

**МИЦЕЛЛООБРАЗУЮЩИЕ И АНТИМИКРОБНЫЕ СВОЙСТВА
СЕРИИ БИС-КВАТЕРНИЗОВАННЫХ АММОНИЕВЫХ
СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ ДАБКО**

© 2025 г. **З. М. Шайхутдинова^{1,2}, А. С. Сапунова¹, Д. В. Салахиева², Т. Н. Паширова^{1,*}, А. Д. Волошина¹, А. В. Богданов¹**

¹ *Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, ФИЦ Казанский научный центр РАН, ул. Акад. Арбузова, 8, Казань, 420088, Россия*

² *Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия*

**e-mail: tatyana_pashirova@mail.ru*

Поступила в редакцию 31.12.2024 г.

После доработки 10.02.2025 г.

Принята к публикации 11.02.2025 г.

Комплексом методов (тензиометрия, кондуктометрия, динамическое рассеяние света, спектроскопия, флуориметрия) исследована самоорганизация длинноцепочечных бис-кватернизованных производных 1,4-диазабицикло[2.2.2]октана, содержащих гидроксиэтильную группу. Определены значения критической концентрации мицеллообразования, адсорбционные характеристики на поверхности раздела фаз воздух-вода, солубилизационная емкость в отношении плохо растворимого в воде красителя Оранжевого Т, числа агрегации и размеры ассоциатов. Установлено влияние структуры исследуемых соединений (длина алкильной цепи и заряд головной группы) на мицеллообразующие, антимикробные свойства и гемолитическую активность.

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество, мицеллообразование, солубилизация, критическая концентрация мицеллообразования, 1,4-диазабицикло[2.2.2]октан

MICELLAR AND ANTIMICROBIAL PROPERTIES OF A SERIES OF BIS-QUATERNARY AMMONIUM COMPOUNDS BASED ON DABCO DERIVATIVES

© 2025 г. Z. M. Shaihutdinova, A. S. Sapunova, D. V. Salakhieva,
T. N. Pashirova, A. D. Voloshina, A.V. Bogdanov

Self-assembly of bisquaternary ammonium compounds, long-chain derivatives of 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane containing a hydroxyethyl group was investigated using methods (tensiometry, conductometry, dynamic light scattering, spectroscopy, and fluorimetry). The values of critical micelle concentration, adsorption characteristics at the air-water interface, solubilization capacity toward the poorly water-soluble OrangeOT probe, aggregation numbers, and sizes were determined. The influence of the structure of the compounds under study (alkyl chain length and head group charge) on micelle-forming, antimicrobial properties, and hemolytic activity was established.

Keywords: surfactant, micellization, solubilization, critical micelle concentration, 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование легкодоступных и недорогих амфифильных четвертичных аммониевых соединений (ЧАС) в качестве антимикробных и антисептических агентов и других фармацевтических и косметических продуктов [1–3] ограничено их токсичностью [4–6]. В связи с этим интерес исследователей направлен на поиск новых малотоксичных и биоразлагаемых ЧАС. Среди последних наиболее перспективными являются «зеленые» и экологически чистые биоразлагаемые поверхностно-активные вещества (ПАВ) выделяемые из природных и возобновляемых источников [7], а именно биосурфактанты растительного и животного происхождения [8], ПАВ с расщепляемыми фрагментами [9], ПАВ на платформе природных соединений [10]. Среди последних одними из интересных примеров являются ЧАС на основе природного алколоида – хинин [11], и его бициклических структурных фрагментов – хинуклидин [12,13] и 1,4-диазабицикло[2.2.2]октан (ДАБКО) [14]. Как правило длинноцепочечные амфифильные ЧАС, содержащие 8–18 атомов углерода демонстрируют антимикробное действие, а удлинение их алкильной цепи имеет тенденцию к повышению антимикробной эффективности. Обычно среди ряда алкилтриметиламмоний бромидов (C_n ТАБ) бактериальные штаммы наиболее чувствительны к C_{14} ТАБ, а дрожжи и грибы – к C_{16} ТАБ [15]. Не смотря на то, что механизмы ЧАС известны [16] и связаны со встраиванием алкильной цепи в цитоплазматическую мембрану, ее реорганизацией и дальнейшем лизисом клетки, в литературе встречаются и другие механизмы [17]. Например, вследствие образования супрамолекулярных ансамблей ЧАС или агрегатов с жидкокристаллической наноструктурой происходит увеличение локальной концентрации и положительного заряда ЧАС, что приводит к благоприятному взаимодействию с бактериями и нарушению целостности мембраны бактериальной клетки при очень низкой концентрации [18–20]. Связь между длиной цепи и эффективностью амфифильных ЧАС

не всегда линейна, а антимикробную активность и клеточную цитотоксичность можно регулировать путем изменения длины алкильной цепи, количества положительных зарядов и гидрофильно-липофильного баланса молекулы [17, 21, 22]. Как правило увеличение количества зарядов ЧАС положительно сказывается на антимикробной активности [23], однако часто это зависит от структуры соединения. Бисгеминальные производные ДАБКО [24], пиридиния [25], имидазолия [26] и другие показали более низкую минимальную ингибирующую концентрацию (МИК).

В настоящей работе будут исследованы бискатионные ПАВ на основе ДАБКО и оценено влияние их структуры (заряд и длина алкильной цепи) на мицеллообразующие и антимикробные свойства.

ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Структура исследуемых соединений – дикатионных поверхностно-активных веществ (бис-ДАБКО- n) представлена на рис. 1. Исследуемые соединения были получены взаимодействием 1,4-диазабцикло[2.2.2]октана с соответствующими алкилбромидами и далее кипячением с 2-бромэтанолом по методике, описанной ранее [27–29]. и охарактеризованы методами ЯМР ^1H и ИК-спектроскопии. Все измерения проводились при температуре 25°C. Для приготовления растворов была использована вода (удельное сопротивление 18.2 МОм·см при 25°C) очищенная с использованием системы Milli-Q® (Millipore).

Рис. 1. Структура дикатионных ПАВ бис-ДАБКО- n , где $R = \text{C}_n\text{H}_{2n+1}$ с $n = 12, 14, 16, 18, 20$;



Поверхностное натяжение определяли методом отрыва кольца Дю-Нуи на приборе «Тензиометр GRUI-100». Данные по удельной электропроводности растворов получали на приборе «WTW Inolab Cond 720».

Количественные характеристики адсорбции были получены с помощью уравнений 1–5: значения предельной адсорбции (Γ_{\max}), минимальной площади поверхностного слоя, приходящейся на одну молекулу ПАВ (A_{\min}).

$$\Gamma_{\max} = -\frac{1}{2.3mRT} \lim_{C \rightarrow \text{ККМ}} (d\pi/d\log C), \quad (1)$$

$$A_{\min} = 10^{18} / (N_A \times \Gamma_{\max}), \quad (2)$$

где N_A – число Авогадро ($6.02 \times 10^{23} \text{ M}^{-1}$).

Способность исследуемых соединений снижать поверхностное натяжение (pC_{20}):

$$pC_{20} = -\log C_{20}, \quad (3)$$

где C_{20} — молярная концентрация, при которой происходит уменьшение поверхностного натяжения на 20 мН м^{-1} .

Размеры (гидродинамический диаметр) частиц определяли с помощью метода динамического рассеяния света на приборе Malvern Instrument Zetasizer Nano (Worcestershire, UK), оснащенный He–Ne лазером с длиной волны 633 нм в U-образной капиллярной кювете при 25°C. Угол детектирования составлял 173°. Солюбилизирующую способность оценивали по методике с добавлением кристаллического красителя ОранжеОТ. В каждый исследуемый раствор вносили 0.7–0.9 мг красителя интенсивно перемешивали, выдерживали в течение 48 часов при комнатной температуре и отфильтровывались через целлюлозную мембрану. Содержание солюбилизата определяли, измеряя оптическую плотность раствора при длине волны 495 нм на спектрофотометре Perkin Elmer λ_{35} (Perkin Elmer Instruments, USA) в кварцевых кюветах с

толщиной слоя жидкости 1 см. Флуоресценцию пирена ($C = 1 \times 10^{-6}$ М) определяли в воде и в водных растворах соединений на спектрофлуориметре VarianCaryEclipse (Varian, Inc., California, USA). Возбуждение образца осуществлялось при длине волны 335 нм. Спектр испускания фиксировался при 350–500 нм. Использовали кювету толщиной 10 x 10 мм. Числа агрегации (N) были найдены по методике [30] с использованием уравнения 4:

$$\ln \left(I_0 / I \right) = [N / (C_{\text{ПАВ}} - \text{ККМ})][\text{ЦПБ}], \quad (4)$$

где I_0 и I – интенсивности флуоресценции пирена в отсутствие и в присутствии тушителя – цетилпиридиний бромида (ЦПБ) соответственно; $C_{\text{ПАВ}}$ – общая концентрация исследуемого соединения; $[\text{ЦПБ}]$ – концентрация тушителя.

Активность исследуемых соединений в отношении антропопатогенных грамположительных *Staphylococcus aureus* ATCC 209p (*Sa*) и *Bacillus cereus* ATCC 8035 (*Bc*) и грамотрицательных микроорганизмов *Escherichia coli* CDC F-50 (*Ec*) и *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 (*Pa*) и грибов *Aspergillus niger* VKMF-1119 (*An*), *Trichophyton mentagrophytes* var. *gypseum* 1773 (*Tm*) и *Candida albicans* NCTC 885-653 (*Ca*) определяли методом серийных разведений в 96-луночных планшетах по ранее описанной методике [31]. Гемолитическую активность оценивали путем сравнения оптической плотности раствора, содержащего исследуемое соединение, с оптической плотностью крови при 100% гемолизе. Эксперименты проводили по описанной ранее методике [31].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 и 3 представлены зависимости поверхностного натяжения и удельной электропроводности растворов исследуемых соединений от их концентрации. Изотермы адсорбции имеют вид с выходом на плато, что типично для ПАВ [32]. Значения ККМ, отвечающие перегибам на зависимостях поверхностного натяжения и удельной

электропроводности водных растворов, приведены в Таблице 1. В качестве соединения-эталоны было использовано классическое катионное ПАВ – цетилтриметиламмоний бромид (ЦТАБ). Эффективность ПАВ снижать поверхностное натяжения воды ($\pi_{\text{ккм}}$) и эффективность адсорбции ПАВ (pC_{20}) зависят от длины цепи и полярности головной группы ПАВ. Значения pC_{20} увеличиваются с ростом длины цепи (от додецильного к октадецильному и эйкозильному аналогу) и с уменьшением полярности головной группы ПАВ в последовательности: бис-ДАБКО-16 < моно-ДАБКО-16 < ЦТАБ. Наиболее эффективными являются соединения бис-ДАБКО-20 и ЦТАБ. Значения предельной адсорбции (Γ_{max}) и минимальной площади поверхностного слоя, приходящейся на одну молекулу ПАВ (A_{min}) связаны со структурой и полярностью головной группы ПАВ (увеличение заряда у атома азота). Для ПАВ с бициклической головной группой бис-ДАБКО- n значение Γ_{max} 2.3 раза ниже, а A_{min} выше, чем классического ПАВ ЦТАБ, скорее всего, обусловленные отталкиванием полярных головных групп и образованием более «рыхлой» упаковки на границе раздела фаз воздух-вода. Увеличение длины алкильной цепи ПАВ приводит к изменению предельной адсорбции ПАВ и A_{min} .

Рис. 2. Изотермы поверхностного натяжения водных растворов бис-ДАБКО- n , где $n = 14$

(1), 16 (2), 18 (3), 20 (4), 25°C.

Рис. 3. Зависимости удельной электропроводности водных растворов бис-ДАБКО- n , где n

= 14 (1), 16 (2), 18 (3), 20 (4), 25°C.

Таблица 1. Величины ККМ катионных ПАВ в воде, определенные методами тензиометрии, кондуктометрии, флуориметрии и спектрофотометрии, значения предельной адсорбции (Γ_{max}), минимальной площади поверхностного слоя, приходящейся на одну молекулу ПАВ (A_{min}), стандартной свободной энергии адсорбции ($\Delta G_{\text{ад}}$).

| Катионные ПАВ | ККМ × 10 ³ (М) | | | | $\pi_{\text{ККМ}}$ (МН·м ⁻¹) | pC_{20} | $\Gamma_{\text{max}} \times 10^6$ (моль·м ⁻²) | A_{min} (нм ²) |
|----------------------------|------------------------------|-------|--------|---------|---|-----------|--|--|
| | Тенз. | Конд. | Флуор. | Спектр. | | | | |
| бис-ДАБКО-14 | 7 | 7.4 | 8.7 | 8 | 26.9 | 2.4 | 2.00 | 0.81 |
| бис-ДАБКО-16 | 1.8 | 1.1 | 1.1 | 1.2 | 27.2 | 3.0 | 1.34 | 1.24 |
| бис-ДАБКО-18 | 1 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 25.1 | 3.2 | 1.6 | 1.04 |
| бис-ДАБКО-20 | 0.43 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 24.3 | 3.5 | 2.09 | 0.79 |
| моно-ДАБКО-16 ^а | 1 | 1 | – | 0.8 | 28.3 | 3.3 | 2.37 | 0.7 |
| ЦТАБ ^а | 1 | 0.8 | – | – | 33.2 | 3.5 | 3.10 | 0.53 |

^а [4]

Далее, используя значения ККМ, полученные методом тензиометрии, построена зависимость \log ККМ, от числа атомов углерода (n) алкильной цепи (рис. 4). Из представленных данных видно, что полученная зависимость линейна и выражается следующим выражением: $\log \text{ККМ} = 0.2n - 0.55$ ($r^2 = 0.997$). Как правило, характеристический наклон для типичных ионных ПАВ лежит в диапазоне 0.28–0.30. Для моно-ДАБКО- n наклон составляло 0.27 [4]. Для бис-ДАБКО- n наблюдается отклонение до 0.2. Такое поведение, скорее всего, свидетельствует о увеличении полярности головной группы для данных соединений.

Рис. 4. Зависимость \log ККМ, МИК в отношении *Staphylococcus aureus* ATCC 209p (*Sa*) и *Candida albicans* NCTC 885-653 (*Ca*), HC_{50} от числа атомов углерода (n) алкильной цепи для бис-ДАБКО- n .

Размеры агрегатов бис-ДАБКО- n были определены методом динамического рассеяния света. Индекс полидисперсности для всех соединений был достаточно высокий 0.5 и выше. В области концентраций близкой к ККМ для всех соединений размер частиц составил 51 ± 12 нм и 150 ± 20 нм (распределение по числу частиц и интенсивности

соответственно). При концентрации выше ККМ в растворе наблюдались частицы небольшого размера 3–5 нм, за исключением бис-ДАБКО-20, где размеры частиц были постоянными в области концентраций от 0.06 до 3 мМ. Необходимо отметить, что для бис-ДАБКО-18 и бис-ДАБКО-20 были найдены самоассоциаты в области концентрации ниже, чем ККМ. Образование предмицеллярных агрегатов, образующихся в области концентрации до ККМ часто встречается для геминальных ПАВ [33–35]. Song и авторы описывают предмицеллярные агрегаты как маленькие двухслойные или пластинчатые мицеллы, в которых одинаково заряженные гидрофильные головные группы будут располагаться на противоположных концах структуры, а их алкильные фрагменты ориентированы друг к другу. Такое необычное поведение также встречается у пиридиневых геминальных ПАВ [36, 37].

Солюбилизационные свойства ПАВ и ККМ оценивали путем исследования солюбилизации гидрофобного красителя ОранжОТ (рис. 5). Наглядно видно, что с увеличением концентрации ПАВ происходит рост оптической плотности при $\lambda = 495$ нм. Солюбилизационная емкость линейно возрастает с увеличением длины алкильной цепи бис-ДАБКО-*n* и описывается следующими уравнением: $S = -0.0347 + 0.00287n$ ($r = 0.997$). Солюбилизирующая емкость превышает емкость триметиламмониевых аналогов, однако в 2.8 раза ниже, чем для его моно-ДАБКО аналога и бис-ДАБКО с этильным фрагментом в головной группе [4, 38]. Последнее, скорее всего, обусловлено его большей полярностью головной группы и образованием более «рыхлых» мицелл.

Рис. 5. Изменение поглощения насыщенных водных растворов ОранжОТ в зависимости от концентрации бис-ДАБКО-*n*, где *n* = 14 (1), 16 (2), 18 (3), 20 (4), $\lambda = 495$ нм; $L=1$ см; 25°C.

Определение ККМ методом флуориметрии предполагает анализ соотношения интенсивности максимумов зонда - пирена при 373 нм (I_1) и 384 нм (I_3) (рис. 6). Значения ККМ, полученные методом флуориметрии, представлены в Таблице 1. Как видно из Таблицы 1, для бис-ДАБКО-18 и бис-ДАБКО-20 значения ККМ, определенные различными методами (тензиометрия, кондуктометрия, спектрофотометрия и флуориметрия) хорошо коррелируют между собой. Однако в случае бис-ДАБКО-14 и бис-ДАБКО-16 наблюдаются отклонения в значениях ККМ, определенных различными методами, что может быть связано, скорее всего, с образованием предмицеллярных агрегатов.

Рис. 6. Спектры флуоресценции пирена в растворах бис-ДАБКО-14 (а) и зависимости отношения интенсивности первого и третьего пиков пирена (I_1/I_3) в растворах бис-ДАБКО-*n*, где *n* = 14 (1), 16 (2), 18 (3), 20 (4) от их концентрации (б), 25°C.

Значения чисел агрегации были найдены из зависимостей $\ln(I_0/I)$ по максимуму интенсивности при 394 нм от концентрации тушителя – цетилпиридиний бромида (рис. 7). Число агрегации для бис-ДАБКО-16 составляет 103 (при $C_{\text{ПАВ}} > \text{ККМ}$), что сопоставимо для моно-ДАБКО ($N = 114$ при $C_{\text{ПАВ}} > \text{ККМ}$) [30] и алкилтриметиламмониевых ПАВ ($N = 90$ и ~ 100) [39, 40]. Увеличение длины углеводородного радикала исследуемых ПАВ от гексадецильного к эйкозильному аналогу приводит к снижению чисел агрегации от 103 до 39. Для традиционных классических алкиламмонийных ПАВ N увеличивается с ростом длины алкильной цепи [39]. Снижение числа агрегации может быть обусловлено природой полярной головной группы, большей площадью поверхности, что приводит к стерическим затруднениям самосборки мицелл и образованию «рыхлых» мицелл. Структуры с низкими числами агрегации наблюдались для димерных [41], тетракативных ПАВ [38] и «Платоновых мицелл» [42, 43].

Рис. 7. Зависимость $\ln(I_0/I)$ в растворах бис-ДАБКО- n , где $n = 14$ (1), 16 (2), 18 (3), 20 (4), от концентрации ЦПБ при $C_{\text{бис-Дабко-14}} = 0.02 \text{ М}$ (1), $C_{\text{бис-Дабко-16}} = 0.005 \text{ М}$ (2), $C_{\text{бис-Дабко-18}} = 0.005 \text{ М}$ (3), $C_{\text{бис-Дабко-20}} = 0.004 \text{ М}$ (4), $\lambda = 394 \text{ нм}$.

Антимикробную активность бис-ДАБКО- n тестировали в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий и грибов. В Таблице 2 представлены минимальные ингибирующие концентрации (МИК), минимальные бактерицидные концентрации (МБК) для бис-ДАБКО- n с различной длиной цепи. Все исследованные соединения активны в основном в отношении грамположительных бактерий *Sa* и *Bc*, наиболее активным является бис-ДАБКО-14 МИК = 7.8 ± 0.5 мг/л. Зависимость антимикробной активности бис-ДАБКО- n от их структуры (длина цепи), представленная на рис. 4. с максимумом активности в отношении *Sa* для тетрацильного производного близка к поведению n -алкилтриметиламмоний бромидов. Известно, что для случаев, когда МИК < ККМ антимикробная активность демонстрирует нелинейную зависимость от длины алкильной цепи катионных ПАВ, а именно постепенно увеличивается до максимума, а затем уменьшается [18, 44]. Как правило, оптимальную антимикробную активность в отношении грамположительных бактерий в ряду алкилтриметиламмоний бромидов показывают вещества со средней длиной цепи, обычно C_{12} – C_{14} , а в отношении грибов – цетилтриметиламмоний бромид [15]. ПАВ с длиной алкильной цепи $n < 4$ или $n > 18$ практически неактивны, такое поведение литературе описано как “cut-off эффект” [45, 46].

Таблица 2. Антимикробная активность дикатионных ПАВ

| Соединение | МИК – минимальная ингибирующая концентрация, мг/л | | | | |
|--------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | <i>Sa</i> | <i>Bc</i> | <i>Ec</i> | <i>Pa</i> | <i>Ca</i> |
| бис-ДАБКО-12 | 62.5±5.4 | 31.3±2.6 | >500 | >500 | >500 |
| бис-ДАБКО-14 | 7.8±0.5 | 7.8±0.6 | >500 | >500 | 250±21 |

| | | | | | |
|---|----------|-----------|----------|--------|----------|
| бис-ДАБКО-16 | 15.6±1.2 | 15.6±1.4 | >500 | >500 | 15.6±1.4 |
| бис-ДАБКО-18 | 62.5±4.9 | 31.3±2.4 | >500 | >500 | 62.5±5.6 |
| бис-ДАБКО-20 | 9.4±0.3 | 37.4±2.4 | 37.4±2.1 | 74.7±5 | 18.7±1.2 |
| моно-ДАБКО-16 ^а | 0.3 | 1.9 | 6.3 | >500 | 3.1 |
| ЦТАБ ^а | 0.5 | 3.1 | 6.3 | 250 | 3.1 |
| МБК - бактерицидная и фунгицидная активность в мг/л | | | | | |
| бис-ДАБКО-12 | 125 | >500 | >500 | >500 | >500 |
| бис-ДАБКО-14 | 15.6±1.3 | 125.0±9.7 | >500 | >500 | >500 |
| бис-ДАБКО-16 | 31.3±2.5 | 62.5±5.6 | >500 | >500 | 31.3±2.3 |
| бис-ДАБКО-18 | 62.5±5.3 | 62.5±5.2 | >500 | >500 | 62.5±5.5 |
| бис-ДАБКО-20 | 9.4±0.3 | 300±22 | 150±10 | 300±22 | 37.4±2.1 |
| моно-ДАБКО-16 ^а | 5 | >500 | >500 | >500 | 50 |
| ЦТАБ ^а | 50 | >500 | >500 | >500 | 50 |

^а [48]

Важно подчеркнуть, что соединения бис-ДАБКО-16, бис-ДАБКО-18 и бис-ДАБКО-20 являются активными в отношении грибов *Sa*, МИК составляют 15.6, 62.5 и 18.7 мг/л, соответственно. В биологических средах (Хоттигера и Сабуро), применяемых для определения биологической активности, ККМ катионных ПАВ снижается более, чем в 10 раз [47]. Можно предположить, что в случае бис-ДАБКО-18 и бис-ДАБКО-20 улучшенная антимикробная активность может быть вызвана не отдельной молекулой ПАВ, а образованием агрегатов. Следует также отметить, что в отличие от ранее исследованного моно-ДАБКО-п, которые обладают лишь бактериостатической активностью [48], бис-ДАБКО-п проявляют как бактериостатические, так и бактерицидные свойства (Табл. 2).

Исследование взаимосвязи структура-активность-цитотоксичность ЧАС имеет большое значение для продвижения новых антимикробных веществ к их использованию. Хороший антимикробный агент должен обладать как высокой активностью, так и

оказывать низкий цитотоксический эффект. Поэтому заключительная часть работы была посвящена определению гемолитической активности в отношении эритроцитов человека.

Установление корреляции между ККМ и проявлением гемолитической активности важно, в связи установлением механизмов разрушения эритроцитов. Известно, что ощутимый вклад в цитотоксичность вносят структура ПАВ, ККМ, $\log P$, размер и морфология ансамблей ПАВ. Выше критической длины алкильной цепи происходит «эффект отсечения» связи между гемолизом и длиной алкильной цепи ПАВ [49]. Из рис. 4 видно, что зависимость $\log HC_{50}$ от числа атомов углерода ($n = C_{12}, C_{14}, C_{16}$) для бис-ДАБКО- n – линейна и выражается следующим уравнением: $\log HC_{50} = 0.38n - 1.69$ ($r^2 = 0.98$). Для октадецильного и эйкозильного производных происходит эффект отсечения. Угол наклона в 2 раза выше, чем для зависимости \log ККМ. Значения HC_{50} намного ниже, чем ККМ, что свидетельствует о том, что для бис-ДАБКО- n при взаимодействии с мембраной, скорее всего, происходит солюбилизация с клеточной мембраны с образованием смешанных мицелл [50, 51].

Для оценки селективности используется терапевтический индекс, соотношение $HC_{50}/\text{МИК}$, где высокий терапевтический индекс означает высокую селективность. Наиболее эффективным является соединение бис-ДАБКО-14, для которого $HC_{50}/\text{МИК} = 15.4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что мицеллообразующие свойства и антибактериальная активность дикатионных ПАВ на основе ДАБКО зависят от структуры (длина алкильной цепи и количество заряженных атомов азота). Мицеллообразование бис-ДАБКО- n затруднено, по сравнению с их моно-ДАБКО аналогом, о чем свидетельствуют более высокие (2 раза) критические концентрации мицеллообразования. Солюбилизирующая способность бис-ДАБКО- n по отношению к гидрофобному зонду

ОранжеОТ ниже, чем для моно-ДАБКО. Влияние длины алкильной длины цепи на антимикробное действие бис-ДАБКО-п близко к поведению алкилтриметиламмонийных аналогов. Наиболее эффективным является тетрадецильное производное, для которого индекс селективности составляет 15.4.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Салахиева Д.В. благодарит за финансовую поддержку субсидию, выделенную Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект FZSM-2022-0020).

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. *Oblak E., Futoma-Koloch B. and Wieczynska A.* Biological activity of quaternary ammonium salts and resistance of microorganisms to these compounds // *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2021. vol 37. p. 22.
<https://doi.org/10.1007/s11274-020-02978-0>
2. *Hu Y., Xing Y., Yue H. et al.* Ionic liquids revolutionizing biomedicine: recent advances and emerging opportunities // *Chem. Soc. Rev.* 2023. vol. 52. pp. 7262–7293.
<https://doi.org/10.1039/D3CS00510K>
3. *Saverina E.A., Frolov N.A., Kamanina O.A. et al.* From antibacterial to antibiofilm targeting: An emerging paradigm shift in the development of quaternary ammonium compounds (QACs) // *ACS Infect. Dis.* 2023. vol. 9. № 3. pp. 394–422.
<https://doi.org/10.1021/acsinfecdis.2c00469>
4. *Zakharova L.Y., Pashirova T.N., Doktorovova S. et al.* Cationic surfactants: Self-assembly, structure-activity correlation and their biological applications // *Int. J. Mol. Sci.* 2019. vol. 20. № 22. p. 5534.
<https://doi.org/10.3390/ijms20225534>
5. *Frantz A.L.* Chronic quaternary ammonium compound exposure during the COVID-19 pandemic and the impact on human health // *Toxicol. Environ. Health Sci.* 2023. vol. 15. pp. 199–206.
<https://doi.org/10.1007/s13530-023-00173-w>
6. *Arnold W.A, Blum A., Branyan J. et al.* Quaternary ammonium compounds: A chemical class of emerging concern // *Environ. Sci. Technol.* 2023. vol. 57. №20. pp. 7645–7665.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08244>
7. *Raj S. and Ramamurthy K.* Classification of surfactants and admixtures for producing stable aqueous foam // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2024. vol. 331. p. 103234.

<https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103234>

8. *Bjerk T.R., Severino P., Jain S. et al.* Biosurfactants: properties and applications in drug delivery, biotechnology and ecotoxicology // *Bioengineering*. 2021. vol. 8. № 8. p. 115.

<https://doi.org/10.3390/bioengineering8080115>

9. *Vavina A.V., Seitkalieva M.M., Strukova E.N. et al.* Fatty acid-derived ionic liquids as soft and sustainable antimicrobial agents // *J. Mol. Liq.* 2024. vol. 410. p. 125483.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125483>

10. *Pashirova T.N., Shaikhutdinova Z.M., Mironov V.F. et al.* Ammonium amphiphiles based on natural compounds: Design, synthesis, properties, and biomedical applications. A Review // *Dokl. Chem.* 2023. vol. 509. pp. 71–88.

<https://doi.org/10.1134/S0012500823700179>

11. *Pernak J., Rzemieniecki T., Klejdysz T., et al.* Conversion of quinine derivatives into biologically active ionic liquids: Advantages, multifunctionality, and perspectives // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2020. vol. 8. № 25. pp. 9263–9267.

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c03501>

12. *Bazina L., Maravić A., Krce L., et al.* Discovery of novel quaternary ammonium compounds based on quinuclidine-3-ol as new potential antimicrobial candidates // *Eur. J. Med. Chem.* 2019. vol. 163. pp. 626–635.

<https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2018.12.023>

13. *Burilova E.A., Pashirova T.N., Lukashenko S.S. et al.* Synthesis, biological evaluation and structure-activity relationships of self-assembled and solubilization properties of amphiphilic quaternary ammonium derivatives of quinuclidine // *J. Mol. Liq.* 2018. vol. 272. pp. 722–730.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.008>

14. *Pashirova T.N., Zhil'tsova E.P., Kashapov R.R. et al.* Supramolecular systems based on

1-alkyl-4-aza-1-azoniabicyclo[2.2.2]octane bromides // Russ. Chem. Bull. 2010. vol. 59. pp. 1745–1752.

<https://doi.org/10.1007/s11172-010-0307-9>

15. *Gilbert P. and Al-taae A.* Antimicrobial activity of some alkyltrimethylammonium bromides // Lett. Appl. Microbiol. 1985. vol. 1. № 6. pp. 101–104.

<https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.1985.tb01498.x>

16. *Lainioti G.C. Druvari D.* Designing antibacterial-based quaternary ammonium coatings (surfaces) or films for biomedical applications: Recent advances // Int. J. Mol. Sci. 2024. vol. 25. № 22. p. 12264.

<https://doi.org/10.3390/ijms252212264>

17. *Dan W., Gao J., Qi X., et al.* Antibacterial quaternary ammonium agents: Chemical diversity and biological mechanism // Eur. J. Med. Chem. 2022. vol. 243. p. 114765.

<https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2022.114765>

18. *Zhou C. Wang Y.* Structure–activity relationship of cationic surfactants as antimicrobial agents // Curr. Opin. Colloid Interface Sci. 2020. vol. 45. pp. 28–43.

<https://doi.org/10.1016/j.cocis.2019.11.009>

19. *Zhou C., Wang F., Chen H. et al.* Selective antimicrobial activities and action mechanism of micelles self-assembled by cationic oligomeric surfactants // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2016. vol. 8. № 6. pp. 4242–4249.

<https://doi.org/10.1021/acsami.5b12688>

20. *Jennings J., Aščerić D., Semeraro E.F. et al.* Combinatorial screening of cationic lipidoids reveals how molecular conformation affects membrane-targeting antimicrobial activity // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2023. vol 15. № 34. pp. 40178–40190.

<https://doi.org/10.1021/acsami.3c05481>

21. *Subedi Y.P., Alfindee M.N., Shrestha J.P. et al.* Tuning the biological activity of cationic

anthraquinone analogues specifically toward *Staphylococcus aureus* // Eur. J. Med. Chem. 2018. vol. 157. pp. 683–690.

<https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2018.08.018>

22. Nadagouda M.N., Vijayasarathy P., Sin A., et al. Antimicrobial activity of quaternary ammonium salts: structure-activity relationship // Med. Chem. Res. 2022. vol. 31. pp. 1663–1678.

<https://doi.org/10.1007/s00044-022-02924-9>

23. Forman M.E., Jennings M.C., Wuest W.M. et al. Building a better quaternary ammonium compound (QAC): Branched tetracationic antiseptic amphiphiles // ChemMedChem. 2016. vol. 11. № 13. pp. 1401–1405.

<https://doi.org/10.1002/cmdc.201600176>

24. Kontos R.C., Schallenhammer S.A., Bentley B.S. et al. An Investigation into rigidity–activity relationships in BisQAC amphiphilic antiseptics // ChemMedChem. 2019. vol. 14. № 1. pp. 83–87.

<https://doi.org/10.1002/cmdc.201800622>

25. Frolov N.A., Fedoseeva K.A., Hansford K.A. et al., Novel phenyl-based bis-quaternary ammonium compounds as broad-spectrum biocides // ChemMedChem. 2021. vol. 16. № 19. pp. 2954–2959.

<https://doi.org/10.1002/cmdc.202100284>

26. Thomas B., Duval R.E., Fontanay S., et al. Synthesis and antibacterial evaluation of bis-thiazolium, bis-imidazolium, and bis-triazolium derivatives // ChemMedChem. 2019. vol. 14. № 13. pp. 1232–1237.

<https://doi.org/10.1002/cmdc.201900151>

27. Pashirova T.N., Zhil'tsova E.P., Lukashenko S.S. et al. Catalytic properties of polymer-colloid complexes based on polyethyleneimines and mono- and diquaternized 1,4-

diazabicyclo[2.2.2]octane derivatives in the hydrolysis of phosphorus acids esters // Russ. Chem. Bull. 2015. vol. 64. pp. 2879–2884.

<https://doi.org/10.1007/s11172-015-1242-6>

28. *Zhiltsova E.P., Lukashenko S.S., Pashirova T.N. et al.* Self-assembling systems based on diquaternized derivatives of 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane // J. Mol. Liq. 2015. vol. 210. pp. 136–142.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.01.018>

29. *Pashirova T.N., Burilova E.A., Lukashenko S.S. et al.* Nontoxic antimicrobial micellar systems based on mono- and dicationic Dabco-surfactants and furazolidone: Structure-solubilization properties relationships // J. Mol. Liq. 2019. vol. 296. p. 112062.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112062>

30. *Zakharova L.Y., Gaysin N.K., Gnezdilov O.I. et al.* Micellization of alkylated 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane by nuclear magnetic resonance technique using pulsed gradient of static magnetic field // J. Mol. Liq. 2012. vol. 167. pp. 89–93.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2011.12.015>

31. *Voloshina A.D., Sapunova A.S., Kulik N.V. et al.* Antimicrobial and cytotoxic effects of ammonium derivatives of diterpenoids steviol and isosteviol // Bioorg. Med. Chem. 2021. vol. 32. p.115974.

<https://doi.org/10.1016/j.bmc.2020.115974>

32. *Rosen M.J. and Kunjappu J.T.* Surfactants and interfacial phenomena. John Wiley & Sons, Inc. 2012.

<https://doi.org/10.1002/9781118228920>

33. *Song L.D. Rosen M.J.* Surface properties, micellization, and pre-micellar aggregation of gemini surfactants with rigid and flexible spacers // Langmuir. 1996. vol. 12. № 5. pp. 1149–1153.

<https://doi.org/10.1021/la950508t>

34. *Rosen M.J., Liu L.* Surface activity and premicellar aggregation of some novel diquaternary gemini surfactants // *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1996. vol. 73. № 7. pp. 885–890.

<https://doi.org/10.1007/BF02517990>

35. *Tsubone K., Arakawa Y. and Rosen M.J.* Structural effects on surface and micellar properties of alkanediyl- α,ω -bis(sodium N-acyl- β -alaninate) gemini surfactants // *J. Colloid Interface Sci.* 2003. vol. 262. № 2. pp. 516–524.

[https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00078-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00078-X)

36. *Fisicaro E., Compari C., Biemmi M. et al.* Unusual behavior of the aqueous solutions of gemini bispyridinium surfactants: apparent and partial molar enthalpies of the dimethanesulfonates // *J. Phys. Chem. B.* 2008. vol. 112. № 39. pp. 12312–12317.

<https://doi.org/10.1021/jp804271z>

37. *Chauhan V., Singh S., Kaur T.* Self-assembly and biophysical properties of gemini 3-alkyloxypyridinium amphiphiles with a hydroxyl-substituted spacer // *Langmuir.* 2015. vol. 31. № 10. pp. 2956–2966.

<https://doi.org/10.1021/la5045267>

38. *Pashirova T.N., Sapunova A.S., Lukashenko S.S. et al.* Synthesis, structure-activity relationship and biological evaluation of tetracationic gemini Dabco-surfactants for transdermal liposomal formulations // *Int. J. Pharm.* 2020. vol. 575. p. 118953.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118953>

39. *Lianos P. Zana R.* Fluorescence probe studies of the effect of concentration on the state of aggregation of surfactants in aqueous solution // *J. Colloid Interface Sci.* 1981. vol. 84. № 1. pp. 100–107.

[https://doi.org/10.1016/0021-9797\(81\)90263-0](https://doi.org/10.1016/0021-9797(81)90263-0)

40. *Zana R., Binana-Limbele W., Kamenka N. et al.* Ethyl(hydroxyethyl)cellulose-cationic

surfactant interactions: electrical conductivity, self-diffusion and time-resolved fluorescence quenching investigations // *J. Phys. Chem.* 1992. vol. 96. № 13. pp. 5461–5465.

<https://doi.org/10.1021/j100192a050>

41. *Danino D., Talmon Y. and Zana R.* Alkanediyl- α,ω -

bis(dimethylalkylammonium bromide) surfactants (dimeric surfactants). 5. Aggregation and microstructure in aqueous solutions // *Langmuir*. 1995. vol. 11. № 5. pp. 1448–1456.

<https://doi.org/10.1021/la00005a008>

42. *Araki M., Fujii S., Lee J.H. et al.* Non-dependence of dodecamer structures on alkyl chain length in platonic micelles // *Soft. Matter*. 2019. vol. 15. № 17. pp. 3515–3519.

<https://doi.org/10.1039/C9SM00076C>

43. *Fujii S., Yamada S., Matsumoto S., et al.* Platonic micelles: Monodisperse micelles with discrete aggregation numbers corresponding to regular polyhedra // *Sci. Rep.* 2017. vol.7. p. 44494.

<https://doi.org/10.1038/srep44494>

44. *Tishkova E.P., Fedorov S.B., Kudryavtseva L.A. et al.* Antimicrobial activity and colloidal properties of N-alkyl-N-(2-oxyethyl)dimethylammonium halides // *Pharm. Chem. J.* 1989. vol. 23. pp. 418–422.

<https://doi.org/10.1007/BF00758296>

45. *Balgavý P. and Devínsky F.* Cut-off effects in biological activities of surfactants // *Adv. Colloid Interface Sci.* 1996. vol. 66. pp. 23–63.

[https://doi.org/10.1016/0001-8686\(96\)00295-3](https://doi.org/10.1016/0001-8686(96)00295-3)

46. *Devínsky F., Kopecka-Leitmanová A., Šeršeň F. et al.* Cut-off effect in antimicrobial activity and in membrane perturbation efficiency of the homologous series of N,N - dimethylalkylamine oxides // *J. Pharm. Pharmacol.* 1990. vol. 42. № 11. pp. 790–794.

<https://doi.org/10.1111/j.2042-7158.1990.tb07022.x>

47. Pashirova T.N., Lukashenko S.S., Zakharov S.V. et al. Self-assembling systems based on quaternized derivatives of 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane in nutrient broth as antimicrobial agents and carriers for hydrophobic drugs // *Colloids Surf. B Biointerfaces*. 2015. vol. 127. pp. 266–273.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2015.01.044>
48. Zhiltsova E.P., Pashirova T.N., Kashapov R.R. et al. Alkylated 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octanes: self-association, catalytic properties, and biological activity // *Russ. Chem. Bull.* 2012. vol. 61. pp. 113–120.
<https://doi.org/10.1007/s11172-012-0016-7>
49. Manaargadoo-Catin M., Ali-Cherif A., Pougna J.-L. et al. Hemolysis by surfactants – A review // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2016. vol. 228. pp. 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.10.011>
50. Gilbert P. and Moore L.E. Cationic antiseptics: diversity of action under a common epithet // *J. Appl. Microbiol.* 2005. vol. 99. № 4. pp. 703–715.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02664.x>
51. Jones M.N. Surfactants in membrane solubilisation // *Int. J. Pharm.* 1999. vol. 177. № 2. pp. 137–159.
[https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(98\)00345-7](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(98)00345-7)

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Структура дикатионных ПАВ бис-ДАБКО- n , где $R = C_nH_{2n+1}$ с $n = 12, 14, 16, 18, 20$; $R' = C_2H_4OH$.

Рис. 2. Изотермы поверхностного натяжения водных растворов бис-ДАБКО- n , где $n = 14$ (1), 16 (2), 18 (3), 20 (4), 25°C.

Рис. 3. Зависимости удельной электропроводности водных растворов бис-ДАБКО- n , где $n = 14$ (1), 16 (2), 18 (3), 20 (4), 25°C.

Рис. 4. Зависимость \log ККМ, МИК в отношении *Staphylococcus aureus* ATCC 209p (Sa) и *Candida albicans* NCTC 885-653 (Ca), HC_{50} от числа атомов углерода (n) алкильной цепи для бис-ДАБКО- n .

Рис. 5. Изменение поглощения насыщенных водных растворов ОранжеОТ в зависимости от концентрации бис-ДАБКО- n , где $n = 14$ (1), 16 (2), 18 (3), 20 (4), $\lambda = 495$ нм; $L=1$ см; 25°C.

Рис. 6. Спектры флуоресценции пирена в растворах бис-ДАБКО-14 (а) и зависимости отношения интенсивности первого и третьего пиков пирена (I_1/I_3) в растворах бис-ДАБКО- n , где $n = 14$ (1), 16 (2), 18 (3), 20 (4) от их концентрации (б), 25°C.

Рис. 7. Зависимость $\ln(I_0/I)$ в растворах бис-ДАБКО- n , где $n = 14$ (1), 16 (2), 18 (3), 20 (4), от концентрации ЦПБ при $C_{\text{бис-Дабсо-14}} = 0.02$ М (1), $C_{\text{бис-Дабсо-16}} = 0.005$ М (2), $C_{\text{бис-Дабсо-18}} = 0.005$ М (3), $C_{\text{бис-Дабсо-20}} = 0.004$ М (4), $\lambda = 394$ нм.

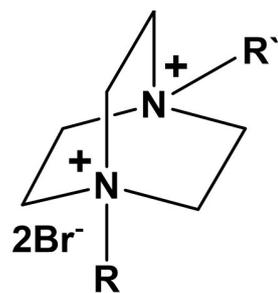


Рисунок 1. Шайхутдинова и др.

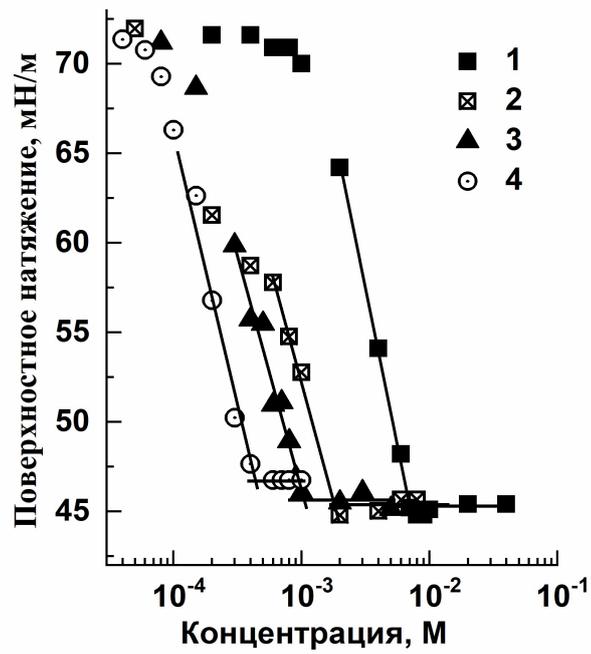


Рисунок 2. Шайхутдинова и др.

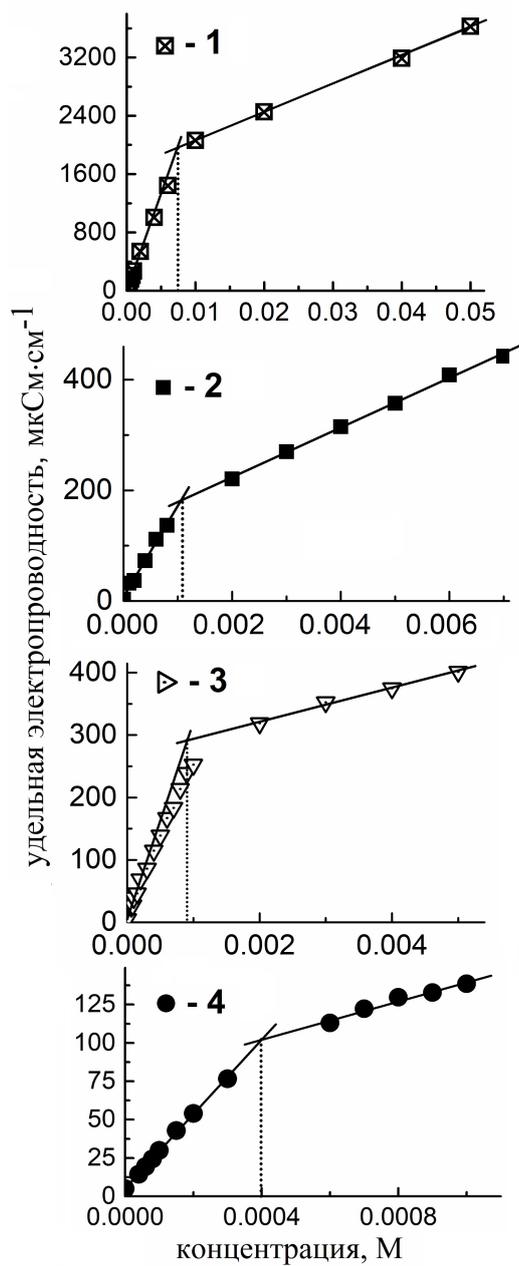


Рисунок 3. Шайхутдинова и др.

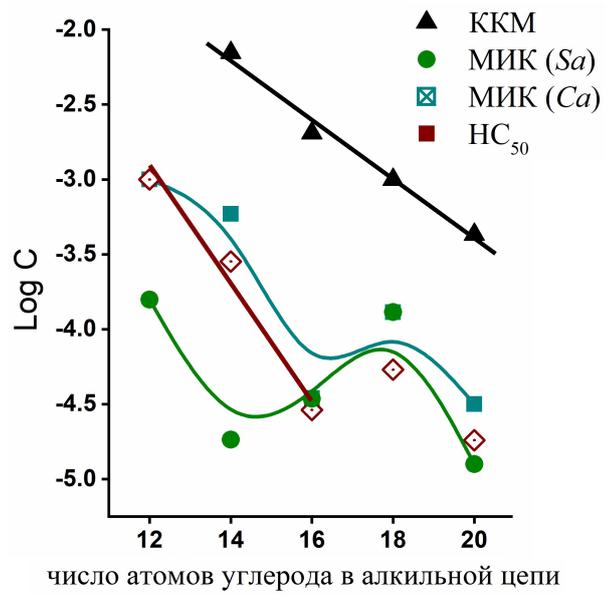


Рисунок 4. Шайхутдинова и др.

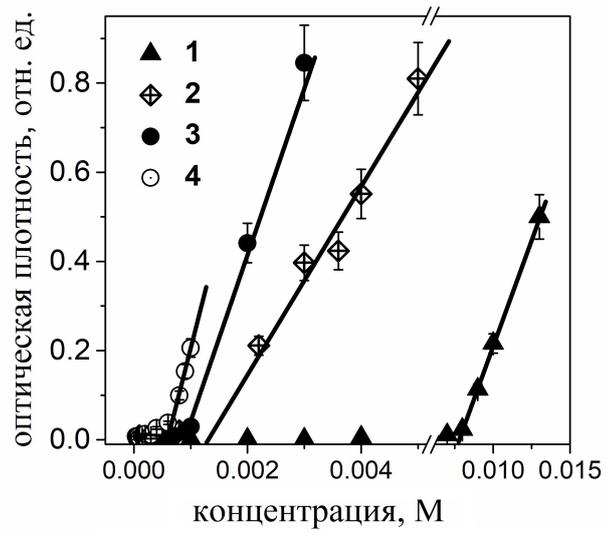


Рисунок 5. Шайхутдинова и др.

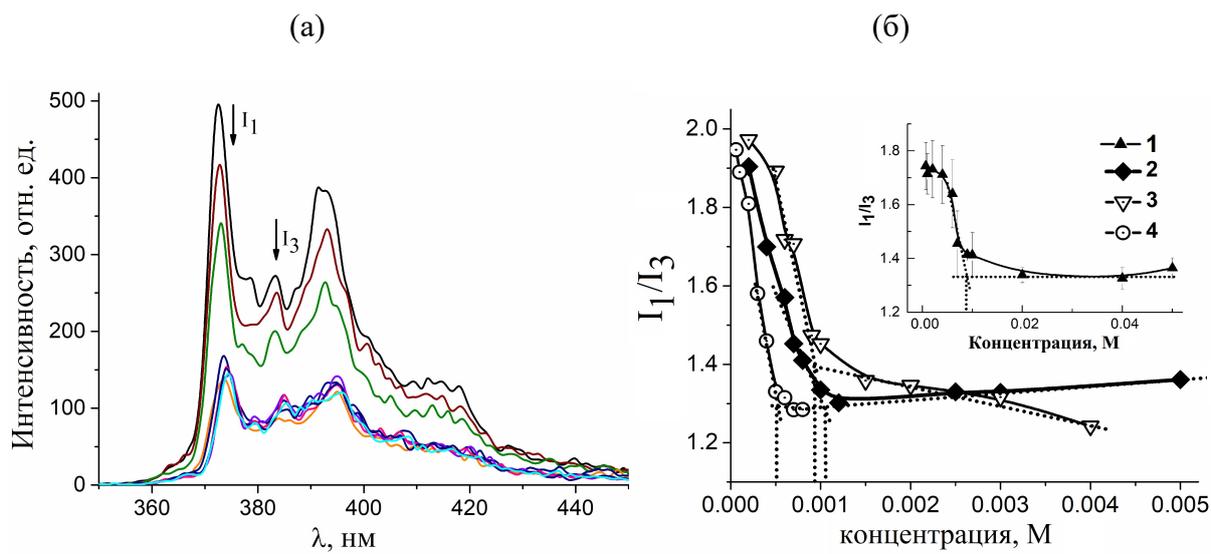


Рисунок 6. Шайхутдинова и др.

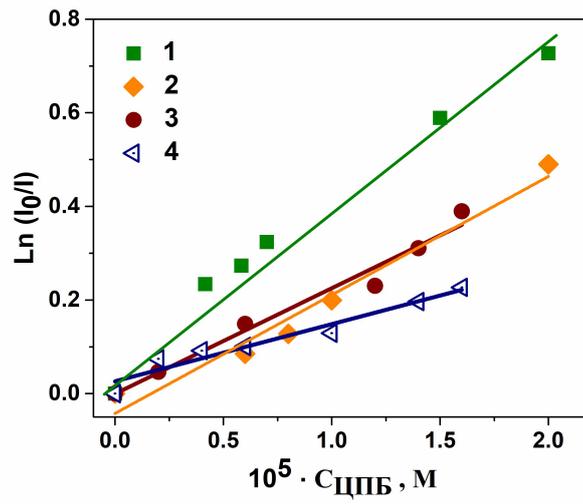


Рисунок 7. Шайхутдинова и др.