



Материалы с новыми функциональными свойствами

УДК 544.773:614.7

DOI: 10.25514/CHS.2026.1.26115

## Солюбилизация гемина в воде с помощью водорастворимых полимеров

*А. В. Лобанов<sup>1</sup>✉, Е. В. Китущина<sup>1,2</sup>, А. В. Стрючкова<sup>1</sup>, А. О. Поздеев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», Москва, Россия, e-mail: [av.lobanov@mpgu.su](mailto:av.lobanov@mpgu.su)

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 06.04.2026 г.; после доработки: 29.05.2026 г.; принята в печать: 03.06.2026 г.

**Аннотация** – В настоящей статье исследована солюбилизация гемина в воде полимерами полиэтиленимином, полиаллиламином, поливинилпирролидоном, хлоридом полидиметилдиаллиламмония, полиэтиленгликолем, поливиниловым спиртом с образованием устойчивых комплексов. Гемин-полимерные пленки обладают антибактериальной активностью в отношении кишечной палочки.

*Ключевые слова:* гемин, полимеры, солюбилизация.

---

Materials with new functional properties

UDC 544.773:614.7

DOI: 10.25514/CHS.2026.1.26115

## Solubilization of hemin in water using water-soluble polymers

*Anton V. Lobanov<sup>1</sup>✉, Ekaterina V. Kitushina<sup>1,2</sup>, Anastasiya V. Stryuchkova<sup>1</sup> and Anton O. Pozdeev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia, e-mail: [av.lobanov@mpgu.su](mailto:av.lobanov@mpgu.su)  
<sup>2</sup>Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Received: April 6, 2026; Revised: May 29, 2026; Accepted: June 3, 2026

**Abstract** – This article provides an solubilization of hemin in water with polymers (polyethyleneimine, polyallylamine, polyvinylpyrrolidone, polydimethyldiallylammonium chloride, polyethyleneglycol, and polyvinyl alcohol) to form stable complexes. Hemin-polymer films exhibit antibacterial activity against *E. coli*.

*Keywords:* hemin, polymers, solubilization.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросы санитарно-гигиенического контроля сегодня продолжают оставаться в фокусе внимания исследователей, что связано с необходимостью разработки, с одной стороны, химически устойчивых, а, с другой, – экологически чистых антисептических препаратов. К немаловажным факторам относится и себестоимость компонентов таких средств. Одним из решений в данной исследовательской области, позволяющее учесть перечисленные факторы и достичь их оптимального соотношения, является создание антисептиков на основе доступных биологически активных веществ.

Известна антибактериальная активность природного комплексного соединения железа – гемина [1, 2]. Гемин является комплексом Fe(III) с протопорфирином IX (FeCIPP), который может быть выделен из крови сельскохозяйственных животных, зачастую являющейся отходом мясоперерабатывающей промышленности. Гемин, как комплекс металла переменной валентности, является эффективным катализатором образования активных форм кислорода в воде, таких как гидроксильный ( $\cdot\text{OH}$ ) и пероксидный радикалы ( $\text{HO}_2\cdot$ ), супероксид-анион радикал ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ), пероксид водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), что обуславливает его антибактериальное действие в отношении патогенных микроорганизмов [3–5].

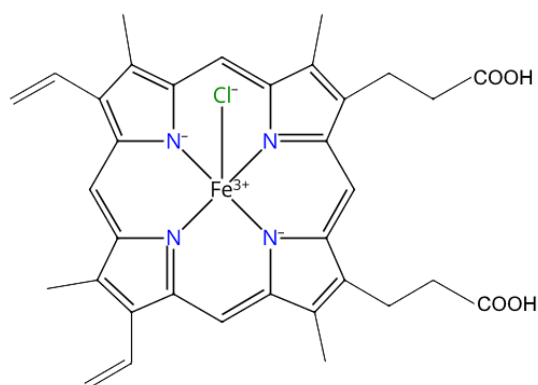
Механизм каталитической активности FeCIPP довольно хорошо изучен и в настоящее время наибольший интерес представляет разработка многокомпонентных систем, включающих FeCIPP, обеспечивающих его пролонгированное действие. Одним из направлений является получение полимерных композитов на основе FeCIPP [6–8]. Перспектива использования подобных материалов обусловлена широким спектром возможностей их применения, от антисептических покрытий рабочей поверхности медицинских инструментов до бактерицидных пластырей и повязок. При этом в случае водорастворимых полимеров возможно получение как жидких водных эмульсий FeCIPP, так его полимерных пленок на различных поверхностях.

Целью настоящей работы было получение комплексов FeCIPP с водорастворимыми полимерами, определение стабильности этих комплексов и их антибактериальных свойств в форме пленок.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

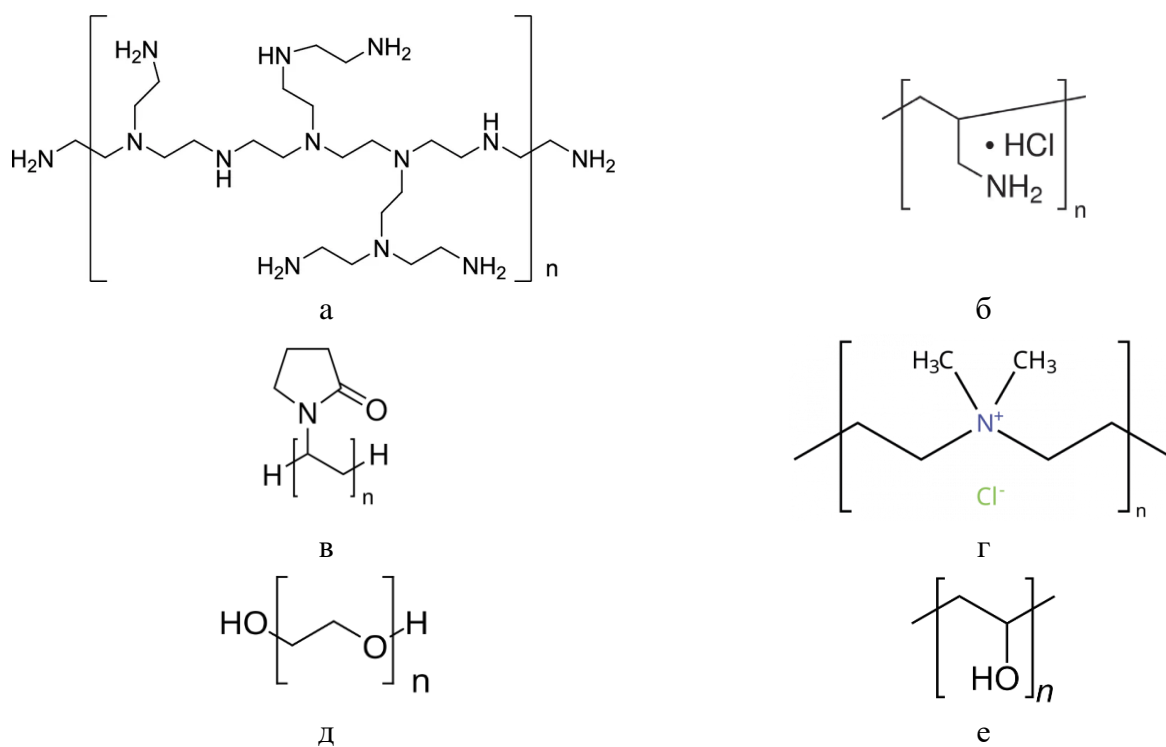
В работе использовали гемин, выделенный из свиной крови по известной методике [9]. Начальной стадией перед процедурой выделения была обработка крови в роторно-пульсационном аппарате, благодаря чему происходит более эффективное (в  $\sim 1,5$  раза) образование кровяных сгустков, которые далее разделяются на фибрин и эритроциты. В качестве водорастворимых полимеров для солюбилизации FeCIPP в воде были взяты полиэтиленимин (ПЭИ) с м.в. 25000 г/моль, полиаллиламин (ПАА) с м.в. 15000 г/моль, поливинилпирролидон (ПВП) с м.в. 25000 г/моль, хлорид полидиметилдиаллиламмония (ПДДА) с м.в. 40000 г/моль, полиэтиленгликоль (ПЭГ) с м.в. 15000 г/моль, поливиниловый спирт (ПВС) с м.в. 20000 г/моль, предоставленные сотрудниками лаборатории

физико-химии композиций синтетических и природных полимеров ИБХФ РАН. Структурные формулы соединений приведены на рис. 1 и 2.



**Рис. 1.** Структурная формула гемина.

**Fig. 1.** Chemical structure of hemin.



**Рис. 2.** Структурные формулы полиэтиленимина (а), полиаллиламина (б), поливинилпирролидона (в), хлорида полидиметилдиаллиламмония (г), полиэтиленгликоля (д), поливинилового спирта (е).

**Fig. 2.** Chemical structure of polyethyleneimine (a), polyallylamine (b), polyvinylpyrrolidone (c), polydimethyldiallylammonium chloride (g), polyethyleneglycol (d), polyvinyl alcohol (e).

Солубилизацию FeCIPР в водных растворах полимеров проводили в стеклянной кювете для спектрофотометра с длиной оптического пути 1 см. В кювету наливали 2 мл раствора одного из полимеров с концентрацией от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  моль/л, в который затем вносили 20 мкл раствора FeCIPР в ДМФА с концентрацией  $10^{-3}$  моль/л. Электронные спектры FeCIPР в растворах полимеров записывали на спектрофотометре ПЭ5400УФ (Экротех, Россия) на

в интервале длин волн 340-660 нм. Проводили пять независимых измерений. Относительная погрешность определения величины оптической плотности не превышала 1%.

Исследования антибактериальных свойств FeClPP в полимерных пленках проводили на тест-культуре кишечной палочки *E. coli* 1257. Контролем служили образцы пленок чистых полимеров. Культуру микроорганизмов пересекали на мясо-пептонный агар и инкубировали в течение 18 ч при 37°C. Затем готовили в физиологическом растворе суспензию клеток *E. coli* и подсчитывали количество микробных клеток по стандарту мутности 10<sup>4</sup> м.к./мл. В стерильные чашки Петри наливали 5 мл раствора полимера с FeClPP (или 5 мл раствора чистого полимера в контроле), давали высохнуть при температуре 60°C до образования пленки толщиной 20-30 мкм. Далее по поверхности пленки распределяли 1 мл суспензии клеток *E. coli* и выдерживали при комнатной температуре в течение 30 мин, после чего в чашку наливали 9 мл стерильного физиологического раствора и выдерживали в течение 30 мин для элюирования клеток тест-культуры с полимерной пленки. Материал из чашек объемом 100 мкл высевали на поверхность мясо-пептонного агара, разлитого в чашки Петри. Посевы инкубировали в течение 48 ч при 37°C и далее проводили подсчет количества жизнеспособных клеток бактерий. Результат усредняли по пяти опытам, разброс результатов подсчета количества клеток не превышал ±10%.

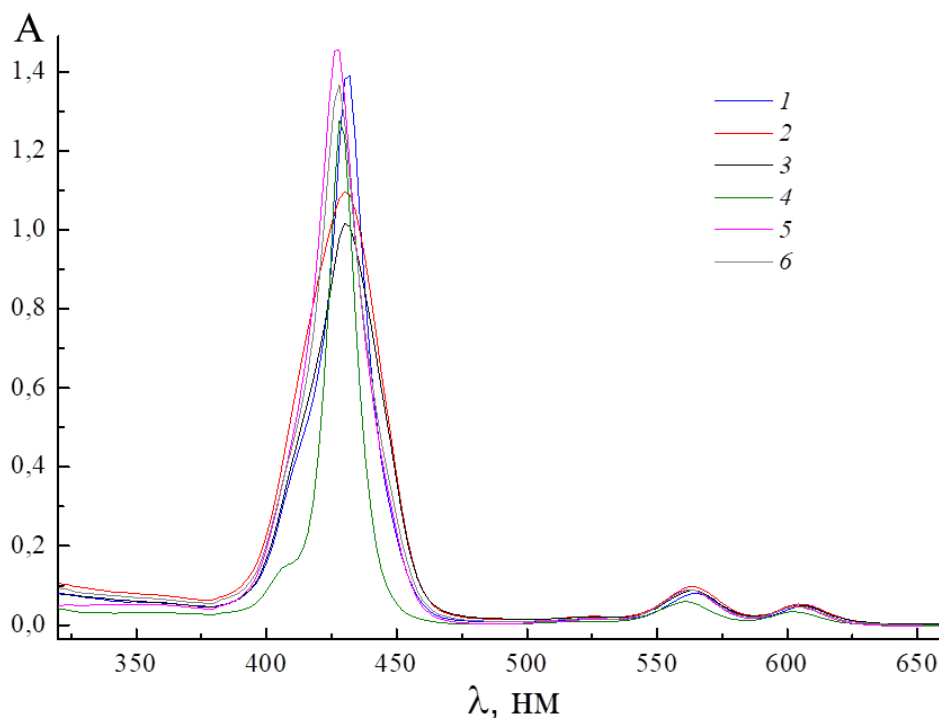
### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гемин ограниченно растворяется в воде, причем только в щелочных средах, благодаря диссоциации двух карбоксильных групп на пропионовокислых остатках молекулы порфиринового лиганда. Одним из способов солюбилизации FeClPP в водных системах с нейтральной реакцией среды является использование подходов супрамолекулярной химии, например, за счет образования комплексов с водорастворимыми полимерами.

Полимеры ПЭИ, ПАА, ПВП, ПДДА, ПЭГ и ПВС растворимы в воде и могут быть использованы для солюбилизации биологически активных соединений для дальнейшего использования их в составе эмульсий, а после концентрирования или высыхания – в форме гидрогелей или пленок соответственно. Молекулы FeClPP и перечисленных полимеров, судя по их структуре (рис. 1 и 2) могут связываться за счет гидрофобных, координационных, диполь-дипольных взаимодействий, а также путем образования водородных связей.

Как показывает анализ методом спектрофотометрии, в растворах ПЭИ, ПАА, ПВП, ПДДА, ПЭГ, ПВС при добавлении к ним FeClPP в электронных спектрах поглощения наблюдаются полосы, характерные для FeClPP (интенсивная полоса Core и Q-полосы малой интенсивности), что говорит о связывании молекул FeClPP с полимерными цепями (рис. 3). Как видно из спектров, приведенных на рисунке 3, в зависимости от химической природы полимера вид спектра несколько трансформируется. Для растворов с одной и той же концентрацией FeClPP (1·10<sup>-5</sup> моль/л) оптическая плотность,

отражающая величину коэффициента молярной экстинкции, изменяется до 1,4 раза, в то время как положение полосы Сорс меняется в пределах 5 нм. Форма спектра для FeClPP в комплексе с ПДДА практически идентична таковой для раствора FeClPP в ДМСО, тогда как в случае комплексов с другими полимерами наблюдается уширение полос поглощения FeClPP, что, возможно, объясняется снижением молекулярной подвижности хромофоров в связанном состоянии. При этом дополнительных полос в спектрах не обнаруживается, что позволяет исключить образование агрегатов Н- или J-типа в сложных системах.



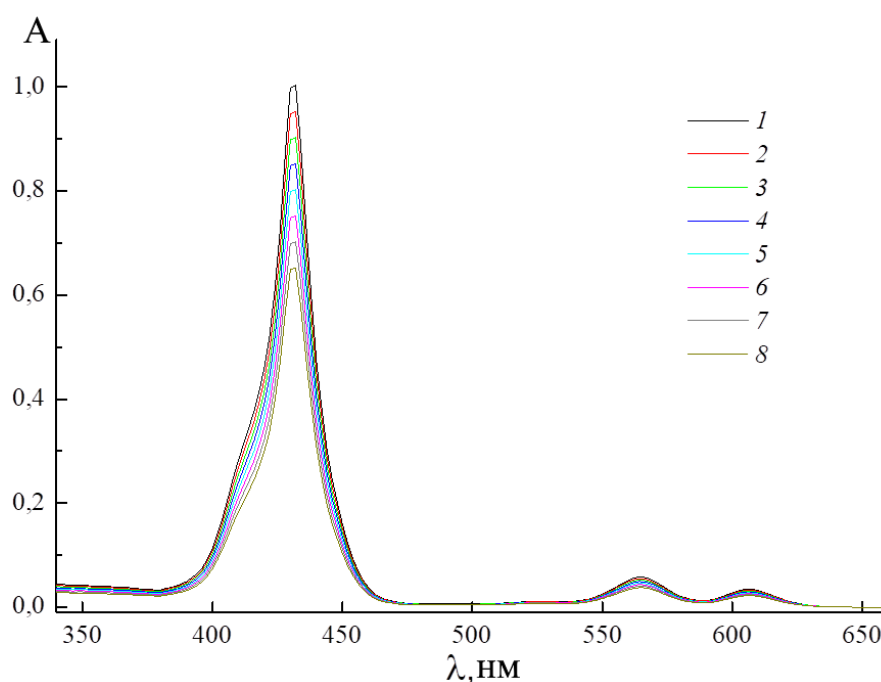
**Рис. 3.** Электронные спектры поглощения FeClPP с концентрацией  $1 \cdot 10^{-5}$  моль/л в комплексах с ПЭИ (1), ПАА (2), ПВП (3), ПДДА (4), ПЭГ (5), ПВС (6) в воде.

**Fig. 3.** Electronic absorption spectra of FeClPP at concentration  $1 \cdot 10^{-5}$  mol/l in complexes with PEI (1), PAA (2), PVP (3), PDDA (4), PEG (5), PVA (6) in water.

В качестве причин, обуславливающих связывание FeClPP с макромолекулами, можно предположить проявление сил слабого (нековалентного) взаимодействия, таких как водородные связи, ионные, диполь-дипольные, ион-дипольные и ван-дер-ваальсовы взаимодействия, в которых могут участвовать кислород- и азотсодержащие фрагменты полимерных цепей, карбоксильные группы гемина, координационные вакансии катиона железа(III). Кроме того, очевидно, проявляются и гидрофобные взаимодействия между ароматическим остовом молекулы FeClPP и углеводородными цепями полимеров.

С увеличением концентрации полимера в воде во всех случаях отмечалось снижение интенсивности полос в спектре, как показано на примере образования комплекса FeClPP с ПВП (рис. 4). Наблюдаемый эффект свидетельствует об эффективном связывании молекул FeClPP с полимерными цепями и в то же время исключает агрегацию FeClPP, поскольку появление

характерных полос агрегатов в процессе комплексообразования в спектрах не наблюдается.



**Рис. 4.** Электронные спектры поглощения FeClPP с концентрацией  $9,9 \cdot 10^{-6}$  моль/л в комплексе с ПВП в концентрации  $2 \cdot 10^{-5}$  (1),  $4 \cdot 10^{-5}$  (2),  $6 \cdot 10^{-5}$  (3),  $8 \cdot 10^{-5}$  (4),  $2 \cdot 10^{-4}$  (5),  $4 \cdot 10^{-4}$  (6),  $6 \cdot 10^{-4}$  (7),  $8 \cdot 10^{-4}$  (8) моль/л (9).

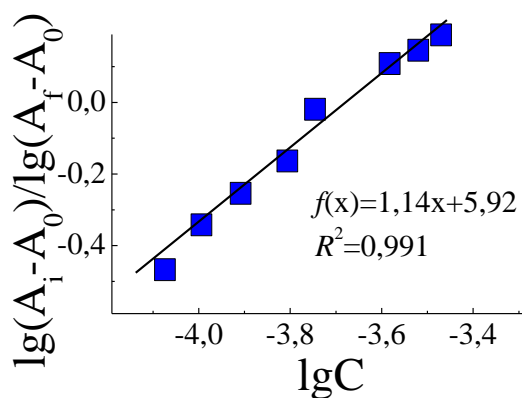
**Fig. 4.** Electronic absorption spectra of FeClPP at concentration  $9.9 \cdot 10^{-6}$  mol/l in complex with PVP at concentrations of  $2 \cdot 10^{-5}$  (1),  $4 \cdot 10^{-5}$  (2),  $6 \cdot 10^{-5}$  (3),  $8 \cdot 10^{-5}$  (4),  $2 \cdot 10^{-4}$  (5),  $4 \cdot 10^{-4}$  (6),  $6 \cdot 10^{-4}$  (7),  $8 \cdot 10^{-4}$  (8) mol/l (9).

Процесс связывания FeClPP макромолекулами полимеров был исследован методом, сочетающим закон Бугера-Ламберта-Бера и закон действующих масс в графической интерпретации в координатах Бенези-Хильдебранда [10] по соответствующему уравнению:

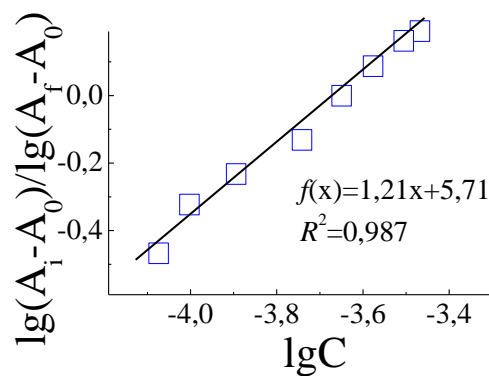
$$\lg \frac{A_f - A_0}{A - A_0} = n \lg[C] + \lg K_B,$$

где  $A_0$ ,  $A_f$ ,  $A$  – начальное, конечное и промежуточное значение оптической плотности растворов FeClPP в присутствии полимеров,  $C$  – концентрация того или иного полимера (моль/л),  $K_B$  – константа связывания FeClPP с полимером (л/моль),  $n$  – количество молекул полимера, приходящееся на одну молекулу FeClPP.

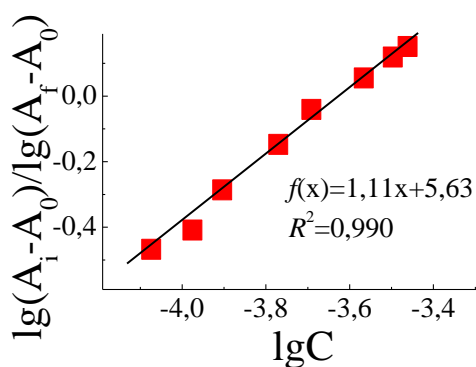
Зависимости Бенези-Хильдебранда представляются прямыми (рис. 5), описываемые функцией  $f(x)=ax+b$ , где  $a=n$ , а  $b=\lg K_B$ . Как видно из данных, представленных на рис. 5, для всех полимерных систем параметр  $n$  оказался по величине близким к 1, что позволяет говорить об образовании комплексов FeClPP с полимерными макромолекулами преимущественно состава 1:1.



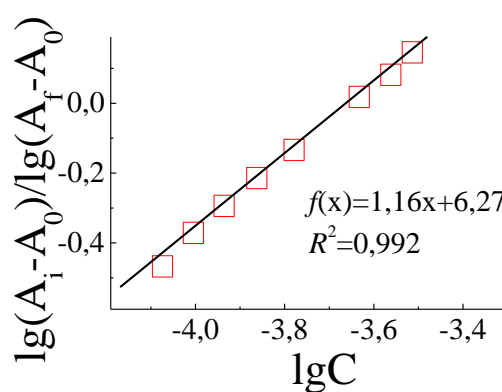
а



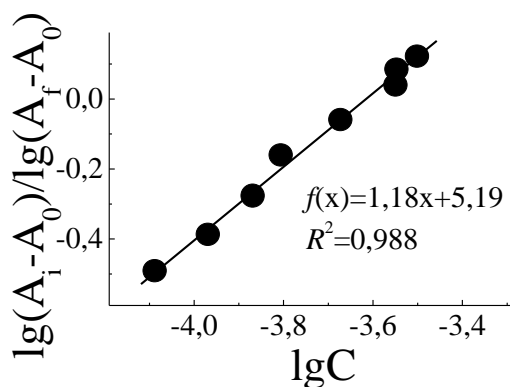
б



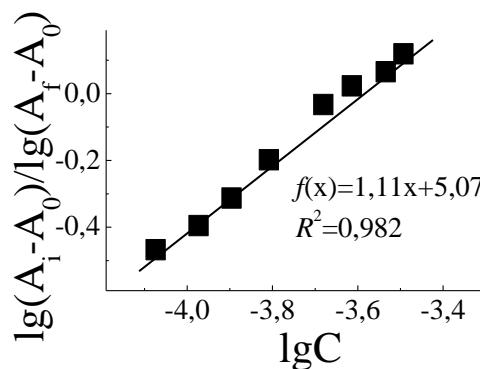
в



г



д



е

**Рис. 5.** Зависимость Бенези-Хильдебранда для процесса солюбилизации FeClPP в растворах ПЭИ (а), ПАА (б), ПВП (в), ПДДА (г), ПЭГ (д), ПВС (е).

**Fig. 5.** Benesi-Hildebrand dependence for the complexation of FeClPP with PEI (a), PAA (б), PVP (в), PDDA (г), PEG (д), PVA (е).

Величина  $K_B$  для различных полимеров представлена в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры состава и устойчивости комплексов FeClPP с полимерами

**Table 1.** Parameters of the composition and stability of FeClPP complexes with polymers

Полимер	ПЭИ	ПАА	ПВП	ПДДА	ПЭГ	ПВС
$K_B$	$8,3 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^5$	$4,3 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$

Как видно из вычисленных значений  $K_B$ , комплексы FeClPP с ПЭИ, ПАА и ПВП, имеющими азотсодержащие группы несколько более прочные ( $K_B=(4-8) \cdot 10^5$  л/моль), чем комплексы FeClPP с ПЭГ и ПВС, у которых имеются только кислородсодержащие группы ( $K_B \leq 1,5 \cdot 10^5$  л/моль). Наиболее прочными оказались комплексы FeClPP с ПДДА, для которых значение  $K_B$  составило  $1,9 \cdot 10^6$  л/моль. Вероятной причиной наблюдаемой особенности, как можно предполагать, является присутствие положительно заряженных фрагментов в связи с наличием в структуре макромолекул ПДДА кватернизированных атомов азота, с которыми, возможно, связываются карбоксильные группы FeClPP.

Для исследования антибактериальной активности FeClPP в составе полимерных комплексов были получены пленки из растворов, действие которых было протестировано в отношении клеток кишечной палочки. Ранее было подтверждено антисептическое действие порфириновых комплексов железа(III) в составе волокнистого материала из полигидроксibuтирата [11]. Хорошо известно, что *E. coli* является одним из наиболее распространенных возбудителей острых инфекционных заболеваний при нарушении санитарно-гигиенических условий в быту, на предприятиях пищевой промышленности, при медицинских манипуляциях. Результаты биологического тестирования комплексов FeClPP с различными полимерами были получены для пленок, высушенных из растворов с концентрацией обоих компонентов  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/л.

Из представленных данных (табл. 2) видно, что для пленок в опытных образцах количество жизнеспособных клеток *E. coli* после контакта с FeClPP-полимерной пленкой снизилось в 100 раз и более в случаях использования полимеров ПЭИ, ПАА, ПВП и ПДДА, тогда как для FeClPP с ПЭГ и ПВС эффект был на порядок ниже. Интересно отметить довольно высокую антибактериальную активность собственно матрицы ПДДА, что видно из данных, полученных для контрольных пленок из чистых полимеров.

**Таблица 2.** Действие FeClPP в составе полимерных комплексов на жизнеспособность клеток *E. coli*

**Table 2.** The effect of FeClPP in the composition of polymer complexes on the viability of *E. coli* cells

Полимер	Количество жизнеспособных микроорганизмов (КОЕ/мл)		
	исходная тест-культура	опытный образец	контрольный образец
ПЭИ	$2,0 \cdot 10^4$	$<1 \cdot 10^2$	$7,1 \cdot 10^3$
ПАА	$2,0 \cdot 10^4$	$<1 \cdot 10^2$	$6,0 \cdot 10^3$
ПВП	$2,0 \cdot 10^4$	$<1 \cdot 10^2$	$6,3 \cdot 10^3$
ПДДА	$2,0 \cdot 10^4$	$<1 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^3$
ПЭГ	$2,1 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$
ПВС	$2,1 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^3$	$7,8 \cdot 10^3$

Результаты оценки антибактериальных свойств полимерных комплексов FeClPP показывают, что данные материалы в пленочной форме проявляют

способность подавлять штаммы кишечной палочки и, кроме того, действуют как покрытия, не позволяющие клеткам кишечной палочки прикрепляться к поверхностям и образовывать биопленки. Следовательно, данные композитные полимерные материалы уничтожают бактерии и предотвращают их размножение при контакте, обеспечивая длительную защиту. Несмотря на то, что сама по себе полимерная матрица также проявляет определенную антибактериальную активность, например, поликатионные полимеры могут снижать количество микроорганизмов на порядок, добавление гемина позволяет достичь более эффективного воздействия. При направленном подборе полимера композиты, содержащие гемин, могут быть использованы в качестве защитных покрытий на хирургических инструментах, поверхностях в больницах, дверных ручках, в системах вентиляции, на стенах, а также при создании антисептических средств, материалов типа «искусственная кожа», пластырей, медицинских повязок.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе доступного биологически активного соединения гемина с использованием солюбилизующих водорастворимых полимеров могут быть получены водные эмульсии, состоящие из устойчивых гемин-полимерных комплексов. Пленки, образующиеся при нанесении полимерных систем на поверхности с последующим высушиванием, проявляют антибактериальное действие, что в целом показывает перспективность данного подхода при разработке новых антисептических материалов и средств.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства просвещения Российской Федерации (тема № 126031718849-6 («Междисциплинарные научно-образовательные подходы в получении биосовместимых форм природных соединений»)).*

### ACKNOWLEDGEMENT

*The research was carried out within the state assignment of The Ministry of Education of The Russian Federation (theme No. 126031718849-6).*

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

### CONFLICT OF INTERESTS:

*The authors declare no conflict of interests.*

Список литературы:

1. Huang, M., Wang, Zh., Yao, L., Zhang, L., Gou, X., Mo, H., Li, H., Hu, L., & Zhou, X. (2023). Ferric chloride induces ferroptosis in *Pseudomonas aeruginosa* and heals wound infection in a mouse model. *Intern J. Antimicrob. Agents*, 61(5), 106794. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2023.106794>.

2. Tyubaeva, P., Varyan, I., Lobanov, A., Olkhov, A., & Popov, A. (2021). Effect of the hemin molecular complexes on the structure and properties of the composite electrospun materials based on poly(3-hydroxybutyrate). *Polymers*, 13(22), 4024. <https://doi.org/10.3390/polym13224024>.
3. Kim, H., Yin, K., Falcon, D.M., & Xue, X. (2019). The interaction of Hemin and Sestrin2 modulates oxidative stress and colon tumor growth. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 374, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.04.025>.
4. Tovmasyan, A., Batinic-Haberle, I., & Benov, L. (2020). Antibacterial activity of synthetic cationic iron porphyrins. *Antioxidants*, 9(10), 972. <https://doi.org/10.3390/antiox9100972>.
5. Gruznov, D. V., Gruznova, O. A., Popov, N. I., Alieva, Z. E., Shcherbakova, G. Sh., Kitushina, E. V., Ovcharenko, E. N., Gololobova, E. G., Klimenko, I. V., Lobanov, A. V., & Melnikov, M. Ya. (2024). Antibacterial *in vitro* study of Fe<sup>III</sup>Cl-tetraphenylporphyrin incorporated into poly-N-vinylpyrrolidone polymeric matrix. *Macroheterocycles*, 17(1), 16–21. <https://doi.org/10.6060/mhc235345g>.
6. Gruznov, D. V., Gruznova, O. A., Popov, N. I., Alieva, Z. E., Stepanova, S. P., Shcherbakova, G. Sh., Kitushina, E. V., Tyubaeva, P. M., Varyan, I. A., Olkhov, A. A., Popov, A. A., Klimenko, I. V., & Lobanov, A. V. (2023). Inhibitory effect of hemin-poly(3-hydroxybutyrate) system on *E. coli* and *S. aureus* growth. *Macroheterocycles*, 16(4), 261–265. <https://doi.org/10.6060/mhc235386g>.
7. Gruznov, D. V., Gruznova, O. A., Popov, N. I., Shcherbakova, G. Sh., Shuteeva, E. N., Konyashkina, A. V., Chesnokova, I. P., Plaksina, L. F., & Lobanov, A. V. (2024). Antibacterial activity of chlorophyll and hemin polymeric forms against *S. aureus* and *E. coli*. *Macroheterocycles*, 17(4), 275–284. <https://doi.org/10.6060/mhc245786g>.
8. Gruznov, D. V., Gruznova, O. A., Chesnokova, I. P., Plaksina, L. F., Lobanov, A. V., & Shcherbakova, G. Sh. (2024). Antimicrobial properties of chlorophyll and hemin incorporated into the polymeric matrix of poly-N-vinylpyrrolidone. *BIO Web of Conferences*, 108, 03012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410803012>.
9. Фигурнов, В. А., Фигурнова, Е. В., Силантьев, Е. А., Фигурнов, А. В. Патент №2359682 «Способ получения гемина» от 27.06.2009. Бюл. №18.
10. Berezin, D. B., Kustov, A. V., Krest'yaninov, M. A., Shukhto, O. V., Batov, D. V., & Kukushkina, N. V. (2019). The behavior of monocationic chlorin in water and aqueous solutions of non-ionic surfactant Tween 80 and potassium iodide. *J. Mol. Liq.*, 283, 532–536. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.091>.
11. Лобанов, А. В., Ольхов, А. А., Попов, А. А. (2018). Бактерицидные свойства волокнистого материала на основе полигидроксibuтирата и металлокомплексов порфиринов. *Химическая безопасность*, 2(2), 78–84. <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.2.14104>.

## References:

1. Huang, M., Wang, Zh., Yao, L., Zhang, L., Gou, X., Mo, H., Li, H., Hu, L., & Zhou, X. (2023). Ferric chloride induces ferroptosis in *Pseudomonas aeruginosa* and heals wound infection in a mouse model. *Intern J. Antimicrob. Agents*, 61(5), 106794. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2023.106794>.
2. Tyubaeva, P., Varyan, I., Lobanov, A., Olkhov, A., & Popov, A. (2021). Effect of the hemin molecular complexes on the structure and properties of the composite electrospun materials based on poly(3-hydroxybutyrate). *Polymers*, 13(22), 4024. <https://doi.org/10.3390/polym13224024>.
3. Kim, H., Yin, K., Falcon, D.M., & Xue, X. (2019). The interaction of Hemin and Sestrin2 modulates oxidative stress and colon tumor growth. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 374, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.04.025>

4. Tovmasyan, A., Batinic-Haberle, I., & Benov, L. (2020). Antibacterial activity of synthetic cationic iron porphyrins. *Antioxidants*, 9(10), 972. <https://doi.org/10.3390/antiox9100972>.
5. Gruznov, D. V., Gruznova, O. A., Popov, N. I., Alieva, Z. E., Shcherbakova, G. Sh., Kitushina, E. V., Ovcharenko, E. N., Gololobova, E. G., Klimenko, I. V., Lobanov, A. V., & Melnikov, M. Ya. (2024). Antibacterial *in vitro* study of Fe<sup>III</sup>Cl-tetraphenylporphyrin incorporated into poly-N-vinylpyrrolidone polymeric matrix. *Macroheterocycles*, 17(1), 16–21. <https://doi.org/10.6060/mhc235345g>.
6. Gruznov, D. V., Gruznova, O. A., Popov, N. I., Alieva, Z. E., Stepanova, S. P., Shcherbakova, G. Sh., Kitushina, E. V., Tyubaeva, P. M., Varyan, I. A., Olkhov, A. A., Popov, A. A., Klimenko, I. V., & Lobanov, A. V. (2023). Inhibitory effect of hemin-poly(3-hydroxybutyrate) system on *E. coli* and *S. aureus* growth. *Macroheterocycles*, 16(4), 261–265. <https://doi.org/10.6060/mhc235386g>.
7. Gruznov, D. V., Gruznova, O. A., Popov, N. I., Shcherbakova, G. Sh., Shuteeva, E. N., Konyashkina, A. V., Chesnokova, I. P., Plaksina, L. F., & Lobanov, A. V. (2024). Antibacterial activity of chlorophyll and hemin polymeric forms against *S. aureus* and *E. coli*. *Macroheterocycles*, 17(4), 275–284. <https://doi.org/10.6060/mhc245786g>.
8. Gruznov, D. V., Gruznova, O. A., Chesnokova, I. P., Plaksina, L. F., Lobanov, A. V., & Shcherbakova, G. Sh. (2024). Antimicrobial properties of chlorophyll and hemin incorporated into the polymeric matrix of poly-N-vinylpyrrolidone. *BIO Web of Conferences*, 108, 03012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410803012>.
9. Figurnov, V. A., Figurnova, E. V., Silant'ev, E. A., Figurnov, A. V. Patent No. 2359682 «Method for Obtaining Hemin» dated June 27, 2009. Bulletin No. 18.
10. Berezin, D. B., Kustov, A. V., Krest'yaninov, M. A., Shukhto, O. V., Batov, D. V., & Kukushkina, N. V. (2019). The behavior of monocationic chlorin in water and aqueous solutions of non-ionic surfactant Tween 80 and potassium iodide. *J. Mol. Liq.*, 283, 532–536. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.091>.
11. Lobanov, A. V., Ol'khov, A. A., Popov, A. A. (2018). Bactericidal properties of fibrous material based on polyhydroxybutyrate and metal porphyrin complexes. *Khimicheskaya Bezopasnost' = Chemical Safety Science*, 2(2), 78–84. <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.2.14104>.