

## ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ / PHYSICAL CHEMISTRY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.70>

## МАТРИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ СЛОЕВ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ С ПРИВИТЫМИ АМИНОАЦЕТАТНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ ПВХ НА ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ТКАНИ И АКАВАКОМПЛЕКСОВ СУЛЬФАТА НАТРИЯ

Научная статья

Кобрин М.Р.<sup>1,\*</sup>, Фридман А.Я.<sup>2</sup>, Цивадзе А.Ю.<sup>3</sup>, Титова В.Н.<sup>4</sup>, Явич А.А.<sup>5</sup>, Горбунов А.М.<sup>6</sup><sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (kobrin92[at]ya.ru)

**Аннотация**

Синтезированы твердые электролиты, состоящие из донорного растворителя в виде пористого слоя, состоящего из привитых к микрочастицам аэросила глицинатных производных ПВХ, пришитых к волокнам целлюлозной ткани, и растворенных в нем аквакомплексов сульфата натрия. Синтезированы образцы с массовыми долями аэросила 24.3, 45.9 и 67.1%. Сорбционный объем растворителя и растворимость сульфата натрия возрастают с увеличением массовой доли аэросила. Исследована зависимость тока от напряжения в цепи Pt (+) – раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – мостик из твердого электролита – раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Pt (-). Длина мостика 20 см, ширина 10 см. Показано, что электролит – это нелинейный ионный проводник, проводимость и поляризуемость которого увеличивается пропорционально концентрации аквакомплексов.

**Ключевые слова:** аэросил, слой, целлюлозная ткань, твердые электролиты, сорбция, ионная проводимость.

## MATRIX ELECTROLYTES BASED ON POROUS LAYERS OF AMORPHOUS SILICA WITH GRAFTED AMINOACETATE PVC DERIVATIVES ON CELLULOSE TISSUE AND SODIUM SULFATE ACAVA COMPLEXES

Research article

Kobrin M.R.<sup>1,\*</sup>, Fridman A.Y.<sup>2</sup>, Tsivadze A.Y.<sup>3</sup>, Titova V.N.<sup>4</sup>, Yavich A.A.<sup>5</sup>, Gorbunov A.M.<sup>6</sup><sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> The Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (kobrin92[at]ya.ru)

**Abstract**

Solid electrolytes consisting of a donor solvent in the form of a porous layer consisting of glycinate PVC derivatives grafted to aerosil microparticles and dissolved sodium sulfate aquacomplexes were synthesized. Samples with mass fractions of aerosil 24.3, 45.9, and 67.1% were synthesized. The solvent sorption volume and solubility of sodium sulfate rise with increasing mass fraction of aerosil. The dependence of the current on the voltage in the circuit Pt (+) - Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution - solid electrolyte bridge - Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Pt (-) solution was studied. The length of the bridge is 20 cm, its width is 10 cm. It is shown that electrolyte is a nonlinear ionic conductor, the conductivity and polarizability of which increase in proportion to the concentration of aqua complexes.

**Keywords:** aerosil, layer, cellulose tissue, solid electrolytes, sorption, iron conductivity.**Введение**

Электропроводные пористые слои аминокетатных производных ПВХ на волокнах ткани с сорбированными аквакомплексами кислот и соединений щелочных металлов, описанные в [1], [2], перспективны как доступные полимерные твердые электролиты, которые на текущий момент не описаны в литературе и не имеют аналогов. Данные материалы в перспективе могут быть использованы как сенсоры, селективные растворители для катионов, в качестве ионных проводников. Стенки пор формируют макромолекулярные сетки из сочлененных циклических аминов с этанольными или ацетатными группами. В них атомы азота – электронодонорные атомы, которые участвуют в формировании сольватных оболочек катионов сорбируемых аквакомплексов. В этом плане слои можно классифицировать как твердые донорные растворители. В электрической цепи с мостиком из твердого электролита, катионы будут двигаться по стенкам пор, а анионы в порах. Растворители синтезируют путем обработки тканей суспензией ПВХ в смеси бензилового спирта (БС) и тетрагидрофурана (ТГФ) с последующей одновременной пришивкой ПВХ к поверхности волокон и сшивания линейного полимера в макромолекулярные циклические глицинатные производные с пористой структурой, а электролит – путем сорбции кислот, солей и оснований из растворов. Содержание аквакомплексов около 10<sup>-4</sup> ммоль/г. Электропроводность электролитов зависит от природы аквакомплексов, но не превышает 10<sup>-8</sup> См. В [3] в эмульсию ПВХ были включены микрочастицы аморфного диоксида кремния типа «аэросил», который проявляет хорошие сорбирующие свойства [4], и на волокнах целлюлозной ткани синтезирован растворитель, в которой полимер через ->Si-O-(CH-CH<sub>2</sub>)-(NCH<)-CH<sub>2</sub>COOK - группы привит к поверхности микрочастиц. Растворимость аквакомплексов сульфата натрия увеличилась на 2 порядка, а электропроводность электролита увеличилась на 5 порядков. Это указывает на то, что в растворимости аквакомплексов участвуют не только донорные атомы в стенках пор полимера, но и донорные атомы кислорода их стенок пор, сформированных группами, через которые полимер привит к аэросилу, а также стенок пор в микрочастицах аэросила. В этом аспекте можно ожидать, что с увеличением содержания аэросила будет возрастать

растворяющая способность растворителя и соответственно электропроводность электролита с аквакомплексами сульфата натрия.

Цель работы: синтезировать электролиты из аквакомплексов сульфата натрия, растворенных в пришитом к целлюлозной ткани глицинатными производными ПВХ, привитыми к микрочастицам аэросила, слое с разным содержанием аэросила и методом вольтамперометрии исследовать их электропроводность.

### Основные результаты

Материалы и реактивы:

Тетрагидрофуран, бензиловый спирт «ч», глицин «ч», гидроокись калия «хч», натрий сернокислой безводный «чда», смола ПВХ, марка SG-7, содержание ПВХ 88% пластификатор – эфиры терефталевой кислоты – около 10%, хлопковая марля, медицинская, отмытая в ТГФ, содержание целлюлозы 97,0-97,5%, плотность 1,45 г/см<sup>3</sup>. Были приготовлены: 3,33 моль/л раствор глицинат калия, и 1,5 моль/л сернокислого натрия.

Суспензии ПВХ и аэросила: отношение аэросил : ПВХ 1:1 (I), 2:1 (II), и 3:1 (III). Приготовлены по методике [3]. В смеси из 400 см<sup>3</sup> ТГФ и 75 см<sup>3</sup> БС с помощью блендера диспергировали 15 г смолы ПВХ (марка SG-7, содержание ПВХ 88%), после чего дозировали 15 (I), 30 (II) или 45 (III) г аэросила, измельчая его до состояния однородной суспензии. Микрофотографирование проводили с помощью оптического микроскопа Motic DMBA 300, увеличение 40х, микрофотографии приведены на рис. 1.



Рисунок 1 - Микрофотографии суспензий

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.70.1>

В суспензиях видны шарообразные или эллипсообразные микрочастицы аэросила размером от 0,5 до 5 мкм, объединенные в агрегаты. В I – это нити разной формы и длины, в II – агломераты, а III - звезды из коротких нитей. Плотность: 0,941(I), 0,807 (II) 0,762(III) г/см<sup>3</sup>.

Растворители были синтезированы по методике [3]. Образец марли массы  $m_0$  пропитывали эмульсией, выдерживали на воздухе, прогревали при 110° С до удаления ТГФ, измеряли  $m_1$  массу образца марли с покрытием геля ПВХ с аэросилом в БС и рассчитывали массу покрытия по формуле  $m_n = m_1 - m_0$ . Затем образец кипятили в растворе аминоксета калия, отгоняли БС путем кипячения образца в воде, сушили при 105°, измеряли  $m_2$  массу образца марли со слоем и рассчитывали массу слоя  $m_c = m_2 - m_0$  и ее массовую долю  $w_{cn} = m_c/m_0$ . Матрица, полученная с суспензией I обозначена как MI, с суспензией II – MII, а с суспензией III – MIII.  $w_{cn} = 59\%$  (MI), 52% (MII) и 53% (MIII).

Состав слоя был рассчитан используя значения  $m_0$ ,  $m_n$  и  $m_c$ , исходя из следующего. Покрытие состоит из аэросила ПВХ и БС. В покрытии I массовая доля аэросила  $w_{AC(n)} = 86\%$ , в II = 64%, а в III = 43%. В растворе глицината калия, как соли сильного основания и слабой кислоты, одновременно происходят три реакции с участием ПВХ:

1.  $>Si-O-H + Cl-CH_2 + KOH = ->Si-O-CH_2 + KCl$ , с помощью которой происходит прививка ПВХ к поверхности аэросила,

2.  $>C-O-H + Cl-CH_2 + KOH = ->C-O-CH_2 + KCl$ , с помощью которой происходит пришивка ПВХ к поверхности волокон целлюлозы,

3.  $2(>CH-Cl) + NH_2CH_2COOK + 2KOH = (>CH-Cl)_2NCH_2COOK$ , с помощью которой происходит превращение участков ПВХ в макромолекулярные циклические аминоксеты. Масса целлюлозы и аэросила в процессе реакций практически не меняется, то есть масса аэросила слое равна его массе в покрытии:  $m_{AC} = m_n w_{AC(n)}$ . Тогда массовая доля аэросила в слое  $w_{AC} = m_{AC}/m_c$  равна 24,3 (MI), 45,9 (MII) и 67,1 (MIII) %.

Микрофотографии растворителей приведены на рис. 2. Для сравнения приведена микрофотография марли перед пропиткой.

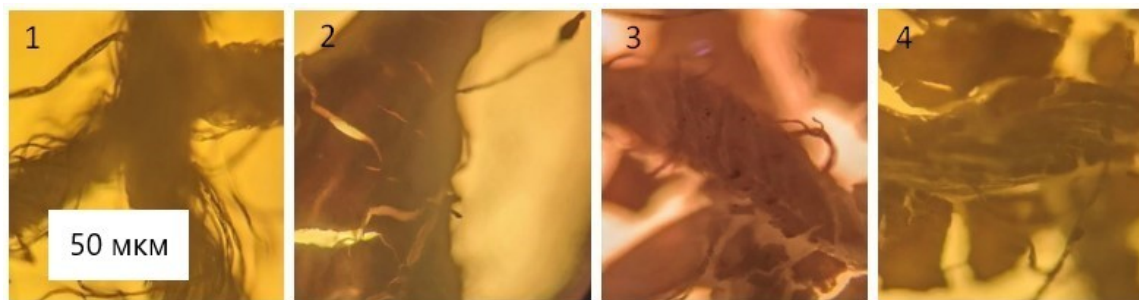


Рисунок 2 - Микрофотографии марли (1), MI (2), MII (3), MIII (4)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.70.2>

Марля состоит из переплетенных волокон, от которых отходят короткие волоконца. В растворителях волокна и волоконцы находятся в оболочках из полимера. В MI слой сформирован преимущественно на волокнах, а в MII и MIII на волокнах и на волокоцах. Микрочастицы аэросила относительно равномерно распределены в объеме полимера. Плотность упаковки частиц коррелирует с содержанием аэросила.

ИК-спектры отражения растворителей были записаны на ИК -Фурье спектрометр Perkin-Elmer 2000. Они приведены на рис. 3.

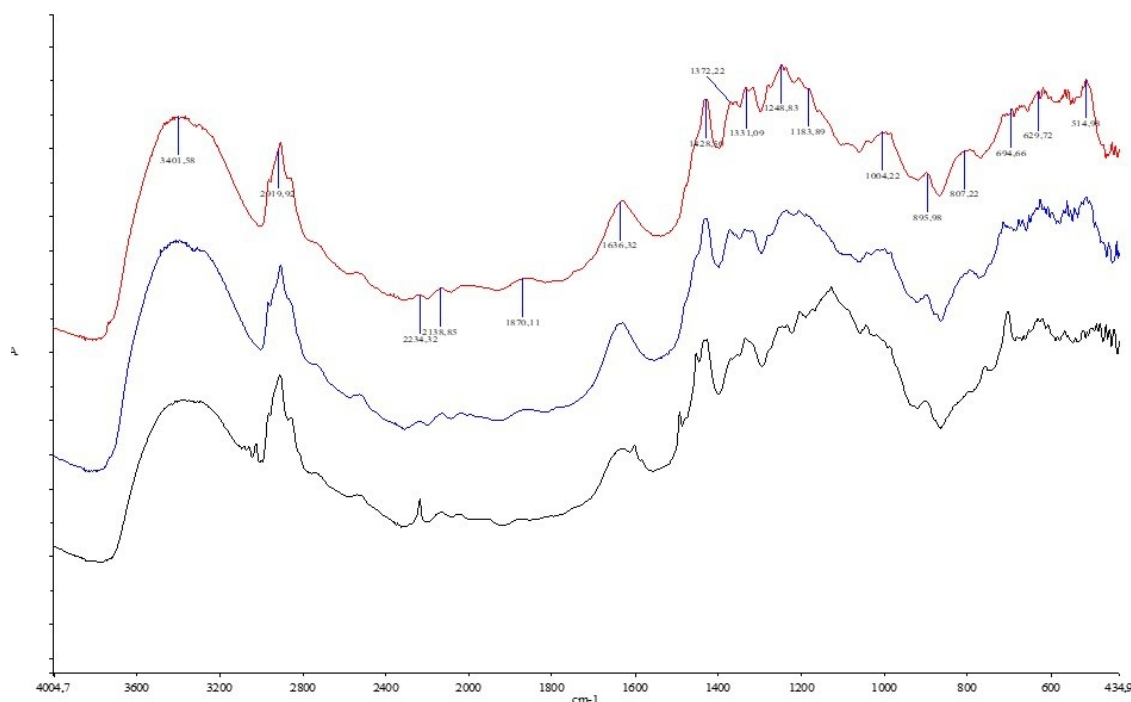


Рисунок 3 - ИК-спектр:

1 - MI, 2 - MII, 3 - MIII

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.70.3>

Отнесение полос проводили согласно [5], [6], [7], [8]. Во всех случаях имеются полосы  $3400$  и  $3280$   $\text{cm}^{-1}$  колебаний водородных связей в целлюлозе, в  $2920$   $\text{cm}^{-1}$  – C-H колебаний в целлюлозе и полимере,  $1870$  и  $1248$   $\text{cm}^{-1}$  - C=O и C-O колебаний в эфирных группах пластификатора в ПВХ,  $1636$  и  $1438$   $\text{cm}^{-1}$  - COO<sup>-</sup> антисимметричным и симметричным колебаний в глицинатных группах полимера, в  $1185$   $\text{cm}^{-1}$  колебаниям в C-O-C групп, через которые полимер пришит к волокнам целлюлозы,  $807$   $\text{cm}^{-1}$  к колебаниям Si-O-C- групп, через которые полимер привит к поверхности аэросила. Ее интенсивность возрастает с увеличением содержания аэросила. Положение полос - Si-O-Si колебаний в аморфном диоксиде кремния зависят от состава матрицы: в спектре MI имеются полосы  $1100$ ,  $1065$ ,  $1000$ ,  $895$  и  $800$  и  $796$   $\text{cm}^{-1}$ , в спектре MII –  $1090$ ,  $1035$ ,  $1004$ ,  $805$  и  $800$   $\text{cm}^{-1}$ , а в MIII –  $1096$ ,  $1038$ ,  $1020$ ,  $895$  и  $807$   $\text{cm}^{-1}$  и плечо  $1128$   $\text{cm}^{-1}$ .

Объем сорбирующих пор был определен весовым методом по количеству воды, поглощаемой из паров. Расчеты проводили по формуле  $G = (m - m_0) / m_0$ , где  $m_0$  и  $m$  - масса до и после сорбции.  $G = 0.059$ ,  $0.081$  и  $0.114$   $\text{cm}^3/\text{г}$  для MI, MII и MIII соответственно.

Электролиты синтезированы следующим образом. Образцы растворителей массы  $m_0$  были пропитаны раствором сульфата натрия, отжаты между листами фильтровальной бумаги и высушены до постоянной массы  $m_c$  при  $120^\circ$  и

выдержаны при воздухе (влажность 80 - 100%) до постоянной массы  $m_3$ . Электролиты на основе MI, MII и MIII были обозначены как ЭI, ЭII и ЭIII. Содержание сорбированного сульфата натрия и воды рассчитывали по формулам:  $C(\text{Na}_2\text{SO}_4) = (m_c - m_0)/142 \cdot m_0$  и  $C(\text{H}_2\text{O}) = (m_3 - m_c)/18 \cdot m_0$ .  $C(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 1.65, 2.80$  и  $3.87$  ммоль/г, а  $C(\text{H}_2\text{O}) = 1.57, 3.6$  и  $6.96$  для ЭI, ЭII и ЭIII соответственно. На рис. 4 приведены ИК-спектры обезвоженных ЭI, ЭII и ЭIII.

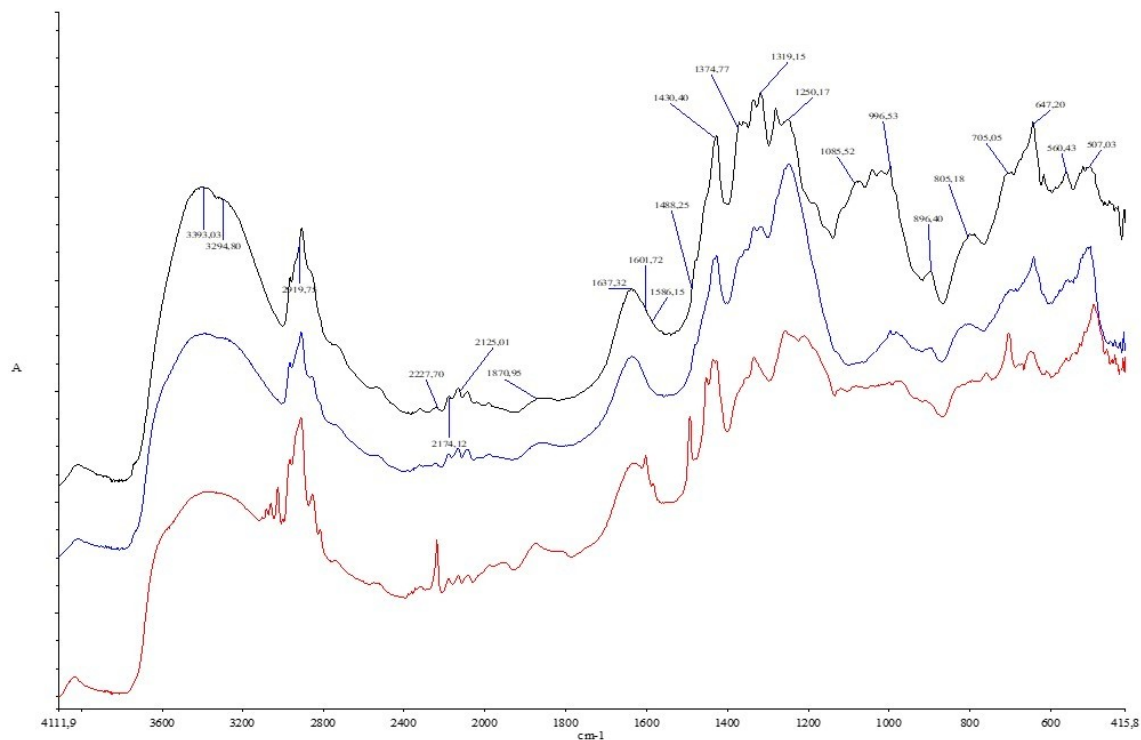


Рисунок 4 - ИК спектры обезвоженных ЭI(1) , ЭII (2) и ЭIII(3)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.70.4>

По сравнению со спектрами MI, MII и MIII в спектрах ЭI, ЭII и ЭIII появилась полоса около  $647 \text{ см}^{-1}$ , относящаяся к деформационным колебаниям в  $\text{SO}_4^{2-}$ . Так же и изменилась спектральная картина в областях  $1430 - 1300 \text{ см}^{-1}$  колебаний в полимере и  $1100 - 760 \text{ см}^{-1}$  - Si-O- Si колебаний. Это указывает на то, что в сольватации аквакомплексов участвуют донорные атомы полимера и аэросила.

Измерение электропроводности электролитов проводили в электрохимической ячейке из двух стаканов с  $1,5 \text{ M}$  раствором сульфата натрия в каждом с помещенными в них платиновыми электродами. Полученные нами материалы-донорные растворители ЭI, ЭII и ЭIII попеременно использовались в данной ячейке в качестве электрохимических мостиков. Длина мостика  $20 \text{ см}$ , ширина  $10 \text{ см}$ . Концы мостика были опущены в каждый стакан с раствором сульфата натрия на глубину  $0,3 \text{ см}$ . Платиновые электроды были соединены с источником постоянного тока. Задавали напряжение  $U$  и измеряли  $J$  ток в цепи. Данные зависимости приведены на рис. 5.

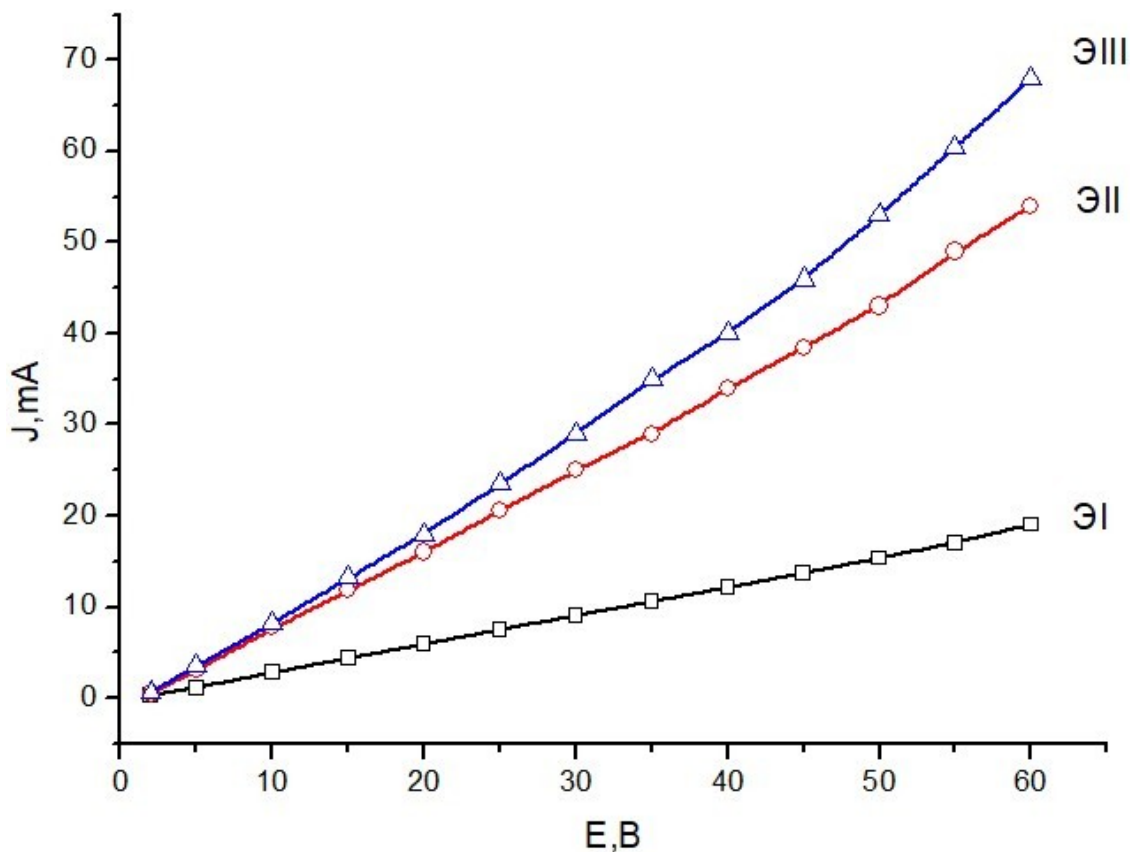


Рисунок 5 - Зависимость тока в цепи от напряжения

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.70.5>

Видно, что при каждом заданном напряжении ток в цепи возрастает в ряду ЭI < ЭII < ЭIII. Установлено, что ЭI, ЭII или ЭIII – это не линейные проводники. Зависимость тока в цепи от напряжения описывается уравнением:  $J = \sigma(U-U_0) + \chi(U-U_0)^2$ , где  $U_0$  – напряжение начала движения ионов в проводнике,  $\sigma$  – проводимость проводника, а  $\chi$  – поляризуемость проводника (в уравнении отвечает за нелинейность). Для ЭI  $U_0=0.00029$  В,  $\sigma = 0.3 \cdot 10^{-3}$  См и  $\chi = 0.32 \cdot 10^{-6}$  См/В, для ЭII  $U_0=0.0039$  В,  $\sigma = 0.82 \cdot 10^{-3}$  См,  $\chi = 1.6 \cdot 10^{-6}$  См/В и для ЭIII  $U_0=0.013$  В,  $\sigma = 0.84 \cdot 10^{-3}$  См,  $\chi = 5.09 \cdot 10^{-6}$  См/В. Значения  $\sigma$  возрастают с увеличением  $C(\text{Na}_2\text{SO}_4)$ , а  $\chi$  – увеличением  $C(\text{Na}_2\text{SO}_4)^2$ . При этом  $\sigma/C(\text{Na}_2\text{SO}_4) \approx 0,23$  См\*г/моль, а  $\chi/C(\text{Na}_2\text{SO}_4)^2 \approx 0,22 \cdot 10^{-3}$  См\*г<sup>2</sup>/В\*моль<sup>2</sup>. Особенность структуры растворителя заключается в том, что водный раствор сульфата натрия контактирует с полимером, окружающим частицы аэросила. Согласно составу аквакомплексов числа молекул воды недостаточно для формирования первой сольватной оболочки  $\text{Na}^+$ . В стенках пор полимера эту оболочку достраивают атомы азота и кислорода. Сродство иона  $\text{Na}^+$  к донорным атомам кислорода больше, чем к донорным атомам азота [9], [10]. Поэтому  $\text{Na}^+$  перемещаются в зону прививки и через них в стенки пор аэросила, состыкованных с порами полимера. С увеличением доли аэросила в слое уменьшается число донорных атомов полимера и увеличивается количество групп, формирующих переходную зону. При этом одновременно увеличивается объем сорбирующих пор. Вероятно, что в электропроводном мостике движение ионов происходит преимущественно в зоне прививки.

### Заключение

Исследования показали перспективность синтеза твердых донорных растворителей с задаваемой растворяющей способностью и электролитов с требуемой электропроводностью. Для синтеза растворителей возможно варьирование составом суспензии микрочастиц аэросила и ПВХ в смеси ТГФ и БС), которые можно химически пришить к подложке из целлюлозной ткани использованием аминокислот, моноэтаноамина, первичных ди- и полиаминов как реагентов для превращения цепей ПВХ в макромолекулярные циклические амины. В дальнейших исследованиях будет определена зависимость варьирования природой аквакомплексов с задаваемым отношением катионов к анионам и природой подложек на растворяющую способность и электропроводность материалов.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Fridman A.Ya. Transformation of polyvinyl chloride surface layers into insulating layers of macromolecular cyclams as a new trend in the field of chemical encapsulation. A review / A.Ya. Fridman, A.Yu. Tsivadze, E.M. Morozova // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2015. – Vol. 51. – № 6. – P. 990-1000.
2. Цивадзе А.Ю. Формирование и свойства привитых к активному углероду электрон- и ионпроводящих слоев n-замещенных производных ПВХ / А.Ю. Цивадзе, А.Я. Фридман, А.А. Аверин и др. // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2019. – Т. 55. – № 6. – С. 610-619.
3. Цивадзе А.Ю. Материал в виде слоя аэросила с привитыми макромолекулярными циклическими аминокетатами на целлюлозной ткани / А.Ю. Цивадзе, А.Я. Фридман, А.К. Новиков и др. // *Наукаосфера*. – 2022. – № 4-2. – С. 332-336
4. Wang J. Synthesis and characterization of sodium lauryl sulfonate modified silicon / J. Wang, S. Yang, R. Ma // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – № 316. – P. 1-7.
5. Накамото К. ИК спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накамото. – Москва : Мир, 1991.
6. Hospodarova V. Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials / V. Hospodarova, E. Singovszka, N. Stevulova // *American Journal of Analytical Chemistry*. – 2018. – Vol. 9. – № 6. – P. 303–310.
7. Ocaña M. The variability of the infrared powder spectrum of amorphous SiO<sub>2</sub> / M.Ocaña, V.Fornés, C.J.Serna // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1989. – Vol. 107. – Iss. 2–3. – P 187-192.
8. Чукин Г.Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезёма / Г.Д. Чукин. – Москва : Экзамен, 2016. – 527 с.
9. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений / Б.Н. Тарасевич. – Москва : МГУ, 2012. – 54 с.
10. Измайлов Н.А. Электрохимия растворов / Н.А. Измайлов. – Москва : Химия, 1976. — 488 с.
11. Фиалков Ю.Я. Растворитель как средство управления химическим процессом / Ю.Я. Фиалков. – Ленинград : Химия, 1990. – 237 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Fridman A.Ya. Transformation of polyvinyl chloride surface layers into insulating layers of macromolecular cyclams as a new trend in the field of chemical encapsulation. A review / A.Ya. Fridman, A.Yu. Tsivadze, E.M. Morozova // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2015. – Vol. 51. – № 6. – P. 990-1000.
2. Civadze A.Ju. Formirovanie i svojstva privityh k aktivnomu uglerodu jelektron- i ionprovodjashhih sloev n-zameshennyh proizvodnyh pvh [Formation and properties of electron- and ion-conducting layers of n-substituted PVC derivatives grafted to active carbon] / A.Ju. Civadze, A.Ja. Fridman, A.A. Averin et al. // *Fizikohimija poverhnosti i zashhita materialov* [Physical chemistry of the surface and protection of materials]. – 2019. – Vol. 55. – № 6. – P. 610-619. [in Russian]
3. Civadze A.Ju. Material v vide sloja ajerosila s privitymi makromolekuljarnymi ciklichesкими аминокетатами на целлюлозной ткани [Material in the form of an aerosil layer with grafted macromolecular cyclic aminoacetates on cellulose tissue] / A.Ju. Civadze, A.Ja. Fridman, A.K. Novikov et al. // *Naukosfera* [Sciencesphere]. – 2022. – № 4-2. – P. 332-336 [in Russian]
4. Wang J. Synthesis and characterization of sodium lauryl sulfonate modified silicon / J. Wang, S. Yang, R. Ma // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – № 316. – P. 1-7.
5. Nakamoto K. ИК спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений [IR and RAMAN spectra of inorganic and coordination compounds] / K. Nakamoto. – Moscow : Mir, 1991. [in Russian]
6. Hospodarova V. Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials / V. Hospodarova, E. Singovszka, N. Stevulova // *American Journal of Analytical Chemistry*. – 2018. – Vol. 9. – № 6. – P. 303–310.
7. Ocaña M. The variability of the infrared powder spectrum of amorphous SiO<sub>2</sub> / M.Ocaña, V.Fornés, C.J.Serna // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1989. – Vol. 107. – Iss. 2–3. – P 187-192.
8. Chukin G.D. Himija poverhnosti i stroenie dispersnogo kremnezjoma [Surface chemistry and structure of dispersed silica] / G.D. Chukin. – Moscow : Jekzamen, 2016. – 527 p. [in Russian]
9. Tarasevich B.N. ИК-спектры основных классов органических соединений [IR spectra of the main classes of organic compounds] / B.N. Tarasevich. – Moscow : MGU, 2012. – 54 p. [in Russian]
10. Izmajlov N.A. Jelektrohimiya rastvorov [Electrochemistry of solutions] / N.A. Izmajlov. – Moscow : Himija, 1976. — 488 p. [in Russian]
11. Fialkov Ju.Ja. Rastvoritel' kak sredstvo upravlenija himicheskim processom [Solvent as a means of controlling the chemical process] / Ju.Ja. Fialkov. – Leningrad : Himija, 1990. – 237 p. [in Russian]