

### Список литературы:

1. Сафронов А.П. Набухание и сжатие феррогелей на основе полиакриламида в магнитном поле / А.П. Сафронов, Т.В. Терзиян, А.С. Истомина, И.В. Бекетов // Высокомолекулярные соединения, А. – 2012. – Т.54. – № 1. – С. 30-38.
2. Ali I. Rheological investigation of the viscoelastic thixotropic behavior of synthesized polyethylene glycol-modified polyacrylamide hydrogels using different accelerators / I. Ali, L.A. Shah // Polymer Bulletin. – 2021. – V.78. – P. 1275-1291.
3. Barbucci R. A novel strategy for engineering hydrogels with ferromagnetic nanoparticles as crosslinkers of the polymer chains. Potential applications as a targeted drug delivery system / R. Barbucci, D. Pasqui, G. Giani et al // Soft Matter. – 2011. – V.7. – P. 5558-5565.
4. Blyakhman F.A. Polyacrylamide ferrogels with embedded maghemite nanoparticles for biomedical engineering / F.A. Blyakhman, A.P. Safronov, A.Y. Zubarev et al // Results in Physics. – 2017. – V.7. – P. 3624-3633.
5. Campbell S. Enhanced Pulsatile Drug Release from Injectable Magnetic Hydrogels with Embedded Thermosensitive Microgels / S. Campbell, D. Maitland, T. Hoare // ACS Macro Lett. – 2015. – 4. – №3. – 312-316.
6. Kurlyandskaya G.V. Functional magnetic ferrogels: From biosensors to regenerative medicine / G.V. Kurlyandskaya, F.A. Blyakhman, E.B. Makarova et al // AIP Advances. – 2020. – V.10. – №12. – 125128.
7. Mikhnevich E.A. Synthesis and study of mechanical properties of polyelectrolyte ferrogels based on strontium ferrite particles. / E.A. Mikhnevich, P.D. Chebotkova, A.P. Safronov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – V.11. – № 4. – P. 855-860.
8. Tang J. Magnetic double-network hydrogels for tissue hyperthermia and drug release / J. Tang, Y. Qiao, Y. Chu et al // J. Mater. Chem. B. – 2019. – 7. – P. 1311-1321.

УДК 620.3

<sup>1</sup>Динисламова О.А., <sup>1,2</sup>Бугаёва А.Е., <sup>1,2</sup>Шкляр Т.Ф., <sup>1,2</sup>Соколов С.Ю,  
<sup>1,2</sup>Бляхман Ф.А.

### СВЯЗЬ МЕЖДУ ЭХОКОНТРАСТНЫМИ И УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ В ПОЛИАКРИЛАМИДНЫХ ФЕРРОГЕЛЯХ, НАПОЛНЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦАМИ ФЕРРИТА СТРОНЦИЯ

<sup>1</sup>Отдел биомедицинской физики и инженерии  
Уральский Государственный Медицинский Университет  
Екатеринбург, Российская федерация

<sup>2</sup>Институт естественных наук и математики  
Уральский Федеральный университет  
Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>1</sup>Dinislamova O.A., <sup>1,2</sup>Bugayova A.V., <sup>1,2</sup>Shklyar T.F., <sup>1,2</sup>Sokolov S.Yu.,  
<sup>1,2</sup>Blyakhman F.A.

## RELATIONSHIP BETWEEN ECHOGENIC AND ELASTIC PROPERTIES IN POLYACRYLAMIDE FERROGELS FILLED WITH STRONTIUM FERRITE MICROPARTICLES

<sup>1</sup>Department of biomedical physics and engineering  
Ural State Medical University

<sup>2</sup>Institute of natural science and mathematics  
Ural Federal University

Yekaterinburg, Russian Federation

E-mail: [ODinislamova@gmail.com](mailto:ODinislamova@gmail.com)

**Аннотация.** В работе выполнена количественная оценка ультразвуковых (УЗ) изображений и упругих свойств феррогелей на основе полиакриламида, наполненных магнитными микрочастицами (ММЧ) феррита стронция ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) в весовой концентрации 0 – 18%. Установлено, что добавление ММЧ в минимальной концентрации (0,07%) приводит к существенному увеличению эхоконтрастности УЗ-изображения и модуля Юнга образцов. Качественно, динамика этих параметров по мере увеличения концентрации частиц в геле была одинаковой. При этом линейная корреляционная зависимость между параметрами яркости УЗ-изображения и модулем Юнга во всем диапазоне концентраций ММЧ была установлена.

### **Annotation.**

The paper presents a quantitative assessment of ultrasonic (US) images and elastic properties of ferrogels based on polyacrylamide filled with magnetic microparticles (MMP) of strontium ferrite ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) in a concentrations of 0 - 18% by weight. It was found that the addition of microparticles at a minimum concentration (0.07%) resulted in a significant increase in both the echogenicity and Young's modulus of the samples. Qualitatively the same dynamics of these parameters in the course of MMP increase was found. A linear correlation between the ferrogel echogenicity and ferrogel Young's modulus was obtained for full range of MMP concentrations.

**Ключевые слова:** ультразвуковая локация, феррогель, магнитные микрочастицы, феррит стронция, модуль Юнга.

**Key words:** ultrasonography, ferrogel, magnetic microparticles, ferrite strontium, Young's modulus.

### **Введение**

В настоящее время широко изучаются новые композитные материалы на основе гидрогелей со встроенными внутри магнитными микро- и наноразмерными частицами – феррогели (ФГ). Интерес вызван тем, что ФГ, являясь биосовместимым магнитоактивным материалом, могут найти применение в области биоинженерии в качестве управляемых имплантатов, средств для

адресной доставки лекарств, термической терапии рака и других приложений [2, 3, 5]. В свою очередь встает вопрос о методе визуального контроля устройств и материалов на основе ФГ внутри живого организма. Наиболее простым методом визуализации в медицине является ультразвуковой метод. Кроме того, этот метод дает дополнительную информацию об эластичности материала [1]. В настоящем исследовании рассматриваются эхоконтрастные и упругие свойства полиакриламидного ФГ, содержащего магнитные микрочастицы феррита стронция.

**Цель исследования** – поиск связи между эхоконтрастными и упругими свойствами феррогелей, наполненных микрочастицами феррита стронция.

#### **Материалы и методы исследования**

В работе использовались образцы ФГ, представляющие собой композит на основе полиакриламидного гидрогеля и микродисперсного порошка магнитотвердых микрочастиц (ММЧ) феррита стронция ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ). Синтез частиц и гелей, а также аттестация материалов были выполнены на базе департамента фундаментальной и прикладной химии ИЕНиМ УрФУ и Института электрофизики УрО РАН (Екатеринбург), и подробно изложены в работе [4]. Частицы имели форму неправильного многогранника с характерным размером 2,7 мкм. Плотность сшивки геля составляла 1 сшивка на 100 мономеров полимерной цепи. В качестве сшивающего агента был использован метилendiакриламид (МДАА). Весовая концентрация ММЧ феррита стронция составила 0,00%; 0,07%; 0,72%; 8,55%; 17,86%. При этом значение весовой концентрации 0,00% соответствует образцу гидрогеля, не содержащего ММЧ. Всего в исследовании использовали 25 образцов (по 5 образцов каждого из 5 видов гелей).

Эхоконтрастные свойства ФГ изучались при помощи ультразвукового аппарата Sonoline Adara («Siemens», Нидерланды). Образец ФГ толщиной 5 мм и диаметром 10 мм помещали на дно кюветы, заполненной водой объемом 500 мл, и выдерживали в течение суток для установления равновесной степени набухания. Линейный ультразвуковой датчик 7.5L45s Prima/Adara погружали в воду и устанавливали на высоте 3 см над образцом ФГ по нормали к его поверхности. Параметры визуализации составляли: динамический диапазон ультразвукового устройства 66 дБ, рабочая частота 8.5 МГц, длина волны 0.17 мм, усиление 20 дБ, мощность 1.6%. Изображения с экрана ультразвукового аппарата передавались на компьютер, где в дальнейшем производился их количественный анализ в специализированной программе. На рис. 1 представлены изображения на экране ультразвукового аппарата некоторых образцов ФГ с различным содержанием частиц феррита стронция.

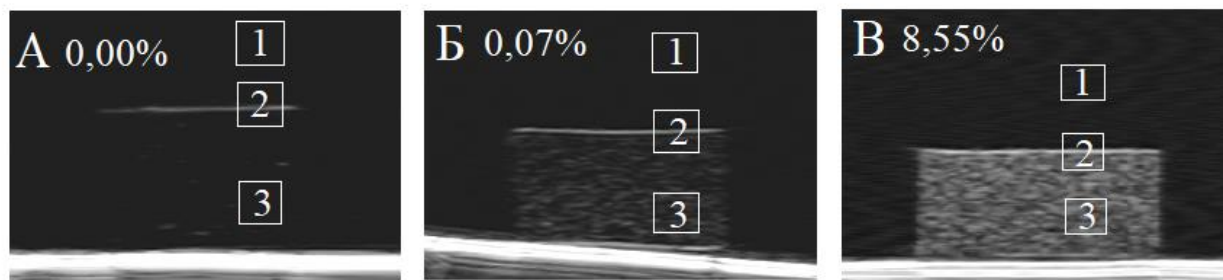


Рис.1. Результаты ультразвуковой визуализации полиакриламидного гидрогеля с различной весовой концентрацией ММЧ  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ . А-В – концентрации частиц; 1 – вода, 2 – верхняя граница образцов, 3 – тело образцов (пояснения в тексте).

Оценивали максимальную яркость изображения на границе гель-вода (см. рис. 1); максимальную, среднюю яркость и среднеквадратичное отклонение (с.к.о.) внутри ФГ; максимальную, среднюю яркость и с.к.о. фона (вода). Яркость изображения определялась в соответствии со шкалой серого цвета, где максимальному значению яркости экрана соответствовало число 255, а минимальному — 30. С.к.о. вычислялось как с.к.о. яркости отдельных пикселей изображения в квадрате  $10 \times 10$  пикселей. Количество измерений составляло не менее десяти. Для каждого вида ФГ были вычислены средние значения измеряемых параметров и границы доверительного интервала при уровне значимости  $p = 0.01$  и  $n = 40$ .

Механические свойства гелей оценивали методом задания ступенчатой деформации на сжатие образца с шагом 100 мкм на общую величину до 35% от начального размера объекта исследования. Образцы помещали между двумя дисками, один из которых был соединен с датчиком силы, другой – с датчиком перемещений. Регистрировали величину деформации сжатия и изменение механического напряжения в образцах, на основании чего строилась зависимость «напряжение-деформация».

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты анализа ультразвукового изображения и значения модуля Юнга исследуемых образцов представлены в табл. 1. Полиакриламидный гидрогель, не содержащий микрочастицы феррита стронция, на ультразвуковом изображении имеет четкие очертания своей верхней поверхности (рис. 1 А) с яркостью 119. Внутри данного гидрогеля максимальная и средняя яркость совпадает со значениями яркости фона ( $38 \pm 1$  и  $32 \pm 1$ , соответственно при  $p = 0,01$ ;  $n = 40$ ). Внутри гидрогеля содержались небольшие пузырьки воздуха, которые выглядят на УЗ-изображении как небольшие белые пятна (при выполнении измерений данные области не затрагивали). Боковые границы гидрогеля не имеют четкого разделения с водой. Наполнение полиакриламидного гидрогеля частицами феррита стронция в минимальной концентрации (0,07%) приводит к существенному увеличению яркости

изображения по сравнению с гидрогелем, не содержащим частиц (рис. 1 Б). Максимальная яркость поверхности ФГ увеличивается до 144, что приводит к более выраженной визуализации его очертаний. Микрочастицы, распределенные внутри гидрогеля, приводят к увеличению неоднородности и, как следствие, к возрастанию эхоконтрастности самого феррогеля. Это наблюдение подтверждается возросшими значениями с.к.о. от 0,6 до 9,5; максимальной и средней яркости внутри ФГ в 2,5 и 1,5 раза, соответственно.

Таблица 1

Значения параметров, характеризующих эхоконтрастные и упругие свойства тестируемых образцов гидрогелей.

<b>весовая концентрация МЧ SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub></b>	<b>0,00%</b>	<b>0,07%</b>	<b>0,72%</b>	<b>8,55%</b>	<b>17,86%</b>
<b>максимальная яркость на границе феррогель- вода (p=0,01; n=40)</b>	119 ± 8	144 ± 5	165 ± 4	189 ± 4	175 ± 3
<b>максимальная яркость внутри ФГ (p=0,01; n=40)</b>	38 ± 1	97 ± 5	124 ± 4	156 ± 4	146 ± 5
<b>Средняя яркость внутри ФГ (p=0,01; n=40)</b>	32 ± 1	48 ± 1	75 ± 2	98 ± 1	92 ± 0,8
<b>с.к.о внутри ФГ (p=0,01; n=40)</b>	0,6 ± 0,1	9,5 ± 0,7	15,2 ± 1,6	17,3 ± 1,4	17,1 ± 0,6
<b>Модуль Юнга, кПа (p=0,05; n=4)</b>	4,1 ± 0,4	4,4 ± 1,4	5,9 ± 1,9	6,7 ± 0,6	5,6 ± 0,6

Дальнейшее увеличение весовой концентрации микрочастиц с 0,07% до 8,55% приводит к достоверному последовательному увеличению яркости УЗ-изображения на границе гель-вода до 189, максимальной яркости внутри до 156 и средней яркости внутри до 98 (рис. 1 В). Однако, при концентрации микрочастиц феррита стронция в 17,86% происходит достоверное уменьшение данных показателей (Табл. 1).

По полученным зависимостям «напряжение-деформация» установлено, что зависимости для всех образцов описываются полиномом второй степени. По линейной части кривых вычисляли тангенс угла наклона, который соответствует величине модуля Юнга (данные приведены в таблице 1). Установлено, что модуль Юнга (модуль упругости) возрастает при наполнении гидрогеля микрочастицами феррита стронция и достоверно увеличивается до концентрации микрочастиц в 8,55%. При повышении концентрации до 17,86% наблюдается снижение упругих свойств геля.

Коэффициент линейной корреляции между параметрами максимальной яркости на границе феррогель-вода и модулем упругости составляет 0,94, что говорит о тесной линейной зависимости между этими параметрами. Данный факт хорошо согласуется с полученным ранее результатом о наличии прямой линейной связи между модулем Юнга и яркостью изображения феррогеля,

наполненного наночастицами оксида железа в диапазоне весовых концентраций от 0% до 2% [1]. Можно предположить, что в исследуемом диапазоне весовых концентраций частиц в феррогеле связь яркости УЗ-изображения ФГ и модуля упругости носит универсальный характер, вне зависимости от типа и размера магнитотвердых частиц.

#### **Выводы**

1. Наполнение полиакриламидного гидрогеля микрочастицами феррита стронция приводит к существенному увеличению эхоконтрастных и упругих свойств композитов, выраженность которых увеличивается по мере возрастания концентрации частиц в полимерной сети.

2. Установлена линейная зависимость между яркостью УЗ-изображения феррогеля наполненного магнитотвердыми частицами феррита стронция и модулем Юнга.

3. Высказано предположение об универсальности связи между эхогенностью композитных феррогелей и их упругими свойствами в исследуемом диапазоне весовых концентраций магнитотвердых частиц.

#### **Список литературы:**

1. Blyakhman F.A. Ferrogels Ultrasonography for Biomedical Applications / F.A. Blyakhman, S.Yu. Sokolov, A.P. Safronov et al // Sensors. - 2019. – V. 19. – P. 3959.

2. Campbell S. Enhanced Pulsatile Drug Release from Injectable Magnetic Hydrogels with Embedded Thermosensitive Microgels / S. Campbell, D. Maitland, T. Hoare // ACS Macro Lett. – 2015.– 4. – №3. – 312-316.

3. Kurlyandskaya G.V. Functional magnetic ferrogels: From biosensors to regenerative medicine / G.V. Kurlyandskaya, F.A. Blyakhman, E.B. Makarova et al // AIP Advances. – 2020. – V.10. – №12. – 125-128.

4. Mikhnevich E.A. Synthesis and study of mechanical properties of polyelectrolyte ferrogels based on strontium ferrite particles. / P.D. Chebotkova, A.P. Safronov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – 11. – № 4, – P. 855-860.

5. Tang J. Magnetic double-network hydrogels for tissue hyperthermia and drug release / J. Tang, Y. Qiao, Y. Chu et al // J. Mater. Chem. B. – 2019. – 7. – P. 1311-1321.

УДК 54.03: 577.114.5

**Земова Ю.С., Терзиян Т.В., Сафронов А.П.**  
**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ**  
**СИНТЕТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ПОЛИАКРИЛАМИДА И**  
**ПОЛИСАХАРИДОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ**

Кафедра органической химии и высокомолекулярных соединений  
Уральский федеральный университет