

УДК: 531.7, 544.162, 620.3

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЯЗКОУПРУГИХ И ЭХОГЕННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ АЛЬГИНАТНЫХ ГЕЛЕЙ С НАНОЧАСТИЦАМИ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Бугаёва Антонина Владимировна¹, Динисламова Ольга Алексеевна¹, Курилова Надежда Михайловна², Немцова Софья Вадимовна², Шкляр Татьяна Фридриховна^{1,2}

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. Для улучшения физических и биологических свойств гидрогели (ГГ) модифицируют, создавая композиты с внедренными в полимерную сетку нано- или микроразмерными частицами оксидов металлов. В представляемой работе проведена оценка вязкоупругости и эхогенности природного гидрогеля альгината кальция (CaAlg), наполненного наночастицами (НЧ) оксида железа (FeO_x) и оксида алюминия (Al_2O_3). **Цель исследования** – оценить вклад НЧ FeO_x и Al_2O_3 в механические и эхогенные свойства композита. **Материал и методы.** Были синтезированы ГГ CaAlg и композитные гели альгината с НЧ оксида железа и оксида алюминия (CaAlg/FeO_x и $\text{CaAlg/Al}_2\text{O}_3$) с концентрацией альгината натрия в полученной смеси 1%, а НЧ – от 0% до 5%. Для характеристики вязкоупругих свойств определяли модуль накопления (E') и модуль потерь (E'') образцов. Для характеристики эхогенности оценивались максимальная и средняя яркости на границе раздела между верхней поверхностью образцов и водой. **Результаты.** Введение 1% НЧ FeO_x и Al_2O_3 в гидрогель CaAlg привело к существенному увеличению E' , E'' и яркости на границе гель/вода. Дальнейшее увеличение концентрации НЧ оказало незначительное влияние на исследуемые параметры CaAlg гелей. На минимальной частоте деформации величины E' гелей с обоими типами НЧ одинаковой концентрации были практически одинаковы. Однако на примере композитов с концентрацией НЧ 3% установлено, что частотозависимая кривая модуля накопления геля CaAlg/FeO_x во всем частотном диапазоне лежала выше, чем для $\text{CaAlg/Al}_2\text{O}_3$. **Выводы.** Введение НЧ в состав CaAlg ГГ приводит к увеличению вязкоупругости и эхогенности композитных гелей. НЧ FeO_x и Al_2O_3 в составе композитного CaAlg ГГ оказывают одинаковое влияние на упругие свойства, оцененные на минимальной частоте деформации, и эхогенность на границе. Установлены различия в частотозависимом поведении вязкоупругих модулей композитов с НЧ FeO_x и Al_2O_3 .

Ключевые слова: альгинат, наночастицы, оксид железа, оксид алюминия, эхогенность, модуль накопления, модуль потерь.

COMPARATIVE CHARACTERIZATION OF VISCOELASTIC AND ECHOGENIC PROPERTIES OF COMPOSITE ALGINATE GELS WITH NANOPARTICLES OF DIFFERENT NATURE

Bugayova Antonina Vladimirovna¹, Dinislamova Olga Alekseevna¹, Kurilova Nadezhda Mikhailovna², Nemtsova Sofia Vadimovna², Shklyar Tatyana Fridrikhovna^{1,2}

¹Ural State Medical University

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Yekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. To improve physical and biological properties, hydrogels (HGs) are modified to create composites with nano- or micro-sized metal oxide particles embedded in the polymer network. In the work presented in this paper, the viscoelasticity and echogenicity of a natural calcium alginate (CaAlg) hydrogel filled with iron oxide (FeO_x) and aluminium oxide (Al_2O_3) nanoparticles (NPs) were evaluated. **The aim of the study** is to evaluate the contribution of FeO_x and Al_2O_3 NPs to the mechanical and echogenic properties of the composite. **Material and methods.** CaAlg HGs and alginate composite gels with iron oxide and aluminium oxide NPs (CaAlg/FeO_x and $\text{CaAlg/Al}_2\text{O}_3$) were synthesized with the concentration of sodium alginate in the resulting mixture of 1% and NPs ranging from 0% to 5%. The storage modulus (E') and loss modulus (E'') were determined to characterize the viscoelastic properties of the samples. The maximum and mean brightnesses at the interface between the top surface of the samples and water were evaluated to characterize echogenicity. **Results.** The embedding of 1% FeO_x and Al_2O_3 NPs into the CaAlg hydrogel resulted in a significant increase in E' , E'' and brightness at the gel/water interface. Further increase in the concentration of NPs had a negligible effect on the investigated parameters of CaAlg gels. At the minimum strain frequency, the E' values of gels with both types of NPs of the same concentration were almost identical. However, using composites with NPs concentration of 3% as an example, it was found that the frequency-dependent curve of the storage modulus of the CaAlg/FeO_x gel over the entire frequency range lay higher than that for $\text{CaAlg/Al}_2\text{O}_3$. **Conclusions.** The embedding of NPs into the CaAlg HGs leads to an increase in the viscoelasticity and echogenicity of the composite gels. FeO_x and

Al₂O₃ NPs in the composite CaAlg HG have the same effect on the elastic properties evaluated at the minimum strain frequency and the echogenicity at the boundary. Differences in the frequency-dependent behaviour of viscoelastic modules of composites with FeO_x and Al₂O₃ NPs have been established.

Keywords: alginate, nanoparticles, iron oxide, aluminum oxide, echogenicity, storage modulus, loss modulus.

ВВЕДЕНИЕ

Гидрогели (ГГ) широко используются в качестве биомиметиков, носителей лекарственных средств, в тканевой инженерии или для решения других биомедицинских задач. Природные гидрогели альгиновой кислоты привлекательны из-за их доступности, отличной биосовместимости, низкой цитотоксичности, способности к биоразложению, высокой гелеобразующей способности. Для улучшения физических и биологических свойств ГГ модифицируют, создавая композиты с внедренными в полимерную сетку нано- или микроразмерными частицами оксидов металлов. Системы наночастиц (НЧ) и гидрогелей представляют собой относительно новый класс biomaterialов, которые разработаны для объединения полезных характеристик отдельных материалов (т. е. гидрогелей и наночастиц). Во многом свойства будущего композитного материала определяются межфазным взаимодействием между суспензией наночастиц и полимерной матрицей. Оно будет влиять на многие параметры, в частности, на механические свойства композита.

Известно, что критически важным фактором для успешного применения новых материалов являются вязкоупругие свойства, прямо влияющие на биологическую активность, например, рост клеток [1]. Поэтому при проектировании композитных гелей с частицами оксидов металлов необходимо учитывать влияние частиц на механические характеристики геля. Ранее нами было показано изменение вязкоупругих свойств синтетических гидрогелей при внедрении нано- и микрочастиц оксида железа и гексаферрита стронция (SrFe₁₂O₁₉) [2, 3, 4]. По оценке влияния оксида алюминия, который широко применяется в медицинской практике [5], на механические свойства полимерных гидрогелей экспериментальных данных недостаточно.

Применение гелей в биомедицине часто требует необходимости визуального контроля образца геля *in vivo*. Наиболее распространенным методом визуализации тканей в медицине является ультразвуковое исследование. Кроме того, как было показано нами, ультразвуковое исследование дает дополнительную информацию об упругости материала [2, 3, 4]. Отсюда понятно, что оценка механических и эхогенных свойств гелей представляется полезным инструментом для подготовки перспективных современных материалов для биомедицины и биоинженерии.

В представляемой работе проведена оценка физических свойств (вязкоупругости и эхогенности) природного гидрогеля альгината кальция, наполненного НЧ оксида железа (FeO_x) и оксида алюминия (Al₂O₃).

Цель исследования – оценить вклад наночастиц оксида железа и оксида алюминия в механические и эхогенные свойства композита.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для синтеза гелей альгината кальция (CaAlg) навеску карбоната кальция равномерно распределяли в дистиллированной воде с помощью ультразвуковой обработки. В полученной суспензии растворяли навеску альгината натрия, после чего добавляли навеску НЧ. Реакционную смесь перемешивали стеклянной палочкой и подвергали ультразвуковой обработке. Отдельно готовили водный раствор глюконо – δ – лактона (GDL). Смешивали суспензию на основе альгината и НЧ с водным раствором GDL. Общий объем смеси составил 10 см³. Концентрация альгината натрия в полученной смеси составила 1%, карбоната кальция – 25 мМ, GDL – 32 мМ. Концентрация НЧ варьировалась от 0% до 5%. Полученную смесь перемешивали, заливали в формы и оставляли на 24 часа при 25°C. Гели извлекались из форм и хранились в дистиллированной воде при регулярном промывании в течение 2 недель.

В качестве наполнителя альгинатных гелей использовались ферромагнитные НЧ FeO_x и парамагнитные НЧ Al₂O₃. Диаметр НЧ (D_{БЭТ}), определенный методом низкотемпературной

адсорбции азота, составил 65,2 нм для НЧ FeO_x и 37,9 нм для НЧ Al_2O_3 . Синтезированные гели обозначали $\text{CaAlg/FeO}_x_y\%$ и $\text{CaAlg/Al}_2\text{O}_3_y\%$, где y – массовая доля НЧ при синтезе.

Оценка механических свойств гелей была проведена методом динамического механического анализа (ДМА) при одноосном периодическом сжатии на установке лабораторной конструкции. Подробное описание установки приведено в нашей более ранней работе [1]. В качестве меры механических свойств определяли модуль накопления (E'), характеризующий упругие свойства материала, и модуль потерь (E''), являющийся характеристикой вязких свойств. Образцы ГГ CaAlg и гелей CaAlg/FeO_x и $\text{CaAlg/Al}_2\text{O}_3$ цилиндрической формы диаметром ~ 10 мм и высотой 7-8 мм помещали в кювету, наполненную дистиллированной водой для поддержания равновесной степени набухания, фиксируя образец двумя пластинами. Одна пластина жестко соединена с приводом линейного электромагнитного мотора, другая – с прецизионным датчиком силы. К образцам прикладывали периодические синусоидальные деформации одноосного сжатия с амплитудой $\sim 4\%$ от начальной высоты образца и частотой 0,01-20 Гц, регистрировали изменения возникающей в образце силы. На основании полученных данных рассчитывался модуль накопления и модуль потерь образцов. Число образцов каждого типа геля составляло 5-6.

Эхогенные свойства гелей изучались при помощи ультразвукового аппарата медицинского назначения UF-850 XTD (Fukuda Denshi, Япония). Образец геля помещали на дно кюветы, заполненной дистиллированной водой объемом 500 мл. Линейный ультразвуковой датчик погружали в воду и устанавливали на высоте 3 см над образцом геля по нормали к его поверхности. Параметры эхолокации составляли: рабочая частота 7,5 МГц, усиление 74 дБ. Изображение образцов в двумерном (2D) режиме в серой шкале было записано в видеофайл длительностью несколько секунд. Изображения с экрана ультразвукового аппарата были оцифрованы и записаны в компьютере, где в дальнейшем производилась их обработка и анализ. Эхогенность образцов характеризовалась по интенсивности отраженного эхосигнала (яркость изображения), которая определялась в соответствии со шкалой серого цвета, где максимальному значению яркости экрана соответствовало число 255, а минимальному – 5. Оценивались максимальная и средняя яркость на границе раздела между верхней поверхностью образцов и водой ($I_{\text{макс}}$ и $I_{\text{сред}}$). Для этого граница поверхности геля была разбита на квадраты размером 3 пикселя $\times$ 3 пикселя в каждом (0,27 мм $\times$ 0,27 мм). Число измерений параметров яркости для каждого типа геля составляло 40-45.

Для каждого типа геля рассчитывали средние значения модуля накопления, модуля потерь, максимальной и средней яркости, а также границы доверительного интервала при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Для статистической обработки данных применяли Специализированное программное обеспечение для статистического анализа данных «Jamovi 2.3.28». Для сравнительного анализа двух независимых групп использовали непараметрический критерий Манна-Уитни. Нулевая гипотеза H_0 об отсутствии различий между значениями двух выборок отвергалась при $p \leq 0,05$, где p – вероятность H_0 .

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1а представлены частотозависимые характеристики модуля накопления для гидрогеля CaAlg и композитных гелей с НЧ в концентрации 3%. Видно, что при введении наночастиц оксидов металлов в полимерную сеть CaAlg во всем частотном диапазоне значения модуля накопления возрастают, причем для CaAlg/FeO_x частотозависимая кривая лежит выше, чем для $\text{CaAlg/Al}_2\text{O}_3$. Рис. 1б иллюстрирует изменение модуля потерь при повышении частоты деформации для этих же образцов гелей. Значения модуля потерь при низких и средних частотах (до 0,5 Гц) также возрастают при введении НЧ оксидов, причем FeO_x оказывает существенно более высокое влияние, чем Al_2O_3 . Дальнейшее повышение частоты деформации композитных гелей вызывает падение величины модуля потерь.

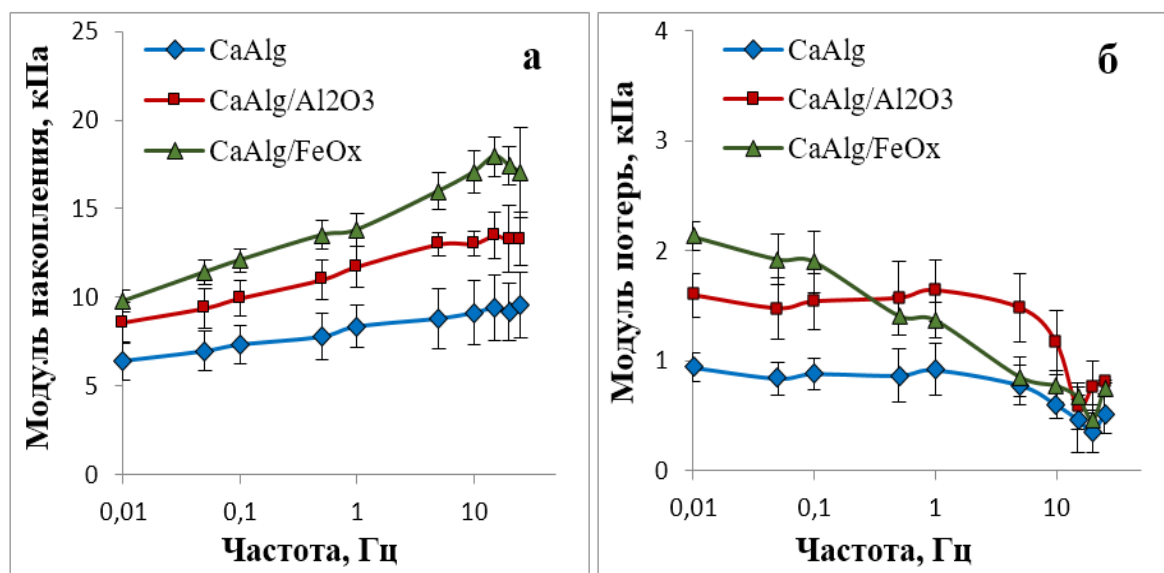


Рис. 1. Частотные зависимости модуля накопления (а) и модуля потерь (б) ГГ CaAlg и гелей CaAlg/FeOx_3% и CaAlg/Al₂O₃_3%

Для установления влияния концентрации НЧ на вязкоупругие свойства композитного геля сравнивали величины модулей при самой низкой частоте деформации (0,01 Гц). Численные данные приведены в таблице 1. По мере добавления НЧ в композитные гели происходил монотонный рост обоих показателей.

Таблица 1.

Модуль накопления, модуль потерь и яркость на границе гель/вода гелей на основе альгината кальция

Образец геля	E' , кПа	E'' , кПа	$I_{\text{макс}}$ на границе	$I_{\text{сред}}$ на границе
CaAlg	6,4±0,4	0,89±0,06	90±5	72±4
CaAlg/FeO _x _1%	7,6±0,7	1,55±0,13	158±6	134±5
CaAlg/FeO _x _3%	8,6±1,1	2,13±0,23	159±3	135±4
CaAlg/FeO _x _5%	11,8±1,2	2,28±0,21	162±2	140±3
CaAlg/Al ₂ O ₃ _1%	8,6±0,6	1,55±0,16	159±2	139±2
CaAlg/Al ₂ O ₃ _3%	9,8±0,6	1,60±0,19	157±1	138±2
CaAlg/Al ₂ O ₃ _5%	11,5±1,7	1,71±0,22	165±3	145±4

Установлено, что добавление 1% НЧ оксидов металлов приводит к статистически значимому ($p < 0,05$) увеличению упругости образцов: увеличение E' наполненного НЧ геля по отношению к E' ГГ составило 19% для CaAlg/FeO_x_1% и 34% для CaAlg/Al₂O₃_1%. Дальнейшее увеличение концентрации НЧ от 1 до 3% и от 3% до 5% не оказало статистически значимого влияния ($p > 0,05$) на модуль накопления альгинатных гелей. Модуль потерь также заметно возрастает при введении 1% НЧ, для обоих типов НЧ рост E'' составлял около 75%. Далее изменения значений E'' были статистически не значимы.

Из данных таблицы видно, что увеличение весового содержания НЧ в геле CaAlg сопровождалось ростом эхогенности образцов. И НЧ FeO_x, и НЧ Al₂O₃ оказали одинаковый эффект на изменение яркости на границе гель/вода. При введении 1% НЧ в состав ГГ CaAlg происходило резкое увеличение яркости на границе образца на 60-70 единиц (75-90%). Дальнейшее добавление НЧ увеличивало эхогенность не более, чем на 5%.

Проведено сравнение значений яркости на границе и значений модуля накопления (на частоте 0,01 Гц) гелей, наполненных частицами разной природы, но одинаковой концентрации. Различия в значениях E' , $I_{\text{макс}}$ на границе, $I_{\text{сред}}$ на границе CaAlg/FeO_x_1% и CaAlg/Al₂O₃_1%, CaAlg/FeO_x_3% и CaAlg/Al₂O₃_3%, CaAlg/FeO_x_5% и CaAlg/Al₂O₃_5% оказались статистически не значимы. То есть, ферромагнитные НЧ FeO_x и парамагнитные НЧ Al₂O₃ оказывают одинаковое влияние на упругие и эхогенные свойства альгинатных гелей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Введение НЧ, как оксида железа, так и оксида алюминия, привело к значительному увеличению модулей накопления во всем диапазоне частот деформаций. Такой эффект может быть связан с образованием дополнительных физических связей между наночастицами и полимерными цепями альгината кальция [6].

Примечательно, что величина E' гелей с обоими типами НЧ оксидов на минимальной частоте, когда завершены все релаксационные процессы, практически одинакова. То есть, природа НЧ не влияет на взаимодействие НЧ оксидов с полимерной сеткой CaAlg. При повышении частоты деформации возникающие отличия в частотных зависимостях модуля накопления композитов с НЧ оксида алюминия и оксида железа могут быть обусловлены разными временами релаксации сегментов сети альгината и связанными с ними НЧ.

То, что конформационные подвижности сегментов композитных гелей отличаются, показывает и анализ изменений модуля потерь. E'' определяется типом и интенсивностью молекулярного движения, то есть является характеристикой молекулярной подвижности. Возрастание значений модуля потерь на низких частотах деформации при введении НЧ может быть связано с ростом внутреннего межсегментарного трения в системе полимер+НЧ именно за счет возникновения дополнительных связей. Причем этот эффект значительно сильнее выражен в композитном CaAlg/FeO_x геле. Начиная с 0,5 Гц происходило выраженное уменьшение модуля потерь, связанное со снижением сегментарной подвижности вследствие уменьшения релаксационных перестроек в полимерной сети на высоких частотах деформации. Эта же блокировка движения цепей альгината кальция НЧ FeO_x приводила к частотозависимому росту E' . Различное влияние двух рассмотренных оксидов металлов на конформационную подвижность сети композитных гелей, возможно, связано с прочностью физической связи между полимером и разными типами НЧ и/или с размерами агрегатов НЧ. При синтезе композитных гелей с НЧ, образование сетки альгината кальция сопровождается коагуляцией суспензии НЧ, которые и фиксируются полимерной сеткой. Размеры таких агрегатов не контролировали, но по результатам можно предположить их различия.

Максимальная и средняя яркости поверхности образцов имели примерно одинаковый тренд с модулем накопления в ответ на добавление НЧ в состав альгинатного геля. Несмотря на то, что введение 1% НЧ увеличивает интенсивность отраженного эхосигнала на границе более существенно, чем модуль накопления CaAlg ГГ, дальнейшее повышение концентрации НЧ обоих типов приводит к тому, что яркость на границе и модуль накопления меняются аналогично. Ранее нами была установлена линейная связь между яркостью на границе гель/вода и модулем упругости гелей различного состава, а также дано теоретическое обоснование этому феномену [2, 3]. Таким образом, эхогенность поверхности гелей может быть использована в качестве альтернативного метода контроля упругих свойств полимерного материала.

ВЫВОДЫ

1. Введение 1% НЧ FeO_x и Al₂O₃ в гидрогель CaAlg приводит к существенному увеличению модуля накопления, модуля потерь и яркости на границе гель/вода; влияние дальнейшего увеличения концентрации НЧ на механические и эхогенные свойства CaAlg гелей незначительно.

2. НЧ FeO_x и Al₂O₃ в составе композитного CaAlg гидрогеля оказывают одинаковое влияние на упругие свойства, оцененные на минимальной частоте деформации, и эхогенность на границе: различия между значениями яркости на границе и значениями модуля накопления гелей, наполненных частицами разной природы, но одинаковой концентрации, статистически не значимы.

3. Установлены отличия в частотозависимом поведении вязкоупругих модулей гелей CaAlg/FeO_x и CaAlg/Al₂O₃.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Effect of the polyacrylamide ferrogel elasticity on the cell adhesiveness to magnetic composite / F.A. Blyakhman, A.P. Safronov, O.G. Makeyev [et al.] // Journal of Mechanics in Medicine and Biology. – 2018. – Vol. 18, № 06. – P. 1850060.
2. Ferrogels ultrasonography for biomedical applications / F.A. Blyakhman, S.Y. Sokolov, A.P. Safronov [et al.] // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 18. – P. 3959.

3. Echogenic advantages of ferrogels filled with magnetic sub-microparticles / O.A. Dinislamova, A.V. Bugayova, T.F. Shklyar [et al.] // Bioengineering. – 2021. – Vol. 8, № 10. – P. 140.
4. Mechanical properties of ferrogels based on polyacrylamide filled with strontium hexaferrite microparticles studied using stress-strain and ultrasonography tests / A.V. Bugayova, O.A. Dinislamova, T.F. Shklyar [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2466. – № 1.
5. Biomedical applications of aluminium oxide nanoparticles / P. Hassanpour, Y. Panahi, A. Ebrahimi-Kalan [et al.] // Micro & Nano Letters. – 2018. – Vol. 13, № 9. – P. 1227–1231.
6. Dannert, C. Nanoparticle-hydrogel composites: from molecular interactions to macroscopic behavior / C. Dannert, B.T. Stokke, R.S. Dias // Polymers. – 2019. – Vol. 11, № 2. – P. 275.

Сведения об авторах

А.В. Бугаёва* – ассистент
О.А. Динисламова – старший преподаватель
Н.М. Курилова – аспирант
С.В. Немцова – студент
Т.Ф. Шкляр – доктор биологических наук, доцент

Information about the authors

A.V. Bugayova* – Department Assistant
O.A. Dinislamova – Senior Lecturer
N.M. Kurilova – Postgraduate student
S.V. Nemtsova – Student
T.F. Shklyar – Doctor of Sciences (Biology), Associate Professor

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):
antonina.v.bugayova@mail.ru

УДК: 620.3

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА И АЛЮМИНИЯ НА ЭХОГЕННОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ ГЕЛЕЙ С ХИМИЧЕСКОЙ ИЛИ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОЛИМЕРНОЙ СЕТКОЙ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Динисламова Ольга Алексеевна¹, Бугаёва Антонина Владимировна¹, Курилова Надежда Михайловна², Шкляр Татьяна Фридриховна^{1,2}

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. Полимерные нанокомпозитные гидрогели (ГГ) являются перспективными материалами для различных биомедицинских приложений. Актуальной задачей является исследование особенностей визуализации этих материалов в биологических средах и тканях организма с помощью ультразвуковой (УЗ) локации. **Цель исследования** – определить влияние наночастиц (НЧ) оксидов железа и алюминия на эхогенные свойства гидрогелей с химической и физической полимерной сеткой. **Материал и методы.** Материалами исследования служили композитные ГГ с химической сеткой на основе полиакриламида (ПАА) и физической сеткой на основе альгината кальция (CaAlg), содержащие ферромагнитные НЧ оксида железа (FeO_x) или парамагнитные НЧ оксида алюминия (Al₂O₃). Весовая концентрация НЧ составляла 0% и 1%. Эхогенные свойства оценивались по яркости изображения образцов при ультразвуковой локации с помощью УЗ-аппарата медицинского назначения UF-850 XTD (Япония). **Результаты.** Добавление НЧ в полимерную сеть гидрогелей в два раза увеличивало интенсивность эхосигнала на границе гель/вода по сравнению с ГГ без НЧ. Внутреннее содержимое ПАА композита не демонстрировало эхогенность, аналогично ГГ без НЧ. Напротив, композит на основе CaAlg приобретал выраженную эхогенность содержимого. **Выводы.** Установлена успешная визуализация всех образцов за счет эхогенности границы гель/вода. Появление эхогенности внутри композита с физической сеткой и ее отсутствие внутри композита с химической сеткой может быть обусловлено особенностями синтеза, и следствием агрегации НЧ в структуре полимера. Влияние типа наночастиц на эхогенные свойства композитов не обнаружено.

Ключевые слова: композитные гидрогели, наночастицы оксидов металлов, эхогенность, биомедицинские приложения.

EFFECT OF IRON AND ALUMINUM OXIDE NANOPARTICLES ON THE ECHOGENICITY OF COMPOSITE GELS WITH CHEMICAL OR PHYSICAL POLYMER NETWORK FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS