

УДК 541.183/.183.7

СОРБЦИЯ КРАСИТЕЛЯ НЕЙТРАЛЬНОГО КРАСНОГО ЭНТЕРОСОРБЕНТОМ ПОЛИСОРБОМ МП ИЗ МИКРОЭМУЛЬСИИ АОТ В *n*-ДЕКАНЕ

© 2025 г. М. Г. Демидова¹, Т. Ю. Подлипская¹, Н. О. Шапаренко^{1, *}, М. К. Баракина^{1, 2},
В. В. Татарчук¹, А. И. Булавченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им А.В. Николаева
СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090 Россия

²Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: nikshapar@mail.ru

Поступила в редакцию 10.12.2024 г.

После доработки 21.01.2025 г.

Принята к публикации 23.01.2025 г.

Проведена сорбция катионного красителя нейтрального красного Полисорбом МП из микроэмульсии 0.25 моль/л АОТ в *n*-декане при различных содержаниях водной псевдофазы. Предельная сорбционная емкость сорбента в микроэмульсии на порядок превысила соответствующую в водной фазе и составила 55 мг/г. Продемонстрированы резкое падение степени извлечения при увеличении содержания воды в микроэмульсии от 1 до 9 объемных процентов и обратимость сорбционных процессов. Анионные красители в тех же системах Полисорбом не извлекались. С ростом содержания воды дзета-потенциал частиц SiO₂ уменьшался с 18 до 1 мВ. На основании полученных зависимостей предложен катионообменный механизм микроэмульсионной сорбции, включающий обмен катионов натрия и нейтрального красного между мицеллами, адсорбированными на поверхности частиц, и мицеллами в объеме микроэмульсии.

Ключевые слова: адсорбция, микроэмульсии, бис(2-этилгексил)сульфосукцинат натрия, наночастицы SiO₂, электрокинетический потенциал

DOI: 10.31857/S0023291225020032, EDN: TPERXM

ВВЕДЕНИЕ

Микроэмульсии широко используются в самых разнообразных технологических процессах. На их основе разрабатываются рецептуры нефтевытесняющих композиций [1]. Малый размер и динамический характер микроэмульсионных капель делают микроэмульсии удобными нанореакторами-темплатами для синтеза самых разнообразных наночастиц [2]. Благодаря уникальным фазовым и структурным трансформациям микроэмульсии незаменимы в качестве переносчиков и доставщиков БАДов и лекарственных препаратов [3]. Также следует отметить катализ [4], биотехнологии, пищевые и косметические направления [5].

Сорбция красителей из водных сред является актуальной задачей в связи с растущими загрязнениями водоемов отходами текстильных и кожевенных производств [6]. Проблемы выросли до такой степени, что ряд исследователей считает, что органические

растворители и обратные микроэмульсии более перспективны в процессах крашения, в том числе и с экологических позиций [7, 8]. Между тем исследованиям сорбции из органических растворителей на неорганические сорбенты посвящены единичные работы [9]. А публикаций, описывающих сорбцию из обратных микроэмульсий на неорганические сорбенты в научной литературе нами не обнаружено. В практике сорбционных процессов микроэмульсии также применялись, но только на стадии преобразования сорбентов для дополнительной функционализации с целью усиления их сорбционных способностей [10]. Также мало публикаций по применению Полисорба МП в ряде важных химических-технологических процессов [11, 12].

В фотovoltaике и фотокатализе для формирования фотоактивных электродов используют природные и синтетические водонерастворимые красители [13]. В этом случае, естественно, сорбция проводится из органических растворителей, что зачастую приводит

к более плотному контакту краситель/оксид и в конечном счете к увеличению КПД устройств [14].

Цель представленной работы заключалась в исследовании закономерностей сорбции красителя нейтрального красного на частицы энтеросорбента Полисорба МП из микроэмульсии АОТ в *n*-декане. В качестве основного фактора, влияющего на свойства микроэмульсии, в работе использовали объемную долю воды в микроэмульсии, выраженную в процентах, и параметр *W*, равный отношению молярных концентраций воды и АОТ. Несколько слов об используемой в работе терминологии. Исследуемый диапазон содержаний воды изменялся от 0 до 9 об. %. т.е. фактически мы переходили от мицеллярных растворов к микроэмульсиям АОТ. В мицеллярных растворах для обозначения агрегатов ПАВ используются термины «мицеллы», или «сухие мицеллы». В микроэмульсиях – «капли», или «набухшие (swollen) мицеллы» [15]. Однако в большинстве публикаций (в том числе и русскоязычных) прилагательное «набухшие» зачастую опускается и для обеих систем для простоты используется термин «мицеллы». Хотя разница в их структурах всегда подразумевается.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Полисорб МП (кремния диоксид коллоидный) получен по реакции прямого синтеза термическим окислением кремния в атмосфере кислорода (АО «Полисорб», Россия, серия образца П16050324). Растворителями служили *n*-декан (99%, ОАО «РЕАКТИВ») и дистиллированная вода с удельной электропроводностью 2 мкСм/см и рН = 5.5. В качестве модельного катионного красителя служил нейтральный красный (НК, ч. д. а., АО «ЛенРеактив»). Для формирования микроэмульсий использовали следующие ПАВ: бис(2-этилгексил)сульфосукцинат натрия (Аэрозоль ОТ, АОТ, Sigma-Aldrich, 97%), сорбитан моноолеат (Span 80, Sigma-Aldrich) и Бридж-30 (Acros Organics). Концентрация всех ПАВ в микроэмульсиях составляла 0.25 М. Водный раствор красителя вводился в мицеллярный раствор ПАВ методом инъекционной солюбилизации [16, 17].

Методы исследования

Порошок сорбента исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (микроскоп JEM 2010, JEOL, Япония). Частицы SiO₂ в полученных микроэмульсиях характеризовали методами фотон-корреляционной спектроскопии (ФКС), определение коэффициента диффузии) и фазового анализа рассеянного света (PALS, определение электрофоретической подвижности). Для каждой системы проводили по 30 параллельных измерений. Эффективный гидродинамический диаметр рассчитывали

из коэффициентов диффузии по уравнению Стокса-Эйнштейна [18]. Электрокинетический потенциал определяли из электрофоретической подвижности по формулам Генри в приближении Ошима [19]. Для корректного выбора формулы расчета измеряли электропроводность всех дисперсий и оценивали отношение приведенной толщины двойного электрического слоя (ДЭС) к диаметру частицы. Методики и оборудование методов светорассеяния описаны в наших ранних работах [20, 21].

Сорбционные процедуры

Для проведения сорбции 20 мг порошка вводили в 10 мл микроэмульсии с солюбилизированным красителем. Несколько раз встряхивали вручную, затем перемешивали в течение 30 минут на механическом перемешивателе (модель 3025 фирмы GFL, Германия). Сорбцию из водных растворов проводили аналогично. После перемешивания дисперсию центрифугировали 10 минут при скорости вращения 1500 об/мин (центрифуга ОС-6М); рафинат отделяли, исходную ($C_{исх}$, мг/мл) и равновесную концентрации красителя ($C_{равн}$, мг/мл), степень извлечения (R , %) и сорбцию (G , мг/г) определяли спектрофотометрически. Градуировочные зависимости для всех систем были прямолинейными и хорошо воспроизводимыми. Электронные спектры поглощения красителей в воде и в микроэмульсиях регистрировали на спектрофотометре UV-1700 (Shimadzu, Япония) в кварцевых кюветах 1 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Растворы нейтрального красного в воде и в микроэмульсии АОТ

Спектры поглощения нейтрального красного и градуировочные зависимости в воде и в микроэмульсии АОТ приведены на рис. 1. В микроэмульсии в зависимости от содержания водной псевдофазы отмечен красный сдвиг, свидетельствующий о стабилизации основного состояния красителя (рис. 2а). Разность между длинами волн ($\Delta\lambda$) на максимуме спектров поглощения НК в воде и в микроэмульсии в зависимости от содержания воды и параметра *W* представлена на рис. 2б.

Аналогичные сольватохромные эффекты, обнаруженные при зондировании полярности обратных мицелл АОТ метиленовым синим, авторы работы [22] трактовали следующим образом. Вследствие электростатических взаимодействий катиона красителя с отрицательным зарядом молекулы АОТ, краситель локализуется в поверхностном слое мицеллы рядом с полярной группой. В области низких содержания воды до 1 об. % ($W < 2$) ее молекулы не связаны с полярными группами АОТ; часть молекул

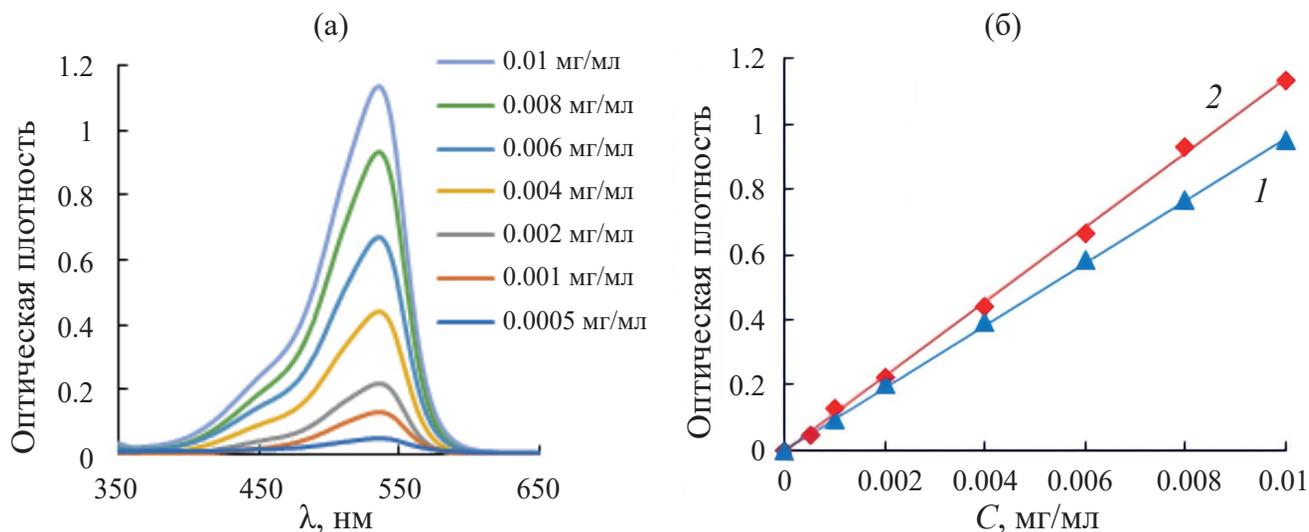


Рис. 1. Спектры поглощения НК в микроэмульсии АОТ в *n*-декане в зависимости от концентрации НК (а), и градуировочные зависимости для воды (1) и микроэмульсии (2) (б). Содержание воды в микроэмульсии 0.4 об. %.

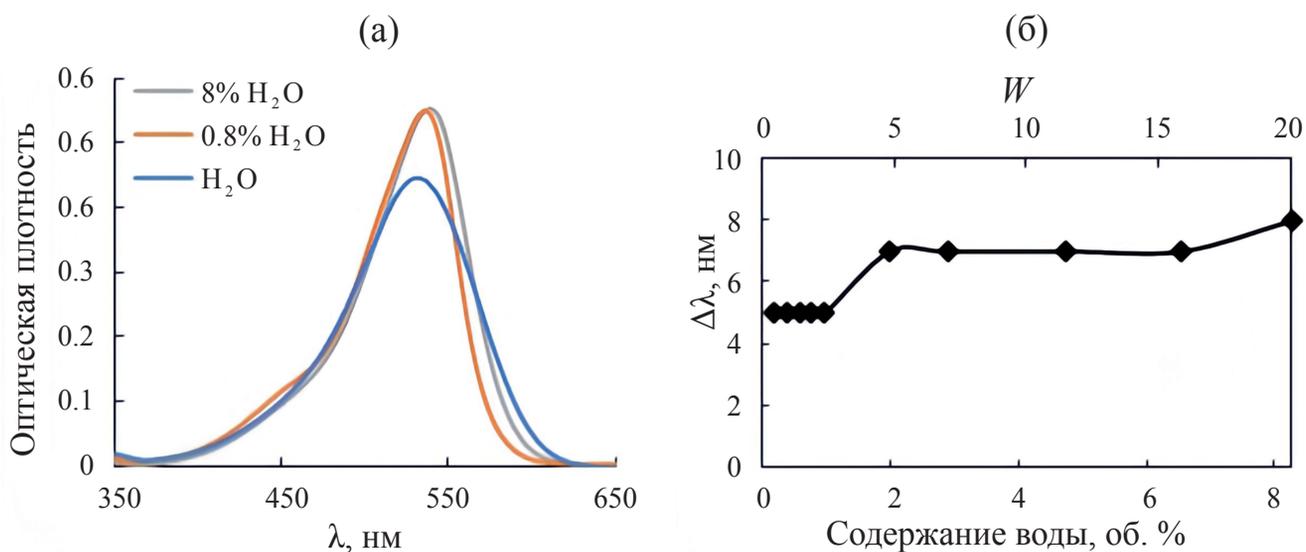


Рис. 2. Спектры поглощения НК (0.005 мг/мл) в воде и микроэмульсии при содержаниях воды 0.8 и 8 об. % (а) и зависимость величины смещения λ_{max} спектра поглощения НК в микроэмульсии относительно его водного раствора от содержания воды в микроэмульсии и параметра W (б).

расположена вокруг углеводородных радикалов. Молекулы воды присутствуют в виде мономеров и димеров и способны проникать в гидрофобный поверхностный слой. В этой области микроокружение красителя-зонда не изменяется, и $\Delta\lambda$ остается неизменной. При увеличении содержания воды до 2 об. % ($2 < W < 5$) молекулы воды начинают гидратировать ион натрия и сульфогруппу. В этом диапазоне окружение зонда изменяется, что приводит к изменению $\Delta\lambda$. Дальнейший рост объемного содержания воды свыше 2 об. % ($W > 5$) приводит к формированию водного ядра мицеллы, в котором вода уже начинает проявлять объемные свойства. Микроокружение красителя не изменяется, и $\Delta\lambda$ остается постоянной. Таким образом, можно сделать вывод, что во всем

диапазоне содержаний водной псевдофазы катионный краситель нейтральный красный находится в поверхностном слое мицеллы.

На рис. 3 приведена зависимость гидродинамического диаметра мицелл от объемного содержания водной псевдофазы. С увеличением содержания воды размер мицелл закономерно увеличивается [23].

Свойства частиц в микроэмульсии АОТ в *n*-декане

На рис. 4 представлены микрофотографии частиц Полисорба МП и функция распределения первичных частиц по размерам. Средний диаметр первичных частиц по данным ПЭМ составил 11 ± 2 нм.

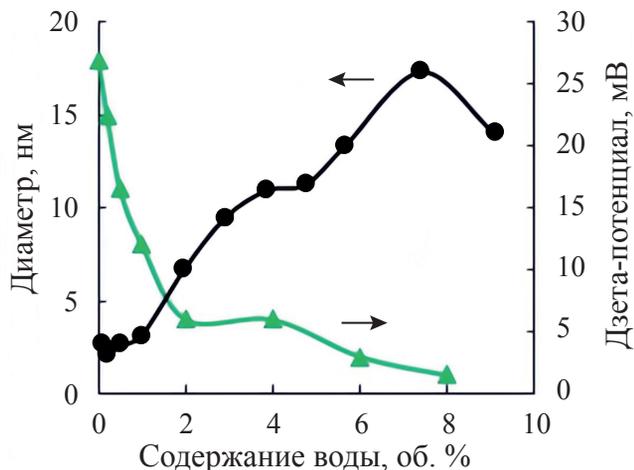


Рис. 3. Зависимость гидродинамического диаметра мицелл АОТ и дзета-потенциала частиц Полисорба от содержания водной псевдофазы в микроэмульсии.

В то же время среднечисленный гидродинамический диаметр частиц в микроэмульсиях и в водных дисперсиях, по данным ФКС, не изменялся и составлял примерно 100 нм. Гидродинамический диаметр частиц Полисорба МП в воде и в микроэмульсии АОТ значительно превышает размер первичных частиц, представленных на рис. 4. Это свидетельствует о том, что первичные частицы SiO₂ в обеих системах связаны в агрегаты.

Электрокинетический потенциал в воде составил -25 ± 3 мВ. В микроэмульсиях скорость движения агрегатов была прямо пропорциональна

приложенному полю, что свидетельствует о выполнении критериев «классического» линейного электрофореза [24, 25]. Из данных, приведенных на рис. 3, следует, что начиная с 1 об. % дзета-потенциал уменьшается вплоть до нулевых значений. В отличие от гидрозолей, все частицы в микроэмульсии АОТ были заряжены положительно.

В ряде работ по неводному электрофорезу показано, что поверхностный заряд на частицах при концентрациях АОТ, превышающих критическую концентрацию мицеллообразования (ККМ), возникает в результате адсорбции заряженных мицелл [26, 27] (в англоязычной литературе их называют по-разному [28], мы будем использовать термин «поверхностные» мицеллы). Свободные ионы в мицеллах возникают по реакции диспропорционирования молекул АОТ в полярных ядрах [29, 30].

Далее в результате флуктуаций состава в процессе межмицеллярного обмена определенная часть мицелл приобретает положительный заряд, обусловленный избытком ионов натрия. Столько же мицелл заряжаются отрицательно вследствие избытка анионов АОТ⁻. Судя по положительной электрофоретической подвижности частиц, на поверхность SiO₂ предпочтительно адсорбируются мицеллы, содержащие Na⁺. В качестве противоионов двойного электрического слоя (ДЭС) выступают мицеллы с избытком АОТ⁻.

На схеме (графический абстракт) частица сорбента представлена не монолитом, а сферическим агрегатом с плотной упаковкой частиц на поверхности (структура типа «ягода малины» [31] получена методом прямой оптимизации [32]).

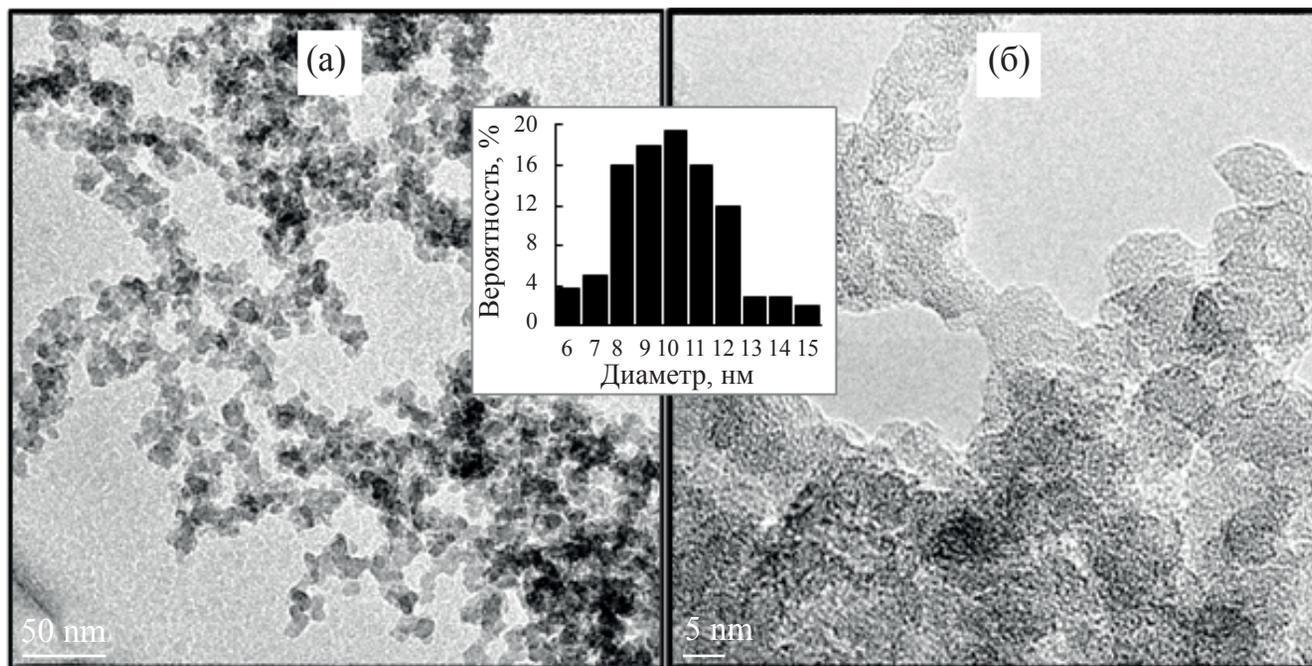


Рис. 4. ПЭМ (а) и ПЭМ ВР (б) – фотографии порошка Полисорба МП и функция распределения первичных частиц по размерам (на врезке).

*Гипотетический механизм сорбции
из водных растворов и микроэмульсий*

На рис. 5 приведены изотермы сорбции и степени извлечения красителя НК из воды и микроэмульсии. Изотерма в случае сорбции из водных растворов (зависимость 1) выходит на насыщение. В случае микроэмульсии (зависимость 2) насыщения достичь не удалось. Крайняя точка соответствует предельной растворимости НК в воде, и дальше продвигаться по изотерме не представляется возможным. Тем не менее максимальная адсорбция из микроэмульсии на порядок превышает предельную адсорбцию из водной фазы. Процесс сорбции обратим. После проведения сорбции в микроэмульсию, содержащую 0.4 об. % воды, при перемешивании на магнитной мешалке с помощью инъекционной солубилизации содержание воды увеличили до 5 об. %. После нескольких минут перемешивания краситель практически полностью перешел с сорбента в микроэмульсию (степень десорбции составила 85%). Далее нагреванием сорбционной системы при 80°C в течение 30 минут при перемешивании в открытом стакане содержание воды вновь уменьшили до 0.4 об. %. В процессе охлаждения до комнатной температуры (20°C) краситель вновь адсорбировался на диоксид кремния. Степень извлечения из микроэмульсии составила 92%. Такую процедуру можно было проводить многократно.

Степени извлечения, рассчитанные по начальным участкам изотерм (области Генри) близки для водных растворов и микроэмульсий. При исходных концентрациях красителя, больших 0.005 мг/мл, степень извлечения из водных растворов монотонно уменьшается, в то время как в случае микроэмульсии остается постоянной. Такое поведение обусловлено видом изотерм сорбции. Угол наклона зависимости 2 практически не изменяется во всей области

концентраций, что свидетельствует о постоянстве коэффициента распределения и, соответственно, степени извлечения для микроэмульсии. В случае сорбции из водных растворов в области низких концентраций зависимость сорбции от равновесной концентрации прямолинейна (см. врезку на рис. 5а); с ростом концентрации зависимость выходит на насыщение. Поэтому при постоянной сорбции и увеличении исходной концентрации степень извлечения закономерно падает. Отметим, что степень извлечения красителя Полисорбом из микроэмульсии превышает соответствующую из водных растворов; что позволяет проводить микроэмульсионную сорбцию с хорошим извлечением в более широком концентрационном диапазоне красителя.

Уменьшение сорбции с ростом содержания воды в микроэмульсии (зависимость 3) может быть обусловлено рядом факторов. Концентрация красителя в этих опытах в пересчете на весь объем микроэмульсии была такой же, как при проведении сорбции из водного раствора. Однако непосредственно в водных пулах обратных мицелл при низком содержании водной псевдофазы она будет намного выше, чем при высоком. Тем более по сравнению с концентрацией НК при сорбции из водных растворов. Поэтому микроэмульсия обеспечивает более высокую концентрацию красителя на поверхности сорбента [33]. И эта концентрация будет тем выше, чем меньше воды солубилизировано. Другим фактором является уменьшение дзета-потенциала частиц Полисорба с ростом содержания воды. Следует также отметить, что содержание воды в мицеллах влияет на степень гидратации красителя и полярной группы молекулы АОТ. На данном этапе исследований можно сделать вывод, что для успешной сорбции катионных красителей микроэмульсией

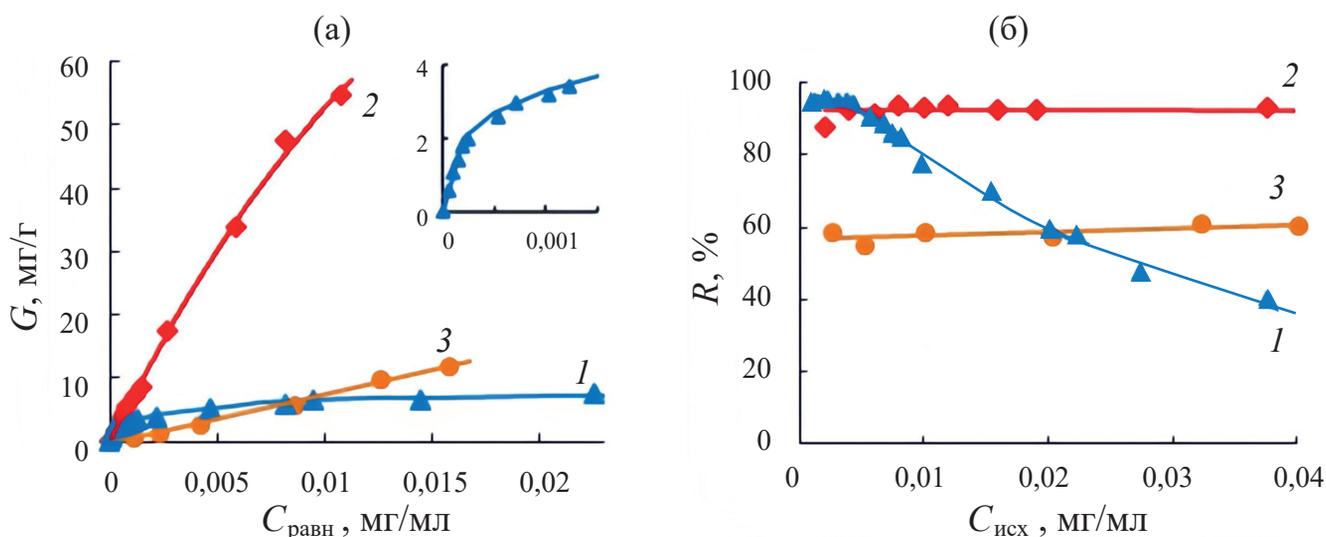
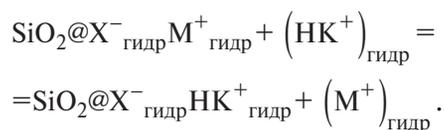


Рис. 5. Изотермы сорбции (а) и степени извлечения (б) НК из воды (1) и микроэмульсий с содержанием водной псевдофазы: 0.4 (2) и 1.5 об. % (3). На врезку рис. а приведена зависимость 1 в области низких концентраций.

АОТ необходимыми условиями являются наличие на поверхности заряженных мицелл и низкое содержание воды в микроэмульсии.

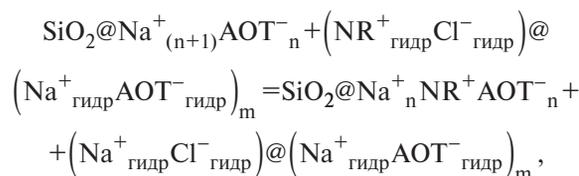
Таким образом, мы имеем парадоксальную ситуацию: один и тот же катионный краситель адсорбируется из водных растворов Полисорбом МП на отрицательно заряженные частицы, а из микроэмульсий АОТ — на положительные. Ситуация в первом случае хорошо известна и предсказуема: по-видимому, имеет место катионообменная сорбция [34]. В отсутствие красителей частицы SiO_2 в воде несут отрицательный заряд, следовательно, в качестве противоионов могут выступать протон, или катионы металлов, присутствующие в Полисорбе МП в качестве примесей. Обозначим их как M^+ , а функциональные группы на поверхности оксида кремния (силанольные SiOH , силандиольные $\text{Si}(\text{OH})_2$ и силантриольные $\text{Si}(\text{OH})_3$ [35]) как X ; катион красителя — НК^+ . В общем виде уравнение катионного обмена можно представить как:



Движущей силой сорбции может быть как разность энергий гидратаций обменивающихся ионов, так и разность электростатических взаимодействий [36].

В случае микроэмульсии ситуация сложнее. В связи с чем последующие рассуждения имеют сугубо гипотетический характер. Как отмечалось выше, при концентрациях АОТ, значительно превышающих ККМ, заряд частицы формируют положительно заряженные мицеллы. Положительный заряд мицелл создает катион натрия. Эти «поверхностные» положительно заряженные мицеллы конкурируют с «обычными» мицеллами, находящимися в объеме микроэмульсии, за право обладать красителем. Зависимость степени извлечения от содержания водной псевдофазы в 0.25 М АОТ (рис. 6) свидетельствует о том, что при малых содержаниях водной псевдофазы красителю энергетически более выгодно находиться в поверхностных мицеллах, при больших — наоборот. При этом многие качественно тестируемые нами анионные красители (тимоловый синий, метиловый оранжевый, ализариновый красный, тартразин кислотный желтый, эозин К розовый) не сорбировались из микроэмульсии ни при каких условиях; а ряд катионных красителей (родамин Ж, малахитовый зеленый, бриллиантовый зеленый, метиленовый синий) сорбировались аналогично нейтральному красному. В то же время из микроэмульсий, образованных неионными ПАВ (Span 80, Brij-30), сорбции катионных красителей не наблюдается. Также зависимость степени извлечения от солюбилизационной емкости коррелирует с аналогичной зависимостью дзета-потенциала (рис. 3), поэтому логично предположить,

что и в случае микроэмульсий сорбция нейтрального красного также протекает по реакции катионного обмена:



где n и m — числа агрегации поверхностных и объемных мицелл, соответственно. Избыточный катион натрия в поверхностной мицелле меняется на катион красителя НК^+ . Такой обмен более выгоден, на наш взгляд, по следующим соображениям. Условия гидратации на поверхности частицы при низких содержаниях водной псевдофазы более жесткие, так как молекулы воды взаимодействуют еще и с поверхностными функциональными группами SiO_2 . Поэтому обмен малого катиона Na^+ на большой НК^+ более энергетически выгоден [36]. Добавление в микроэмульсию воды приводит к постепенному выравниванию условий гидратации, и катионный обмен становится менее выгодным. Кроме того, уменьшается и число положительно заряженных мицелл (адсорбционных центров) на поверхности частиц. К сожалению, данных по гидратации красителей в обратных мицеллах АОТ не так много. Например, в недавней статье японских авторов [37] показано, что сольватационная динамика гидратированных молекул воды становится «жидкоподобной» только при диаметре водного ядра мицеллы, большего 4 нм. В качестве зонда авторы использовали родамин Ж, а растворителем АОТ служил изооктан. Зонд был локализован, по мнению авторов, в центре водного пула мицеллы.

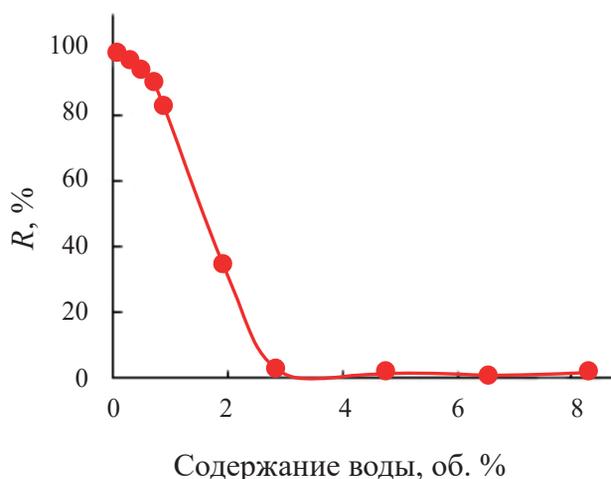


Рис. 6. Степень извлечения НК в зависимости от содержания воды в микроэмульсии АОТ в декане. Исходная концентрация НК составляла 0.005 мг/мл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые показана возможность адсорбции катионного красителя нейтрального красного на частицы SiO₂ (классический неорганический сорбент) из микроэмульсии АОТ. Следует обратить внимание на то, что катионный краситель сорбируется на положительно заряженную частицу. Это, на наш взгляд, одна из специфических особенностей еще практически не изученного механизма сорбции красителей на частицы из микроэмульсий. В водных системах такое встречается крайне редко, когда на электростатический механизм сорбции накладываются другие более сильные взаимодействия. Предложен катионообменный механизм сорбции, основанный на переходе красителя из мицелл, находящихся в объемной фазе микроэмульсии, в мицеллы на поверхности частицы. Движущей силой обмена являются концентрационные эффекты, обусловленные повышенной концентрацией красителей в мицеллах, и гидратационные эффекты, различные для поверхностных и объемных мицелл. Отметим гипотетический характер предложенного механизма сорбции; для его подтверждения необходимы дополнительные исследования. В принципе, возможны и другие варианты, обусловленные специфическим кислотно-основным поведением НК в микроэмульсии АОТ [38]. Однако серьезных изменений в спектрах поглощения нами не обнаружено.

В перспективе дисперсии Полисорба МП с адсорбированными красителями (а многие катионные красители обладают лекарственными свойствами [39]) в обратных микроэмульсиях могут быть задействованы в технологиях фармацевтической доставки (drug delivery systems [40]). Обратимость процесса сорбции, несомненно, будет этому способствовать. Для этого в первую очередь будет необходимо стабилизировать дисперсию частиц Полисорба МП в микроэмульсиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-03-00017) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700315-2).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bera A., Mandal A. Microemulsions: a novel approach to enhanced oil recovery: a review // *J. Petrol. Explor. Prod. Technol.* 2015. V. 5. P. 255–268. <https://doi.org/10.1007/s13202-014-0139-5>
2. Федоренко С.В., Степанов А.С., Бочкова О.Д., Муштафина А.П. Основные процессы, способствующие формированию композитных кремнеземных нанокolloидов, допированных комплексами d-, f-металлов и неорганическими наночастицами // *Коллоид. журн.* 2022. Т. 84. № 5. С. 630–641. <https://doi.org/10.31857/S0023291222600067>
3. Мурашова Н.М., Нгуен Х.Т. Микроэмульсии лецитина с маслом гака и эфирным маслом куркумы // *Коллоид. журн.* 2023. Т. 85. № 2. С. 191–199. <https://doi.org/10.31857/S0023291223600049>
4. Schwarze M., Pogrzeba T., Volovych I., Schomacker R. Microemulsion systems for catalytic reactions and processes // *Catal. Sci. Technol.* 2015. V. 5. P. 24–33. <https://doi.org/10.1039/c4cy01121j>
5. Gradzielski M., Duvail M., Malo de Molina P., Simon M., Talmon Y. Using microemulsions: formulation based on knowledge of their mesostructured // *Chem. Rev.* 2021. V. 121. № 10. P. 5671–5740. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00812>
6. Agarwala R., Mulky L. Adsorption of dyes from wastewater: a comprehensive review // *ChemBioEng Reviews.* 2023. V. 10. № 3. P. 326–335. <https://doi.org/10.1002/cben.202200011>
7. Yi S., Deng Y., Sun S. Adsorption and dyeing characteristics of reactive dyes onto cotton fiber in nonionic Triton X-100 reverse micelles // *Fibers Polym.* 2014. V. 15. P. 2131–2138. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-2131-6>
8. Tang Y.L., Jin S., Lee C.H., Law H.S., Yu J., Wang Y., Kan C. Reverse micellar dyeing of cotton fabric with reactive dye using biodegradable non-ionic surfactant as nanoscale carrier: an optimization study by one-factor-at-one-time approach // *Polymers.* 2023. V. 15. № 20. P. 4175. <https://doi.org/10.3390/polym15204175>
9. Sharma R., Kar P.K., Dash S. Adsorption of a styrylpyridinium dye on silica and modified silica surfaces from some binary solvent mixtures—should we call it solvent-induced preferential adsorption? // *J. Phys. Chem. C.* 2023. V. 127. P. 20539–20548. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c05023>
10. Khraishes M.A.M., Al-ghouti M.S. Enhanced dye adsorption by microemulsion-modified calcined diatomite (μE-CD) // *Adsorption.* 2005. V. 11. P. 547–559. <https://doi.org/10.1007/s10450-005-5612-5>
11. Skrabkova H.S., Bubenschikov V.B., Kodina G.E., Lunev A.S., Larenkov A.A., Epshtein N.B., Kabashin A.V. ⁶⁸Ga-adsorption on the Si-nanoparticles // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2019. V. 487. P. 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/487/1/012026>

12. *Shklyayeva A.S., Vasilieva O.V., Kucuk V.I.* The study of physical and chemical properties aqueous dispersion of enterosorbent Polysorb MP // *Butlerov Commun.* 2013. V. 35. P. 94–99.
13. *Shah Z.A., Zaib K., Khan A., Saeed M.* Dye sensitized solar cells based on different solvents: comparative study // *J. Fundam. Renewable Energy Appl.* 2017. V. 7. № 4. P. 1000234. <https://doi.org/10.4172/2090-4541.1000234>
14. *Fang H., Ma J., Wilhelm M.J., DeLacy B.G., Dai H.L.* Influence of solvent on dye-sensitized solar cell efficiency: what is so special about acetonitrile? // *Particles and Particle Systems Characterization.* 2021. V. 38. P. 2000220. <https://doi.org/10.1002/ppsc.202000220>
15. *Eicke H.F.* Aggregation in surfactant solutions: formation and properties of micelles and microemulsions // *Pure Appl. Chem.* 1980. V. 52. P. 1349–1357.
16. *Булавченко А.И., Батищева Е.К., Подлипская Т.Ю., Торгов В.Г.* Коллоидно-химические взаимодействия при концентрировании металлов обратными мицеллами оксиэтилированных поверхностно-активных веществ. Исследование солюбилизации // *Коллоидный журнал.* 1996. Т. 58. № 2. С. 163–168.
17. *Булавченко А.И., Подлипская Т.Ю., Торгов В.Г.* Структурные перестройки обратных мицелл оксиэтилированных ПАВ при инъекционной солюбилизации растворов HCl // *Журнал физической химии.* 2004. Т. 78. № 12. С. 2258–2263.
18. *Knysh A., Sokolov P., Nabiev I.* Dynamic light scattering analysis in biomedical research and applications of nanoparticles and polymers // *J. Biomed. Photonics Eng.* 2023. V. 9. № 2. P. 020203. <https://doi.org/10.18287/JBPE23.09.020203>
19. *Ohshima H.* A simple expression for Henry's function for the retardation effect in electrophoresis of spherical colloidal particles // *J. Colloid Interface Sci.* 1994. V. 168. P. 269–271. <https://doi.org/10.1006/jcis.1994.1419>
20. *Шапаренко Н.О., Бекетова Д.И., Демидова М.Г., Булавченко А.И.* Регулирование заряда и гидродинамического диаметра наночастиц диоксида кремния в микроэмульсиях АОТ // *Коллоид. жур.* 2019. Т. 81. № 1. С. 78–85. <https://doi.org/10.1134/S0023291219010105>
21. *Shaparenko N.O., Demidova M.G., Bulavchenko A.I.* Electrophoretic mobility and stability of SiO₂ nanoparticles in the solutions of AOT in *n*-hexadecane-chloroform // *Electrophoresis.* 2021. V. 42. № 16. P. 1648–1654. <https://doi.org/10.1002/elps.202100060>
22. *Maxim M.E., Stinga G., Iovescu A., Baran A., Ikie C., Anghel D.F.* Monitoring methylene blue inclusion in reverse micellar nanostructures // *Revue Roumaine de Chimie.* 2012. V. 57. P. 203–208.
23. *Faeder J., Ladanyi B.M.* Molecular dynamics simulations of the interior of aqueous reverse micelles // *J. Phys. Chem. B.* 2000. V. 104. № 5. P. 1033–1046. <https://doi.org/10.1021/jp993076u>
24. *Tartaro G., Mateos H., Schirone D., Angelico R., Palazzo G.* Microemulsions microstructure(s): A tutorial review // *Nanomaterials.* 2020. V. 10. P. 1657. <https://doi.org/10.3390/nano10091657>
25. *Van der Minne J.L., Hermanie P.H.J.* Electrophoresis measurements in benzene-correlation with stability. I. Development of method // *J. Colloid Sci.* 1952. V. 7. № 6. P. 600–615. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(52\)90042-1](https://doi.org/10.1016/0095-8522(52)90042-1)
26. *Поповецкий П.С.* Модели стабилизации заряженных частиц поверхностно-активными веществами в неполярных средах // *Коллоид. жур.* 2023. Т. 85. № 6. С. 806–817. <https://doi.org/10.31857/S0023291223600621>
27. *Saitoh T., Matsushima S., Hiraide M.* Aerosol-OT- γ -alumina admicelles for the concentration of hydrophobic organic compounds in water // *J. Chromatography A.* 2004. V. 1040. № 2. P. 185–191. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.04.010>
28. *Bulavchenko A.I., Popovetsky P.S.* Structure of adsorption layer of silver nanoparticles in sodium bis-(2-ethylhexyl) sulfosuccinate solutions in *n*-decane as observed by photon-correlation spectroscopy and nonaqueous electrophoresis // *Langmuir.* 2014. V. 30. № 43. P. 12729–12735. <https://doi.org/10.1021/la5004935>
29. *Kalam S., Abu-Khamsin S.A., Kamal M.S., Patil S.* Surfactant adsorption isotherms: a review // *ACS Omega.* 2021. V. 6. № 48. P. 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
30. *Strubbe F., Neyts K.* Charge transport by inverse micelles in non-polar media // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2017. V. 29. P. 453003. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa8bf6>
31. *Bulavchenko A.I., Shaparenko N.O., Kompan'kov N.B., Popovetskiy P.S., Demidova M.G., Arymbaeva A.T.* The formation of free ions and electrophoretic mobility of Ag and Au nanoparticles in *n*-hexadecane-chloroform mixtures at low concentrations of AOT // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2020. V. 22. P. 14671–14681. <https://doi.org/10.1039/D0CP02153A>
32. *Kopanichuk I.V., Novikov V.A., Vanin A.A., Brodskaya E.N.* The electric properties of AOT reverse micelles by molecular dynamics simulations // *J. Mol. Liq.* 2019. V. 296. P. 111960. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111960>
33. *Bulavchenko A.I., Batishchev A.F., Batishcheva E.K., Torgov V.G.* Modeling of the electrostatic interaction of ions in dry isolated micelles of AOT by the method of direct optimization // *J. Phys. Chem. B.* 2002. V. 106. № 25. P. 6381–6389. <https://doi.org/10.1021/jp0144000>

34. *Bairabathina V., Shanmugam K.S.K., Chilukoti G.R., Ponnamp V., Raju G., Chidhambaram P.* A review on reverse micellar approach for natural fiber dyeing // *Color. Technol.* 2022. V. 138. P. 329–341. <https://doi.org/10.1111/cote.12605>
35. *Ханхасаева С.Ц., Дашинамжилова Э.Ц., Бадмаева С.В., Бардамова А.Л.* Адсорбция триарилметанового красителя на Са-монтмориллоните: равновесие, кинетика и термодинамика // *Коллоид. жур.* 2018. Т. 80. № 4. С. 472–478. <https://doi.org/10.1134/S0023291218040043>
36. *Арефьева О.Д., Пироговская П.Д., Панасенко А.Е., Ковехова А.В., Земнухова Л.А.* Кислотно-основные свойства аморфного диоксида кремния из соломы и шелухи риса // *Химия растительного сырья.* 2021. № 1. С. 327–335. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021017521>
37. *Гиндин Л.М.* Экстракционные процессы и их применение // 1984. Москва: Наука. С. 144.
38. *Murakami H., Kanahara Y., Sasaki K.* Freezing of water solvation dynamics in nanoconfinement by reverse micelles at room temperature // *Langmuir.* 2024. V. 40. № 25. P. 13082–13091. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c00926>
39. *Moulik S.P., Paul B.K., Mukherjee D.C.* Acid-base behavior of neutral red in compartmentalized liquids (micelles and microemulsions) // *J. Col. Interface Sci.* 1993. V. 161. № 1. P. 72–82. <https://doi.org/10.1006/jcis.1993.1443>
40. *Кузнецов Д.Н., Кобраков К.И., Ручкина А.Г.* Биологически активные синтетические органические красители // *Изв. Вузов. Химия и Хим. Технология.* 2017. Т. 60. С. 4–33. <https://doi.org/10.6060/tcct.2017601.5423>
41. *Umar O., Kumar K., Joshi A., Khairiya D., Teotia D., Ikram.* A comprehensive review on microemulsions: a potential novel drug delivery system // *Int. J. Indig. Herbs Drugs.* 2022. V. 7. № 3. P. 56–61. <https://doi.org/10.46956/ijihd.v7i3.315>

SORPTION OF NEUTRAL RED DYE BY ENTERSORBENT POLYSORB MP FROM AOT MICROEMULSION IN *n*-DECAN

M. G. Demidova, T. Yu. Podlipskaya, N. O. Shaparenko, M. K. Barakina, V. V. Tatarchuk, A. I. Bulavchenko

Sorption of the cationic neutral red dye by Polysorb MP from a microemulsion of 0.25 mol/L AOT in *n*-decane was carried out at different contents of the aqueous pseudophase. The maximum sorption capacity of the sorbent in the microemulsion exceeded the corresponding one in the aqueous phase by an order of magnitude and amounted to 55 mg/g. A sharp drop in the degree of extraction with an increase in the water content of the microemulsion from 1 to 8 volume percent and the reversibility of sorption processes were demonstrated. Anionic dyes were not extracted by Polysorb MP in the same systems. With increasing water content, the zeta potential of SiO₂ particles decreased from 18 to 1 mV. Based on the obtained dependencies, a cation exchange mechanism of microemulsion sorption was proposed, including the exchange of sodium and neutral red cations between micelles adsorbed on the surface of particles and micelles in the bulk of the microemulsion.

Keywords: adsorption, microemulsions, sodium bis-(2-ethylhexyl)sulfosuccinate, silica nanoparticles, electrokinetic potential