

ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ
PHYSICAL CHEMISTRYУДК: 541.183.12+631.589
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-3-183-191>Поступила в редакцию 17.10.2023
Received 17.10.2023**П. В. Нестеронок, Л. Н. Шаченкова, Н. В. Вонсович, В. С. Солдатов,
Е. Г. Косандрович, А. П. Езубец***Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ВОЛОКНИСТЫЙ АНИОНИТ С ТРЕТИЧНЫМИ АМИНОГРУППАМИ
КАК КОМПОНЕНТ СУБСТРАТА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ**

Аннотация. Выполнен необходимый комплекс исследований волокнистого анионита с третичными аминогруппами на основе промышленного полиакрилонитрильного волокна Нитрон С для определения его пригодности к использованию в качестве компонента ионитных почв. Образец ионита лабораторного приготовления имел рабочую обменную емкость 0,9 мэкв/г по лимитирующему биологическую продуктивность субстрата для выращивания растений аниону нитрата в физиологическом интервале pH = 5,5–7,5 и концентрации равновесного питательного раствора 0,02 экв/л. Это находится на уровне лучших гранульных ионитов и превосходит емкость использовавшихся ранее волокнистых ионитов для выращивания растений в невесомости на космических станциях в 1970–1994 гг. («Мир», «Союз» ТМ-10 – ТМ-17). Полученный ионит является полиамфолитом и содержит три типа ионообменных групп, обладает высокой гидрофильностью и механическими свойствами, позволяющими перерабатывать его в текстильные изделия и применять по любым назначениям, в которых могут быть использованы волокнистые иониты (очистка воздуха и воды, индивидуальные средства защиты органов дыхания и т. п.).

Ключевые слова: волокнистый анионит, гранульный катионит, обменная емкость, потенциметрическое титрование, питательный раствор, ионитный субстрат

Для цитирования. Волокнистый анионит с третичными аминогруппами как компонент субстрата для выращивания растений / П. В. Нестеронок [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2024. – Т. 60, № 3. – С. 183–191. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-3-183-191>

P. V. Nesteronok, L. N. Shachenkova, N. V. Vansovich, V. S. Soldatov, E. G. Kosandrovich, A. P. Ezubets*Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***FIBROUS ANION EXCHANGER WITH TERNARY AMINO GROUPS AS A COMPONENT
OF THE SUBSTRATE FOR PLANTS GROWING**

Abstract. A set of studies necessary to determine the suitability of a fibrous anion exchanger with ternary amino groups based on industrial polyacrylonitrile fiber Nitron C as a component of ion substrates was carried out. A laboratory-prepared ion exchanger sample had a working exchange capacity equal to 0.9 meq/g for the nitrate anion, which limits the biological productivity of the substrate for growing plants, in the physiological pH range = 5.5–7.5 and the concentration of the equilibrium nutrient solution is 0.02 eq/l. This capacity is at the level of the best granular ion exchangers and significantly exceeds the capacity of the previously used fibrous ion exchangers for growing plants in zero gravity conditions on space stations in 1970–1994 (Mir, Soyuz TM-10 – TM-17). The synthesized ion exchanger is a polyampholyte and contains three types of ion exchange groups, has high hydrophilicity and mechanical properties that allow it to be processed into textiles and used for any purpose, in which fibrous ion exchangers can be used (air and water purification, human protection means, etc.).

Keywords: fibrous anion exchanger, granular cation exchanger, exchange capacity, potentiometric titration, nutrient solution, ion exchanger substrate

For citation. Nesteronok P. V., Shachenkova L. N., Vansovich N. V., Soldatov V. S., Kosandrovich E. G., Ezubets A. P. Fibrous anion exchanger with ternary amino groups as a component of the substrate for plants growing. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2024, vol. 60, no. 3, pp. 183–191 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-3-183-191>

Введение. Волокнистые ионитные субстраты были разработаны для выращивания растений в космосе в условиях невесомости [1]. Они использовались для длительного выращивания различных видов растений в культивационных модулях «Оазис-1» и «Оазис-2» и бытовых отсеках космических станций «Салют». Субстраты показали свою эффективность и надежность работы при различных экстремальных режимах [2]. Решающее значение при их выборе для применения в космосе имело сочетание их следующих свойств:

отсутствие необходимости использования питательных растворов или других форм удобрений (требовался только полив водой на протяжении всего цикла выращивания растений);

высокая гидрофильность и водоудерживающая способность, обеспечивающая отсутствие выделения капель воды в окружающее пространство;

отсутствие фрагментации в невесомости, при смене ориентации и сильных вибрациях с выделением в окружающее пространство частиц.

В последнее время возможность применения волокнистых ионитных почв интенсивно исследуется в Институте медико-биологических проблем РАН [3–6].

В связи с тем что цель этих экспериментов была достигнута – было доказано, что растения могут успешно расти в условиях невесомости, а также по ряду других причин, в конце 1980-х гг. интенсивность исследований была снижена до минимума, позволяющего не утратить накопленный в этой области опыт.

В настоящее время интерес к космическому растениеводству снова возрос в связи с планированием новых космических программ, включающих длительную работу людей на орбитальных станциях. В рамках программы «Конвергенция–2025» Национальной академии наук Беларуси выполняется раздел, предусматривающий разработку современного волокнистого субстрата для проведения в земных условиях экспериментов по выращиванию растений в условиях переменной ориентации относительно направления силы тяжести.

Применявшиеся в упомянутых выше экспериментах ионитные субстраты изготавливались из доступных в то время ионитов (не производятся в настоящее время), уступающих по некоторым свойствам современным материалам этого типа и не соответствующих современным стандартам качества [7]. В частности, они не обладали достаточной химической и микробиологической стойкостью, так как имели целлюлозную матрицу или/и недостаточно высокую обменную емкость по некоторым элементам питания растений.

В настоящей статье сообщается о получении и исследовании свойств анионообменного компонента таких субстратов. В качестве носителя основных питательных элементов, содержащихся в анионах нитратов, фосфатов и сульфатов, был выбран ионит с третичными аминогруппами.

Аниониты с этой функциональной группой в последнее время получили широкое применение в ионообменных технологиях и их свойства хорошо изучены. Они имеют высокую химическую и микробиологическую стойкость и применяются в процессах очистки воды, что гарантирует их безопасность при использовании в замкнутых обитаемых системах. Промышленные иониты этого типа выпускаются в виде гранул и имеют стирол-дивинилбензолную матрицу, непригодную для получения волокнистых материалов. В связи с этим в ИФОХ НАН Беларуси были синтезированы аналогичные материалы на основе промышленного полиакрилонитрильного (ПАН) волокна Нитрон [8], которые нашли применение в очистке воздуха от кислотных загрязнений. Материалы этого типа, полученные в лабораторных условиях, были испытаны на предмет применимости в качестве анионообменного компонента волокнистого субстрата для выращивания растений. Исследования включали: определение кислотно-основных свойств оптимального образца ионита и расчет его параметров кислотности; определение количества основных питательных веществ в материале, доступных растениям; получение полноценного анионообменного компонента субстрата и его испытание в биологическом эксперименте в сочетании с известным гранульным катионообменным компонентом на основе сульфостирольного ионита.

Экспериментальная часть. *Синтез волокнистого анионита. Обменная емкость и потенциометрическое титрование.* Анионит (ПАН–ДМАПА) получали путем взаимодействия водного раствора диметиламинопропиламина (ДМАПА) с нитрильными группами ПАН волокна Нитрон С (сополимер 92,5 % акрилонитрила, 6 % метилакрилата и 1,5 % итаконовой кислоты) производства Новополоцкого ПО «Полимир» в присутствии гидросиламина гидрохлорида [9].

Полученные ионитные материалы представляют собой штапельное волокно с эффективным диаметром $40 \pm 3 \mu$ и средней длиной 4–6 см. Они обладают механическими свойствами, допускающими переработку в иглопробивной нетканый материал. Водоудерживающая способность зависит от pH контактируемого с ним раствора. Она минимальна при $\text{pH} = 9$ (1,55 г $\text{H}_2\text{O}/\text{г}$ ионита) и несколько выше (1,7 г $\text{H}_2\text{O}/\text{г}$ ионита) в щелочной и кислой средах.

Для хранения и исследования его свойств ионит переводили в смешанную ионную H/Cl-форму раствором соляной кислоты. Затем промывали дистиллированной водой до значения pH близкой

к 3,5. После воздушной сушки в ионите определяли содержание воды и хлорид ионов. Во всех расчетах, где требовалась масса ионита в Н/ОН-форме, ее принимали равной массе первоначально взятой его Н/СІ-формы, уменьшенной на соответствующее количество воды и хлора в образце.

Методики определения обменной емкости, потенциметрического титрования анионита и интерпретации полученных результатов титрования приведены в работах В. С. Солдатова и П. В. Нестеронка [10, 11].

Потенциметрическое титрование проводили методами одной и многих навесок. Перед титрованием образец измельчали ножницами на короткие фрагменты волокна длиной 3–6 мм. Во всех случаях использовали навеску ионита 0,43 г в пересчете на Н/ОН-форму и раствор (1 М или 0,02 М) фонового электролита КСІ объемом 30 мл. В методе одной навески интервал времени между добавлениями порций титранта составлял от 5 до 90 мин. В методе многих навесок равновесие устанавливалось в течение 8 ч при регулярном интенсивном перемешивании за счет встряхивания пробирок.

Определение анионного состава ионита, равновесного питательному раствору. Для насыщения ионита использовали раствор солей калия (нитрат, сульфат и дигидрофосфат) с общей концентрацией анионов 20 мэкв/л, относительные эквивалентные доли $X_N = 0,80$, $X_S = 0,15$, $X_P = 0,05$; рН = 6,5.

Навеску волокнистого ионита (1 г) в СІ-форме помещали в колонку (диаметр – 10 мм, высота слоя ионита – 40 мм, объем фильтрационного слоя (ОФС) – 3 см³) и непрерывно пропускали раствор насыщения со скоростью ~ 7,0 мл/ч (~ 2,2 ОФС/час).

Регулярно (не чаще 12–24 ч) отмечали общий объем пропущенного раствора и на выходе из колонки отбирали пробы раствора для измерения рН и анионного состава (система капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ-104Т»). После выравнивания показателей (кислотность, анионный состав) исходного и прошедшего через колонку растворов процесс прекращали. Колонку с ионитом помещали в центрифугу на 15 мин при 4 000 об/мин для удаления физического избытка раствора с волокна. Затем проводилось полное вытеснение ионов раствором 0,4 н (NH₄)₂CO₃, объем элюата – 200 мл. Аликвоту элюата досуха выпаривали на водяной бане, разбавляли дистиллированной водой и проводили анализ полученного раствора методом капиллярного электрофореза.

Получение ионитного субстрата. Для проведения биологического тестирования исследуемого анионита был получен полноценный ионитный субстрат, включающий исследуемый волокнистый анионообменный компонент и гранульный катионообменный компонент. В качестве катионита выбран компонент хорошо исследованного субстрата БИОНА-111 – сульфостирольный ионит ТОКЕМ-100 (прежнее название КУ-2). Получение субстрата производили солевым методом [12]. Количество и перечень вводимых микроэлементов (Fe, Na, Mn, Cu, Co, Ni, Zn, B, Mo) соответствовали БИОНА-111.

Биологическое тестирование. Экспериментальная культура для тестирования – салат листовой Афицион (*Lactuca sativa* L.). Посадка пророщенных семян осуществлялась по 1 семени на вазон. В эксперименте использовали пластиковые вазоны высотой 5 см, почвенной площадью 16 см², объем заполнения субстратом – 50 см³. Для полного заполнения вазона использовано 14 г набухшего субстрата (влагосодержание 1,2 г H₂O/г). В качестве контроля использовали субстрат БИОНА-111 (28 г набухшего субстрата, влагосодержание – 0,92 г H₂O/г). Полив осуществлялся водопроводной водой в поддон (рН = 7,6–7,8; ионный состав (мэкв/л): Na⁺ – 0,59; Ca²⁺ – 3,23; Mg²⁺ – 1,33; NO₃⁻ – 0,16; SO₄²⁻ – 0,40; Cl⁻ – 0,80). Эксперимент проводился в соответствии с общепринятыми биологическими методами согласно среднему вегетационному периоду растений салата – 31 сутки.

Результаты и их обсуждение. По химическим свойствам ионит является полиамфолитом с преобладающим содержанием слабоосновных третичных аминогрупп. Анионная емкость в НСІ составляла 4,9 мэкв/г. Так как при аминировании волокна протекают побочные реакции гидролиза нитрильных групп ПАН до карбоксильных, ионит обладает катионной емкостью 1,4 мэкв/г.

Кислотно-основные и сорбционные свойства ионита ПАН–ДМАПА по отношению к ионам хлора и калия отражены на рис. 1 и 2.

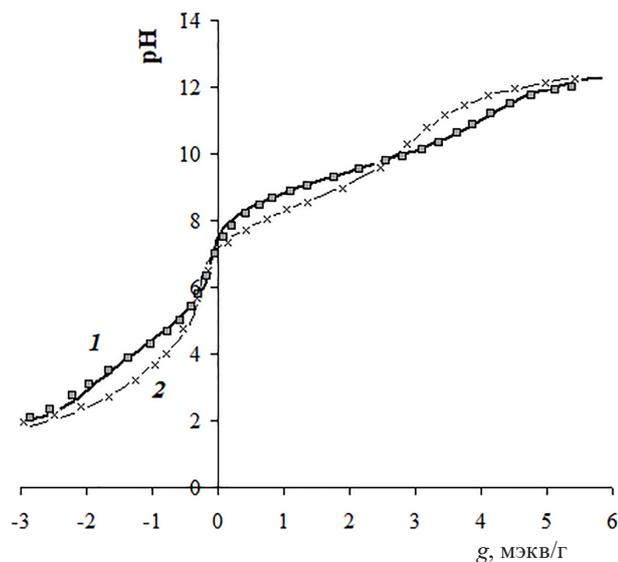


Рис. 1. Кривые потенциметрического титрования волокнистого анионита ПАН–ДМАПА. Концентрация фонового электролита KCl: 1 – 1 М; 2 – 0,02 М. Символы – экспериментальные точки, линии – расчетные кривые с параметрами, указанными в табл. 1

Fig.1. Potentiometric titration curves of fibrous anion exchanger PAN–DMAPA. Concentration of supporting electrolyte KCl: 1 – 1 M; 2 – 0.02 M. Symbols are experimental data, lines are calculated curves with the parameters presented in Table 1

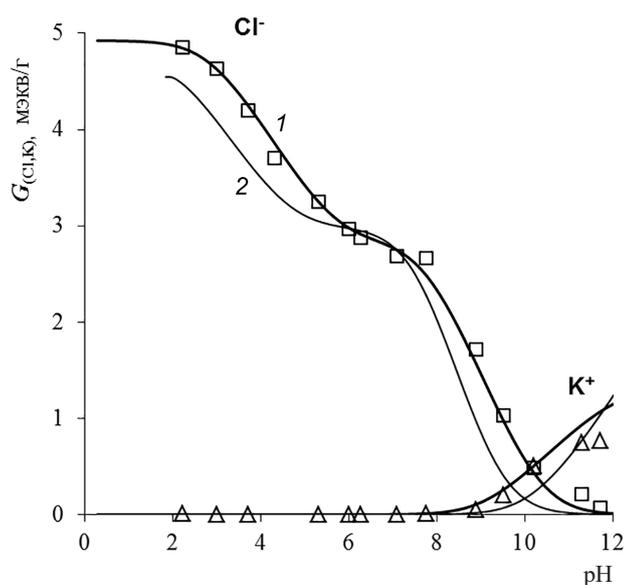


Рис. 2. Зависимость количества поглощенных ионов фонового электролита (G) от pH равновесного раствора. Концентрация фонового электролита: 1 – 1 М; 2 – 0,02 М.

Символы – экспериментальные точки, линии – расчетные кривые с параметрами, указанными в табл. 1

Fig. 2. Dependence of the amount of sorbed ions of the supporting electrolyte (G) on the pH of the equilibrium solution. Supporting electrolyte concentration: 1 – 1 M; 2 – 0.02 M. Symbols are experimental data, lines are calculated curves with the parameters presented in Table 1

При исследовании и применении ионитов их кислотность принято характеризовать кривыми потенциметрического титрования (КПТ) при постоянном концентрационном фоне нейтрального электролита (обычно для анионитов: титрант HCl, фон 1M KCl или NaCl) и константой обобщенного уравнения Гендерсона–Гассельбаха. Эта величина не постоянна в широком интервале pH, требуемом для выращивания растений. Она может служить для ранжирования ионитов по их относительной кислотной силе, но не может использоваться для каких-либо прогностических расчетов [13].

Мы описываем кислотно-основные свойства ионитов через параметры кислотности, которые могут быть найдены из кривых потенциометрического титрования. Связь между этими параметрами передается уравнениями (по числу типов функциональных групп в ионите) [14], такими как:

$$\lg\left(\frac{x}{1-x}\right) + \Delta pK\left(x - \frac{1}{2}\right) - pH + pK_a^o - (1-b)\lg C = 0, \quad (1)$$

где x – текущая относительная эквивалентная доля противоиона титранта в ионите в процессе титрования, C – его концентрация в растворе, b – эмпирическая константа, pK_a^o – константа равновесия обмена противоиона на ион титранта, $k = k(x, C)$ – коэффициент равновесия этого же обмена, константа $\Delta pK = pK_{x=1} - pK_{x=0}$. Три последних константы называются параметрами кислотности ионита. Для их определения необходимо иметь, как минимум, две кривые титрования с существенно различающимися концентрациями постоянного солевого фона C .

Параметры кислотности ионита ПАН–ДМАПА (табл. 1) рассчитаны из экспериментальных кривых титрования исследуемого анионита соляной кислотой в 1 М и 0,02 М КСl и данных по зависимости сорбции ионов калия и хлора от pH равновесного раствора на фоне 1 М КСl, как описано в [11].

Таблица 1. Параметры кислотности ионообменных групп ионита
Table 1. Acidity parameters of ion exchange groups of the ion exchanger

Группа	1	2	3
Тип группы	Анионообменная	Анионообменная	Катионообменная
E , мэкв/г	1,95	2,95	1,40
pK_a^o	4,20	9,30	10,20
ΔpK	1,40	0,70	1,40
b	0,45	0,50	0,20

В полиамфолите выявлено три вида групп, две из которых анионообменные. Принимая во внимание строение аминирующего агента, мы относим более сильную по основности группу (табл. 1, группа 2) с параметрами кислотности $pK_a^o = 9,3$, $\Delta pK = 0,7$ к концевой третичной аминогруппе. Ее обменная емкость составляет 2,95 мэкв/г, на что указывает положение горизонтальной точки перегиба на кривой сорбции ионов хлора ($G_{(Cl)} = f(pH)$) (рис. 2, кривая 1) и соответствующая точка эквивалентности при $pH = 6,0$ на кривых титрования.

Сорбция ионитом ионов калия начинается только с $pH = 8$. Такие очень слабокислотные катионообменные центры с $pK_a^o = 10,2$ соответствуют карбоксильным группам, связанным с аминогруппами $pK_a^o = 4,2$ во внутрисолевыми ассоциаты [15]. В данном ионите свободных карбоксильных групп не наблюдается.

На кривых титрования видны две точки эквивалентности: хорошо разрешенный вертикальный перегиб при $pH = 6$ и менее выраженный при $pH = 10$. Последний более четко просматривается на КПТ с меньшей концентрацией фонового электролита (рис. 1, кривая 2). Такая трансформация формы КПТ вызвана понижением кислотной силы ионогенных групп ионита при уменьшении концентрации фонового электролита. Следовательно, анионообменные группы титруются при более низких pH (левая ветвь КПТ по pH сдвинута вниз), а катионообменные – при более высоких pH (правая ветвь, наоборот, поднята вверх).

Кривые титрования анионита соляной и азотной кислотами почти совпадают, поэтому параметры кислотности Cl^- можно использовать для расчета максимальной рабочей емкости анионита по иону NO_3^- , который является лимитирующим анионным компонентом питания, так как истощение субстрата в первую очередь наблюдается по азоту.

Зная параметры кислотности ионита по иону питательного элемента, можно рассчитать его максимальное количество в единице массы субстрата и сделать заключение о его пригодности в заданных условиях.

Предпосылками для применимости ионита ПАН–ДМАПА для наших целей в качестве компонента ионитного субстрата является тот факт, что третичная аминогруппа обладает высоким сродством к нитрату, который является наиболее потребляемым анионом в процессе питания растения и лимитирует биологическую продуктивность субстрата. Для расчета кривых сорбции с учетом установленных значений параметров кислотности уравнение (1) приобретает вид для первой группы:

$$\lg(x/(1-x)) + 1,4(x-0,5) - \text{pH} + 4,2 - (1-0,45)\lg C = 0, \quad (2)$$

для второй группы:

$$\lg(x/(1-x)) + 0,7(x-0,5) - \text{pH} + 9,3 - (1-0,5)\lg C = 0. \quad (3)$$

Из рассчитанных по параметрам кислотности данных (рис. 2, кривая 2) следует, что сорбция нитрата из 0,02 М раствора при минимальной для физиологического интервала $\text{pH} = 5,5$ составляет 3,3 мэкв/г и 2,4 мэкв/г при максимально допустимой $\text{pH} = 7,5$. Такие значения характерны для лучших гранульных анионитов и намного превосходят показатели ранее использовавшихся волокнистых анионитов. Присутствующие в ионите катионные группы начинают диссоциировать при $\text{pH} > 8$ и не принимают участия в ионообменных процессах в физиологическом интервале pH , но их наличие обеспечивает высокую гидрофильность. Это является необходимым требованием субстрата для выращивания растений.

Из результатов предварительного исследования можно заключить, что ионит ПАН–ДМАПА является перспективным материалом для применения в качестве анионного компонента для волокнистого субстрата. Для окончательного заключения следовало определить его ионный состав в равновесии с раствором, содержащим все три основных питательных аниона – нитрат, сульфат и фосфат в таких же пропорциях, как в одном из питательных растворов.

На рис. 3 представлены выходные кривые насыщения ионита ПАН–ДМАПА. Пунктирные линии на рисунке отражают концентрации анионов в питательном растворе: NO_3^- – 16 мэкв/л; SO_4^{2-} – 3 мэкв/л, H_2PO_4^- – 1 мэкв/л. По выходным кривым видно, что для достижения равновесия ионита с раствором насыщения потребовалось в количестве 320 объемов фильтрационного слоя. Скорость пропускания раствора насыщения через колонку составляла 2,2 объема фильтрационного слоя в час. В результате насыщения суммарная реализованная емкость ионита по биоанионам составила 2,35 мэкв/г. Это значение почти совпадает с прогнозом, полученным из расчетов по параметрам кислотности ионита.

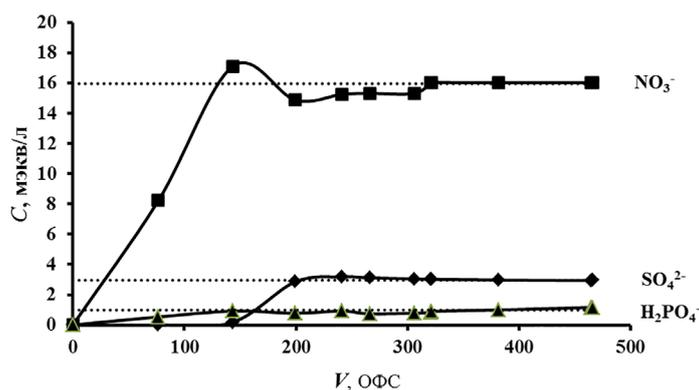


Рис. 3. Зависимость концентрации анионов на выходе из колонки от количества пропущенного раствора насыщения, выраженного в объемах фильтрационного слоя. Пунктирные линии – концентрация анионов в растворе на входе в колонку

Fig. 3. Dependence of the concentration of anions at the outlet of the column on the amount of saturation solution passed through, expressed in the volume of the filtration layer. The dotted lines indicate the inlet concentration of anions in the solution at the entrance to the column

Используя солевой метод [12], был получен комбинированный субстрат, состоящий из волокнистого анионного компонента ПАН–ДМАПА и гранульного катионного компонента – сильно-кислотного сульфостирольного катионита ТОКЕМ-100. Выбор катионита был обусловлен тем,

что он используется в субстрате БИОНА-111, получившим широкое практическое применение [16–19]. Анионный состав нового комбинированного волокнисто-гранульного субстрата и субстрата БИОНА-111 представлены в табл. 2. Оба субстрата имеют сходные относительные эквивалентные доли анионов, но в комбинированном субстрате суммарная реализованная емкость по биоанионам на 25 % ниже, чем в БИОНА-111.

Таблица 2. Анионный состав субстратов: волокнисто-гранульного ПАН–ДМАПА и гранульного БИОНА-111, выраженный в относительных эквивалентных долях

Table 2. Anionic composition of the substrates: fibrous-granular with PAN–DMAPA and granular BIONA-111, expressed in relative equivalent fractions

Субстрат	Относительная эквивалентная доля аниона		
	$\text{H}_2\text{PO}_4^- / \text{HPO}_4^{2-}$ *	SO_4^{2-}	NO_3^-
Волокнисто-гранульный ПАН–ДМАПА	0,07	0,66	0,27
Гранульный БИОНА-111	0,09	0,44	0,47

*рассчитана как доля H_2PO_4^-

Принципиальная пригодность комбинированного субстрата для выращивания растений была протестирована в биологическом эксперименте по выращиванию салата листового Афицион (*Lactuca sativa* L.). На экспериментальном субстрате все фазы развития тест-растения проходили нормально. Полученная биомасса по физиологическим и химическим показателям соответствовала биологическим нормам и была выше, чем на контрольном субстрате БИОНА-111.

Заключение. Выполненные исследования показали, что полиамфолит, получаемый модификацией ПАН-волокна ДМАПА, соответствует требованиям, необходимым для получения волокнистого субстрата непрерывного строения для выращивания растений в условиях переменной гравитации или невесомости. Он обладает достаточно высокой удерживающей способностью по основным питательным элементам растений в физиологическом интервале рН и высокой водоудерживающей способностью. Предварительный биологический эксперимент по выращиванию тест-растения салата листового Афицион (*Lactuca sativa* L.) показал, что субстрат, полученный его композицией со стандартным сульфостирольным катионитом, имеет сходные с производящимся гранульным субстратом БИОНА-111 показатели продуктивности.

Список использованных источников

1. Искусственные субстраты для растений на основе волокнистых ионообменных материалов / В. С. Солдатов [и др.] // Изв. Акад. наук Беларус. ССР. Сер. хим. наук. – 1985. – № 6. – С. 85–90.
2. Nechitailo, G. S. Space biology: studies at orbital stations / G. S. Nechitailo, A. L. Mashinsky. – М.: Mir Publ., 1993. – 504 p.
3. Кривобок, А. С. Методы биолого-технической деструкции корневых остатков применительно к космической витаминной оранжерее с ионитным почвозаменителем / А. С. Кривобок, Ю. А. Беркович, Н. М. Кривобок // Авиакосм. и экол. медицина. – 2012. – Т. 46, № 4. – С. 48–52.
4. Developing a technique to enhance durability of fibrous ion-exchange resin substrate for space greenhouses / A. S. Krivobok [et al.] // Life Sci. Space Res. – 2018. – Vol. 16. – P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.10.001>
5. A high-performance ground-based prototype of horn-type sequential vegetable production facility for life support system in space / Y. Fu [et al.] // Adv. Space Res. – 2013. – Vol. 52, iss. 1. – P. 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.03.020>
6. Перспективы применения космических оранжерей в комплексе систем жизнеобеспечения космонавтов в условиях лунной орбитальной станции, лунной базы и межпланетных транспортных кораблей / Ю. А. Беркович [и др.] // Косм. техника и технологии. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 37–54.
7. Характеристики некоторых искусственных заменителей почвы для космических оранжерей типа «Свет» / Ю. А. Беркович [и др.] // Авиакосм. и экол. медицина. – 1997. – Т. 31, № 6. – С. 51–55.
8. Шункевич, А. А. Синтез, структура и свойства волокнистых ионитов ФИБАН / А. А. Шункевич // Химия и технология новых веществ и материалов: сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т физико-орг. химии; под ред. А. В. Бильдюкевича. – Минск, 2005. – С. 158–188.
9. Получение новых ионитов на основе полиакрилонитрильного волокна Нитрон С / Е. Г. Косандрович [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хіміч. навук. – 2019. – Т. 55, № 1. – С. 7–17. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-1-7-17>

10. Soldatov, V. S. Potentiometric titration of ion exchangers / V. S. Soldatov // *React. and Funct. Polym.* – 1998. – Vol. 38, № 2–3. – P. 73–112. [https://doi.org/10.1016/s1381-5148\(98\)00018-2](https://doi.org/10.1016/s1381-5148(98)00018-2).
11. Нестеренок, П. В. Метод определения параметров кислотности полиамфолитов / П. В. Нестеренок, В. С. Солдатов // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук.* – 2013. – № 2. – С. 31–36.
12. Солдатов, В. С. Ионитные почвы / В. С. Солдатов, Н. Г. Перышкина, Р. П. Хорошко. – Минск: Наука и техника, 1978. – 270 с.
13. Солдатов, В. С. Физический смысл параметров обобщенного уравнения Гендерсона–Гассельбаха / В. С. Солдатов // *ДАН.* – 1994. – Т. 336, № 6. – С. 782–785.
14. Soldatov, V. S. Acid-base properties of ion exchangers. II. Determination of the acidity parameters of ion exchangers with arbitrary functionality / V. S. Soldatov, Z. I. Sosinovich, T. V. Mironova // *React. Funct. Polym.* – 2004. – Vol. 58, № 1. – P. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2003.11.004>
15. Нестеренок, П. В. Протолитические свойства аминокарбоксильных полиамфолитов на основе модакриловой полимерной матрицы / П. В. Нестеренок, В. С. Солдатов // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук.* – 2014. – № 4. – С. 72–79.
16. Красинская, Т. А. Адаптационный процесс растений-регенерантов, выращенных в культуре *in vitro*, в условиях *ex vitro* и способы его улучшения / Т. А. Красинская, Н. В. Кухарчик, М. С. Кастрицкая // *Плодоводство.* – 2010. – Т. 22 – С. 309–320.
17. Рундя, А. П. Влияние субстрата на адаптацию сортов вишни *ex vitro* / А. П. Рундя, Т. Н. Виск, Н. В. Кухарчик // *Плодоводство.* – 2018. – Т. 30. – С. 99–103.
18. Рундя, А. П. Особенности использования субстратов с добавлением AQUASORB 3005 KB при адаптации растений в условиях *ex vitro* / А. П. Рундя // *Плодоводство.* – 2015. – Т. 27 – С. 165–172.
19. Бободжанова, Х. И. Оценка эффективности ризогенеза *in vitro* и адаптации *ex vitro* сортов винограда таджикской селекции / Х. И. Бободжанова, Н. В. Кухарчик // *Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад.* – 2022. – № 2. – С. 105–111.

References

1. Soldatov V. S., Peryshkina N. G., Lukashevich L. I., Khoroshko R. P. Artificial substrates for plants based on fibrous ion exchanging materials. *Izvestiya Akademii nauk Belorusskoi SSR. Seriya khimicheskikh nauk = Proceedings of the Academy of Sciences of the Belarusian SSR. Chemistry series*, 1985, no. 6, pp. 85–90 (in Russian).
2. Nechitailo G. S., Mashinsky A. L. *Space biology. Studies at Orbital Stations*. Moscow, Mir Publ., 1993, 504 p.
3. Krivobok A. S., Berkovich Yu. A., Krivobok N. M. Methods of bio-engineering destruction of root residues in application to a space vitamin greenhouse with ionite artificial soil. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina = Aerospace and Environmental Medicine*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 48–52 (in Russian).
4. Krivobok A. S., Bercovich Yu. A., Shcherbacova V. A., Chuvilskaya N. A. Developing a technique to enhance durability of fibrous ion-exchange resin substrate for space greenhouses. *Life Sciences in Space Research*, 2018, vol. 16, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.10.001>
5. Fu Yuming, Liu Hui, Shao Lingzhi, Wang Minjuan, Berkovich Yu. A., Erokhin A. N., Liu Hong. A high-performance ground-based prototype of horn-type sequential vegetable production facility for life support system in space. *Advances in Space Research*, 2013, vol. 52, iss. 1, pp. 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.03.020>
6. Berkovich Yu. A., Smolyanina S. O., Zheleznyakov A. G., Guzenberg A. S. Prospects for using space greenhouses as a part of a suite of crew life support systems of a lunar orbital station, a lunar base and interplanetary transfer vehicles. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii = Space technique and technologie*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 37–54 (in Russian).
7. Berkovich Yu. A., Krivobok S. M., Krivobok N. M., Sinyak Yu. E., Zakharov S. B., Matusevich V. V. On the characteristics of some artificial soil substitutes for space greenhouses. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina = Aerospace and Environmental Medicine*, 1997, vol. 31, no. 6, pp. 51–55 (in Russian).
8. Shunkevich, A. A. Synthesis, structure and properties of fibrous ion exchangers FIBAN. *Khimiya i tekhnologiya novykh veshchestv i materialov: sb. nauch. tr.* [Chemistry and technology of new substances and materials. Collection of scientific papers]. Minsk, Tehnoprnt Publ., 2005, pp. 158–188 (in Russian).
9. Kosandrovich E. G., Korshunova T. A., Shachenkova L. N., Yakubel O. N., Vansovich N. B. Synthesis of the new ion exchangers based on polyacrylonitrile fiber Nitron C. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 7–17 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-1-7-17>
10. Soldatov V. S. Potentiometric titration of ion exchangers. *Reactive and Functional Polymers*, 1988, vol. 38, no. 2–3, pp. 73–112. [https://doi.org/10.1016/s1381-5148\(98\)00018-2](https://doi.org/10.1016/s1381-5148(98)00018-2)
11. Nesterenok P. V., Soldatov V. S. A method for determination of polyampholytes' acidity parameters. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2013, no. 2, pp. 31–36 (in Russian).
12. Soldatov V. S., Piorishkina N. G., Horoshko R. P. *Ion Exchange Soils*. Minsk, Nauka i Tehnika Publ., 1978. 270 p. (in Russian).
13. Soldatov V. S. Physical meaning of the parameters of the generalized Henderson-Hasselbach equation. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Academy of Sciences*, 1994, vol. 336, no. 6, pp. 782–785 (in Russian).
14. Soldatov, V. S., Sosinovich Z. I., Mironova T. V. Acid-base properties of ion exchangers. II. Determination of the acidity parameters of ion exchangers with arbitrary functionality. *Reactive and Functional Polymers*, 2004, vol. 58, no. 1, pp. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.-2003.11.004>

15. Nesterenok P. V., Soldatov V. S. Protolytic properties of aminocarboxylic polyampholytes based on modacryl polymeric matrix. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2014, no. 4, pp. 72–79 (in Russian).

16. Krasinskaya T. A., Kukharchik N. V., Kastritskaya M. S. Adaptation process of plant regenerants after *in vitro* in *ex vitro* conditions and ways to improve it. *Plodovodstvo = Fruit Growing*, 2010, vol. 22, pp. 309–320 (in Russian).

17. Ryndia H. P., Vicks T. N., Kykharchyk N. V. Substrate influence on *ex vitro* adaptation of cherry cultivars. *Plodovodstvo = Fruit Growing*, 2018, vol. 30, pp. 99–103 (in Russian).

18. Ryndia H. P. The peculiarities of substrates with AQUASORB 3005 KB use for plants adaptation under *ex vitro* conditions. *Plodovodstvo = Fruit Growing*, 2015, vol. 27, pp. 165–172 (in Russian).

19. Bobodzhanova H. I., Kukharchik N. V. Efficiency mark of *in vitro* rhizogenesis and *ex vitro* adaptation of Tajik grape varieties. *Vestnik BGSNA = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*, 2022, no. 2, pp. 105–111 (in Russian).

Информация об авторах

Нестеренок Петр Викторович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: petr.nester@gmail.com

Шаченкова Лариса Николаевна – кандидат химических наук, заведующий лабораторией. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sln13102005@mail.ru

Вонсович Наталия Васильевна – младший научный сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: natasha_ya_vonsovich@tut.by

Солдатов Владимир Сергеевич – академик, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by

Косандрович Евгений Генрихович – доктор химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kosandrovich@ifoch.bas-net.by

Езубец Анна Петровна – научный сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anna.ezubets94@gmail.com

Information about the authors

Nesterenok Petr V. – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petr.nester@gmail.com

Shachenkova Larisa N – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sln13102005@mail.ru

Vansovich Nataliya V. – Junior Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: natasha_ya_vonsovich@tut.by

Soldatov Vladimir S. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Chief Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by

Kosandrovich Evgenii G. – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Leading Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kosandrovich@ifoch.bas-net.by

Yezubets Hanna P. – Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anna.ezubets94@gmail.com