

## АНОТАЦІЯ

*Жигайло М.М.* Полімерні і гібридні неорганічно/органічні мембрани з протонопровідними і іоно-обмінними властивостями – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 102. Хімія 10. Природничі науки – Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, м. Львів, 2022.

Дисертаційна робота присвячена розробленню нових типів функціональних полімерних і гібридних неорганічно/органічних матеріалів методом УФ-ініційованої полімеризації, який є перспективним завдяки високій продуктивності та екологічності. Для забезпечення матеріалу функції протонної провідності до складу полімеризаційної суміші вводять мономери, що містять протонодонорні сульфо- і карбоксильні групи. Зшити структуру кополімерів забезпечує зшивальний агент. Морфологічна організація мембран включає канали транспортування протонів, які формуються через фазове розділення між гідрофобним полімерним ланцюгом і гідрофільними сульфогрупами.

Для синтезу гібридних неорганічно/органічних мембран застосовано підхід, пов'язаний із хімічним зв'язуванням неорганічного і органічного компонентів нанокompозита. З цією метою використано золь-гелевий прекурсор 3-метакрилоксипропілтриметоксисилан, до складу якого входить акрилатний фрагмент, що впроваджується у полімерний ланцюг, кополімеризуючись з іншими мономерами, і метоксисилільні групи, які у процесі золь-гель перетворення формують кремнеземну мережу, яка додатково зшиває нанокompозит. Золь-гель прекурсор тетраетоксисилан, який також використовується у синтезах, співконденсується з МАПТМС. Золь-гель реакції конденсації гідролізованих прекурсорів проходять під час полімеризації мономерів *in situ*. Таким чином, формується неорганічно/органічна просторово зшита структура гібридного матеріалу з розгалуженою мережею протонопровідних каналів.

З використанням описаної стратегії синтезовано декілька типів мембран на основі акрилових та вінілового мономера: полі(акрилонітрил-ко-2-акриламід-2-метилпропансульфонова кислота-ко-акрилова кислота-ко-метиленбісакриламід), полі(акрилонітрил-ко-стиренсульфонат натрію-ко-акрилова кислота-ко-етиленгліколь диметакрилат), полі(акрилонітрил-ко-3-сульфопропілакрилат натрію-ко-етиленглікольдиметакрилат-ко-акрилова кислота), а також гібридні кремнеземно/полімерні мембрани з полімерними матрицями, до складу яких входить ще МАПТМС, та неорганічною складовою – кремнеземною сіткою, сформованою прекурсорами золь-гель процесу. Успішність проведених синтезів підтверджено ІЧ-спектроскопічними дослідженнями, ЕДР-аналізом, визначенням гель-фракції полімерів. СЕМ-зображення зразків мембран дозволили встановити їхню морфологію.

Протонна провідність усіх типів синтезованих мембран є високою. Значення протонної провідності залежать від складу полімерної матриці і зростають в ряду полімерних мембран: полі(АН-ко-АМПС-ко-АК-ко-МБА) > полі(АН-ко-СПАК-ко-АК-ко-ЕГДМА) > полі(АН-ко-ССНа-ко-АК-ко-ЕГДМА). Встановлена залежність протонної провідності мембран від співвідношення АМПС/АК у полімерній матриці (зростає із збільшенням АМПС/АК), від співвідношення прекурсорів золь-гель процесу. Цікава закономірність була встановлена при дослідженні впливу вмісту неорганічного компонента на протонні властивості мембран типу  $\text{SiO}_2$ /полі(АН-ко-СПАК-ко-АК-ко-ЕГДМА): при вмісті доданого МАПТМС до 5 мас. % було досягнуто збільшення провідності, однак, подальше збільшення вмісту неорганічного компонента призвело до її зменшення. Очевидно, введення наночастинок модифікатора супроводжується розширенням каналів, та при більшій концентрації наночастинок простір у каналах зменшується. Тестування синтезованих мембран у паливному елементі показали, що протонна провідність мембран є функцією температури і часу експлуатації мембрани. Зі збільшенням температури значення протонної провідності зростає, що зумовлено термоактиваційним характером протонного переносу, однак, із збільшенням часу використання поліелектролітної мембрани величина провідності

зменшується, що пов'язано із втратою мембраною води. Найкращий показник продемонструвала кремнеземно/полімерна мембрана  $\text{SiO}_2$ /полі(АН-ко-АМПС-ко-АК-ко-МБА) –  $4,6 \times 10^{-2}$  См/см, що співмірно із значенням протонної провідності мембрани Нафіон, яка є на даний час мембраною *the state-of-the-art*.

Між іоно-обмінною ємністю та протонною провідністю мембран встановлена пряма кореляція.

Протонна провідність мембран у значній мірі визначається ступенем водопоглинання, що в свою чергу залежить від природи мономерів (найвищі показники для мембран типу полі(АН-ко-АМПС-ко-АК-ко-МБА)), від вмісту фракції кремнезему та зшивального агента.

Визначено термічні та механічні показники мембран, які є параметрами, що суттєво визначають продуктивність роботи мембрани у паливному елементі. Механічні та теплофізичні характеристики мембран задовільні. Термічна деградація мембран проходить у кілька етапів, які визначаються наявністю функціональних груп у кополімері, а також вмістом неорганічного компонента: із введенням золь-гель систем кремневмісних прекурсорів, що формують кремнеземну сітку, пропорційно зростає термостабільність досліджуваних зразків. Початок термічної деградації мембран лежить вище температури, при якій функціонує паливний елемент. Температури склування матеріалів є достатньо високими.

Ущільнення структури матеріалів завдяки впровадженню кремнеземної сітки у полімерну матрицю підвищує також окиснювальну стійкість мембран. Більшу окиснювальну стабільність продемонстрували мембрани, до складу яких входить ароматичний мономер стиренсульфонат натрію.

Важливо відзначити, що значення поглинання метанолу для усіх типів досліджуваних мембран є суттєво нижчими, ніж відповідні значення для мембран типу Нафіон, що визначає можливість їх використання у прямих метанольних паливних елементах.

Досліджено адсорбційну здатність синтезованих полімерних і гібридних неорганічних мембран типу полі(АН-ко-АМПС-ко-АК-ко-МБА) і  $\text{SiO}_2$ /полі(АН-ко-АМПС-ко-АК-ко-МБА) з видалення іонів важких металів

Co(II) і Ni(II), яка складає 87 % для іонів Co(II) і 90 % для іонів Ni(II). Нанопориста структура у кремнеземно/полімерних мембранах сприяє підвищенню ефективності адсорбції. З'ясовано вплив рН розчинів солей металів на величину адсорбції досліджуваними адсорбентами: при підвищенні рН від 2 до 6 здатність адсорбції запропонованими адсорбентами збільшується. Кінетика адсорбції проаналізована в рамках кінетичних моделей Лагергрена псевдо-першого і псевдо-другого порядків. Встановлено, що адсорбція металів краще описується рівнянням Лагергрена псевдо-другого порядку, що свідчить про іоно-обмінний механізм процесу.

Таким чином, полімерні і гібридні кремнеземно/полімерні мембрани запропонованого складу перспективні як протонопровідні мембрани паливних елементів, а також як адсорбенти іонів важких металів з водних розчинів.

*Ключові слова:* полімерні мембрани, гібридні кремнеземно/полімерні мембрани, протонна провідність, адсорбційна здатність, паливний елемент, золь-гель процес, прекурсор, УФ-ініційована полімеризація

## ABSTRACT

*Zhyhailo M.M.* Polymer and hybrid inorganic/organic membranes with proton conductive and ion-exchange properties – Qualification scientific work as the manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy Degree in specialty 102. Chemistry. 10. Natural Sciences – Department of Physical Chemistry of Fossil Fuels of L.M. Lytvynenko Institute of Physico-organic Chemistry and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 2022.

The dissertation is devoted to the development of the new types of functional polymer and hybrid inorganic/organic materials by UV-initiated polymerization method, which is promising due to high productivity and environmental friendliness. To ensure the proton conductivity function of the material, monomers containing proton-donor sulfo and carboxyl groups are introduced into the polymerization mixture. The cross-linked structure of the copolymers is provided by a cross-linking agent. The morphological organization of the membranes includes proton transport channels, formed through phase separation between hydrophobic polymer chain and hydrophilic sulfo groups.

For the synthesis of hybrid inorganic/organic membranes an approach involving the chemical bonding of inorganic and organic components in nanocomposite has been realized. For this purpose, a sol-gel precursor 3-methacryloxypropyl trimethoxysilane was used. This precursor includes an acrylate fragment embedded into the polymer chain at copolymerization with other monomers, and methoxysilyl groups, which form a silica network in the process of sol-gel transformation, additionally “sewing” nanocomposite. A sol-gel precursor tetraethoxysilane, which is also used in the synthesis, co-condenses with MAPTMS. Sol-gel condensation reactions of hydrolyzed precursors take place during *in situ* polymerization of monomers. Thus, an inorganic/organic spatially cross-linked structure of the hybrid material with an extensive network of proton-conducting channels is formed.

Using the described strategy, several types of membranes based on acrylic and vinyl monomers were synthesized: poly(acrylonitrile-*co*-2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid-*co*-acrylic acid-*co*-methylenebisacrylamide), poly(acrylonitrile-*co*-sodium styrene sulfonate-*co*-acrylic acid-*co*-ethylene glycol dimethacrylate), poly(acrylonitrile-*co*-3-sulfopropyl acrylate potassium salt-*co*-ethylene glycol dimethacrylate-*co*-acrylic acid), as well as hybrid silica/polymer membranes with polymer matrices with additional component – MAPTMS, and inorganic component – silica network formed by precursors of the sol-gel process. The success of the performed syntheses was confirmed by IR spectroscopic studies, EDR analysis, determination of the gel fraction of polymers. SEM images of membrane samples allowed to establish their morphology.

The proton conductivities of all types of synthesized membranes are high. The values of proton conductivity depend on the composition of the polymer matrix and increase in a row: poly(AN-*co*-AMPS-*co*-AA-*co*-MBA) > poly(AN-*co*-SPAK-*co*-AA-*co*-EGDMA) > poly(AN-*co*-SSS-*co*-AK-*co*-EGDMA). The dependence of the membrane proton conductivity on the ratio of AMPS/AA in the polymer matrix (increases with increasing AMPS/AA), on the ratio of sol-gel precursors was established.

An interesting pattern was found in the study of the effect of the inorganic component on the proton properties of the hybrid membranes poly(AN-*co*-SPAK-*co*-AA-*co*-EGDMA): when the content of added MAPTMS was up to 5 wt. % an increase in conductivity was achieved, however, a further increase in the inorganic component content led to a decrease of conductivity. Obviously, the introduction of nanoparticles of modifier is accompanied by the expansion of the channels, and with a higher concentration of nanoparticles, the space in the channels decreases. Tests of the synthesized membranes in fuel cell have shown that the membrane proton conductivity is a function of the temperature and the operating time. With increasing the temperature the value of proton conductivity enhances evidencing the thermoactive nature of proton transfer. However, with increasing time of the use of the polyelectrolyte membrane, the value of conductivity decreases due to the loss of water by membrane. The best characteristic was demonstrated by silica/polymer

membrane  $\text{SiO}_2/\text{poly}(\text{AN-}co\text{-AMPS-}co\text{-AA-}co\text{-MBA}) - 4.6 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ , which is commensurate with the value of the proton conductivity of Nafion, which is considered currently as *the state-of-the-art* membrane.

There is a direct correlation between the ion-exchange capacity and the proton conductivity of the membranes.

The proton conductivity of membranes is largely determined by the degree of water absorption, which, in turn, depends on the nature of the monomers (the highest for the membranes  $\text{poly}(\text{AN-}co\text{-AMPS-}co\text{-AA-}co\text{-MBA})$ ), the content of silica fraction and cross-linking agent.

Thermal and mechanical parameters of the obtained membranes were investigated. These parameters are essential ones as they determine the performance of the membrane in fuel cells. Mechanical and thermophysical characteristics of the membranes are satisfactory. Thermal degradation of membranes takes place in several stages, determined by the presence of functional groups in the copolymer, as well as the inorganic component content: the introduction of sol-gel systems of silicon-containing precursors forming silica network causes proportional increasing of thermal stability of the material. The beginning of thermal degradation of membranes takes place above the operating temperature of the fuel cell. The glass transition temperatures of the materials are quite high.

Compaction of the material structure due to the introduction of silica network into polymer matrix also increases the oxidative resistance of the membranes. The membranes containing the aromatic monomer – sodium styrene sulfonate – demonstrated greater oxidative stability.

It is important to note that the methanol adsorption values for all types of membranes under study are significantly lower than the corresponding values for Nafion type membranes, which determines the possibility of their use in direct methanol fuel cells (DMFC).

The adsorption capacity of synthesized polymeric and hybrid inorganic/organic membranes such as  $\text{poly}(\text{AN-}co\text{-AMPS-}co\text{-AA-}co\text{-MBA})$  and  $\text{SiO}_2/\text{poly}(\text{AN-}co\text{-AMPS-}co\text{-AA-}co\text{-MBA})$  for removal of ions of heavy metals  $\text{Co(II)}$  and  $\text{Ni(II)}$  was studied. The adsorption achieved 87% for  $\text{Co(II)}$  ions and 90% for  $\text{Ni(II)}$  ions.

Nanoporous structure in silica/polymer membranes increases the efficiency of adsorption. The effect of pH of metal salt solutions on the adsorption value by the studied adsorbents was found out: when the pH increases from 2 to 6, the adsorption capacity of the proposed adsorbents increases. Adsorption kinetics was analyzed in the framework of the Lagergren kinetic models of pseudo-first and pseudo-second orders. It was found that the adsorption of metals is better described by the Lagergren pseudo-second order equation, which indicates the ion-exchange mechanism of the process.

Thus, polymer and hybrid silica/polymer membranes of the proposed composition are promising as the proton-conducting membranes of fuel cells, as well as the adsorbents of heavy metal ions from aqueous solutions.

*Keywords:* polymer membranes, hybrid silica/polymer membranes, proton conductivity, adsorption capacity, fuel cell, sol-gel process, precursor, UV-initiated polymerization



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях України та іноземних держав, що індексовані в міжнародних наукометричних базах даних (Scopus та/або Web of Science)

1. **Zhyhailo M.M.** Proton conductive organic-inorganic nanocomposite membranes derived by sol-gel method / **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Rymsha Kh.V., Yevchuk I.Yu., Rachiy B.I. // Chemistry & Chemical Technology. – 2019. – V. 13, № 4. – P. 436-443. DOI: 10.23939/chcht13.04.436. **Квартиль – Q3.** *(Особистий внесок: аналіз статей за темою дослідження, участь у формулюванні мети та завдань роботи, проведення основної частини експериментів, оброблення результатів, підготовка матеріалів до публікації).*
2. Demchyna O.I. UV-curable hybrid organic-inorganic membranes for the use as PEM in fuel cell / Demchyna O.I., Rymsha Kh.V., **Zhyhailo M.M.**, Yevchuk I.Yu., Kochubei V.V. // French-Ukrainian Journal of Chemistry. – 2019. – V. 7, № 1. – P. 81-89. DOI: 10.17721/fujcV7I1P81-89. *(Особистий внесок: проведення синтезу мембран, дослідження їхніх характеристик, участь у дискусії за результатами роботи та у написанні статті).*
3. **Zhyhailo M.M.** Preparation and characterization of UV-curable cross-linked organic-inorganic membranes / **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Yevchuk I.Yu., Rachiy B.I., Kochubei V.V. // Питання хімії та хімічної технології. – 2019. – Т. 5. – С. 34-41. DOI: 10.32434/0321-4095-2019-126-5-34-41. **Квартиль – Q3.** *(Особистий внесок: опрацювання публікацій за темою досліджень, постановка завдання роботи, проведення експериментальних робіт, участь в обговоренні результатів та у написанні статті).*
4. **Zhyhailo M.** Preparation of polyacrylate/silica membranes for fuel cell application by in situ UV polymerization / **Zhyhailo M.**, Yevchuk I., Yatsyshyn M., Korniy S., Demchyna O., Musiy R., Raudonis R., Zarkov A., Kareiva A. // Chemija. – 2020. – V. 31, № 4. – P. 247-254. DOI: 10.6001/chemija.v31i4.4321. **Квартиль – Q4.** *(Особистий внесок: написання літературного огляду, приготування зразків та виконання частини досліджень, аналіз та порівняння результатів, участь у написанні статті).*

5. **Zhyhailo M.** Proton conductive membranes from covalently cross-linked poly(acrylate)/silica interpenetrating networks / **Zhyhailo M.**, Horechyy A., Meier-Haack J., Formanek P., Malanin M., Arnhold K., Schneider K., Scheibner H., Yevchuk I., Fery A. // *Macromolecular Materials and Engineering*. – 2021. – V. 306, № 4. – P. 1-11. DOI: 10.1002/mame.202000776. **Квартиль – Q1.** *(Особистий внесок: підбір літератури для постановки завдання роботи, проведення частини експериментальних досліджень, обробка і оформлення результатів, участь в обговоренні і написанні статті).*
6. **Zhyhailo M.** UV-curable proton conductive organic-inorganic membranes based on acrylic monomers and sol-gel derived silica / **Zhyhailo M.**, Yevchuk I. // *Journal of Chemistry and Technologies*. – 2021. – V. 29, № 1. – P. 117-127. DOI: 10.15421/08212901. **Квартиль – Q4.** *(Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення результатів, участь в обговоренні одержаних результатів і у формулюванні висновків, підготовка матеріалів до публікації).*
7. **Zhyhailo M.M.** Cross-linked composite proton conductive membranes / **Zhyhailo M.M.**, Yevchuk I.Y., Demchyna O.I., Kochubei V.V., Makota O.I. // *Physics and Chemistry of Solid State*. – 2021. – V. 22, № 4. – P. 775-780. DOI: 10.15330/pcss.22.4.775-780. **Квартиль – Q4.** *(Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, аналіз та оброблення даних, участь у написанні та оформленні статті).*
8. Grigoraviciute-Puroniene I. Proton-Conducting Organic-Inorganic Sulfo-Containing Membranes for Fuel Cells / Grigoraviciute-Puroniene I., Yevchuk I., Demchyna O., **Zhyhailo M.**, Rymsha Kh., Babkina N., Shantaliy T., Rachiy B., Kareiva A., Stankeviciute Z., Skaudzius R., Zarkov A., Musiy R. // *Materials Science (Medžiagotyra)*. – 2022. – V. 28, №1. P. 1392-1320. DOI: 10.5755/j02.ms.28440. **Квартиль – Q4.** *(Особистий внесок: синтез мембран, підготовка зразків для дослідження, участь у дискусії за результатами проведеної роботи та у написанні статті).*

9. **Zhyhailo M.M.** Investigation of viscosity of sol-gel systems based on 3-methacryloxypropyl-trimethoxysilane and tetraethoxysilane / **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Demydova Kh.V., Yevchuk I.Yu. // Вісник НУ “Львівська політехніка”, Сер. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2018. – № 886. – С. 58-66. *(Особистий внесок: приготування золь-гель систем, вимірювання в'язкості, участь в обговоренні результатів, приготування статті до друку).*

10. Римша Х. Органо-неорганічні сульфовмісні мембрани для паливних елементів / Римша Х., **Жигайло М.**, Демчина О., Євчук І // Праці наукового товариства ім. Шевченка, Сер. Хімічні науки. – 2018. – Т. LIII. – С. 71-83. *(Особистий внесок: пошук та аналіз літературних даних, участь у постановці завдання дослідження, виконання частини експериментів, обговорення результатів).*

11. Rymsha Kh.V. Proton conductive polymer and hybrid polymer-inorganic membranes / Rymsha Kh.V., **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Yevchuk I.Yu. // Хімія, фізика та технологія поверхні. – 2019. – Т. 10, №1. – С. 38-47. *(Особистий внесок: проведення частини досліджень, аналіз одержаних результатів, участь у написанні статті).*

Патенти на корисну модель:

12. **Жигайло М.М.**, Євчук І.Ю., Демчина О.І., Іващишин Ф.О. Спосіб синтезу сульфовмісного полімерного матеріалу з іонною провідністю. Патент України на корисну модель № 150344, заявл. 6. 09. 2021, опубл. 02. 02. 2022, Бюл. № 5. *(Особистий внесок: проведення частини експериментальних досліджень, участь в інтерпретації результатів та написанні патенту).*

Публікації у збірниках матеріалів та тез доповідей міжнародних і вітчизняних наукових конференцій:

13. Demydova Kh.V., **Zhyhailo M.M.**, Yevchuk I.Yu., Demchyna O.I., Koval Z.M. Investigation of proton conductivity of the hybrid organanic-inorganic membranes synthesized via photoinitiated polymerization and *in situ* sol-gel process // Abstract Book. International Research and Practice Conference “Nanotechnology and Nanomaterials” (NANO-2017). Chernivtsi, 23-26. 08. 2017, P. 171.

14. **Zhyhailo M.**, Demchyna O., Demydova Kh., Yevchuk I. Rheological investigation of sol-gel systems based on 3-methacryloxypropyl trimethoxysilane // 7th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”. Lviv, 23-25. 11. 2017, P. 79-80.
15. Rymsha Kh.V., **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Yevchuk I.Yu. Sol-gel synthesis and characterization of proton conductive membranes // Збірник тез доповідей. I Міжнародна (XI Українська) наукова конференція студентів, аспірантів і молодих учених “Хімічні проблеми сьогодення”. Вінниця, 27-29. 03. 2018, С. 331.
16. **Zhyhailo M.**, Demchyna O., Rymsha Kh., Yevchuk I. The development of proton conductive hybrid organic-inorganic membranes // Proceedings of IX International Scientific-Technical Conference “Advance in Petroleum and Gas Industry and Petrochemistry” (APGIP-9). Lviv, 14-18. 05. 2018, P. 382-385.
17. **Zhyhailo M.M.**, Rymsha Kh.V., Demchyna O.I., Yevchuk I.Yu. Organic-inorganic nanocomposites based on acrylates and 3-methacryloxypropyl trimethoxysilane // Ukrainian Conference with International participation “Chemistry, Physics and Technology of Surface”. Kyiv, 23-24. 05. 2018, P. 180.
18. **Zhyhailo M.M.**, Rymsha Kh.V., Demchyna O.I., Yevchuk I.Yu., Rachiy B.I. Organic-inorganic proton conductive nanocomposites // Abstract Book. International Research and Practice Conference “Nanotechnology and Nanomaterials” (NANO-2018). Kyiv, 27-30. 08. 2018, P. 248.
19. Yevchuk I.Yu., Rymsha Kh.V., **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I. Proton Conductive Polymer and Organic-inorganic Membranes // Abstract Book. East-West Chemistry Conference. Lviv, 10-12. 10. 2018, P. 70, S-039.
20. **Zhyhailo M.**, Demchyna O., Rymsha Kh., Yevchuk I., Kochubey V. Preparation and characterization of UV-curable crosslinked organic-inorganic membranes // 8th International Joint Youth Science Forum “Litteris et Artibus” & 13<sup>th</sup> International Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology”. Lviv, 22-24. 11. 2018, P. 166-169.
21. **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Kochubey V.V., Yevchuk I.Yu., Rymsha Kh.V. Preparation and characterization of UV-curable organic-inorganic membranes for

- fuel cells // II International (XII Ukrainian) Scientific Conference for Students and Young Scientists "Current Chemical Problems". Vinnytsia, 25-27. 03. 2019, P. 192.
22. **Жигайло М.М.**, Демчина О.І., Євчук І.Ю. Хімічна стійкість поліакрилат-кремнеземних протонопровідних мембран // III Всеукраїнська наукова конференція "Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи". Житомир, 17.04. 2019, С. 128-129.
23. **Жигайло М.М.** Синтез і властивості поліакрилат-кремнеземних протонопровідних мембран // Школа-конференція молодих вчених "Сучасне матеріалознавство: фізика, хімія, технології" (СМФХТ – 2019). Ужгород, 27-31. 05. 2019, С. 154.
24. **Zhyhailo M.M.**, Rymsha Kh.V., Yevchuk I.Yu., Demchyna O.I., Kochubei V.V. UVcurable cross-linked polymer and polymer-inorganic materials for fuel cell application // Збірник тез доповідей. 2-га Міжнародна науково-практична конференція "Хімічна технологія та інженерія – 2". Львів, 24-28. 06. 2019, С. 74-75.
25. **Zhyhailo M.M.**, Kochubei V.V., Yevchuk I.Yu., Demchyna O.I., Rymsha Kh.V. Synthesis of polyacrylate-silica membranes for fuel cells // Збірник тез доповідей. II Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні технології одержання та переробки полімерних матеріалів". Львів, 06-08. 11. 2019, С. 53.
26. **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Yevchuk I.Yu., Rymsha Kh.V., Zhuravetska I.M. Poly(acrylate)/silica membranes for fuel cells // Збірник тез доповідей. III Міжнародна (XIII Українська) наукова конференція студентів, аспірантів і молодих учених "Хімічні проблеми сьогодення" (ХПС-2020). Вінниця, 25-27. 03. 2020, С. 166.
27. **Жигайло М.М.** Polymer membrane with different of cross-linker for fuel cells // IV Всеукраїнська наукова конференція "Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи". Житомир, 29. 04. 2020, С. 71-72.
28. **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Yevchuk I.Yu., Kochubei V.V. Proton conductive organic-inorganic cross-linked membranes for fuel cell application // X Міжнародна науково-технічна конференція "Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості" (APGIP-10). Львів, 18-23. 05. 2020, С. 296-298.

29. Demchyna O.I., Babkina N.V., Shantaliy T.A., Yevchuk I.Yu., **Zhyhailo M.M.**, Rymsha Kh.V. Viscoelastic properties of proton conductive organic-inorganic membranes for fuel cells / Ukrainian Conference with International participation “Chemistry, Physics and Technology of Surface”. Kyiv, 21-22. 10. 2020, P. 51.
30. **Жигайло М.М.**, Демчина О.І., Євчук І.Ю. Вплив компонентів полімерної матриці на характеристики гібридних протон провідних мембран // Збірник тез доповідей. IV Міжнародна (XIV Українська) наукова конференція студентів, аспірантів і молодих учених “Хімічні проблеми сьогодення”. Вінниця, 23-25. 03. 2021, С. 175.
31. **Zhyhailo M.M.**, Yevchuk I.Yu. Investigation of proton conductivity of the organic-inorganic membranes for fuel cells // XXII Міжнародна науково-практична онлайн-конференція “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”. Київ, 20-21. 05. 2021, С. 600-602.
32. **Жигайло М.М.**, Демчина О.І., Євчук І.Ю. Поліакрилатні мембрани для електрохімічного використання // XXII Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Сучасні проблеми хімії”. Київ, 19-21. 05. 2021, С. 204.
33. **Zhyhailo M.M.**, Yevchuk I.Yu., Rymsha Kh.V., Demchyna O.I. Novel proton conductive polymer/inorganic membranes for fuel cell application // XVIII Міжнародна Фреїківська конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем. Івано-Франківськ, 11-16. 10. 2021, С. 186.
34. **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Yevchuk I.Yu., Malynych Ya.S. Sulfocontaining polymer membranes for Co(II) and Ni(II) removal // International Scientific Online Conference “Modern Advances in Organic Synthesis, Polymer Chemistry and Food Additives” in honor of Prof. Stanislav Voronov, dedicated to the 80th anniversary of birth. Lviv, 07. 12. 2021, P. 76.
35. **Zhyhailo M.M.**, Demchyna O.I., Yevchuk I.Yu. Removal of Ni(II) and Co(II) from aqueous solutions using crosslinked membranes // V Міжнародна (XV Українська) наукова конференція студентів, аспірантів і молодих учених “Хімічні проблеми сьогодення” (ХПС-2022). Вінниця, 22-24. 03. 2022, С. 151.