

Установленные закономерности позволяют выдвинуть гипотезу о том, что наряду, например, с пристеночным сдвиговым напряжением, низкоскоростные зоны рециркуляции могут являться дополнительным фактором прогрессирования кальцинирования артерий вблизи существующего стеноза.

Выводы

1. Компьютерное моделирование гемодинамики вблизи идеальных стенозов прямого сосуда позволяет рассмотреть зарождение и особенности рециркуляционных зон непосредственно после сужения.
2. В случае критического сужения сосуда (стеноз 75%) рециркуляционная зона образуется уже при минимальных скоростях тока крови, характерных для большей части кардиоцикла. Для некритического стеноза 50% рециркуляция проявляется не столь ярко, причем, при достаточно больших скоростях тока крови.
3. Зона рециркуляции является низкоскоростной, в ряде случаев ее можно считать застойной зоной. Кроме того, поскольку скорости тока в этой зоне и в области основного течения могут отличаться более, чем в 10 раз, в силу неньютоновских свойств крови, на границе рециркуляции может существенно увеличиться вязкость.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-61-46013.

Список литературы:

1. Lopes D. Blood flow simulations in patient-specific geometries of the carotid artery: A systematic review / D. Lopes, H. Puga, J. Teixeira et al. // J Biomech. – 2020. – Vol.9. – No.111. – 110019.
2. Starodumov I. O. In-silico study of hemodynamic effects in a coronary artery with stenosis / I.O. Starodumov, F.A. Blyakhman, S.Yu. Sokolov et al. // European Physical Journal: Special Topics. – Vol.229. – No.19-20. – pp. 3009-3020.
3. Rabby M. Pulsatile non-Newtonian laminar blood flows through arterial double stenoses / M. Rabby, S. Shupti, M. Mamun // Journal of Fluids. – 2014. – Vol.2014. – 757902.

УДК 620.3

**Мелкозеров Д.И.^{1,2}, Сосян Д.А.^{1,2}, Михневич Е.А.¹, Сафронов А.П.¹,
Бляхман Ф.А.^{1,2}**

ОЦЕНКА СИЛЫ ДЕЙСТВИЯ ГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОЛИАКРИЛАМИДНЫЕ ФЕРРОГЕЛИ, НАПОЛНЕННЫЕ МИКРОЧАСТИЦАМИ ФЕРРИТА СТРОНЦИЯ

¹Институт естественных наук и математики
Уральский федеральный университет
Екатеринбург, Российская Федерация

²Отдел биомедицинской физики и инженерии
Уральский государственный медицинский университет
Екатеринбург, Российская Федерация

**Melkozerov D.I.^{1,2}, Sosyan D.A.^{1,2}, Mikhnevich E.A.¹, Safronov A.P.¹,
Blyakhman F.A.^{1,2}**

**ACTION FORCE EVALUATION OF GRADIENT MAGNETIC FIELD ON
POLYACRYLAMIDE FERROGELS FILLED WITH STRONTIUM FERRITE
MICROPARTICLES**

¹Institute of natural science and mathematics
Ural Federal University
Yekaterinburg, Russian Federation

²Department of biomedical physics and engineering
Ural State Medical University
Yekaterinburg, Russian Federation

E-mail: denis.melkozerov.s@gmail.com

Аннотация.

Исследовалась сила действия градиентного магнитного поля на феррогели (ФГ), выбранные в качестве прототипа платформ для адресной доставки лекарственных сред. ФГ были синтезированы на основе полиакриламидного гидрогеля и микрочастиц (МЧ) феррита стронция ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) с весовой долей 0,7–17,9%. Установлено, при любом значении напряженности магнитного поля в диапазоне 200 – 400 Э сила притяжения феррогелей тем больше, чем выше концентрация МЧ в магнитном композите. Вне зависимости от концентрации МЧ в ФГ, сила притяжения образцов к источнику магнитного поля возрастает по мере увеличения объема магнитного композита.

Annotation.

The effects of action force of a gradient magnetic field on ferrogels (FGs), chosen as a prototype of targeted drug delivery platform, was investigated. FGs were synthesized based on polyacrylamide hydrogel and strontium ferrite microparticles ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) with a weight fraction of 0.7–17.9%. It was found that at any value of the magnetic field strength in the range of 200 - 400 Oe, the force is the greater, the higher the concentration of MPs in the magnetic composite. Regardless of the MPs concentration in the FG, the action force increases with an increase in the volume of the magnetic composite.

Ключевые слова: магнитные частицы, феррогели, магнитное поле, сила, биомедицинские приложения.

Key words: magnetic particles, ferrogels, magnetic field, force, biomedical applications.

Введение

Гидрогели, то есть полимеры, набухшие в растворителе, относят к разряду «умных» материалов, использование которых для биомедицинских приложений рассматривается как перспективное направление исследований [2]. Разновидностью гидрогелей являются феррогели (ФГ) – гидрогели, в полимерную сеть которых при синтезе включены микро- или наноразмерные магнитные частицы (МЧ). Благодаря этому гидрогели приобретают дополнительные свойства, в частности, в присутствии внешнего магнитного поля они могут деформироваться и перемещаться в пространстве [3]. Такие функциональные возможности ФГ могут быть применены в медицинской практике для адресной доставки лечебных субстанций в места поражения органов и тканей [5].

Настоящая работа посвящена механическому поведению ФГ в магнитном поле. Более конкретно, предметом нашего интереса был аспект, отражающий силу притяжения ФГ к источнику магнитного поля. На предварительном этапе нами был разработан дизайн экспериментов для подобного рода исследований и получены первые данные о силе действия источника градиентного магнитного поля на полиакриламидные ФГ, наполненные микрочастицами оксида железа (магнетит, Fe_3O_4) [3]. В данной работе были использованы полиакриламидные ФГ, содержащие в широком диапазоне концентраций оксид феррита стронция ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$), обладающий магнитным гистерезисом и ненулевой величиной остаточной намагниченности.

Цель исследования – оценить силу притяжения ФГ к источнику магнитного поля в зависимости от величины напряженности магнитного поля, концентрации МЧ в феррогеле, и от объема образцов.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования были образцы ФГ цилиндрической формы диаметром 14-15 мм и высотой до 8 мм. ФГ представляли собой композит на основе полиакриламидного гидрогеля, наполненного микрочастицами феррита стронция. 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]. Кратко, пространственную сетку геля создавали за счет использования сшивающего агента - метилendiакриламида, взятом в мольном соотношении 1:100 к мономеру. Перед введением инициатора и катализатора в реакционную смесь добавляли разное количество магнитных частиц феррита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Частицы имели форму неправильного многогранника с характерным размером порядка 3 мкм. Согласно данным вибрационной магнитометрии коэрцитивная сила стронциевого феррита составляла 1,2 кЭ, то есть он являлся магнитотвердым материалом. Полимеризацию проводили в цилиндрических формах из полиэтилена. После достижения равновесной степени набухания рассчитывали содержание феррита стронция в феррогеле. В исследовании использовались образцы с весовой долей частиц: 0,7, 4,0, 8,6, 11,0, 17,9%.

Образцы ФГ помещались на дно тонкостенной кюветы с дистиллированной водой. Кювета крепилась к датчику силы с помощью жесткого рычага. На минимально возможном расстоянии под кюветой располагался источник градиентного магнитного поля – коммерческий электромагнит (ЭМ) CL -34/18 («Cinlin», Китай). Сопротивление катушки ЭМ составляло 25,8 Ом, максимальное допустимое напряжение – 12 В. Источником стабилизирующего напряжения служил PS - 1502D («Element», Россия). Напряжение на катушку ЭМ задавалось дискретно в пределах от 0 до 12 В с шагом 1 В. Исследование особенностей источника магнитного поля и зависимость интенсивности поля от напряжения на катушке ЭМ были выполнены на Кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов ИЕНиМ УрФУ, и подробно описаны в работе [1].

Феррогели в кювете располагались соосно с сердечником ЭМ на минимальном расстоянии от него, примерно 500 мкм. По три образца ФГ для каждой концентрации МЧ были тестированы.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость силы притяжения феррогелей с различной концентрацией МЧ к источнику магнитного поля от интенсивности магнитного поля.

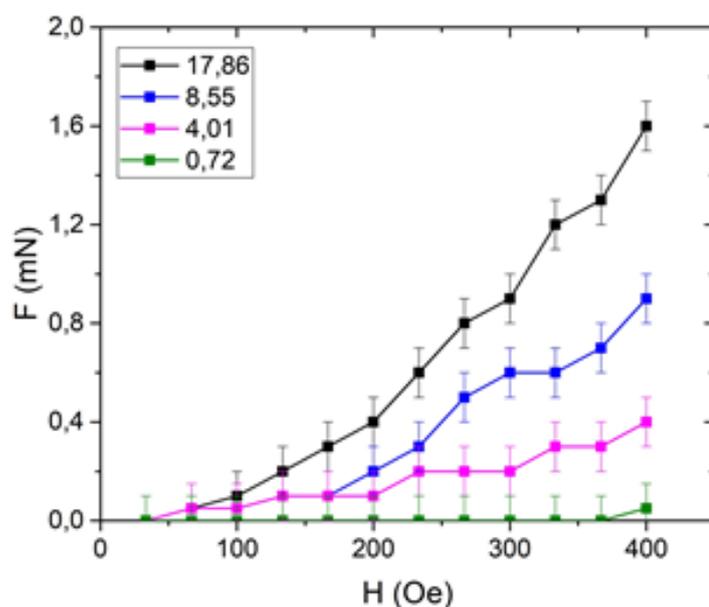


Рис. 1. – Связь между напряженностью градиентного магнитного поля (H) и силой взаимодействия (F) образцов с различной концентрацией магнитных частиц в феррогеле. Диаметр цилиндрических образцов ~14 мм, высота 6 мм, объем ~920 мм³.

На графике можно видеть, что при весовой доле МЧ в ФГ 0,72% сила взаимодействия в пределах погрешности ($\pm 0,1$ мН) не наблюдается на исследуемом промежутке действия магнитного поля (0 – 400 Э). С повышением концентрации МЧ в ФГ значение силы взаимодействия увеличивается. Причем, при любом значении напряженности магнитного поля сила действия ЭМ на ФГ тем больше, чем выше концентрация МЧ в магнитном композите.

На рис. 1 видно также, что для всех концентраций МЧ в ФГ вид зависимости «сила – напряженность» определить сложно из-за низкой точности измерения силы при малых интенсивностях поля. Вместе с тем, в диапазоне Н 200 -400 Э связь между параметрами близка к линейной.

На рис. 2 приведен график зависимости силы притяжения ФГ к источнику магнитного поля от объема образцов. Данные получены для ФГ с наибольшими концентрациями МЧ (11,0 % и 17,9 %) при максимально возможной напряженности магнитного поля источника (400 Э).

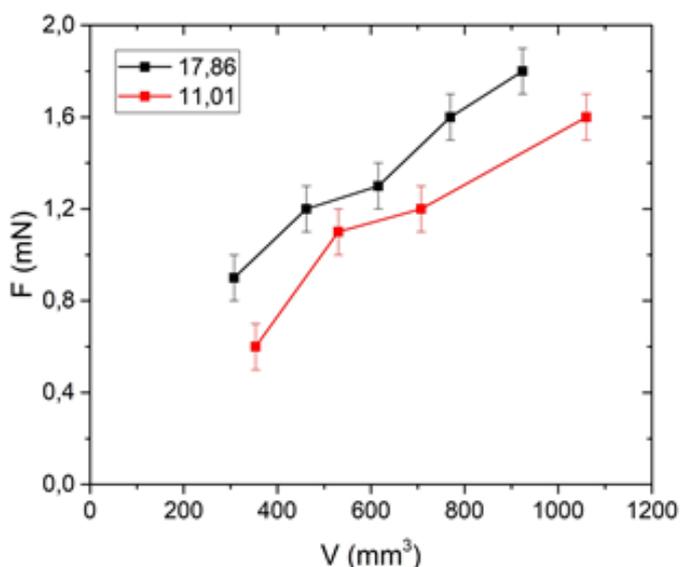


Рис. 2. – Связь между силой притяжения (F) феррогелей с концентрацией магнитных частиц 11,0 % и 17,9 % и объемом образцов (V) при заданной величине напряженности поля 400 Э.

Из данных на рис. 2 следует, во-первых, что при любом одинаковом значении объема ФГ сила взаимодействия образцов с концентрацией МЧ 17,86% значимо больше, чем у магнитных композитов с концентрацией МЧ. Полученный результат полностью согласуется с данными, приведенными на рис. 1 (см.). Во-вторых, вне зависимости от выбранной концентрации МЧ в ФГ, сила притяжения образцов к источнику магнитного поля возрастает по мере увеличения объема магнитного композита.

Таким образом, установленные в работе закономерности о влиянии градиентного магнитного поля на механическую реакцию ФГ с различной геометрией и весовой долей МЧ феррита стронция дают экспериментальное обоснование для проектирования магнитоуправляемых систем, необходимых для различных приложений, включая биомедицинские.

Выводы:

1. Феррогели с магнитными микрочастицами феррита стронция демонстрируют силу притяжения к источнику градиентного магнитного поля.

2. При любом значении напряженности магнитного поля в диапазоне 200 – 400 Э сила притяжения феррогелей тем больше, чем выше концентрация МЧ в магнитном композите.

3. Вне зависимости от концентрации МЧ в ФГ, сила притяжения образцов к источнику магнитного поля возрастает по мере увеличения объема магнитного композита.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ, № 18-19-00090.

Список литературы:

1. Мельников Г.А., Сосян Д.А., Мелкозеров Д.А., Бляхман Ф.А., Курляндская Г.В. Проектирование эксперимента для создания средств адресной доставки лекарств на основе феррогелей. Сборник трудов V Международная (75 Всероссийская) научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения», Екатеринбург, -2020, - С. 177-182.

2. Harland R.S. Polyelectrolyte Gels: Properties, Preparation and Applications / R.S. Harland, R.K. Prudhomme. – Washington DC: American Chemical Society, 1992. – 450 p.

3. Kennedy S. Improved magnetic regulation of delivery profiles from ferrogels/ S. Kennedy, C. Roco, A. Delerisa, P. Spoerria, C. Cezara, J. Weavera, H.Vandenburghd, D. Mooney // Biomaterials. – 2018. – Т.161. – P.179–189.

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. Zhang Y. Mechanical force-triggered drug delivery / Y. Zhang, J. Yu, H.N. Bomba, Y. Zhu, Z. Gu // Chem. Rev. – 2016. – Т.116. – P.12536 – 12563.

УДК 537.622.4

**Мельников Г.Ю., Тимохина В.Э., Бляхман Ф.А., Курляндская Г.В.
МАГНИТНЫЕ МАТРИЦЫ ДЛЯ КЛЕТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Кафедра магнетизма и магнитных наноматериалов,
Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Российская Федерация

**Melnikov G.Yu., Timokhina V.E., Blyakhman F.A., Kurlyandskaya G.V.
MAGNETIC MATRIXES FOR CELL TECHNOLOGIES**

Department of magnetism and magnetic nanomaterials
Ural Federal University
Ekaterinburg, Russian Federation