

## **БИОМЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА**

УДК 531, 544

<sup>1</sup>Бугаёва А.В., <sup>1,2</sup>Шкляр Т.Ф.

### **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ПОЛИАКРИЛАМИДНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ С РАЗНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ СШИВКИ**

<sup>1</sup>Кафедра физики конденсированного состояния и наноразмерных систем  
Институт естественных наук и математики  
Уральский Федеральный университет  
Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>2</sup>Отдел биомедицинской физики и инженерии,  
Центральная научно-исследовательская лаборатория  
Уральский государственный медицинский университет  
Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>1</sup>Bugayova A.V., <sup>1,2</sup>Shklyar T.F.

### **COMPARATIVE EVALUATION OF THE VISCOELASTIC PROPERTIES OF POLYACRYLAMIDE HYDROGELS WITH DIFFERENT CROSS-LINKING DENSITY**

<sup>1</sup>Department of Condensed Matter Physics and Nanoscale Systems  
of the Institute of natural science and mathematics  
Ural Federal University

Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup>Department of biomedical physics and engineering of the Central research laboratory  
Ural State Medical University  
Ekaterinburg, Russian Federation

E-mail: bantonina1998@mail.ru

**Аннотация.** В настоящей статье проведена оценка вязкоупругих свойств (модуль накопления, модуль потерь и фазовый сдвиг) полиакриламидных гидрогелей с разной степенью сшивки методом динамической синусоидальной деформации. Показано, что при степени сшивки мономеров от 1:50 до 1:300 гели проявляют в основном упругий характер деформирования.

**Annotation.** In this article the viscoelastic properties (the storage modulus, loss modulus and phase shift ) of polyacrylamide hydrogels with the cross-linking densities from 1:50 to 1: 300 have been evaluated with the use of dynamic sinusoidal deformation method. It was found that independently on the gel crosslinking density the polyacrylamide gels demonstrate mainly the elastic nature as a response to deformation.

**Ключевые слова:** гидрогель, динамические деформации сжатия, вязкоупругие свойства.

**Key words:** hydrogel, dynamic compression deformations, viscoelastic properties.

### **Введение**

Интерес к полимерным гелям обусловлен их восприимчивостью к внешним факторам (температура, pH среды, состав растворителя и т.д.). В биотехнологии и биоинженерии широко используются полиакриламидные (ПАА) гидрогели и их производные. В частности, ранее обсуждалась эффективность применения гелей на основе полиакриламида в тканевой биоинженерии [1]. Очевидно, что для успешного результата необходимо уметь моделировать их механические характеристики, приближая к свойствам живой ткани. Адекватный выбор полимерных материалов во многом основывается на точной оценке, помимо всего прочего, их вязкоупругих свойств. Ранее, разрабатывая для тканевой инженерии новые полимерные материалы, было показано, что степень адгезии фибробластов человека зависит от эластичности матрицы, изготовленной из композитного геля на основе ПАА [3]. Механические свойства синтетических гидрогелей зависят от множества факторов, контролируемых во время синтеза. Например, концентрация основного мономера, отношения количества мономеров и сшивающего агента, температура синтеза, природа композита [2,4,5]. Любое теоретическое описание реологических свойств для гелей довольно сложный процесс. Механические свойства гелей лучше всего понять экспериментальным методом, исследуя их ответ на деформации.

**Цель исследования** - сравнительная оценка реологических свойств ПАА гидрогелей с разной степенью сшивки.

### **Материалы и методы исследования**

Исследовали синтезированные методом радикальной полимеризации в 1.6М водном растворе полиакриламидные гели. Сшивающий агент - метиленадиакриламид (MerckSchuchardt) вводили в мольном соотношении 1:50 и 1:300 к мономерам. Получали плотно сшитый гель, где на один узел сетки приходится 50 мономеров и редко сшитый гель с 300 мономерами на один узел сетки.

Исследование проводилось в лаборатории биомедицинской физики и инженерии ЦНИЛ УГМУ.

Образцы в форме цилиндров диаметром ~ 10 мм и высотой ~ 6-8 мм помещали между двумя дисками, один из которых был соединен с датчиком силы, другой - с датчиком перемещений. Задавали ступенчатую деформацию с шагом 100 мкм. Регистрировали изменение развиваемой в образце силы и по отношению к величине деформации получали зависимость «деформация - напряжение». Затем, на уровне сжатия образца 5% от его начальной высоты, задавали периодические деформации одноосного сжатия с амплитудой ~ 8% от начальной высоты образца и частотой от 0,01 до 20 Гц. Рассчитывали модуль накопления, или модуль Юнга ( $G'$ ), угол сдвига фаз ( $\Delta\varphi$ ) и модуль потерь ( $G''$ ).

## Результаты исследования и их обсуждение

Установлено увеличение напряжения в обоих гелях в зависимости от величины деформации (рис. 1). Отмечена линейная зависимость между напряжением и деформацией. Такой тип зависимости характерен для материалов с линейным упругим поведением и может быть описан законом Гука. Видно, что крутизна наклона кривой, описывающей зависимость для плотно сшитого геля (1:50) выше, чем для редко сшитого геля (1:300). Тангенс угла наклона соответствует модулю упругости (Юнга). Рассчитанные величины модуля Юнга составили для геля со степенью сшивки 1:50 - 16,6 кПа, для геля 1:300 - 8,7 кПа.

Методом задания динамических деформаций исследована зависимость модуля упругости, величины фазового сдвига и модуля потерь от частоты деформации. При динамических деформациях можно определить энергию, запасаемую в полимере и обратимо отдаваемую им в каждом цикле деформации. Мера этой энергии - модуль упругости ( $G'$ ). Также определяется сопротивление полимера деформированию, переход некоторой части работы в тепло. Эта часть сопротивления материала определяется модулем потерь ( $G''$ ). Фазовый сдвиг отражает отставание развития напряжения материала от деформации и свидетельствует о вкладе вязкой компоненты. На рис. 2 показаны частотные зависимости модуля упругости ( $G'$ ) и модуля потерь ( $G''$ ) для обоих гелей. Во-первых, видно, что при любой частоте деформации значения модуля упругости для плотно сшитого геля всегда выше, чем для редко сшитого геля. Во-вторых, у плотно сшитого геля отмечен слабый рост величины модуля Юнга при увеличении частоты деформации. Это можно объяснить наличием быстро и медленно релаксирующих звеньев цепи полимера. На низких частотах часть полимерных цепочек релаксирует и не вносит свой вклад в напряжение материала. На высоких частотах все звенья проявляют упругое поведение.

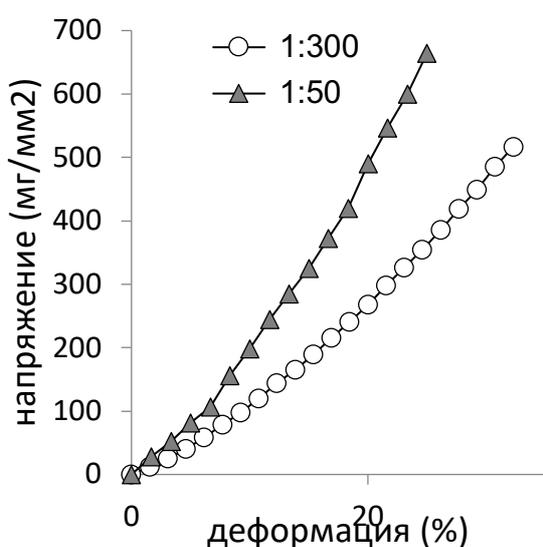


Рис. 1. Зависимость «деформация-напряжение» для двух типов гелей

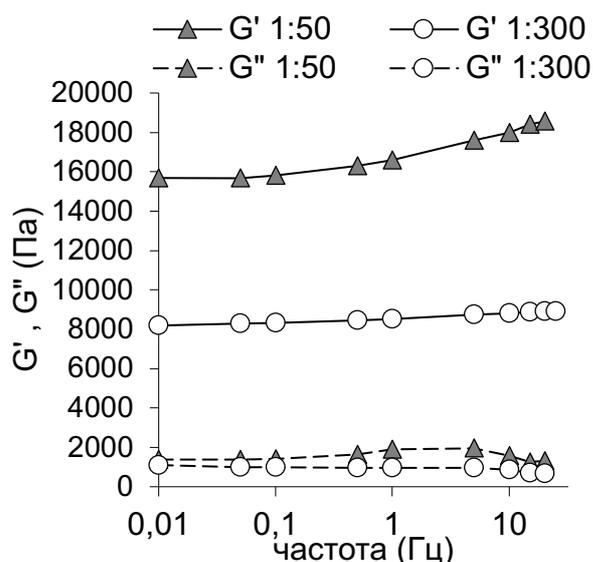


Рис. 2. Частотные зависимости модулей упругости и потерь

Видно, также, что значения модуля потерь для обоих типов гелей не существенно отличаются друг от друга и практически не зависят от частоты деформации. Фазовый сдвиг, измеренный в градусах, также не выявил значимой зависимости от частоты деформации. Для редко сшитого геля величина ( $\Delta\varphi$ ) колебалась в диапазоне от 3 до 5 градусов, для плотно сшитого - от 7 до 10 градусов.

Таким образом, установлено снижение ( $G'$ ), ( $\Delta\varphi$ ) и ( $G''$ ) при уменьшении степени сшивки геля. Изменение частоты в диапазоне 0,01 - 20 Гц не существенно влияет на показатели вязкоупругости. Соотношение величин модулей говорит о преимущественном вкладе упругой компоненты в ответ гелей на динамическую деформацию.

### **Выводы**

Для полиакриламидных гелей со степенью сшивки 1:50 и 1:300 величина модуля Юнга значительно превышает значения модуля потерь, величина фазового сдвига мала и составляет несколько градусов. Полученные результаты свидетельствуют о преобладании упругого характера деформирования, а исследуемые гели можно рассматривать как упругие материалы.

### **Список литературы:**

1. Острецова Н.И. Полиакриламидные гели, их безопасность и эффективность (обзор) / Н.И. Острецова, А.А. Адамян, А.А. Копыльцов и др. // *Анналы пластической, реконструктивной и эстетической хирургии.* - 2003. - № 3. - С. 72-87.
2. Русинова М.А. Влияние наночастиц оксида железа на вязкоупругие свойства ПАА гидрогелей / М.А. Русинова, Т.Ф. Шкляр // «Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения». Сб. тр. II Междунар. Конф. Екатеринбург: Изд-во УГМУ. - 2017. - С. 151-154.
3. Blyakhman F. A. Effect of the polyacrylamide ferrogel elasticity on the cell adhesiveness to magnetic composite / F.A. Blyakhman, A.P. Safronov, O.G. Makeyev, V.V. Melekhin, T.F. Shklyar, et al // *Journal of Mechanics in Medicine and Biology* - 2018. - V.18. - №6.
4. Dobreikina A. Biomimetic gels with chemical and physical interpenetrating networks / A. Dobreikina, T.F. Shklyar, F. Blyakhman, A. Safronov // *Polymer International.* - 2018. - V.67. - №10. - pp 1330-1334.
5. Zhang J. Characterization of polyacrylamide gels as an elastic model for food gels / J. Zhang, C.R. Daubert, E.A. Foegeding // *RheolActa.* - 2005. - V.44. - pp 622-630.