

**ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ**  
**PHYSICAL CHEMISTRY**

УДК 541.183

Поступила в редакцию 09.11.2016  
Received 09.11.2016**Д. В. Шахно, В. С. Солдатов***Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**КАРБОКСИЛЬНЫЙ ИОНИТ НА ОСНОВЕ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛЬНОГО ВОЛОКНА  
КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ КОМПОНЕНТ ПИТАТЕЛЬНЫХ СУБСТРАТОВ  
ДЛЯ РАСТЕНИЙ**

Определены параметры кислотности и тип функциональных групп аминокарбоксильного полиамфолита с преобладающим содержанием карбоксильных групп, полученного на основе промышленного полиакрилонитрильного волокна (Панион-110). Предложен алгоритм определения типа функциональных групп из кривых титрования при разных концентрациях фонового электролита. На основании теоретической модели рассчитаны кривые титрования при концентрациях фонового электролита, соответствующих почвенным и питательным растворам для растений. Сделан вывод о пригодности данного ионита в качестве компонента волокнистого ионообменного субстрата для растений – носителя иона калия.

*Ключевые слова:* ионный обмен, волокнистый ионит, потенциметрическое титрование, моделирование ионного обмена.

**D. V. Shakhno, V. S. Soldatov***Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**A CARBOXYLATE ION EXCHANGER BASED ON POLYACRYLONITRILE FIBER  
AS A POTENTIAL COMPONENT OF NUTRIENT SUBSTRATES FOR PLANTS**

The acidity parameters and type of functional groups of the aminocarboxylate polyampholyte with prevailing carboxyl groups prepared from an industrial polyacrylonitrile fiber (Panion-110), have been determined. An algorithm for determining the type of functional groups based on the potentiometric titration data at different concentrations of the background electrolyte, has been proposed. Titration curves were calculated for the background electrolyte concentrations corresponding to soil and nutrient solutions for plants. It has been concluded that the ion exchanger is suitable as a component of the ion exchanging fibrous substrate for plants, carrying potassium ions.

*Keywords:* ion exchange, fibrous ion exchanger, potentiometric titration, ion exchange simulation.

Волокнистые ионообменные материалы нашли широкое применение в качестве фильтров для очистки воды и воздуха [1, 2]. Синтез и свойства их различных вариантов описаны в литературе [3–5]. Они производятся в Российской Федерации и Республике Беларусь под названиями Вион-КН-1, Фибан К-5 и Панион-110.

Ионнообменные материалы давно используются в качестве носителей отдельных питательных элементов [6] или среды для выращивания растений [7–9]. Однако волокнистые иониты пока не нашли применения в данной области. В нашей лаборатории установлена возможность использования этих ионитов в качестве волокнистого катионообменного компонента питательных сред для выращивания растений [10]. Такие субстраты предназначены для использования в условиях невесомости или переменной ориентации модулей для выращивания растений [11]. Однако имеющихся в литературе данных о кислотно-основных свойствах этих ионитов недостаточно для разработки научно обоснованного способа получения таких субстратов. В частности, не известна количественная взаимосвязь между содержанием в ионите биогенных ионов от их кон-

центрации в питательном растворе и pH равновесного раствора. Для дальнейшего использования волокнистых ионитов в качестве субстрата для растений необходимы такие данные в интервале суммарной концентрации  $10^{-5}$ – $10^{-2}$  экв/л и pH в интервале 4,5–8. Такие составы являются типичными для питательных и почвенных растворов.

В данной работе приводятся экспериментальные данные о зависимости содержания в ионите ионов  $K^+$  от pH и концентрации  $KNO_3$  в растворах, равновесных с ионитом. На примере данного ионита описывается метод получения зависимостей  $f(x, C) = pH$  в математическом виде, позволяющий сделать расчет состава раствора и ионита из параметров кислотности, определенных из данных потенциометрического титрования ионитов при высоких концентрациях солевого фона. Этот метод основывается на теоретической концепции, описанной в работе [12]. Ионит Панион-110 выбран в качестве объекта исследования в связи с его доступностью и относительно невысокой стоимостью.

**Экспериментальная часть.** Ионит Панион-110 производства ООО «ИМТ-Фильтр» (РБ) содержит карбоксильные и слабоосновные группы различного состава. Его полная катионо- и анионообменная емкость составляет 5,2 и 0,9 мэкв/г соответственно. Набухание ионита в  $H^+$ - $OH^-$ - и  $K^+$ -формах равно 0,48 и 1,18 г/г. Ионит получен на основе ПАН волокна нитрон производства Новополоцкого ПО «Полимир». Его мономерный состав: акрилонитрил – 92,5%, метилакрилат – 6,0%, итаконовая кислота – 1,5% [13]. Ионит использовался в виде шпателя с 0,3 текс (эффективный диаметр филамента ~20μ).

Процесс получения ионита заключается в гидразидировании исходного волокна для придания ему сетчатой структуры с последующим гидролизом NaOH нитрильных групп до карбоксильных. Наличие анионообменных групп обусловлено гетероциклическими поперечными мостиками и продуктами побочных процессов взаимодействия гидразина с нитрильной группой, приводящими к образованию групп  $R-C(NH)-NH_2$  и  $-C(O)-NH-NH_2$ . Таким образом, Панион-110 является полиамфолитом, преимущественно содержащим карбоксильные группы [2].

Кривые потенциометрического титрования получены методом одной навески в варианте, детально описанном в работе [14]. Титрованию подвергали образцы ионита, предварительно кондиционированные пятикратной обработкой растворами NaOH и HCl и отмытые дистиллированной водой до pH 6,2. Образцы не содержали  $Na^+$ - и  $Cl^-$ -ионов. Титрование проводилось 1M раствором KOH или  $HNO_3$ . Титрант добавляли в суспензию ~0,5 г ионита в 30 мл раствора фонового электролита  $KNO_3$ . Титрант содержал  $KNO_3$  в концентрации, равной концентрации фонового электролита. Кривые титрования снимались при концентрациях фонового электролита 0,05; 0,1; 0,315 и 1 моль/л. Его количество в каждой порции задавалось микропипеткой и уточнялось взвешиванием с точностью  $\pm 0,0002$  г.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 представлены кривые потенциометрического титрования ионита в  $H^+$ - $OH^-$ -форме в присутствии  $KNO_3$  в различных концентрациях.

Обработку кривых титрования проводили в соответствии с теоретической моделью, разработанной в работе [12]. В рамках данной модели взаимодействие ионита в  $H^+$ - $OH^-$  форме с кислотой и щелочью рассматривается как процесс анионного или катионного обмена, с последующей нейтрализацией  $H^+$  или  $OH^-$  ионов.



В нашем случае  $Kt^+ = K^+$ ,  $An^- = NO_3^-$ . Уравнения (1) и (2) описываются с помощью коэффициента равновесия

$$k_{H^+}^{Kt^+} = \frac{x_{Kt}[H^+]}{(1-x_{Kt})[Kt^+]}; \quad k_{OH^-}^{An^-} = \frac{x_{An}[OH^-]}{(1-x_{An})[An^-]} \quad (4)$$

где  $x$  – эквивалентная доля иона титранта в ионите, величины в квадратных скобках – молярные концентрации.

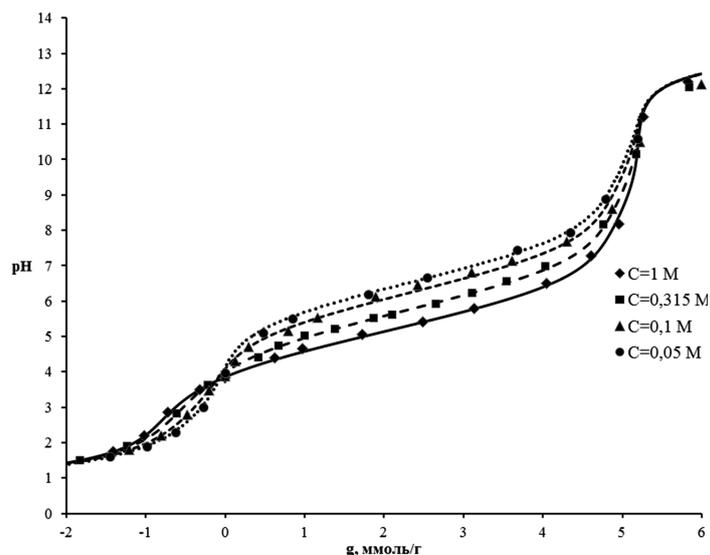


Рис. 1. Кривые титрования Панион-110 раствором KOH при различных концентрациях фонового электролита ( $\text{KNO}_3$ ). Отрицательные значения  $g$  соответствуют титрованию кислотой. Точки – экспериментальные данные, линии рассчитаны с помощью модели [11] с параметрами, приведенными в таблице

Fig. 1. Paniion-110 titration curves with KOH solution at different concentrations of the background electrolyte ( $\text{KNO}_3$ ). Negative  $g$  values belong to titration with an acid. Dots are experimental data, curves are calculated according to [11] with parameters given in Table

В работе [12] показано, что ионный обмен, происходящий на слабоосновных анионообменных группах (5), которые существуют в виде свободных аминов, также описывается уравнениями (2), (4)



Коэффициенты равновесия – переменные величины. Зависимость их отрицательных логарифмов  $p_k$  от  $x$  и  $C_{\text{KtAn}}$  аппроксимируется линейной зависимостью типа:

$$p_k = pK^0 + \Delta p_k \cdot (x - 1/2) + b \cdot \lg C_{\text{KtAn}}, \quad (6)$$

где  $K^0$  – термодинамическая константа ионного обмена, при линейной аппроксимации:  $K^0 = k_{x=1/2}$ ;  $b$  – эмпирическая константа – для однозарядных ионов при ионном обмене на карбоксильном ионите близка к 0,2;  $C_{\text{KtAn}}$  – концентрация фонового электролита в растворе,  $\Delta p_k$  – разность  $p_k$  при полной и нулевой степени нейтрализации ионита. Константы  $pK^0$ ,  $\Delta p_k$  и  $b$  называются параметрами кислотности. Они не зависят от условий получения кривой титрования и составляют набор параметров, достаточных для расчета из них величин  $x$ , pH или  $C_{\text{KtAn}}$  при фиксированных других переменных.

Для ионита, содержащего несколько функциональных групп, необходимо иметь наборы параметров кислотности для функциональной группы каждого типа. Это относится к нашему случаю.

Для расчета теоретической кривой титрования  $\text{H}^+$ - $\text{OH}^-$ -формы ионита необходимо решить систему уравнений, составленную из логарифмических форм уравнений (4), (5) и уравнения массобаланса:

$$\text{pH} = \lg\left(\frac{x_{\text{Kt}}}{1 - x_{\text{Kt}}}\right) + \Delta p_k^{\text{Kt}} (x_{\text{kt}} - 1/2) + pK_{\text{H}}^{\text{Kt}} - (1 - b_{\text{kt}}) \lg C_{\text{KtAn}}, \quad (7)$$

$$\text{pH} = -\lg\left(\frac{x_{\text{An}}}{1 - x_{\text{An}}}\right) - \Delta p_k^{\text{An}} (x_{\text{An}} - 1/2) + 14 - pK_{\text{OH}}^{\text{An}} + (1 - b_{\text{An}}) \lg C_{\text{KtAn}}, \quad (8)$$

$$V[\text{H}^+] + m(g_{\text{OH}} + S_{\text{Kt}} - \sum_i E_{i\text{Kt}}x_{i\text{Kt}}) = V[\text{OH}^-] + m(g_{\text{H}} + S_{\text{An}} - \sum_j E_{j\text{An}}x_{j\text{An}}), \quad (9)$$

где  $V$  – объем равновесного раствора,  $m$  – масса навески ионита,  $g_{\text{H}}$  и  $g_{\text{OH}}$  – количество эквивалентов добавленного титранта в расчете на грамм ионита,  $S_{\text{Kt}}$  и  $S_{\text{An}}$  – содержание катионов и анионов в исходном ионите (в случае  $\text{H}^+$ - $\text{OH}^-$ -формы  $S_{\text{Kt}}$  и  $S_{\text{An}} = 0$ ),  $E_{\text{Kt}}$  и  $E_{\text{An}}$  – емкости ионита по каждому типу катионо- и анионообменных групп.

При замене в (8) доли титранта  $x_{\text{An}}$  на долю  $\text{OH}^-$ -формы  $x_{\text{OH}} = 1 - x_{\text{An}}$

$$\text{pH} = \lg\left(\frac{x_{\text{OH}}}{1 - x_{\text{OH}}}\right) + \Delta\text{p}k_{\text{OH}}^{\text{An}}(x_{\text{OH}} - 1/2) + 14 - \text{p}K_{\text{OH}}^{\circ\text{An}} + (1 - b_{\text{An}})\lg C_{\text{KtAn}}, \quad (10)$$

полученные уравнения (7) и (10) отличаются только знаком перед  $\lg C$  и заменой  $\text{p}K_{\text{H}}^{\circ\text{Kt}}$  на  $14 - \text{p}K_{\text{OH}}^{\circ\text{An}}$ .

Таким образом, взаимодействия протонизированных катионообменных групп в  $\text{H}^+$ -форме и протонизированных анионообменных с раствором фонового электролита описываются сходными уравнениями. Поэтому катионо- и анионообменные группы нельзя различить из данных потенциометрического титрования при одной концентрации фонового электролита. Однако разница между катионо- и анионообменными группами проявляется в зависимости pH от концентрации фонового электролита. Такая разница между катионо- и анионообменными группами заметна из хода кривых титрования (рис. 1). В области титрования анионообменных групп ( $g < 0$ ) при повышении концентрации фонового электролита pH увеличивается, а при титровании катионообменных групп ( $g > 0$ ) при повышении концентрации фонового электролита pH уменьшается. Однако только визуальный анализ кривых титрования не может дать сведения о параметрах кислотности и емкости каждого типа функциональных групп.

Для определения типа функциональной группы нами был предложен алгоритм, основанный на использовании только данных потенциометрических титрований при различных концентрациях фонового электролита.

1. Для упрощения описания ионного обмена при разных концентрациях фонового электролита все ионообменные группы обрабатываются как катионообменные.

2. Для каждой кривой потенциометрического титрования определяются  $\Delta\text{p}k_i$ ,  $E_i$  и вспомогательная величина  $\text{p}K_i^1$  для каждой функциональной группы.

Для катионообменных групп  $-\text{p}K^1 = \text{p}K_{\text{H}}^{\circ\text{Kt}} - (1 - b_{\text{Kt}})\lg C_{\text{KtAn}}$ .

Для анионообменных групп  $-\text{p}K^1 = 14 - \text{p}K_{\text{OH}}^{\circ\text{An}} + (1 - b_{\text{An}})\lg C_{\text{KtAn}}$ .

При такой замене определение вышеуказанных параметров сводится к определению параметров кислотности катионообменных групп при  $C_{\text{KtAn}} = 1$  М. Алгоритм такого расчета описан в работе [13].

3. По известным параметрам  $\text{p}K_i^1$ ,  $\Delta\text{p}k_i$ ,  $E_i$  для каждой функциональной группы строятся дифференциальные кривые сорбции  $dg/d\text{pH} = f(\text{pH})$ , где  $g$  – количество сорбируемого катиона (ммоль/г), равно  $E_i x_i$ . Значения  $x_i$  находятся как численное решение уравнения (7) при известных pH,  $\text{p}K_i^1$ ,  $\Delta\text{p}k_i$ ,  $E_i$ . Значение производной  $dg/d\text{pH}$  рассчитывается численным методом по таблице значений  $x_i$  от pH.

Такие кривые позволяют найти диапазоны значений pH, для которых происходит сорбция на группах различного типа, а также диапазоны pH, при которых сорбция происходит совместно на нескольких ионообменных группах.

4. Для определения типа ионообменной группы необходимо проанализировать как будут смещаться дифференциальные кривые сорбции для каждой группы с изменением концентрации. Максимум на таких кривых наблюдается при  $x_i = 0,5$ . Из уравнений (7) и (8):

для катионообменных групп  $-\text{pH}_{\text{max}} = \text{p}K_{\text{H}}^{\circ\text{Kt}} - (1 - b_{\text{Kt}})\lg C_{\text{Kt}}$ ;

для анионообменных групп  $-\text{pH}_{\text{max}} = 14 - \text{p}K_{\text{OH}}^{\circ\text{An}} + (1 - b_{\text{An}})\lg C_{\text{An}}$ .

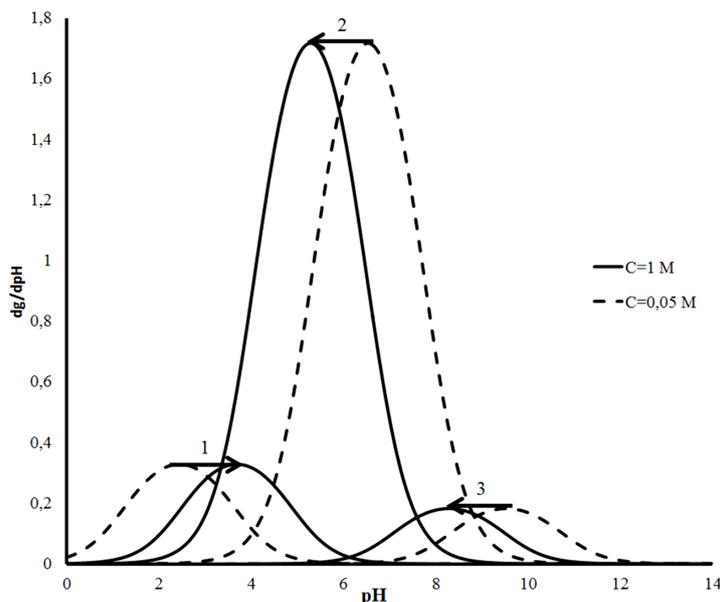


Рис. 2. Рассчитанные дифференциальные кривые сорбции ионита Панион-110. Цифрами обозначен тип функциональной группы; стрелками – направление сдвига максимума дифференциальных кривых сорбции при повышении концентрации фонового электролита

Fig. 2. Calculated differential sorption curves for Panion-110 ion exchanger. Numbers designate functional group types, arrows show the direction of shift for differential sorption curve maximums with background electrolyte concentration increase

Так как  $b < 1$ , максимумы на дифференциальных кривых сорбции катионообменных групп при повышении концентрации фонового электролита смещаются в сторону уменьшения pH, а для анионообменных групп – в сторону увеличения.

5. Из зависимости  $pK_i^1$  от концентрации фонового электролита  $C_{\text{КтАп}}$  определяются параметры  $pK_i^\circ$  и  $b$ .

На рис. 2 приведены дифференциальные кривые сорбции на ионите Панион-110 для двух концентраций фонового электролита ( $C = 0,05$  моль/л и  $C = 1,0$  моль/л). Из рисунка видно, что максимум, соответствующий группе 1, при повышении концентрации фонового электролита смещается в сторону увеличения pH, а максимумы, соответствующие группам 2 и 3, в сторону его уменьшения. Следовательно, группа 1 является анионообменной, а группы 2 и 3 катионообменными.

Таким образом, кривые титрования можно описать тремя наборами параметров кислотности, приведенными в таблице.

#### Тип ионообменной группы и параметры кислотности ионита Панион-110

#### Types of anion exchanging groups and acidity parameters for Panion-110 anion exchanger

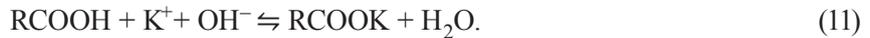
| Номер группы | 1              | 2               | 3               |
|--------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Тип группы   | Анионообменная | Катионообменная | Катионообменная |
| E            | 0,9            | 4,7             | 0,5             |
| $pK^\circ$   | 10,3           | 5,3             | 8,3             |
| $\Delta pK$  | 1,0            | 1,0             | 1,0             |
| b            | 0,05           | 0,05            | 0,05            |

Из работы [15] известно, что в полиамфолитах аминокарбоксильного типа в протонизированной форме (область низких pH) в реакцию нейтрализации при потенциометрическом титровании первыми вступают слабоосновные протонизированные группы.

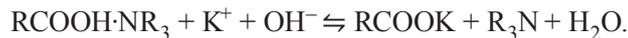
При титровании  $\text{H}^+$ - $\text{OH}^-$ -формы ионита кислотой происходит протонизация основных групп, в нашем случае групп типа 1:



Область более высоких рН относится к нейтрализации свободных карбоксильных групп, обозначенных в таблице как группы типа 2:



Дальнейшее добавление  $\text{KOH}$  к системе ионит–раствор приводит к медленному росту рН, соответствующему нейтрализации более слабых кислотных групп, в роли которых могут выступать карбоксильные группы, связанные с основными группами во внутримолекулярный комплекс, группы типа 3:



Поскольку значение параметра  $b$  оказалось равным 0,05, что значительно меньше, чем рекомендованное значение – 0,2, то можно предположить, что некоторые свойства ионитов, а именно коэффициент  $b$ , в значительной степени зависят от химической природы ионита. При совместном присутствии катионо- и анионообменных групп значения  $b$  могут принимать нехарактерные для карбоксильных ионитов значения близкие к 0.

При низких концентрациях фонового электролита пики, соответствующие группам типов 1 и 2, не пересекаются. В интересующей нас области рН 4,5–8,5 и концентраций ( $10^{-5}$ – $10^{-2}$  моль·экв/л) преимущественно происходит процесс нейтрализации свободных карбоксильных групп с типичной для них  $\text{p}K^\circ = 5,3$ . Поэтому при использовании данного ионита в качестве катионообменной части субстрата для растений его ионообменные свойства можно описывать, используя только одну основную катионообменную группу (свободные карбоксильные группы, тип 2), так как в диапазоне рН и концентраций электролита, соответствующим реально используемым питательным растворам, титрованию подвергаются только свободные карбоксильные группы.

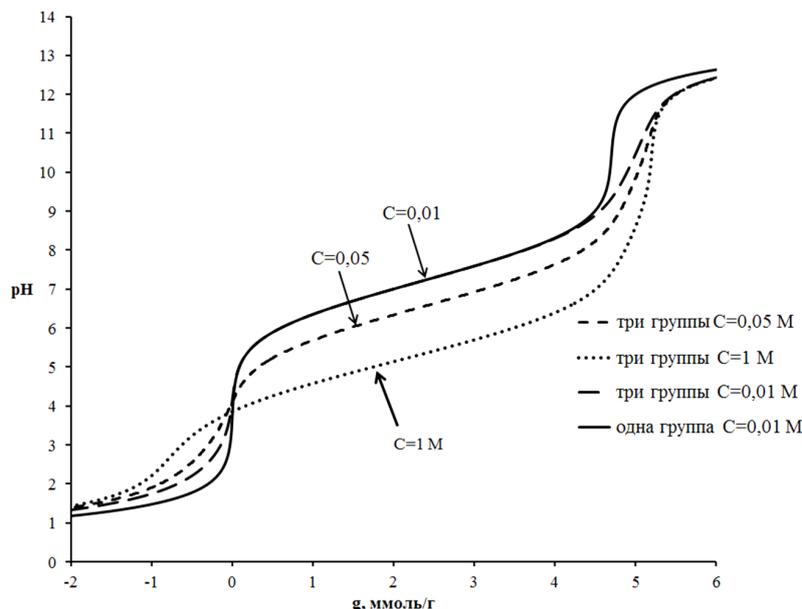


Рис. 3. Модельные кривые титрования ионита Панион-110, рассчитанные с помощью модели [11] с параметрами, приведенными в таблице. Для концентрации  $C_{\text{КтAn}} = 0,01$  М приведены кривые титрования, рассчитанные с учетом всех трех типов функциональной группы и только с учетом группы типа 2

Fig. 3. Simulated titration curves for Panion-110 anion exchanger, calculated according to [11] with parameters given in Table. For  $C_{\text{КтAn}} = 0,01$  M, titration curves are given both including all three functional group types and only including type 2 groups

Из полученных параметров кислотности была теоретически рассчитана кривая титрования, соответствующая раствору с концентрацией  $C = 0,01$  моль/л (рис. 3), что соответствует типичной концентрации почвенных растворов.

Анализируя полученную модельную кривую титрования можно сделать вывод, что данный ионит можно применять в качестве компонента субстрата для растений при рН питательного раствора  $> 6$ , так как при более низком рН мала величина сорбции иона  $K^+$ . Данный диапазон рН подходит для большинства видов сельскохозяйственных и декоративных растений. Однако Панион-110, как и любой другой слабокислотный ионит, не будет подходить в качестве компонента субстрата для кислотолюбивых растений.

### Выводы

1. Предложен простой способ определения типа ионнообменной группы в полиамфолите, исходя только из кривых потенциометрического титрования при разных концентрациях фонового электролита.

2. Определены параметры кислотности полиамфолита Панион-110, содержащего преимущественно карбоксильные группы. Данные параметры позволяют теоретически рассчитать кривые потенциометрического титрования при любой концентрации фонового раствора, даже при низких концентрациях, когда невозможно получить экспериментальные кривые титрования.

3. Спрогнозированы кривые потенциометрического титрования при концентрации фонового электролита, соответствующей питательному раствору (0,01 М). Показано, что при концентрации фонового раствора, соответствующей концентрации питательного раствора ( $10^{-5}$ – $10^{-2}$  моль·экв/л) и физиологически приемлемого для растений рН (4,5–8), данную кривую титрования можно описать одной функциональной группой.

4. Панион 110 может стать эффективным компонентом субстрата для растений (носителя ионов калия) в диапазоне рН питательного раствора 6–8,5.

### Список использованных источников

1. Soldatov, V. S. Ion exchangers for air purification / V. S. Soldatov, E. G. Kosandrovich // Ion exchange and solvent extraction. – 2011. – Vol. 20. – P. 45–117.
2. Kosandrovich, E. G. Fibrous Ion Exchangers / E. G. Kosandrovich, V. S. Soldatov // Ion exchange technology I: theory and materials. – Amsterdam: Springer, 2012. – P. 299–371.
3. Зверев, М. П. Хемосорбционные волокна / М. П. Зверев. – М.: Химия, 1981. – 191 с.
4. Вольф, Л. А. Волокна с особыми свойствами / Л. А. Вольф. – М.: Химия, 1980. – 240 с.
5. Soldatov, V. S. Synthesis, structure and properties of new fibrous ion exchangers / V. S. Soldatov, A. A. Shunkevich, G. I. Sergeev // React. Polymers. – 1988. – Vol. 7, № 2–3. – P. 159–172.
6. Arnon, D. I. Nutrient. Ion-exchange Materials / D. I. Arnon, K. A. Grossenbacher // Soil Sci. – 1947. – Vol. 63, № 3. – P. 159–182.
7. Chmoczynska, M. The influence of ion-exchange substrates on grass growth in sandy soils / M. Chmoczynska [et. al.] // J. Plant. Nutr. Soil. Sci. – 2014. – Vol. 117, № 3. – P. 438–442.
8. Солдатов В. С. Ионитные почвы / В. С. Солдатов, Н. Г. Перышкина, Р. П. Харошка. – Минск: Наука и техника, – 1978. – 272 с.
9. Matraszek, R. Productivity and chemical composition of tomato and cucumber plants growing in nickel polluted soils fertilized with Biona-312 / R. Matraszek [et al.] // Comm. soil sci. plant anal. – 2010. – Vol. 41, № 2. – P. 155–172.
10. Искусственные субстраты для растений на основе волокнистых ионообменных материалов / В. С. Солдатов [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 1985. – № 6. – С. 85–90.
11. Федюнькин, Д. В. Интенсивная культура растений в искусственных условиях / Д. В. Федюнькин. – Минск: Наука и техника, –1988. – 213 с.
12. Soldatov, V. S. Potentiometric titration of ion exchangers / V. S. Soldatov // React. Funct. Polym. – 1998. – Vol. 38, № 2–3. – С. 73–112.
13. 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.
14. Миронова, Т. В. Потенциометрическое титрование ионитов при различных концентрациях фонового электролита / Т. В. Миронова, В. С. Солдатов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2003. – № 4. – С. 95–100.
15. Нестеренок, П. В. Протолитические свойства аминокислотных 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.

## References

1. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G., “Ion exchangers for air purification”, *Ion exchange and solvent extraction*, 2011, vol. 20, pp. 45–117.
2. Kosandrovich E. G., Soldatov V. S., “Fibrous Ion Exchangers”, *Ion exchange technology I: theory and materials*, Springer, Amsterdam, NL, 2012, pp. 299–371.
3. Zverev M. P., *Khemosorbtsionnye volokna* [Chemosorption fibers], Khimiia, Moscow, RU, 1981.
4. Vol’f L. A., *Volokna s osobymi svoistvami* [Fibers with special properties], Khimiia, Moscow, RU, 1980.
5. Soldatov V. S., Shunkevich A. A., Sergeev G. I., “Synthesis, structure and properties of new fibrous ion exchangers”, *Reactive Polymers*, 1988, vol. 7, no. 2–3, pp. 159–172.
6. Arnon D. I., Grossenbacher K. A., “Nutrient. Ion-exchange Materials”, *Soil Science*, 1947, vol. 63, no. 3, pp. 159–182.
7. Chmoczynska M., Pristavko S., Soldatov V. S., Wasag H., “The influence of ion-exchange substrates on grass growth in sandy soils”, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, vol. 117, no. 3, pp. 438–442.
8. Soldatov V. S., Peryshkina N. G., Kharoshka R. P., *Ionitnye pochvy* [Ion-exchanging soils], Nauka i tekhnika, Minsk, BY, 1978.
9. Matraszek R., Szymańska M., Chomeczyńska M., Soldatov V. S., “Productivity and chemical composition of tomato and cucumber plants growing in nickel polluted soils fertilized with Biona-312”, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, vol. 41, no. 2, pp. 155–172.
10. Soldatov V. S., Peryshkina N. G., Lukashovich L. I., Khoroshko R. P., “Artificial substrates for plants based on fibrous ion exchanging materials”, *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series], 1985, no. 6, pp. 85–90.
11. Fediun’kin D. V., *Intensivnaia kul’tura rastenii v iskusstvennykh usloviakh* [Intensive plant cultivation under artificial conditions], Nauka i tekhnika, Minsk, BY, 1988.
12. Soldatov V. S., “Potentiometric titration of ion exchangers”, *Reactive and Functional Polymers*, 1998, vol. 38, no. 2–3, pp. 73–112.
13. Nesterenok P. V., Soldatov V. S., “A method for determination of polyampholytes’ acidity parameters”, *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series], 2013, no. 2, pp. 31–36.
14. Mironova T.V., Soldatov V.S., “Potentiometric titration of ion exchangers at various concentrations of background electrolyte”, *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series], 2003, no. 4, pp. 95–100.
15. Nesterenok P. V., Soldatov V. S., “Protolytic properties of aminocarboxylic polyampholytes based on modacryl polymeric matrix”, *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series], 2014, no. 4, pp. 72–79.

## Информация об авторах

Шахно Дмитрий Викторович – мл. науч. сотрудник, Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shakhnodv@gmail.com.

Солдатов Владимир Сергеевич – академик, д-р хим. наук, профессор, зав. лаб., Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by.

## Для цитирования

Шахно, Д. В. Карбоксильный ионит на основе полиакрилонитрильного волокна как потенциальный компонент питательных субстратов для растений / Д. В. Шахно, В. С. Солдатов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 2. – С. 7–14.

## Informanion about the authors

Shakhno Dzmitry Viktorovich – 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: shakhnodv@gmail.com.

Soldatov Vladimir Sergeevich – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, 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: soldatov@ifoch.bas-net.by.

## For citation

Shakhno D. V., Soldatov V. S. A carboxylate ion exchanger based on polyacrylonitrile fiber as a potential component of nutrient substrates for plants. *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk*. [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, chemical series], 2017, no. 2, pp. 7–14. (In Russian).