПАВ к мицеллообразованию?

4. Что такое мицелла? Какие мицеллы могут образовывать коллоидные ПАВ в растворе?

5. Что такое критическая концентрация мицеллообразования? Какие значения она может принимать для типичных коллоидных ПАВ?

6. Каким образом на практике определяют ККМ?

7. Что такое солюбилизация? Как ее можно охарактеризовать количественно?

8. Какая солюбилизация эффективнее, прямая или обратная? Почему?

9. Каким образом молекулы солюбилизата могут располагаться в прямых и обратных мицеллах?

10. Какие физико-химические свойства растворов коллоидных ПАВ изменяются при ККМ? Каким образом? Почему это происходит?

11. ККМ каких коллоидных ПАВ нельзя определить кондуктометрическим методом? Почему?

ЛИТЕРАТУРА

1. Кагиров, А. Г. Лабораторный практикум «Коллоидная химия»: метод. указания / А. Г. Кагиров. – Томск: изд. XXX, 2017. – 80 с.

2. Оствальд, В. Краткое практическое руководство по коллоидной химии, пер. с нем. / В. Оствальд; под ред. Б. В. Бызова; 2-е изд. – М.: ЛИБРОКОМ, 2010. – 176 с.

3. Клындюк, А. И. Поверхностные явления и дисперсные системы: учеб. пособие / А. И. Клындюк. – Минск: БГТУ, 2011. – 317 с.

4. Поверхностные явления и дисперсные системы: лаб. практикум для студентов хим.-технол. специальностей / А. А. Шершавина [и др.]. – Минск: БГТУ, 2005. – 104 с.

5. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А. А. Равделя, А. М. Пономаревой. – 8-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 5
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 6
Оформление отчета 6
Приближенные величины и действия с ними 7
Ошибки измерений 7
Графическое отображение экспериментальных данных 8
Лабораторная работа № 1. ПОЛУЧЕНИЕ ЭМУЛЬСИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ 10
Теоретическая часть 10
Порядок выполнения работы 12
Ход работы 13
Контрольные вопросы 15
Лабораторная работа № 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА КОАГУЛЯЦИИ ГИДРОЗОЛЯ ГИДРОКСИДА ЖЕЛЕЗА 17
Теоретическая часть 17
Порядок выполнения работы 20
Ход работы 20
Контрольные вопросы 22
Лабораторная работа № 3. ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРОЗОЛЕЙ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОЙ КОНДЕНСАЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ 23
Теоретическая часть 23
Порядок выполнения работы 25
Ход работы 25
Контрольные вопросы 28
Лабораторная работа № 4. ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРОЗОЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ПЕПТИЗАЦИИ 30
Теоретическая часть 30
Порядок выполнения работы 31
Ход работы 31
Контрольные вопросы 33

Лабораторная работа № 5. КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИИ ФУРАЦИЛИНА НА УГЛЕ 34
Теоретическая часть 34
Порядок выполнения работы 38
Ход работы 38
Контрольные вопросы 41
Лабораторная работа № 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТОЧКИ БЕЛКА 42
Теоретическая часть 42
Порядок выполнения работы 43
Ход работы 44
Контрольные вопросы 47
Лабораторная работа № 7. КОАГУЛЯЦИЯ ЖЕЛАТИНА ПУТЕМ ДЕГИДРАТАЦИИ ЕГО СПИРТОМ В ИЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТОЧКЕ 48
Теоретическая часть 48
Порядок выполнения работы 48
Ход работы 49
Контрольные вопросы 50
Лабораторная работа № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГИДРОЗОЛЯ МЕТОДОМ МАКРОЭЛЕКТРОФОРЕЗА 51
Теоретическая часть 51
Порядок выполнения работы 53
Ход работы 54
Контрольные вопросы 54
Лабораторная работа № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ ПАВ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ «ЖИДКОСТЬ – ГАЗ» 56
Теоретическая часть 56
Порядок выполнения работы 62
Ход работы 62
Контрольные вопросы 66
Лабораторная работа № 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МИЦЕЛЛООБРАЗОВАНИЯ ИОНОГЕННОГО ПАВ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ 67
Теоретическая часть 67
Порядок выполнения работы 70
Ход работы 70
Контрольные вопросы 72
ЛИТЕРАТУРА 74

Учебное издание

Клындюк Андрей Иванович
Шевченко Светлана Валерьевна
Тарасевич Александр Васильевич
Чижова Екатерина Анатольевна

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ

Лабораторный практикум

Учебно-методическое пособие

Редактор *Т. Е. Самсанович*
Компьютерная верстка *Е. В. Ильченко*
Дизайн обложки *П. П. Падалец*
Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 16.06.2022. Формат $60\times84^{1}/_{16}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 4,4. Уч.-изд. л. 4,6.
Тираж 200 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.