

ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ
PHYSICAL CHEMISTRY

УДК 544.341.2+581.133.8

Поступила в редакцию 18.10.2016
Received 18.10.2016

В. С. Солдатов, С. Ю. Косандрович, О. В. Ионов

Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ПОЛУЧЕНИЕ ИОНООБМЕННЫХ СУБСТРАТОВ ДЛЯ РАСТЕНИЙ

Описывается новый вариант метода получения ионитных субстратов для растений путем отдельного получения катионного и анионного компонентов ионообменных субстратов биогенными ионами. Состав катионного компонента субстрата задается приведением в равновесие катионита и концентрированного раствора солей основных биогенных катионов – K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; состав анионного компонента – нейтрализацией OH^- формы анионита смешанным концентрированным раствором кислот HNO_3 , H_3PO_4 и H_2SO_4 . Субстрат получается путем механического смешивания катионного и анионного компонентов с введением микроэлементов. Идентичность субстрата, полученного описанным способом, и стандартного субстрата Биона 111 доказана химическим анализом и биологическим экспериментом по выращиванию растений.

Ключевые слова: ионообменные субстраты для растений, интенсивное растениеводство, субстраты Биона, ионитопоника, питательные растворы для растений.

V. S. Soldatov, S. Y. Kasandrovich, O. V. Ionova

Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

PREPARATION OF ION EXCHANGE SUBSTRATES FOR PLANTS

A new variant of the method for preparation of the ion exchange substrate for plants is described in the paper. The cationic component has been obtained by equilibrating of the cation exchange resin with a concentrated solution of salts of the main biogenic cations K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; the anionic component is obtained by neutralization of the OH^- form of anion exchanger with a concentrated mixed solution of the acids containing the nutrient elements that is HNO_3 , H_3PO_4 and H_2SO_4 . Both components are mixed and the microelements are added to obtain the full ion exchange substrate.

Keywords: ion exchange substrates for plants, intensive plants growing, Biona substrates, ionitoponics, nutrient solutions for plants.

Введение. Первые попытки использования синтетических ионитов в качестве носителей питательных веществ для получения полноценных субстратов для растений были предприняты непосредственно после промышленного освоения их производства [1–9]. Они заключались в том, что моноионные формы ионитов, содержащие биогенные ионы, смешивались в пропорциях, обеспечивающих такое же их соотношение, как в гидропонных растворах. Было показано, что растения могут расти на ионитах, но полноценного субстрата таким образом получить не удалось, так как пропорции, в которых должны присутствовать ионы биогенных элементов в ионитном субстрате, сильно отличаются от пропорций в питательных растворах из-за различной селективности их сорбции ионитами. Теоретически рассчитать необходимый состав моноионных смесей не представлялось возможным.

Универсальный способ получения полноценного ионообменного субстрата для растений был описан в первых публикациях по этому вопросу [1–5, 7] (динамический метод). Он заключается в том, что эквивалентная смесь катионита и анионита помещается в колонку, через которую пропускается один из питательных растворов для растений до установления равновесия. Последнее устанавливается по равенству составов исходного и выходящего из колонки раствора.

Универсальность этого способа состоит в том, что могут быть использованы иониты любых химических типов в любых ионных формах и питательные растворы любого состава. Способ гарантирует идентичность питательных свойств смеси ионитов и выбранного питательного раствора пока их состав не будет существенно изменен растущими на них растениями.

Несмотря на отмеченные достоинства принципиального характера, этот способ имеет недостатки, препятствующие его промышленному применению. Они заключаются в следующем.

Питательные растворы имеют низкую общую концентрацию ионов обычно несколько ниже, чем $2 \cdot 10^{-2}$ экв/дм³, в то время как характерная для полимерных ионитов величина выше на два порядка. Учитывая разницу в селективности сорбции ионитами различных ионов – компонентов питательного раствора и особенностей колоночного процесса, необходимый для достижения равновесия объем пропускаемого раствора должен быть увеличен, как минимум, в десять раз, что и было подтверждено экспериментально [1]. Следовательно, для получения ионитного субстрата динамическим методом через слой смеси необходимо пропустить не менее 1000 л раствора на килограмм ионитов, что неприемлемо с технологической и экономической точек зрения. Тем не менее, этим методом были произведены тоновые количества ионитных субстратов для использования в растениеводстве в особых условиях [10].

Существенно увеличить концентрацию насыщающего раствора невозможно, так как питательный раствор содержит катионы и анионы биогенных элементов, образующих труднорастворимые осадки (Ca^{2+} , Mg^{2+} , катионные микроэлементы; HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , SO_4^{2-}) даже при небольшом увеличении концентрации. Поэтому были разработаны другие технологии получения ионитных субстратов, в которых задание нужного ионного состава ионитной смеси осуществляется в статических условиях (солевой и кислотно-основной метод [1]). Они обеспечивают получение высокоэффективных питательных сред для растений [11–14]. Однако динамический метод остался важнейшей лабораторной процедурой для определения ионного состава ионитных компонентов субстратов.

В настоящей работе описывается метод получения ионитных субстратов путем отдельного получения катионного и анионного компонентов ионообменных субстратов биогенными ионами. Это позволяет использовать в динамическом методе насыщающие растворы высокой концентрации и избежать образования осадков при получении смешанных ионных форм ионитов. Субстрат получается путем механического смешивания полиионных форм анионита и катионита. Полноценность субстрата подтверждена его химическим анализом и биологическим экспериментом по выращиванию тест-растения, в качестве которого выбран райграс *Lolium Perenne L.*

Экспериментальная часть. Для получения субстрата по отдельности были получены смешанные ионные формы катионита и анионита, содержащие катионы и анионы, необходимые растению в макроколичествах соответственно: катионит – K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; анионит – NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} . Микроэлементы в виде водной суспензии вводились в механическую смесь ионитов после задания им необходимого ионного состава. Предлагаемый метод будет объяснен на примере получения производящегося в настоящее время субстрата Биона 111. Этот субстрат является смесью сульфокатионита КУ-2Х8 и полиосновного анионита ЭДЭ-10П, насыщенных полным комплектом макро- и микроэлементов. Он равновесен с питательным раствором, состав которого по макрокомпонентам приведен в таблице вместе с составом ионитов, входящих в состав субстрата.

Получение смешанной ионной формы катионита из насыщающего раствора высокой концентрации. В настоящей работе предлагается использовать динамический (колоночный) процесс для насыщения катионита макроионами (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) из концентрированных растворов солей этих катионов, не образующих осадков при смешивании, например хлоридов. Использование 1 н. раствора позволило бы уменьшить объем насыщающего раствора в сотни раз. Однако для применения такой технологии необходимо знать состав насыщающего раствора (соотношение катионов), который очень сильно зависит от суммарной концентрации раствора и должен значительно отличаться от состава 0,017 н. раствора, так как содержит катионы с различными зарядами. Он должен быть таким, чтобы при замене концентрированного (в нашем случае 1 н.) раствора на разбавленный (0,017 н.) с катионным составом, сходным с питательным раствором,

Ионный состав ионитов, входящих в состав субстрата Биона 111 и равновесного раствора

Ион	Экв. доля у в питательном 0,017 н. растворе	Концентрация в питательном 0,017 н. растворе, экв/л	Экв. доля в насыщенном 1 н. растворе	Экв. доля x в ионите	Содержание иона в ионите, м-экв/г
K ⁺	0,53	0,0090	0,096	0,08	0,368
Ca ²⁺	0,35	0,00595	0,673	0,78	3,580
Mg ²⁺	0,12	0,00204	0,231	0,14	0,642
NO ₃ ⁻	0,76	0,0129	–	0,33	1,118
H ₂ PO ₄ ⁻	0,12	0,00204	–	0,12	0,407
SO ₄ ²⁻	0,12	0,00204	–	0,55	1,860

состав равновесного с ним ионита был бы аналогичен составу катионного компонента субстрата Биона.

Этот состав неизвестен, но может быть рассчитан из теории ионного обмена при наличии экспериментальных данных о бинарных равновесиях обменов пар ионов, входящих в тройку макрокатионов, что и было сделано в настоящей работе, как описано ниже.

Состав фазы ионита и равновесного с ним раствора в нашей системе определяется тремя уравнениями зависимости коэффициентов равновесия парных обменов Mg²⁺–K⁺, Ca²⁺–K⁺ и Ca²⁺–Mg²⁺:

$$k_{\text{K}}^{\text{Mg}} = \frac{x_{\text{Mg}}^{1/2} \cdot (N_0)_{\text{K}}}{x_{\text{K}} \cdot (N_0)_{\text{Mg}}^{1/2}}, \quad (1)$$

$$k_{\text{K}}^{\text{Ca}} = \frac{x_{\text{Ca}}^{1/2} \cdot (N_0)_{\text{K}}}{x_{\text{K}} \cdot (N_0)_{\text{Ca}}^{1/2}}, \quad (2)$$

$$k_{\text{Mg}}^{\text{Ca}} = \frac{x_{\text{Ca}} \cdot (N_0)_{\text{Mg}}}{x_{\text{Mg}} \cdot (N_0)_{\text{Ca}}}. \quad (3)$$

Состав ионита выражается через эквивалентные доли x , N_0 – нормальность ионов в растворе, k – коэффициент равновесия.

В идеальных системах коэффициенты равновесия идентичны константам равновесия и не зависят от суммарной концентрации и соотношения концентраций ионов. Поскольку коэффициенты активности ионов в фазе ионита недоступны из экспериментальных данных, в практических расчетах, приводящихся ниже, мы принимаем как допущение, что коэффициенты равновесия обладают некоторыми свойствами констант равновесия, в частности, не зависят от степени обмена ионов. Это означает, что мы принимаем коэффициенты равновесия постоянными и равными константам. Для таких систем ионообменное равновесие трех ионов описывается любой парой уравнений (1) – (3), так как третья константа может быть получена комбинированием двух других, например,

$$k_{\text{Mg}}^{\text{Ca}} = \left(k_{\text{K}}^{\text{Ca}} / k_{\text{K}}^{\text{Mg}} \right)^2. \quad (4)$$

Поскольку наиболее важными характеристиками ионообменного субстрата являются соотношения концентраций биогенных ионов и их суммарная концентрация (массовая нормальность) $\bar{N}_0$, запишем уравнения коэффициентов равновесия (1) – (3) через относительные эквивалентные доли ионов в ионите (x) и растворе (y):

$$\bar{N}_0 = \sum z_i \bar{m}_i, \quad N_0 = \sum z_i m_i, \quad (5)$$

$$x = z_i \bar{m}_i / \bar{N}_0, \quad y = z_i m_i / N_0, \quad (6)$$

$$\sum x_i = 1, \quad \sum y_i = 1, \quad (7)$$

где $\bar{m}_i$ – моляльность катиона в ионите, которая рассчитывается как число молей катиона на 1000 г воды, содержащейся в ионите; m_i – моляльность иона в растворе; $\bar{N}_0$ и N_0 – суммарная концентрация ионов в ионите и растворе соответственно; z_i – заряд иона.

$$k_K^{Mg} = \frac{x_{Mg}^{1/2} \cdot y_K}{x_K \cdot y_{Mg}^{1/2}} \cdot \left(\frac{N_0}{\bar{N}_0} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

$$k_K^{Ca} = \frac{x_{Ca}^{1/2} \cdot y_K}{x_K \cdot y_{Ca}^{1/2}} \cdot \left(\frac{N_0}{\bar{N}_0} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

$$k_{Mg}^{Ca} = \frac{x_{Ca} \cdot y_{Mg}}{x_{Mg} \cdot y_{Ca}}. \quad (10)$$

Если известны коэффициенты равновесия парных обменов и суммарные концентрации ионов в ионите (рассчитываются из экспериментально определяемых величин сорбции воды ионитом в смешанной ионной форме), то можно рассчитать состав раствора любой концентрации по заданному составу ионита. Пример такого расчета приводится ниже.

Рассчитаем состав 1 н. раствора хлоридов калия, кальция и магния, равновесный с ионитом КУ-2Х8, имеющим такой же ионный состав, как состав катионного компонента субстрата Биона 111, приведенный в таблице. Экспериментально определенная сорбция воды катионитом в смешанной ионной форме равна 1,2 г воды на грамм ионита, откуда находим значение $\bar{N}_0 = 3,95$ м-экв/г. Коэффициенты равновесия, рассчитанные из данных этой же таблицы по уравнениям (8) – (10), равны: $k_K^{Mg} = 0,47$; $k_K^{Ca} = 0,653$; $k_{Mg}^{Ca} = 1,39$.

Решаем систему уравнений, составленную из любых двух уравнений (8) – (10), с этими численными значениями параметров N_0 и k и уравнений (7) относительно переменных y .

Рассчитаем y_{Mg} для равновесия ионита с 1н. раствором. Подставляем в уравнение (8) известные величины x :

$$k_K^{Mg} = \frac{0,14^{1/2} \cdot y_K}{0,08 \cdot y_{Mg}^{1/2}} \cdot \frac{1}{3,95^{1/2}} = 0,47 = \frac{2,352 \cdot y_K}{y_{Mg}^{1/2}} = \frac{2,352 \cdot (1 - y_{Mg} - y_{Ca})}{y_{Mg}^{1/2}}. \quad (11)$$

Для того чтобы исключить из уравнения (11) y_{Ca} , целесообразно использовать уравнение (10), так как с изменением суммарной концентрации отношение долей ионов с одинаковым зарядом остается постоянным, так же как и константа равновесия.

$$k_{Mg}^{Ca} = 1,91 = \frac{0,78 \cdot y_{Mg}}{0,14 \cdot y_{Ca}} = 5,57 \frac{y_{Mg}}{y_{Ca}} = 1,91; \quad (12)$$

$$y_{Ca} = 2,915 \cdot y_{Mg}. \quad (13)$$

Значение y_{Ca} подставляем в уравнение (11) и после преобразований получаем:

$$84,787 \cdot y_{Mg}^2 - 43,535 y_{Mg} + 5,534 = 0. \quad (14)$$

Оказалось, что оба корня этого уравнения лежат в области значений 0–1, допустимых для значений y_{Mg} : $y_{Mg}^{(1)} = 0,231$ или $y_{Mg}^{(2)} = 0,282$.

Эквивалентную долю кальция находим из однозначного условия (13): $y_{Ca}^{(1)} = 0,673$ или $y_{Ca}^{(2)} = 0,822$. Выбор корней $y^{(1)}$ или $y^{(2)}$, отвечающих физически реальным условиям, возможен путем проверки условий

$$y_{Ca} + y_{Mg} < 1, \\ y_{Ca} / y_{Mg} = 2,915.$$

Последнее следует из состава питательного раствора, приведенного в таблице. Можно убедиться, что этим условиям отвечают только $y_{Mg}^{(1)}$ и $y_{Ca}^{(1)}$.

Таким образом, в результате расчета получен следующий состав 1 н. равновесного раствора: $y_{Mg} = 0,231$; $y_{Ca} = 0,672$; $y_K = 0,096$. Эти значения эквивалентных долей резко отличаются от величин для питательного раствора, приведенных в таблице. В частности, доля калия в 1 н. растворе в 5 раз ниже, а концентрация в 10 раз выше, чем в 0,017 н. питательном растворе.

Экспериментальная проверка корректности расчета. Смешанный 1 н. раствор хлоридов рассчитанного состава пропускали через колонку с ионитом КУ-2Х8. В вытекающем растворе измеряли pH и концентрации всех катионов. Условия проведения процесса: объем фильтрующего слоя $V = 1256 \text{ см}^3$, масса сухого ионита – 451 г, высота слоя – 25 см, скорость пропуска – 30 мл/мин.

Состав выходящего раствора становился идентичным составу входящего после пропускания 5000 мл (4 объема фильтрующего слоя). Колонку промывали дистиллированной водой. Содержание ионов в ионите в расчете на грамм сухой смешанной ионной формы определяли в растворе после их количественного вытеснения из его точной навески 1н. HCl. Получили следующие величины (м-экв/г): $\text{K}^+ - 0,360$, $\text{Ca}^{2+} - 3,473$, $\text{Mg}^{2+} - 0,565$. Несмотря на достаточно хорошее совпадение теоретически рассчитанного и экспериментально определенного состава ионита, была проведена точная корректировка его ионного состава путем дополнительного приведения в равновесие с разбавленным раствором, имеющим такой же катионный состав, как и питательный раствор.

Ионит в смешанной ионной форме поместили в колонку и пропускали через нее 0,017 н. питательный раствор. После пропускания шести колоночных объемов составы входящего и выходящего растворов выравнились.

Таким образом доказано, что метод теоретического расчета состава концентрированных растворов, равновесных с катионообменным компонентом ионитного субстрата, позволяет определить его состав с точностью, близкой к экспериментальной. Небольшие расхождения при необходимости могут быть устранены финальной обработкой ионита стандартным питательным раствором.

Получение смешанных анионных форм анионитов из насыщенных растворов. Описанный выше способ получения смешанных катионных форм – компонентов ионообменных субстратов – в полной мере применим к анионитам. Однако в этом случае возможен другой, более простой метод. Он заключается в том, что анионит в OH^- -форме обрабатывается смесью кислот, содержащих питательные элементы – HNO_3 , H_3PO_4 и H_2SO_4 . Ионные доли анионов в смешанном водном растворе и кислот и их количества выбираются такими же, как в анионном компоненте субстрата (таблица). В этом же растворе должны содержаться калиевые соли этих кислот в такой же нормальности, как общая нормальность питательного раствора (в нашем случае 0,017 экв/л).

Анионит в OH^- -форме приводится в контакт с раствором и выдерживается в течение времени, необходимого для достижения равновесия. Если анионит содержит слабоосновные группы, то наиболее важным и чувствительным критерием достижения ионитом заданного состава является pH раствора. Поскольку он обычно равен 5–8, остаточные количества кислот в растворе после реакции с анионитом ничтожно малы по сравнению с их общим количеством, и можно считать, что количество анионов, перешедших в анионит, равно взятому в реакцию количеству.

Смешанную NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} -форму анионита ЭДЭ-10П получали нейтрализацией кислотами его OH^- -формы. Расчет количества кислот проводили исходя из того, что содержания и эквивалентные доли в анионите должны быть такими же, как в Бионе (таблица). Процесс получения полиионной формы проводили в статических условиях при периодическом перемешивании с контролем pH.

В нашем эксперименте 395 г анионита ЭДЭ-10П (в пересчете на массу сухой OH^- -формы) было приведено в контакт с 2000 мл раствора, содержащего 451, 164 и 375 м-моль HNO_3 , H_3PO_4 и H_2SO_4 соответственно. Раствор содержал также ион K^+ в концентрации 0,017 моль/л. Установление равновесия контролировали по достижению постоянного значения pH 6,58, для чего потребовалось 80 ч (температура $20 \pm 2^\circ$, периодическое перемешивание). После установления равновесия раствор содержал смесь калиевых солей кислот в концентрации 0,017 экв/л (равной общей солевой концентрации питательного раствора).

Ионообменный субстрат получали механическим смешиванием приготовленных описанными способами катионита и анионита. Соотношение масс катионита и анионита выбирали таким же, как в субстрате Биона 111 (40,4% катионита и 59,6% анионита в расчете на сухие H^+ и OH^- -формы). В смесь добавляли полный комплект микроэлементов в виде густой суспензии

осадков, образующихся при смешении растворов их солей. Их общее количество составляет 40,3 г/кг ионитов.

Полученный субстрат по составу полностью идентичен стандартному субстрату Биона 111 и отличается от него только способом введения микроэлементов. Сравнение качества субстрата в биологическом эксперименте вместе со стандартным субстратом Биона по выращиванию тест-растения райграса (*Lolius Perenne L.*) показала их полную идентичность.

Заклучение. Преимуществом описанного варианта метода получения ионообменных субстратов является возможность варьирования содержания в нем пропорций биогенных катионных и анионных компонентов в соответствии с потребностями различных видов растений.

Список использованных источников

1. Солдатов, В. С. Ионитные почвы / В. С. Солдатов, Н. Г. Перышкина, Р. П. Хорошко. – Минск: Наука и техника, 1978. – 270 с.
2. Солдатов, В. С. Искусственные питательные среды для роста растений на основе ионообменных материалов. Сообщ. 1 / В. С. Солдатов, Н. Г. Терентьев, Н. Г. Перышкина // *Агрохимия*. – 1969. – № 2. – С. 101–108.
3. Солдатов, В. С. Методы получения ионитных субстратов. Сообщ. 2 / В. С. Солдатов, Н. Г. Перышкина, Р. П. Хорошко // *Агрохимия*. – 1971. – № 11. – С. 103–108.
4. Субстраты на основе различных ионообменных материалов. Сообщ. 4 / В. С. Солдатов [и др.] // *Агрохимия*. – 1972. – № 1. – С. 85–90.
5. К вопросу получения ионитных субстратов различными методами / Н. Г. Перышкина [и др.] // *Агрохимия*. – 1977. – № 11. – С. 125–131.
6. Суровая, Т. П. Выращивание редиса у прячяглы монакультуры на іанітнай глебе / Т. П. Суровая, В. М. Цярэнцьеў, Л. Л. Кошалева // *Весці АН БССР*. – 1971. – № 4. – С. 37–39.
7. Расчет и прогнозирование минерального состава ионитных субстратов по данным тройных и бинарных равновесий / Р. П. Хорошко [и др.] // *Агрохимия*. – 1974. – № 10. – С. 122–129.
8. Мытько, Л. В. Использование ионообменных субстратов в длительной культуре овощных растений / Л. В. Мытько, Л. И. Лукашевич, И. Ф. Хирсанова // *Агрохимия*. – 1989. – № 7. – С. 51–58.
9. Солдатов, В. С. Ионитные субстраты для растений на основе сильнодиссоциирующих ионитов / В. С. Солдатов, О. В. Ионова, С. Ю. Косандрович // *Агрохимия*. – 2015. – № 6. – С. 19–24.
10. Интенсивная культура растений в искусственных условиях / Д. В. Федюкин [и др.]. – Минск: Наука и техника. – 1988. – № 5. – С. 17–21.
11. Chomczynska, M. Possibilities of applications of ion exchange substrates and archebacteria for improvement of plants development on fruitless soils / M. Chomczynska, V.S. Soldatov // *Budownictwo i Architektura*. – 2016. – Vol. 15(3). – P. 91–98.
12. Chomczynska, M. Effect of ion exchange substrate on grass root development and cohesion of sandy soil / M. Chomczynska, V. S. Soldatov, M. Turski // *Int. Agrophysics*. – 2016. – Vol. 30. – P. 293–300.
13. The influence of ion exchange substrates on grass growing in sandy soil / M. Chomczynska [et al.] // *Plant. Nutr. Soil. Sci.* – 2014. – Vol. 177. – P. 438–442.
14. Restoration of degraded soils using ion exchange resins (in Polish) / H. J. Wasag [et al.] // 14 Research Report. Lublin University of Technology. – 2000. – KBN № 3. – T09. – P. 105.

References

1. Soldatov V.S., Peryshkina N.G. and Khoroshko R.P., *Ionitnye pochvy* [Ionite soils], Nauka i tekhnika, Minsk, BY, 1978.
2. Soldatov V.S., Terent'ev N.G. and Peryshkina N.G., "Artificial media for growth of plants based on ion-exchange materials", *Agrokimiya* [Agrochemistry], 1969, no. 2, pp. 101–108.
3. Soldatov V.S., Peryshkina N.G. and Khoroshko R.P., "Methods for obtaining of ion exchange substrates", *Agrokimiya* [Agrochemistry], 1971, no. 11, pp. 103–108.
4. Soldatov V.S., Peryshkina N.G., Khoroshko R.P., Vasil'eva V.F. and Zenchik L.V., "Substrates based different ion exchange materials", *Agrokimiya* [Agrochemistry], 1972, no. 1, pp. 85–90.
5. Peryshkina N.G., Khoroshko R.P., Lukashevich L.I., Soldatov V.S. Makhover A.Z., "On the preparation of ion exchange substrates by different methods", *Agrokimiya* [Agrochemistry], 1977, no. 11, pp. 125–131.
6. Surovaya T.P., Tsyarents'eŭ V.M. and Koshaleva L.L., "Radish growing in the long-term monoculture on the ion exchange soil", *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series], 1971, no. 4, pp. 37–39.
7. Khoroshko R.P., Kol'nenkov V.P., Soldatov V.S., Soldatov N.I., Sudarikova N.I. and Peryshkina N.G., "Calculation and prediction of the ion exchange substrates' mineral composition from ternary and binary equilibria data", *Agrokimiya* [Agrochemistry], 1974, no. 10, pp. 122–129.
8. Myt'ko L.V., Lukashevich L.I. and Khirsanova I.F., "Using ion-exchange substrates in the long term culture of vegetable plants", *Agrokimiya* [Agrochemistry], 1989, no. 7, pp. 51–58.

9. Soldatov V.S., Ionova O.V. and Kosandrovich S.Yu., "Ion exchange substrates for plants based on fully dissociating ion-exchange resins", *Agrokimiya* [Agrochemistry], 2015, no. 6, pp. 19–24.
10. Fedyun'kin D.V., Golovneva N.V., Kosheleva L.A. and Bakhnova K.V., *Intensivnaya kul'tura rastenii v iskusstvennykh usloviyakh* [Intensive culture of plants under artificial conditions], Nauka i tekhnika, Minsk, BY, 1988.
11. Chomczynska M. and Soldatov V.S., "Possibilities of applications of ion exchange substrates and archebacteria for improvement of plants development on fruitless soils", *Budownictwo i Arhitektura*, 2016, vol. 15(3), pp. 91–98.
12. Chomczynska M., Soldatov V.S. and Turski. M., "Effect of ion exchange substrate on grass root development and cohesion of sandy soil", *International Agrophysics*, 2016, vol. 30, pp. 293–300.
13. Chomczynska M., Pristavko S.V., Soldatov V.S. and Wasag H.J., "The influence of ion exchange substrates on grass growing in sandy soil", *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, vol. 177, pp. 438–442.
14. Wasag H.J., Pawlowski L., Soldatov V.S., Szymanska M., Chomczynska M., Kolodynska M., Ostrowski J., Rut B., Skwarek A. and Mlodawska G., "Restoration of degraded soils using ion exchange resins (in Polish)", *14 Research Report. Lublin University of Technology*, 2000, KBN №3, T09, p. 105.

Информация об авторах

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

Косандрович Светлана Юрьевна – мл. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svetlanakos79@yandex.ru.

Ионова Ольга Владимировна – мл. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga.ionova@tut.by.

Information about the authors

Soldatov Vladimir Sergeevich – Academician, Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the laboratory "Of ion exchange and sorption". Institute 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.

Kasandrovich Svetlana Yur'evna – Junior Researcher. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svetlanakos79@yandex.ru.

Ionova Olga Vladimirovna – Junior Researcher. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olga.ionova@tut.by.

Для цитирования

Солдатов, В. С. Получение ионообменных субстратов для растений / В. С. Солдатов, С. Ю. Косандрович, О. В. Ионова // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 1. – С. 7–13.

For citation

Soldatov V. S., Kasandrovich S.Y., Ionova O. V. Preparation of ion exchange substrates for plants. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, chemical series, 2017, no. 1, pp. 7–13.