

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ФЕРРИТА КОБАЛЬТА В ГИДРОФИЛЬНОЙ ОБОЛОЧКЕ НА ПРОВОДИМОСТЬ БИСЛОЙНЫХ ЛИПИДНЫХ МЕМБРАН

Борисова Е.Д., Кожемова Б.Э., Константинов О.О., Корепанова Е.А., Михеев В.М.,
Михнич А.В., Сухова В.И., Астанина П.Н., Коплак О.В., Аносов А.А.

Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова

ул. Большая Пироговская, 2, стр. 4, г. Москва, 119435, РФ

Поступила в редакцию 14.07.2022. DOI: 10.29039/rusjbc.2022.0501

Аннотация. Магнитные наночастицы широко используются в медицинских приложениях, например, как контрастные вещества для магнитно-резонансной томографии, для усиления гипертермии, для адресной доставки лекарств, тераностики (терапия + диагностика). При использовании магнитных наночастиц *in vivo* им требуется специальное покрытие, способствующее биосовместимости и минимизирующее потенциальную токсичность в физиологических условиях. В качестве покрытия может быть использован сывороточный альбумин человека или полиэтиленгликоль. В этой работе исследованы взаимодействия кубических магнитных наночастиц феррита кобальта размером 12 и 27 нм с дифитаноилфосфатидилхолиновыми бислойными липидными мембранами. Проводимость мембран менялась в широких пределах – можно выделить две группы мембран: мембраны, проводимость которых (после добавления наночастиц) по сравнению с контролем практически не менялась, и мембраны, проводимость которых при добавлении наночастиц менялась скачком и увеличивалась в широком диапазоне на 0,5-2 порядка. Значимых различий между проводимостями при добавлении одинакового объема наночастиц размером 12 и 27 нм, окруженных сывороточным альбумином человека, не обнаружено. При добавлении наночастиц с оболочкой из полиэтиленгликоля проводимость увеличивалась значительно слабее, чем при добавлении наночастиц с оболочкой из сывороточного альбумина человека. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что магнитные наночастицы с гидрофильным покрытием взаимодействуют с мембранами, что может приводить к появлению метастабильных проводящих пор, которые, в свою очередь, увеличивают интегральную проводимость мембран.

Ключевые слова: бислойные липидные мембраны, магнитные наночастицы, электрическая проводимость, липидные поры.

Магнитные наночастицы (МНЧ) широко используются в медицинских приложениях, например, как контрастные вещества для магнитно-резонансной томографии, для усиления гипертермии, для адресной доставки лекарств, тераностики (терапия + диагностика) [1-3]. При этом при использовании МНЧ *in vivo* им требуется специальное покрытие, способствующее биосовместимости и минимизирующее потенциальную токсичность МНЧ в физиологических условиях. В качестве покрытия может быть использован человеческий сывороточный альбумин (ЧСА), который является транспортным белком, выполняющим множество функций в организме человека [1]. Также в литературе представлены исследования, в которых МНЧ покрыты полиэтиленгликолем (ПЭГ). ПЭГ является биосовместимым, стабилизирующим поверхностно-активным веществом [4].

В этой работе исследовали взаимодействия магнитных наночастиц феррита кобальта с дифитаноилфосфатидилхолиновыми бислойными мембранами. Ранее [5] мы изучали, как меняется проводимость азолектиновых мембран при добавлении наночастиц феррита кобальта, диспергированных в толуоле, в мембранный раствор азолектина в декане. Таким образом, мы изучали ситуацию, когда наночастицы уже находятся в мембране. Сейчас мы использовали наночастицы в гидрофильной оболочке (в ЧСА и ПЭГ), которые добавляли в окружающий мембрану раствор электролита, что в большей степени соответствует реальной ситуации, которая может возникнуть при использовании наночастиц при адресной доставке лекарств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях использовали коллоидный раствор флуоресцентно-меченных кубических магнитных наночастиц феррита кобальта CoFe_2O_4 , которые были синтезированы в НИТУ МИСИС, Россия. Для создания гидрофильной оболочки использовали ЧСА (молекулярный вес ~67 кДа) или ПЭГ (молекулярный вес 3500 г/моль). Средняя диагональ образцов наночастиц составляла 12 (МНЧ-12@BDP-TR) и 27 нм (МНЧ-27@BDP-TR или МНЧ-27@sCy5). Концентрации наночастиц: МНЧ-12@BDP-TR 0,85 мг CoFe_2O_4 /мл, МНЧ-27@BDP-TR 1,2 мг CoFe_2O_4 /мл, МНЧ-27@sCy5 $0,77 \pm 0,02$ мг CoFe_2O_4 /мл.

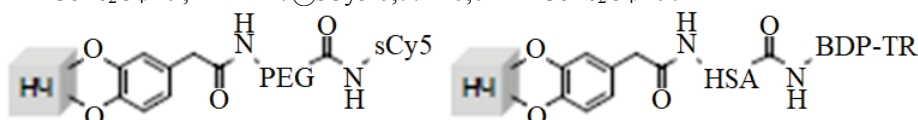


Рисунок 1. Схемы гидрофильных оболочек наночастиц

В этом исследовании флуоресцентных измерений не проводили, поэтому в дальнейшем мы будем использовать следующие обозначения: вместо МНЧ-12@BDP-TR – МНЧ12 ЧСА, вместо МНЧ-27@BDP-TR – МНЧ27 ЧСА, вместо МНЧ-27@sCy5 – МНЧ27 ПЭГ.

Дифитаноилфосфатидилхолин dphpc (Avanti Polar Lipids, Alabaster, США) был использован для формирования плоских бислойных липидных мембран БЛМ в растворе 0,1 М КСl. Мембраны были сформированы на круглом отверстии площадью 0,5 мм² в перегородке тефлоновой кюветы при комнатной температуре 21 ± 1 °С. Мембранный раствор содержал dphpc в х.ч. декане в концентрации 25 мг/мл.

Ток через мембрану измеряли с помощью электродов Ag-AgCl, подключенных к усилителю VA-10X (NPI Electronics GmbH, Германия) с сопротивлением обратной связи 5 ГОм и постоянной времени интегрирования 20 мс. Флуктуации тока через мембрану записывали в компьютер с частотой 1 кГц с помощью 16-разрядного АЦП (L-Card, Россия).

Полученные в экспериментах при постоянном напряжении на мембране токовые треки содержали импульсы. Мы полагаем, что эти импульсы обусловлены сквозными порами. Если рассматривать эти поры как цилиндры и считать, что удельная проводимость в поре равна проводимости в растворе, то радиус пор R определяется известной формулой:

$$R = \sqrt{\frac{Gh}{\pi g}}, \quad (1)$$

где $h = 5$ нм – толщина мембраны; G – проводимость поры; $g = 1,04$ См/м – удельная проводимость 0,1 М раствора КСl при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Было исследовано 28 мембран: к 10 мембранам добавляли МНЧ12 ЧСА, к 10 – МНЧ27 ЧСА, к 8 – МНЧ27 ПЭГ. Среднее время жизни мембран после полного почернения составляло 82 ± 42 мин (после знака ± указано стандартное отклонение). Сценарий эксперимента был следующим: после посадки мембраны в течение ~15 мин проводили контрольные измерения, потом через каждые ~15 мин в окружающий мембрану раствор, в ближнюю камеру кюветы, добавляли 10, еще 10, еще 40 и еще 40 мкл суспензии наночастиц, а в дальнюю камеру, чтобы исключить перепад давлений, добавляли соответствующий объем раствора. Через ~15 мин после последней добавки в дальнюю камеру кюветы добавляли 100 мкл суспензии наночастиц (100 мкл раствора добавляли в ближнюю камеру), чтобы сравнить концентрации наночастиц в обеих камерах кюветы.

На мембрану подавали постоянное напряжение 25 мВ и регистрировали флуктуации мембранного тока. Проводимость мембран менялась в широких пределах – можно выделить две группы мембран:

1) «непроводящие» мембраны, проводимость которых (после добавления наночастиц) по сравнению с контролем скачком не менялась. Таких мембран было: 50% с МНЧ12 ЧСА, 60% с МНЧ27 ЧСА, 63% с МНЧ27 ПЭГ;

2) «проводящие» мембраны, проводимость которых при добавлении наночастиц менялась скачком и увеличивалась в широком диапазоне на 0,5-2 порядка.

Зависимости проводимости мембран от добавленного в раствор объема наночастиц МНЧ12 ЧСА, МНЧ27 ЧСА, МНЧ27 ПЭГ представлены на рисунке 2. Представлена проводимость, усредненная по временному интервалу между добавками (после последней добавки – до конца записи). Значимых различий между проводимостями при добавлении одинакового объема наночастиц, окруженных ЧСА, нет, поэтому на графике представлен и усредненный результат по мембранам с добавкой МНЧ12 ЧСА, МНЧ27 ЧСА. На графике представлены стандартные ошибки для усредненных результатов. Большие погрешности связаны с большим разбросом данных от мембраны к мембране, в частности с наличием указанных выше двух групп мембран. На графике также представлены аппроксимирующие линии. При добавлении МНЧ с оболочкой из ПЭГ проводимость увеличивалась значительно слабее, чем при добавлении МНЧ с оболочкой из ЧСА.

На рисунке 3 представлены токовые треки (треки проводимости), полученные при мембранном фиксированном потенциале 25 мВ. Каждый трек начинается со скачка тока, после которого следуют разнообразные флуктуации тока: на рисунке 3а-в показаны треки после добавки МНЧ27 ЧСА, на рисунке 3г, д – после добавки МНЧ12 ЧСА, на рисунке 3е, 3ж, 3з – после добавки МНЧ27 ПЭГ. Величины скачков различаются более, чем на порядок от ~3 пА (120 пСм) до ~50 пА (2000 пСм). Для МНЧ с оболочкой из ЧСА после скачка уровень тока остается неизменным в течение длительного времени от секунд до минут. При этом в ряде случаев после скачка проводимости увеличилась дисперсия тока (рис. 3в, 3д; 3г – на некоторых участках). Для МНЧ с оболочкой из ПЭГ ситуация для двух мембран аналогичная (рис. 3ж, 3з), а для одной мембраны открывшиеся поры закрываются через ~1 секунду и значительно повышается дисперсия тока (рис. 3е).

Если считать, что в результате скачка образовывалась цилиндрические проводящие поры, то их радиусы, согласно (1), лежат в диапазоне от 0,4 до 1,7 нм.

Также после последней добавки МНЧ были измерены ВАХ «проводящих» и «непроводящих» мембран. Значимых отличий между ВАХ «проводящих» мембран для МНЧ12 ЧСА и МНЧ27 ЧСА не выявлено, поэтому на рисунке 4 представлена усредненная зависимость, приближенная параболой. ВАХ для «непроводящих» мембран показана для МНЧ27 ПЭГ.

Представленные на рисунке 2 линейные зависимости проводимости от объема добавленных МНЧ из-за колоссального разброса значений могут говорить только о том, что при добавлении МНЧ проводимость мембран

увеличивается, но не могут достоверно определить характер этой зависимости: линейная или нелинейная, если нелинейная, то какая именно? На рисунке 5 приведена медианная зависимость проводимости от объема добавленных МНЧ. Так как число «проводящих» мембран, проводимость которых скачкообразно увеличилась, не превышало половины, то медианная зависимость характеризует проводимость «непроводящих» мембран. Также на рисунке 5 показана средняя проводимость «проводящих» мембран после скачка проводимости. В таблице 1 приведены средние и медианные проводимости для каждой добавки, а также стандартные отклонения. Без МНЧ и при добавке 10 и 20 мкл МНЧ27 ПЭГ медианные проводимости практически равны средним, а стандартное отклонение вдвое меньше среднего значения. Эти данные не противоречат утверждению о распределении проводимости, близком к нормальному. Во всех других случаях медианы меньше средних, а стандартное отклонение превышает среднее значение (при 10 мкл МНЧ12 ЧСА они равны). Это следствие наличия двух групп мембран: «проводящих» и «непроводящих».

Отметим, что проводимость мембран в присутствии МНЧ с ПЭГ значимо меньше, чем в присутствии МНЧ с ЧСА (согласно критерию знаков $p = 0,05$). Это согласуется с данными [6] о том, что добавление ПЭГ вызывает дегидратацию бислоя, что может приводить к уменьшению эффективного размера полярных групп липидов и вызвать более плотную упаковку липидов в мембране, что препятствует возникновению пор. Также экспериментально было показано, что добавление ПЭГ приводит частичному или полному блокированию пор при фазовом переходе, что выражалось в полном исчезновении флуктуаций [7] или уменьшении частоты их появления [8].

Рассмотрим полученные токовые треки. Записи на рисунке 3д, з, ж представляются типичными при добавлении в окружающий мембрану раствор веществ, способствующих увеличению проницаемости мембраны. На записи видны несколько скачков, приводящих к росту проводимости, которые можно связать с возникновением пор. Некоторые поры закрываются, а часть остается открытыми.

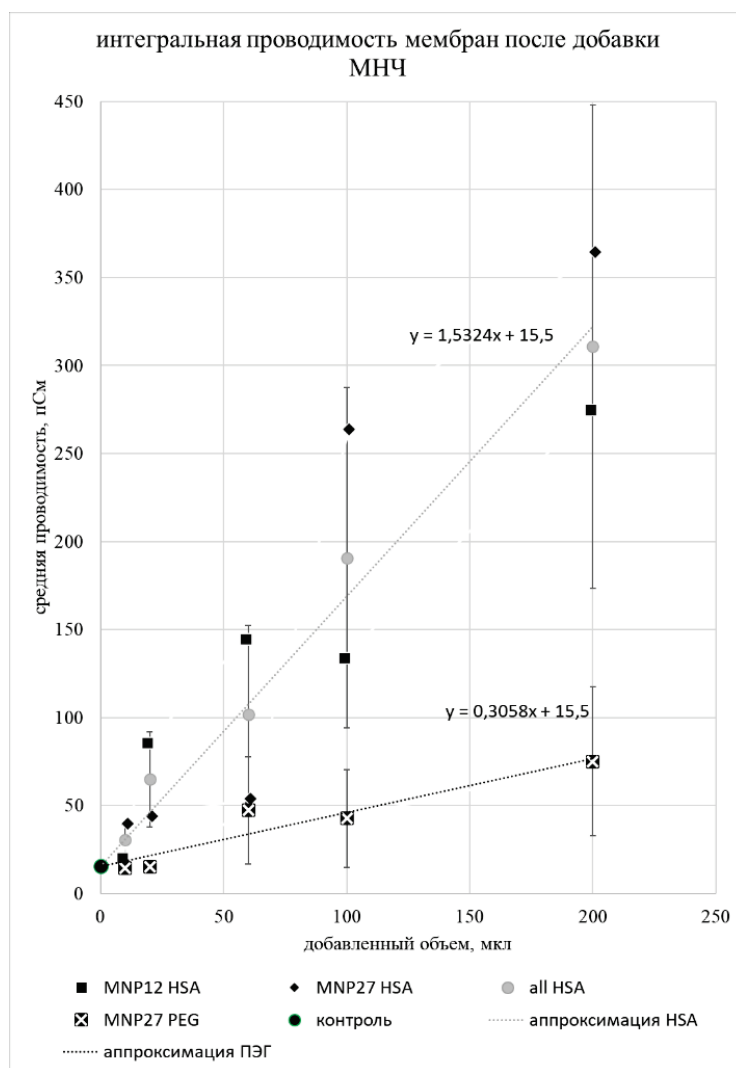
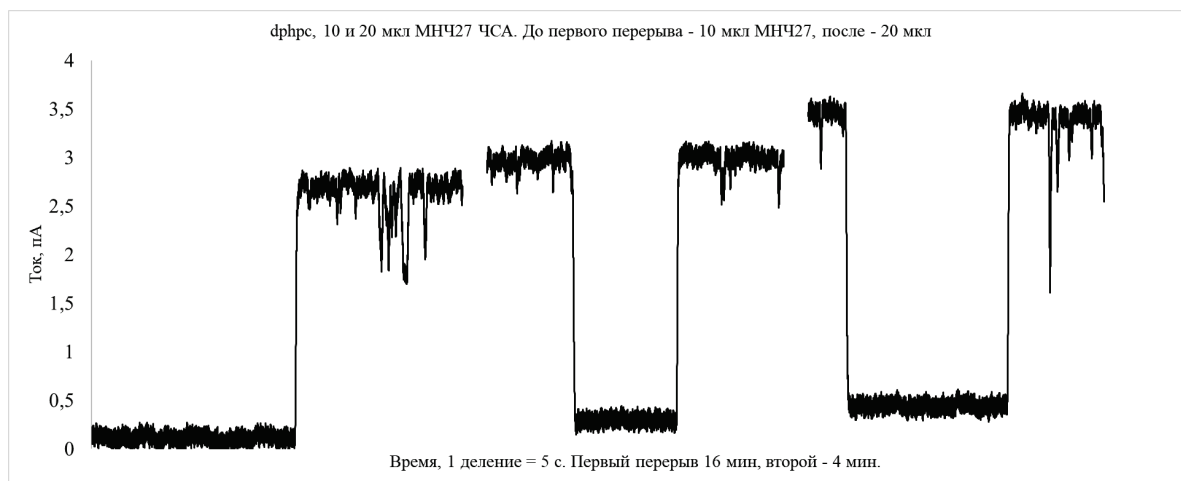
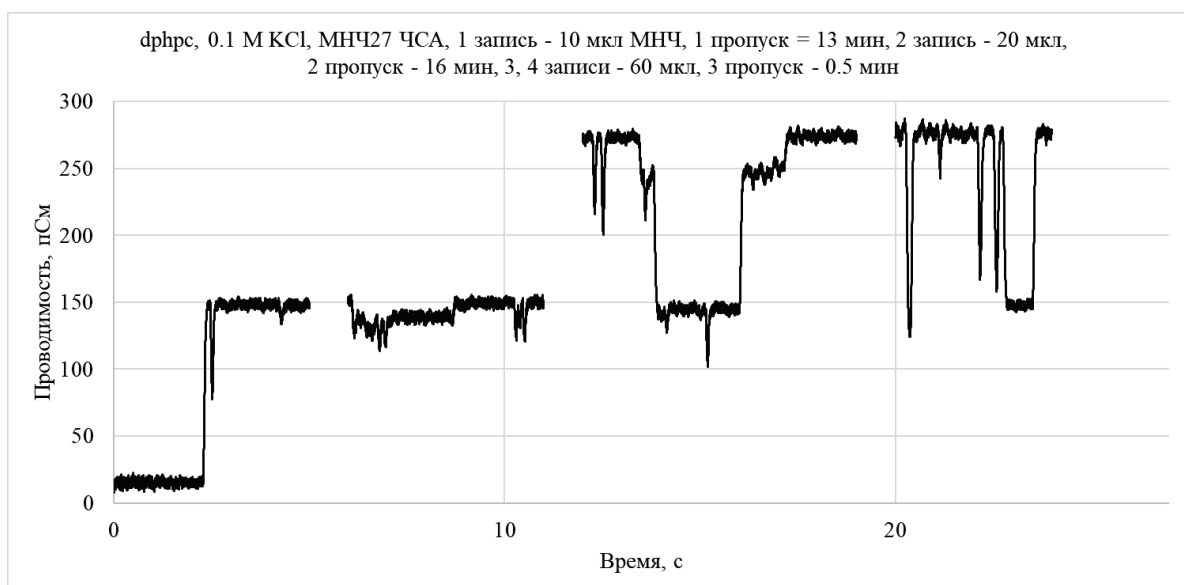


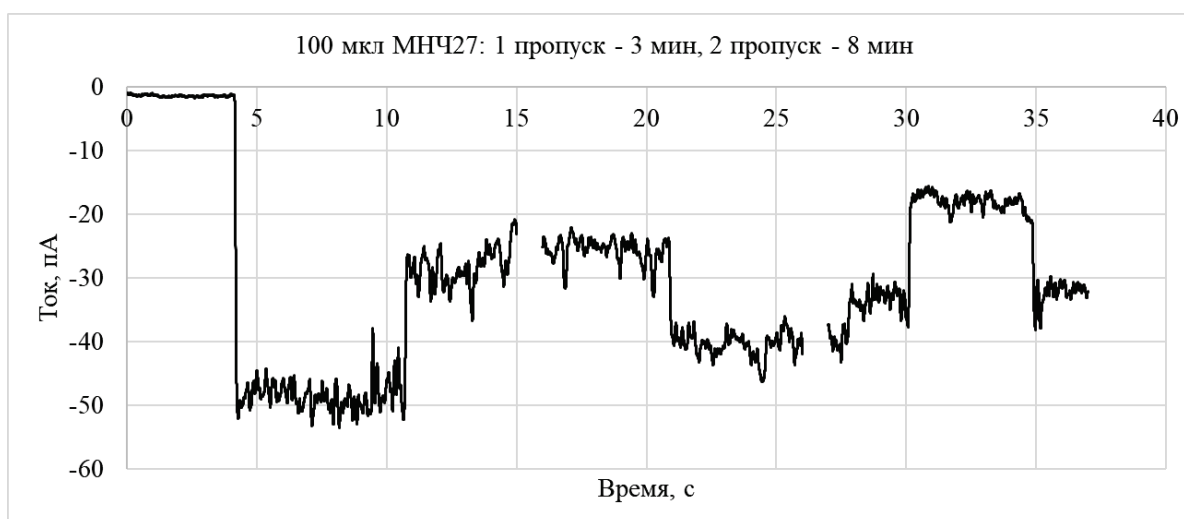
Рисунок 2. Зависимость проводимости БЛМ из dPhrC от объема добавленных в окружающий 0,1 М КСI раствор МНЧ. Указаны стандартные ошибки



а)

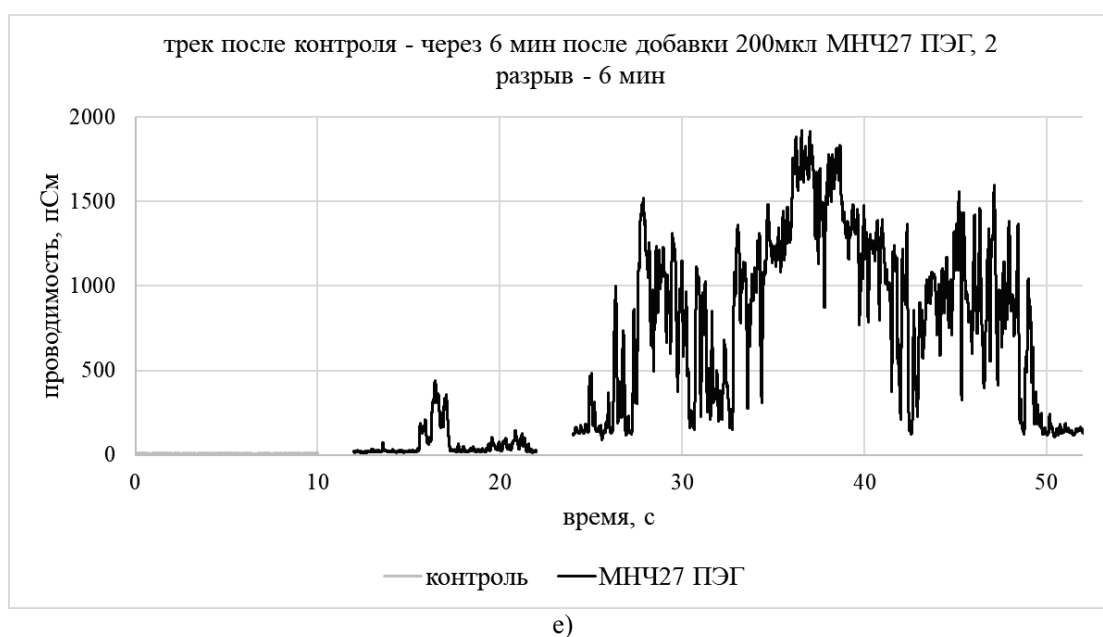
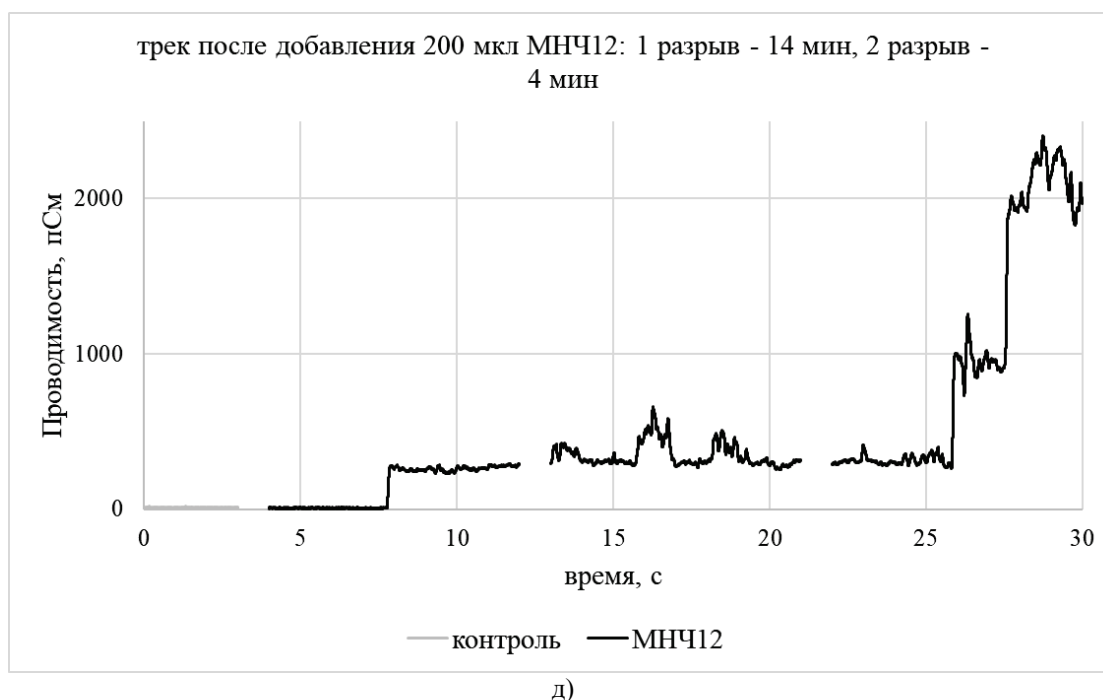
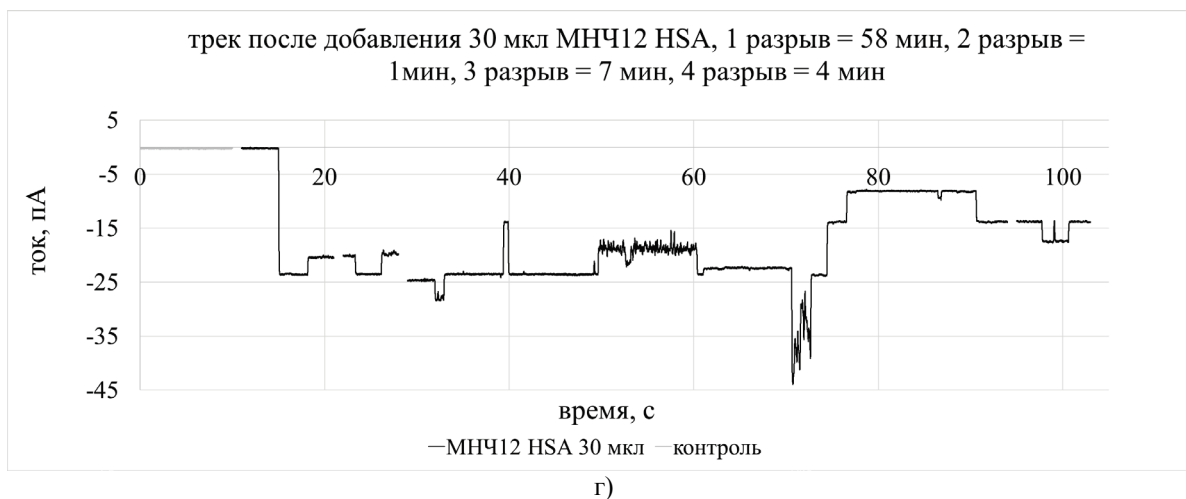


б)

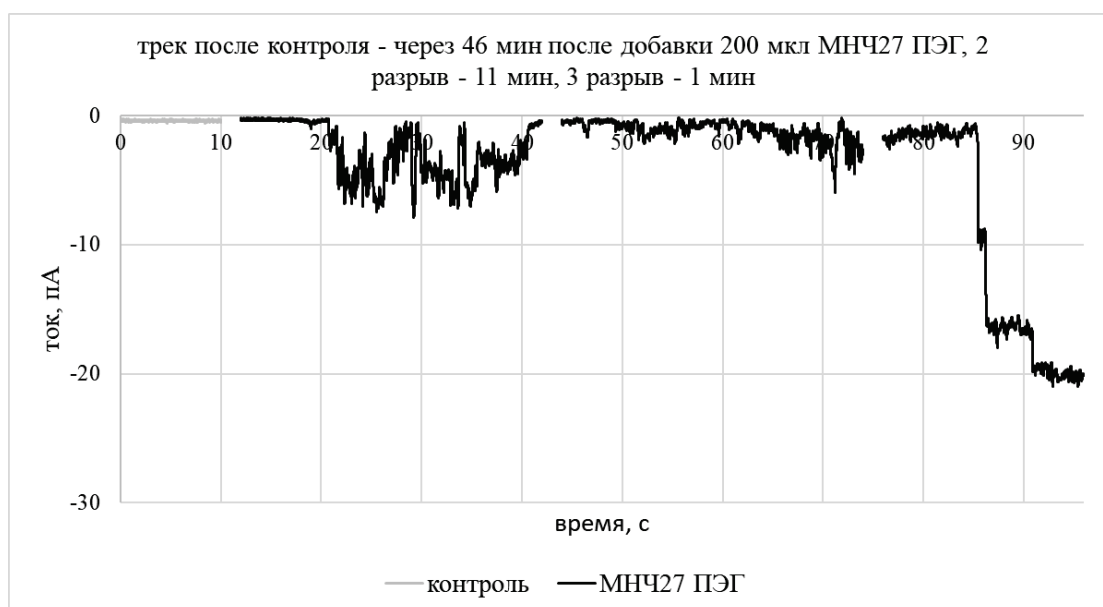


в)

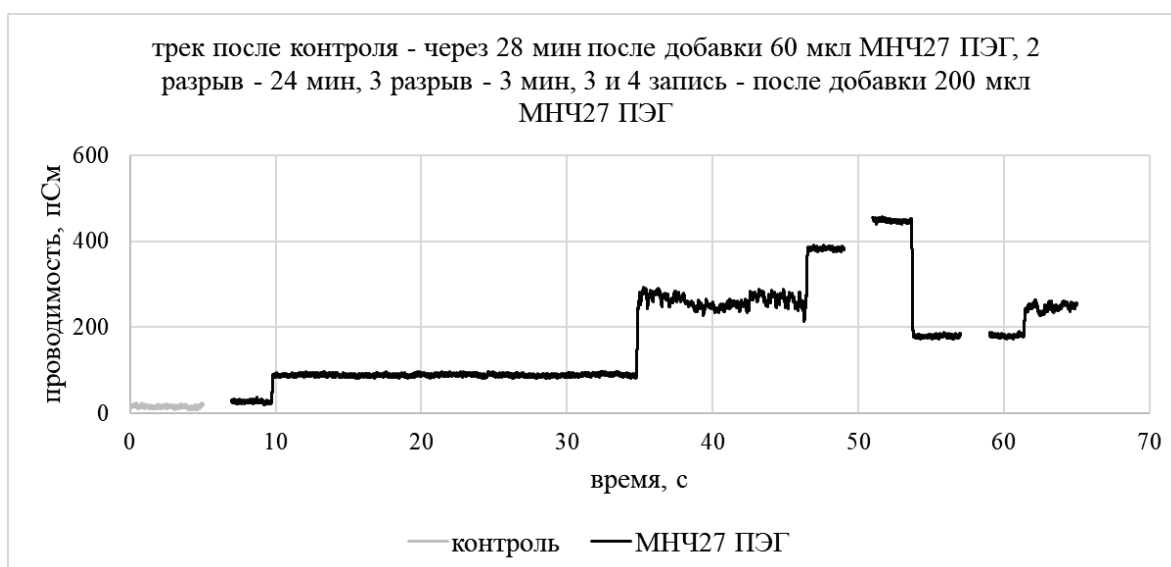
Рисунок 3. Токвые треки (треки проводимости) БЛМ из фрhrs при различных добавках МНЧ27 ЧСА (а, б, в), МНЧ12 ЧСА (г, д), МНЧ27 ПЭГ (е, ж, з). Мембранный потенциал 25 мВ, 0,1 М КСl.



Продолжение рисунка 3



ж)



з)

Продолжение рисунка 3

Запись на рисунке 3б представляется аналогичной: первый скачок проводимости относительно фона (~ 10 пСм) на ~ 140 пСм – возникновение первой поры, затем (с 14-й секунды), проводимость выросла еще на ~ 130 пСм – это может означать возникновение второй поры приблизительно одинакового размера. Момент второго скачка проводимости (время открытия второй поры) зарегистрировать не удалось из-за наводок, возникших, когда в кювету добавляли наночастицы. На записи видно, что одна из пор на некоторое время закрывалась. При этом выделяется участок записи на ~ 18 -19 с – здесь проводимость снизилась только на ~ 25 пСм – это не может быть закрытием одной из открывшихся пор. На записи также видны отрицательные короткие импульсы проводимости амплитудой менее 130 пСм, однако использовать их для определения размера поры нельзя: их длительность меньше времени интегрирования усилителя.

Аналогичная картина представлена на рисунке 3а: можно видеть, что образовалась пора проводимостью около 120 пСм, которая два раза закрывалась на несколько секунд, а потом открывалась вновь. Возможно, но маловероятно, что открывались еще две разные поры, совпадающие по размеру с первой. Заметно увеличение фоновой проводимости на ~ 16 пСм. Интерес представляет участок записи на ~ 13 -й с, где проводимость снизилась только на ~ 40 пСм. Получается, пора на $\sim 0,4$ с уменьшилась в размере, а потом вернулась в прежнее состояние? Это представляется более вероятным, чем предположение, что первый скачок тока связан с одновременным появлением трех пор, которые потом одновременно закрывались и открывались еще два раза.

Указанное противоречие отчетливо проявляется на рисунке 3г. После первого скачка проводимости ~ 960 пСм виден целый ансамбль отрицательных и положительных импульсов тока, связанных, по-видимому, с изменением первоначального размера открывшейся поры. Отметим, что подобную картину мы зарегистрировали, когда добавили гидрофобные наночастицы феррита кобальта, диспергированные в толуоле, в

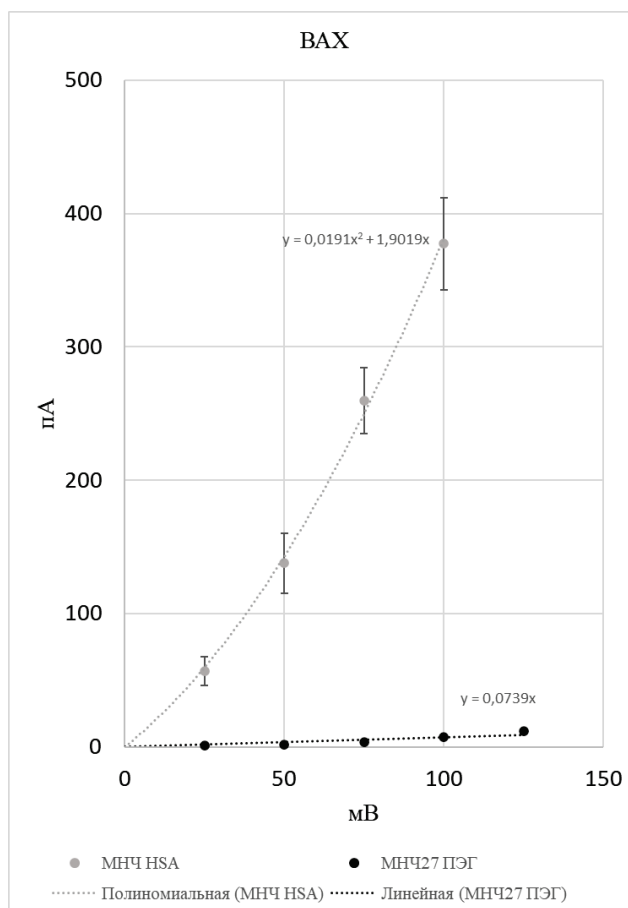


Рисунок 4. ВАХ БЛМ из дрфрс в 0,1 М КСl: 200 мкл МНЧ ЧСА, полученная по трем мембранам (1 мембрана с МНЧ12, 2 – с МНЧ27), у которых был скачок проводимости, и одной мембраны 200 мкл МНЧ27 ПЭГ без скачка проводимости. Представлены аппроксимирующие парабола и прямая. Указаны стандартные ошибки

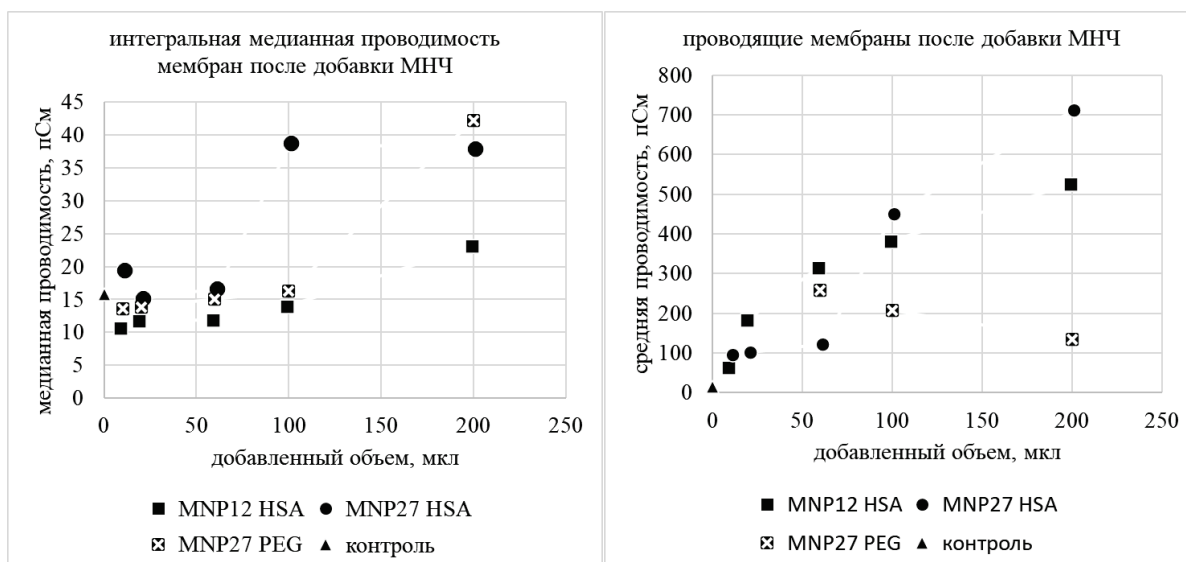


Рисунок 5. Зависимость медианной проводимости мембран и средней проводимости «проводящих» мембран из дрфрс от объема добавленных в окружающий 0.1 М КСl раствор МНЧ

окружающий дрфрс мембрану раствор 0.1 М КСl (рис. 6). Основная доля добавленных частиц сразу ушла на поверхность раствора и расположилась у стенок кюветы, но, видимо, какие-то частицы провзаимодействовали с БЛМ.

Показанные на рисунке 3 импульсы имеют прямоугольную форму, что говорит о метастабильном состоянии возникающих пор. Молекулярная динамика утверждает, что в чисто дрфрс бислоях не могут образовываться гидрофильные поры [9], которые, согласно классической теории [10], являются метастабильными структурами. Возможно, гидрофильная оболочка МНЧ участвует в создании внутренней поверхности мембраны, но это

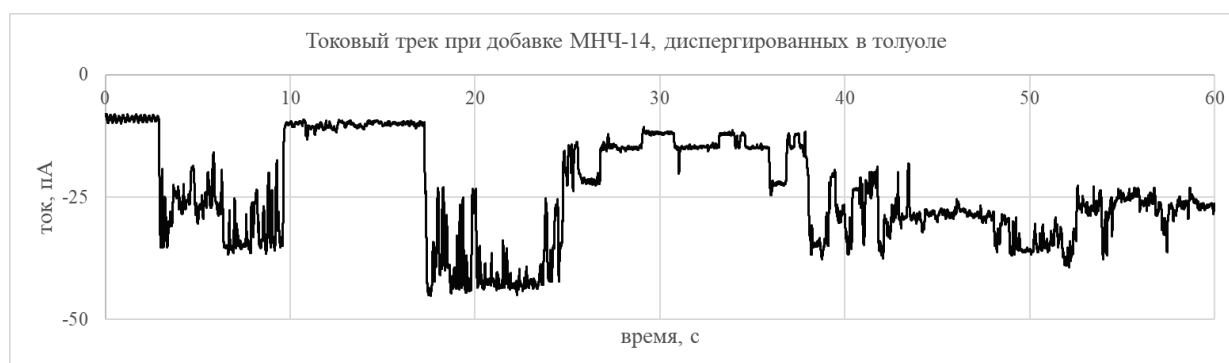


Рисунок 6. Токвый трек БЛМ из dPhrc при добавке МНЧ14, диспергированных в толуоле, в 0,1 М КСl. Мембранный потенциал -50 мВ

Таблица 1. Проводимости мембран в пСм

мкл	МНЧ12 ЧСА			МНЧ27 ЧСА			МНЧ27 ПЭГ		
	среднее	стандартное отклонение	медиана	среднее	стандартное отклонение	медиана	среднее	стандартное отклонение	медиана
0	16	9	16						
10	20	20	11	40	47	21	14	7	14
20	86	155	12	44	51	15	15	8	14
60	145	273	12	54	91	17	47	86	15
100	134	246	14	262	532	27	43	73	16
200	275	406	23	364	721	38	75	104	42

утверждение противоречит данным, представленным на рисунке 6, когда в окружающий мембрану раствор добавлялись гидрофобные частицы без гидрофильной оболочки. Можно предположить, что сама наночастица так связано со структурой поры, что движения наночастицы меняют размер поры.

Отметим работу [11], в которой наночастицы магнетита (Fe_3O_4) диаметром 100 нм, связанные со стрептавидином, взаимодействовали с БЛМ из 1,2-дифитаноил-sn-глицеро-3-фосфохолина в постоянном магнитном поле. Было показано наличие многоуровневых флуктуаций мембранного тока амплитудой ~ 100 пСм. Эти результаты аналогичны нашим (рис. 3а, б, з).

ВЫВОДЫ

1. МНЧ12 и МНЧ27 с гидрофильным покрытием взаимодействуют с dPhrc бислойнными мембранами, что может приводить к появлению метастабильных проводящих пор, которые, в свою очередь, увеличивают интегральную проводимость мембран.
2. По-видимому, указанные проводящие поры в результате взаимодействия с наночастицами могут менять свой размер, оставаясь метастабильными структурами.
3. Если считать, что в dPhrc мембранах могут возникать только гидрофобные поры, то при взаимодействии БЛМ с МНЧ зарегистрированы метастабильные проводящие гидрофобные поры радиусом от 0,4 до 1,7 нм.
4. Проводимость мембран в присутствии МНЧ с ПЭГ значительно меньше, чем в присутствии МНЧ с ЧСА.

Список литературы / References:

1. Chubarov A.S. Serum Albumin for Magnetic Nanoparticles Coating. *Magnetochemistry*, 2022, vol. 8, no. 13.
2. Гуляев Ю.В., Черепенин В.А., Вдовин В.А., Таранов И.В., Ярославов А.А., Ким В.П., Хомутов Г.Б. Дистанционная декапсуляция нанокомпозитных липосом, содержащих внедренные проводящие наночастицы, при воздействии импульсного электрического поля. *Радиотехника и электроника*, 2015, т. 60, № 10, с. 1051-1051. [Gulyaev Y.V., Cherepenin V.A., Vdovin V.A., Taranov I.V., Yaroslavov A.A., Kim V.P., Khomutov G.B., Pulsed electric field-induced remote decapsulation of nanocomposite liposomes with implanted conducting nanoparticles. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, no. 10, pp. 1097-1108. (In Russ.)]
3. Kislov V., Medvedev B., Gulyaev Y., Taranov I., Kashin V., Khomutov G., Artemiev M., Gurevich S. Organized superstructures at nanoscale and new functional nanomaterials. *International Journal of Nanoscience*, 2007, vol. 6, no. 5, pp. 373-377.
4. Brahmabhatt K., Zhao W., Deng Zh., Mao L., Freeman E. Magnetically responsive droplet interface bilayer networks. Proceedings of the ASME 2015. *Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems SMASIS2015*, September 21-23, 2015.
5. Аносов А.А., Корепанова Е.А., Коплак О.В., Казаманов В.А., Дерунец А.С., Моргунов Р.Б. Рост электрической проводимости и появление липидных пор под действием магнитных наночастиц CoFe_2O_4 в бислойной липидной мембране. *Электрохимия*, 2022, т. 58, с. 179-187 [Anosov A.A., Korepanova E.A.,

Koplak O.V., Kazamanov V.A., Derunets A.S., Morgunov R.B. The Increase in Electrical Conductivity and the Appearance of Lipid Pores Induced by Magnetic Nanoparticles CoFe_2O_4 in Bilayer Lipid Membranes. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 321-328. (In Russ.)]

6. Lehtonen J.Y.A., Kinnunen P.K.J. Changes in the lipid dynamic of liposomal membranes induced by poly(ethylene glycol): free volume alterations revealed by inter- and intramolecular excimer forming phospholipid analogs. *Biophys. J.*, 1994, vol. 66, pp. 1981-1990.

7. Антонов В.Ф., Смирнова Е.Ю., Аносов А.А., Норик В.П., Немченко О.Ю. «Блокирование» полиэтиленгликолем одиночных липидных пор, возникающих в немодифицированных бислойных липидных мембранах при фазовых переходах. *Биофизика*, 2008, т. 53, № 5, с. 802-809. [Antonov V.F., Smirnova E.Y., Anosov A.A., Norik V.P., Nemchenko O.Y. PEG blocking of single pores arising on phase transitions in unmodified lipid bilayers. *Biophysics*, 2008, vol. 53, pp. 390-395. (In Russ.)]

8. Аносов А.А., Шаракшанэ А.А., Смирнова Е.Ю., Немченко О.Ю. Проницаемость бислоя при фазовом переходе как поток Эрланга гидрофильных пор, возникающих в результате диффузии в пространстве радиусов. *Биологические мембраны*, 2016, т. 33, № 6, с. 387-397. [Anosov A.A., Sharakshane A.A., Smirnova E.Y., Nemchenko O.Y. Bilayer permeability during phase transition as an Erlang flow of hydrophilic pores resulting from diffusion in the radius space. *Biochem. Moscow Suppl. Ser. A.*, 2017, vol. 11, pp. 8-16. (In Russ.)]

9. Velikonja A., Kramar P., Miklavcic D., Lebar A.M. Specific electrical capacitance and voltage breakdown as a function of temperature for different planar lipid bilayers. *Bioelectrochemistry*, 2016, vol. 112, pp. 132-137.

10. Glaser R.W., Leikin S.L., Chernomordik L.V., Pastushenko V.F., Sokirko A.V. Reversible electrical breakdown of lipid bilayers: formation and evolution of pores. *Biochim. Biophys. Acta*, 1988, vol. 940, pp. 275-287.

11. Mohanta D., Stava E., Yu M., Blick R.H. Creation and regulation of ion channels across reconstituted phospholipid bilayers generated by streptavidin-linked magnetite nanoparticles. *Physical review E*, 2014, vol. 89, 012707.

EFFECT OF COBALT FERRITE MAGNETIC NANOPARTICLES IN HYDROPHILIC COATING ON THE CONDUCTIVITY OF BILAYER LIPID MEMBRANES

Borisova E.D., Kozhemova B.E., Konstantinov O.O., Korepanova E.A., Mikheev V.M., Mikhnich A.V., Sukhova V.I., Astanina P.N., Koplak O.V., Anosov A.A.

I.M. Sechenov First Moscow State Medical University
Bolshaya Pirogovskaya str., 2, p. 4, Moscow, 119435, Russia
Received 14.07.2022. DOI: 10.29039/rusjbp.2022.0501

Abstract. Magnetic nanoparticles are widely used in medical applications, for example, as contrast agents for magnetic resonance imaging, to enhance hyperthermia, for targeted drug delivery, theranostics (therapy + diagnostics). When used in vivo, magnetic nanoparticles require a special coating that promotes biocompatibility and minimizes potential toxicity under physiological conditions. Human serum albumin or polyethylene glycol can be used as a coating. In this work, the interactions of magnetic cobalt ferrite nanoparticles (12 and 27 nm size) with diphitanoylphosphatidylcholine bilayer lipid membranes were investigated. The conductivity of membranes varied over a wide range – two groups of membranes can be distinguished – membranes, the conductivity of which (after the addition of nanoparticles) remained practically unchanged compared to the control, and membranes, the conductivity of which, upon the addition of nanoparticles, changed abruptly and increased in a wide range by 0.5–2 orders of magnitude. Significant differences between the conductivities upon the addition of the same volume of 12 and 27 nm nanoparticles surrounded by human serum albumin were not found. When adding nanoparticles with a coating of polyethylene glycol, the conductivity increased much weaker than when adding nanoparticles with a coating of human serum albumin. The results suggest that hydrophilic coated magnetic nanoparticles interact with the membranes, which can lead to the appearance of metastable conducting pores, which, in turn, increase the integral conductivity of the membranes.

Key words: bilayer lipid membranes, magnetic nanoparticles, electrical conductivity, lipid pores.