

УДК 66.081:546.74

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА ПО ОТНОШЕНИЮ К ИОНАМ НИКЕЛЯ

© Т.А. Кузнецова\*, Н.А. Пестов, В.В. Ревин

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, ул. Большевикская, 68, Саранск, 430005 (Россия), e-mail: tatyanaatyana96@yandex.ru*

В работе были исследованы сорбционные свойства целлюлозы, выделенной из свекловичного жома, по отношению к  $Ni^{2+}$ . Растительная целлюлоза из свекловичного жома выделялась методом последовательной кислотной и щелочной экстракции, эффективность которой была оценена методом инфракрасной спектроскопии. Проведенный сорбционный тест показал, что целлюлоза, выделенная из свекловичного жома, основное количество никеля сорбировала в течение 1 ч. Максимальная сорбционная емкость целлюлозы свекловичного жома составляет 5.01 ммоль  $Ni^{2+}$  из расчета на 1 кг сухой целлюлозы свекловичного жома. Эффективность извлечения  $Ni^{2+}$  зависела от исходной концентрации  $Ni^{2+}$  в растворе. Наиболее эффективное извлечение  $Ni^{2+}$  происходило из растворов с концентрацией  $Ni^{2+}$  не более 23.17 мкмоль/л, позволяя достичь степени извлечения этого тяжелого металла 67.9%. Увеличение начальной концентрации  $Ni^{2+}$  в растворе приводила к снижению степени извлечения этого элемента до 18.6%, что указывает на возможность использования целлюлозы свекловичного жома для очистки воды загрязненной соединениями никеля в низкой концентрации. Сравнение эффективности сорбции  $Ni^{2+}$  при разном значении pH показало, что это процесс является pH зависимым и количество сорбированного  $Ni^{2+}$  и степень извлечения  $Ni^{2+}$  целлюлозой свекловичного жома возрастала при увеличении значения pH от 3.0 до 7.0.

*Ключевые слова:* целлюлоза, свекловичный жом, адсорбция, тяжелые металлы, очистка.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-05054/19).*

### Введение

Никель является широко распространенным в природе тяжелым металлом. Он встречается в воде, почве, воздухе и биологических объектах [1]. Этот элемент является необходимым для нормального функционирования растений, многих видов микроорганизмов, животных и человека. Вследствие широкого распространения никеля случаи, когда наблюдаются нарушения из-за недостатка этого элемента, крайне редки. Несмотря на то, что никель в микроколичествах необходим для живых организмов, тем не менее его высокие концентрации оказывают токсическое и канцерогенное действие в зависимости от характера взаимодействия соединений никеля с организмом [1–3]. Так, контакт этого элемента с кожными покровами может приводить к образованию кожных дерматитов [4]. Вдыхание или попадание соединений никеля с пищей или водой повышает риск развития рака легких, носоглотки, предстательной железы [5, 6]. Кроме того, избыток никеля может привести к нарушениям сердечной деятельности, появлению астмы и хронического бронхита [7]. Кроме того, никель был идентифицирован как токсин, который серьезно повреждает репродуктивное здоровье и может привести к бесплодию, выкидышу, врожденным дефектам и дефектам нервной системы [8, 9]. В окружающей среде этот элемент может распространяться из природных источников, но в последние полтора

*Кузнецова Татьяна Андреевна* – магистрант,  
e-mail: tatyanaatyana96@yandex.ru

*Пестов Николай Александрович* – кандидат биологических наук, доцент, e-mail: pestov79@gmail.com

*Ревин Виктор Васильевич* – доктор биологических наук, профессор, e-mail: revinvv2010@yandex.ru

столетия загрязнение окружающей среды соединениями никеля связано с хозяйственной деятельностью человека. Основными антропогенными источниками загрязнения соединениями никеля яв-

\* Автор, с которым следует вести переписку.

ляются рудники, предприятия по переработки металлов, выбросы промышленных предприятий, сточные воды, удобрения, пестициды и автотранспорт. Никель широко применяется для производства коррозионно-стойких сплавов используемых в системах водоснабжения. Коррозия никельсодержащих элементов в системе водоснабжения будет негативно влиять на качество воды и здоровье человека соответственно. В связи с тем, что растворимые соединения никеля являются наиболее токсичными вследствие более высокой их биодоступности, то необходимо проводить очистку воды от этого элемента.

К традиционным методам очистки воды от тяжелых металлов относится химическая коагуляция, электрохимические методы и сорбционные методы очистки. Сорбционные методы очистки являются наиболее экологичными методами, которые, кроме того, позволяют извлекать тяжелые металлы с высокой эффективностью. В качестве сорбентов могут быть использованы материалы природного или искусственного происхождения [10]. К основным требованиям, которые предъявляются к сорбентам, относится их сорбционную емкость, пористость и экономичность. Для снижения стоимости сорбционного метода очистки воды необходим дешевый сорбент, в качестве которого может выступать отход или побочный продукт какого либо производства. К таким сорбентам можно отнести красный шлам [11], образующийся при производстве алюминия, конвертерный шлак [12], шлак доменных печей [13]. Безусловный интерес вызывает использование целлюлозосодержащих материалов в качестве сорбентов ионов тяжелых металлов, поскольку эти сорбенты обладают низкой стоимостью, экологически безопасны и являются возобновляемыми материалами [14]. К целлюлозосодержащему сырью, которое может использоваться для сорбции ионов металлов, относятся опилки, листья, кора лиственных и хвойных пород деревьев, жмых и шрот, свекловичный жом, кожура фруктов, солома, травянистые и водные растения, торф, морские водоросли, биомассы микроорганизмов, а также продукты биосинтеза микроорганизмов [15–18].

Свекловичный жом является побочным продуктом свеклосахарного производства [19]. Основными компонентами свекловичного жома выступает целлюлоза, гемицеллюлоза и пектиновые вещества, на долю которых приходится 20–25, 21–23 и 48–50% соответственно. Только в России заводы по выработке сахара, перерабатывают ежегодно 25–26 млн тонн сахарной свеклы, в свою очередь в процессе производства образуется около 21–22 млн тонн свекловичного жома, который может являться перспективным источником растительной целлюлозы.

Цель настоящей работы – выделение целлюлозы из свекловичного жома и оценка сорбционных свойств выделенной целлюлозы по отношению к  $\text{Ni}^{2+}$ .

### **Экспериментальная часть**

Объектом исследования выступала растительная целлюлоза, выделенная из свекловичного жома методом кислотно-основной экстракции. Для этого брали навеску сырого измельченного жома массой 200 г и помещали в колбу объемом 2000 мл, заливали 1200 мл 0.4 н HCl и выдерживали на электрической плитке 4 ч при 90 °C при постоянном перемешивании с использованием обратного холодильника. Целлюлозу подвергали промывке двадцатикратным объемом дистиллированной воды до достижения pH=5–6. Для удаления липидов и остатка лигнина осадок целлюлозы, полученный в результате кислотной экстракции, подвергали дополнительной щелочной экстракции. Щелочная экстракция проводилась с добавлением 300 мл 0.5% NaOH на водяной бане при температуре 60 °C в течение 1 ч с периодическим перемешиванием. Целлюлозу, полученную после щелочной экстракции, также подвергали промывке дистиллированной водой до достижения pH=5.5. Затем снова проводили кислотный гидролиз с добавлением 400 мл 0.1 н HCl. Кислотный гидролиз или кислотную экстракцию проводили на водяной бане при температуре 80 °C в течение 1 ч также с периодическим перемешиванием. При кислотной экстракции пектин переходил в раствор, осадок содержал целлюлозу. Осадок целлюлозы подвергали трехкратной промывке двадцатикратным объемом дистиллированной воды до достижения pH=5–6. Очищенную целлюлозу из свекловичного жома лиофильно высушивали с помощью Freezezone 12 plus «Labconco» (США) при давлении 0.035 мбар в течение 48 ч. Очищенная целлюлоза свекловичного жома анализировалась методом ИК-спектроскопии на ИК-Фурье спектрофотометре IR Prestige-21 «Shimadzu» (Япония) в диапазоне 400–4000  $\text{cm}^{-1}$  с использованием бромида калия.

Для проведения сорбционного теста 100 мг предварительно гидратированной в течение 12 ч лиофильно высушенной целлюлозы свекловичного жома помещали в 20 мл раствора сульфата никеля (II) гексагидрата с концентрацией  $1.5 \times 10^{-4}$  моль/л. Инкубация проходила при комнатной температуре и постоянном

перемешивании на орбитальном шейкере PSU-20i «Biosan» (Латвия) со скоростью 50 об/мин. Через определенные промежутки времени определяли изменение содержания никеля в растворе методом атомно-адсорбционной спектроскопией с помощью Shimadzu AA-7000 «Shimadzu» (Япония).

Адсорбционную емкость целлюлозы свекловичного жома ( $Q_e$ ) по отношению к  $Ni^{2+}$  вычисляли по следующей формуле:

$$Q_e = (C_1 - C_2) \times V / M,$$

где  $C_1$  – первоначальная концентрация элемента в исходном растворе ммоль/л,  $C_2$  – остаточная концентрация элемента в исходном растворе ммоль/л,  $M$  – вес адсорбента в кг,  $V$  – объем исследуемого раствора в литрах,  $Q_e$  – адсорбционная емкость, ммоль/кг сорбента.

### **Обсуждение результатов**

Свекловичный жом представляет собой побочный продукт свеклосахарного производства, который содержит порядка 40% целлюлозы. Необходимость выделения целлюлозы из свекловичного жома обусловлена тем, что свекловичный жом помимо целлюлозы содержит пектиновые вещества и гемицеллюлозы в количестве до 60% от массы сухих веществ свекловичного жома. Пектиновые вещества и гемицеллюлоза являются легкогидролизуемыми полисахаридами и их присутствие в свекловичном жоме приводит к его быстрой микробиологической порче, что не позволяет использовать свекловичный жом в качестве сорбента тяжелых металлов.

Целлюлозу из свекловичного жома выделяли методом кислотнo-основной экстракции, в ходе которой происходит гидролиз пектиновых веществ и гемицеллюлозы, с последующей тщательной промывкой для удаления низкомолекулярных продуктов гидролиза пектиновых веществ и гемицеллюлозы. Пектиновые вещества состоят из галактуроновой кислоты, которая несет в своем составе карбоксильные группы. Эти группы имеют характерное поглощение в ИК-спектрах, которое позволяет легко их идентифицировать и, соответственно, эти группы могут быть использованы в качестве маркеров присутствия в целлюлозе пектиновых веществ и гемицеллюлозы. Карбоксильные группы поглощают при 1740 и 1633  $cm^{-1}$  [20]. Очищенную целлюлозу из свекловичного жома лиофильно высушивали и анализировали методом ИК-спектроскопии (рис. 1).

В ИК-спектре свекловичного жома присутствует ярко выраженный пик в области 1740  $cm^{-1}$  и плечо при 1633  $cm^{-1}$ , что свидетельствует о высоком содержании пектиновых веществ в свекловичном жоме.

Выделенная целлюлоза свекловичного жома не имеет пик в области 1600  $cm^{-1}$ , тогда как пик в области 1740  $cm^{-1}$  сохраняется, но его интенсивность значительно снижена, что свидетельствует о высокой степени очистки целлюлозы свекловичного жома от пектиновых веществ. В ИК-спектре целлюлозы свекловичного жома имеется широкая полоса поглощения 3000–3600  $cm^{-1}$ , которая соответствует валентным колебаниям гидроксильных групп целлюлозы, участвующих в образовании водородных связей. Широкая и менее интенсивная полоса при 2800–3000  $cm^{-1}$  отвечает валентным колебаниям C–H-связей метиленовых групп целлюлозы. Колебания при 1650  $cm^{-1}$  соответствуют колебаниям связанной с целлюлозой воды. Интенсивные колебания 1000–1047  $cm^{-1}$  относятся к валентным колебаниям связей C–O. Пик в области 1162–1125  $cm^{-1}$  обусловлен C–O–C асимметрическими искривлениями [21]. Сравнение ИК-спектров свекловичного жома и целлюлозы, выделенной из свекловичного жома, позволяет выявить отличия в спектрах поглощения в области 450–900  $cm^{-1}$ , 1200–1300  $cm^{-1}$  и 1400–1500  $cm^{-1}$ . В этих областях ИК-спектра наблюдается снижение интенсивности поглощения, что может быть связано с очисткой целлюлозы от пектиновых веществ и гемицеллюлозы.

Выделенная из свекловичного жома целлюлоза использовалась в сорбционном тесте для определения ее сорбционной емкости по отношению к ионам никеля (рис. 2). Сорбционный тест проходил при комнатной температуре в растворе  $Ni^{2+}$  с концентрацией 111.6 мкмоль/л. Изменение содержания  $Ni^{2+}$  в растворе определяли через 1, 2, 3, 4 и 24 ч. Инкубация целлюлозы свекловичного жома приводила к снижению концентрации  $Ni^{2+}$  в растворе. По истечении 1 ч произошло связывание 4.15 ммоль  $Ni^{2+}$  из расчета на 1 кг целлюлозы, выделенной из свекловичного жома и используемой в качестве сорбента. Максимальная адсорбция никеля целлюлозой свекловичного жома наблюдалась по истечении 4 ч сорбционного теста, достигая значения 5.01 ммоль  $Ni^{2+}$  из расчета на 1 кг целлюлозы, выделенной из свекловичного жома. Максимальная степень извлечения никеля составила 22.4%.

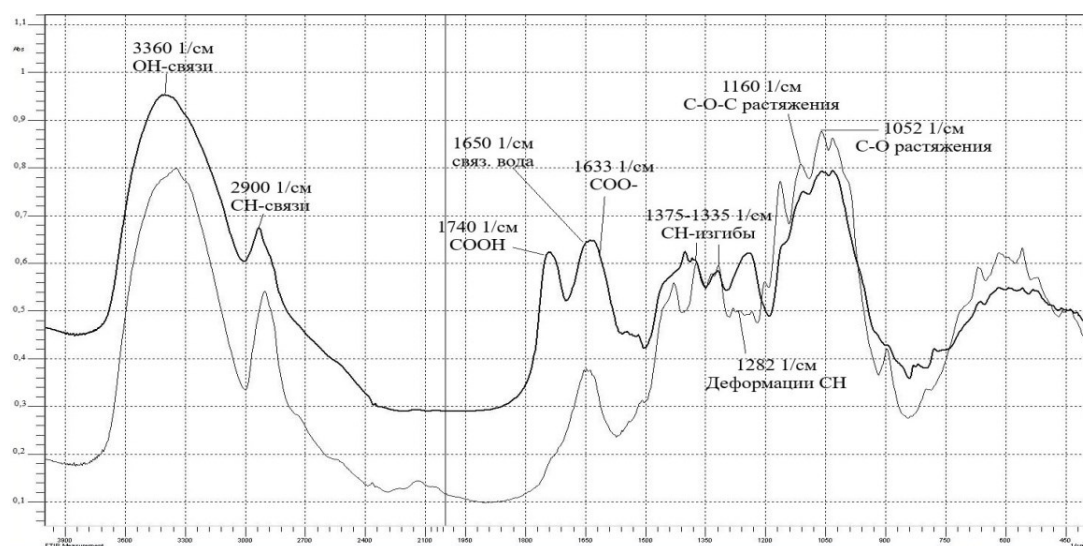


Рис. 1. ИК-спектры свекловичного жома (1) и целлюлозы, выделенной из свекловичного жома (2)

Для определения зависимости количества сорбируемого  $\text{Ni}^{2+}$  растительной целлюлозой, выделенной из свекловичного жома, от концентрации этого элемента в растворе был проведен сорбционный тест с использованием растворов, содержащих  $\text{Ni}^{2+}$  в концентрациях 9.03 мкмоль/л, 23.17 мкмоль/л, 31.01 мкмоль/л, 35.44 мкмоль/л и 52.82 мкмоль/л, которые превышают значение ПДК (0.02 мг/л) для этого элемента в 26.5, 68, 91 и 155 раз соответственно (рис. 3).

Наиболее эффективно  $\text{Ni}^{2+}$  сорбировался целлюлозой свекловичного жома при концентрации этого элемента в растворе 23.17 мкмоль/л, достигая значения 2.9 ммоль/кг сорбента. Степень извлечения  $\text{Ni}^{2+}$  целлюлозой свекловичного жома в этом случае составляла 62.5%. Снижение начальной концентрации  $\text{Ni}^{2+}$  в растворе до 9,03 мкмоль/кг приводило к снижению количества сорбированного  $\text{Ni}^{2+}$  до 1.23 ммоль/кг сорбента. Степень извлечения  $\text{Ni}^{2+}$  целлюлозой свекловичного жома в этом случае составляла 67.9%. Повышение начальной концентрации  $\text{Ni}^{2+}$  до 31.01 мкмоль/л и 35.44 мкмоль/л также приводило к снижению количества сорбированного  $\text{Ni}^{2+}$  до 1.29 мкмоль/кг сорбента и к снижению степени извлечения  $\text{Ni}^{2+}$  до 25.3 и 18.3% соответственно. Дальнейшее увеличение концентрации  $\text{Ni}^{2+}$  в растворе до 52.82 мкмоль/л привело к незначительному увеличению количества сорбированного  $\text{Ni}^{2+}$  до 1.77 мкмоль/кг сорбента, которое было в 1.64 раза ниже максимального количества сорбированного  $\text{Ni}^{2+}$ . Степень извлечения  $\text{Ni}^{2+}$  целлюлозой свекловичного жома в этом случае составляла 16.8%. Таким образом, использование растительной целлюлозы свекловичного жома для очистки воды от  $\text{Ni}^{2+}$  целесообразно только в случае загрязнения воды этим элементом в низкой концентрации.

После проведения сорбционного теста с разной начальной концентрацией  $\text{Ni}^{2+}$  растительная целлюлоза из свекловичного жома была проанализирована методом ИК-спектроскопии в диапазоне 400–4000  $\text{cm}^{-1}$  (рис. 4).

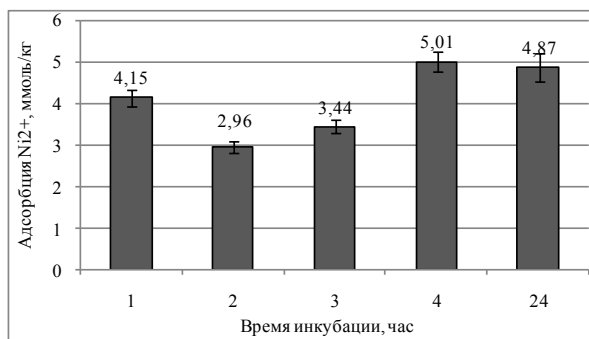


Рис. 2. Адсорбционная емкость целлюлозы свекловичного жома по отношению к ионам  $\text{Ni}^{2+}$

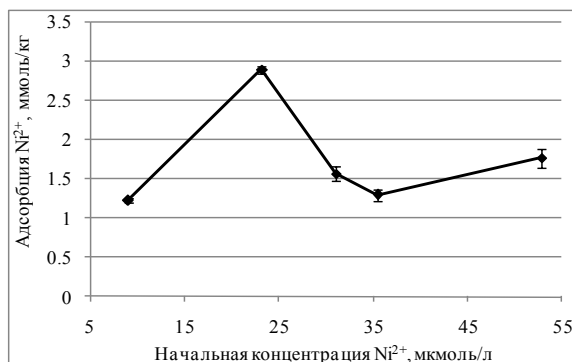


Рис. 3. Эффективность адсорбции  $\text{Ni}^{2+}$  целлюлозой из свекловичного жома в зависимости от начальной концентрации  $\text{Ni}^{2+}$  в растворе

В области  $400\text{--}2700\text{ см}^{-1}$  не были обнаружены какие-либо изменения в ИК-спектрах поглощения целлюлозы. В области  $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ , которая соответствует валентным колебаниям гидроксильных групп, участвующих в образовании межмолекулярных и внутримолекулярных водородных связей, наблюдалось изменение интенсивности поглощения. Снижение площади пика в области  $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$  после проведения сорбционного теста в присутствии  $\text{Ni}^{2+}$  в концентрации  $9.03\text{ мкмоль/л}$  (2),  $35.44\text{ мкмоль/л}$  (3) и  $52.82\text{ мкмоль/л}$  составило  $35.49\%$ ,  $38.28\%$  и  $41.82\%$  соответственно. Произошло также изменение интенсивность поглощения при  $2880\text{ см}^{-1}$ , которое отвечает валентным колебаниям C–H-связей метиленовых групп целлюлозы. Растительная целлюлоза, выделенная из свекловичного жома, по своему химическому строению представляет собой полисахарид, состоящий из остатков глюкозы, связанных  $\beta$  1-4 гликозидными связями. Таким образом, целлюлоза в качестве функциональных групп содержит только гидроксильные группы, которые не способны связывать ионы металлов ионным обменом. Однако известно, что полисахариды могут связывать ионы тяжелых металлов, посредством формирования координационных связей, участвуя тем самым в выполнении ряда биологических функций [22–24]. Формирование координационных связей с металлом происходит с участием гидроксильных групп целлюлозы, что в свою очередь должно приводить к перестройке системы водородных связей в этом полимере. Это в свою очередь могло отразиться на интенсивности поглощения в области  $3200\text{--}3600$  и  $2880\text{ см}^{-1}$ , что и наблюдалось на ИК-спектрах целлюлозы после сорбционного теста.

Для определения влияния pH на эффективность сорбции  $\text{Ni}^{2+}$  целлюлозой свекловичного жома использовались значения  $3.0$ ,  $5.0$  и  $7.0$  (рис. 5). В этом сорбционном тесте, который проводился в течение 24 ч, использовался раствор  $\text{Ni}^{2+}$  с начальной концентрацией  $23.17\text{ мкмоль/л}$  в связи с тем, что эта концентрация позволяла добиться высокой степени извлечения  $\text{Ni}^{2+}$  из раствора. Значения pH более  $7.0$  не использовались, так как в щелочных условиях происходит образование нерастворимого гидроксида никеля, хлопья которого хорошо видны в растворе.

Образование нерастворимой формы никеля (II) в виде гидроксида никеля не позволяет извлечь  $\text{Ni}^{2+}$  посредством сорбции с помощью целлюлозы свекловичного жома. При значении  $\text{pH}=3.0$  наблюдалась минимальная сорбция  $\text{Ni}^{2+}$ , которая составляла  $0.88\text{ ммоль/кг}$  сорбента. Степень извлечения  $\text{Ni}^{2+}$  целлюлозой свекловичного жома при данном значении pH составила  $18.3\%$ . Увеличение значения pH до  $5.0$  приводило к увеличению количества сорбированного  $\text{Ni}^{2+}$  до  $2.05\text{ ммоль/кг}$  сорбента. Степень извлечения  $\text{Ni}^{2+}$  целлюлозой свекловичного жома при значении pH  $5.0$  составила  $48.5\%$ . Увеличение значения pH до  $7.0$  приводило к увеличению количества сорбированного  $\text{Ni}^{2+}$  до  $2.17\text{ ммоль/кг}$  сорбента. Степень извлечения  $\text{Ni}^{2+}$  целлюлозой свекловичного жома при значении pH  $7.0$  достигала  $52.1\%$ .

Из полученных результатов следует, что целлюлоза свекловичного жома имеет невысокую сорбционную емкость по отношению к ионам  $\text{Ni}^{2+}$ , что, несомненно, накладывает ограничения на ее использование в качестве сорбента тяжелых металлов и требует проведения

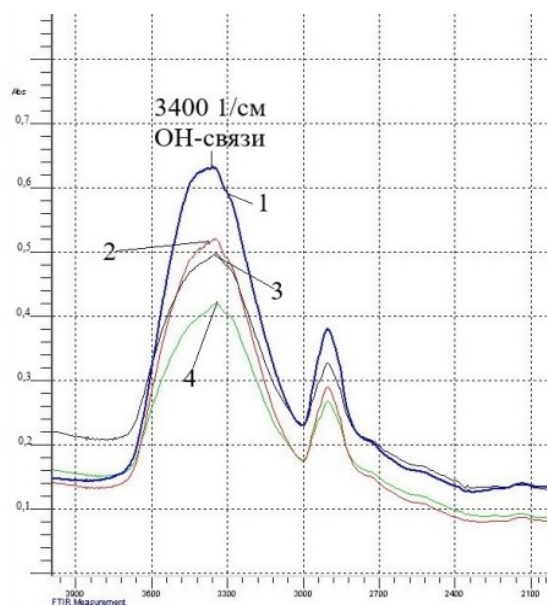


Рис. 4. Изменение ИК-спектров в области  $3000\text{--}3600\text{ см}^{-1}$  у целлюлозы свекловичного жома после проведения сорбционного теста с использованием растворов, содержащих  $\text{Ni}^{2+}$  в концентрации  $0\text{ мкмоль/л}$  (1),  $9.03\text{ мкмоль/л}$  (2),  $35.44\text{ мкмоль/л}$  (3) и  $52.82\text{ мкмоль/л}$  (4)

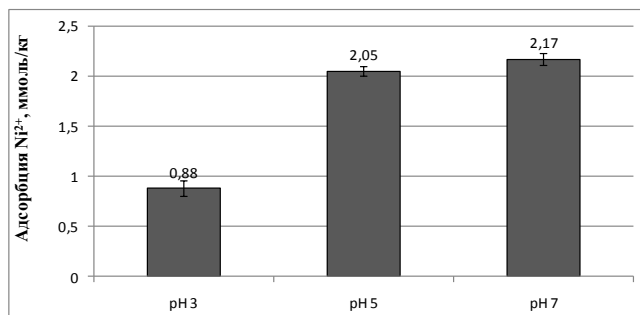


Рис. 5. Влияние значения pH на эффективность сорбции  $\text{Ni}^{2+}$  целлюлозой свекловичного жома

ее дополнительной модификации с целью повышения сорбционной емкости. С этой точки зрения использование свекловичного жома, содержащего пектиновые вещества, имеющие карбоксильные группы, выглядит более логичным. Но свекловичный жом является быстропортящимся продуктом и в связи с этим он должен быть переработан в течение нескольких дней. Такой переработкой может быть выделение из него пектиновых веществ и целлюлозы. Пектиновые вещества могут найти применение в пищевой и фармацевтической промышленности. Целлюлоза свекловичного жома также может найти применение в самых разнообразных областях, в том числе и в качестве сорбента тяжелых металлов [25].

### **Выводы**

Выделенная целлюлоза из свекловичного жома может выступать в качестве экологически безопасного сорбента для извлечения ионов никеля (II) из водных растворов. Максимальная сорбционная емкость целлюлозы свекловичного жома составляет 5.01 ммоль  $\text{Ni}^{2+}$  из расчета на 1 кг сухой целлюлозы свекловичного жома. Сорбционный тест, проводимый в течение 24 ч, показал, что основное количество никеля связывалось в течение первого часа сорбционного теста. Эффективность извлечения  $\text{Ni}^{2+}$  зависела от исходной концентрации  $\text{Ni}^{2+}$  в растворе. Наиболее эффективное извлечение  $\text{Ni}^{2+}$  происходило из растворов с концентрацией  $\text{Ni}^{2+}$  не более 23.17 мкмоль/л, позволяя достичь степени извлечения этого тяжелого металла 67.9%. Сравнение эффективности сорбции  $\text{Ni}^{2+}$  при разном значении pH показало, что это процесс является pH зависимым и наибольшая сорбционная емкость у целлюлозы свекловичного жома наблюдалась при значении pH 7.0.

### **Список литературы**

1. Gautam R.K., Sharma S.K., Mahiya S., Chattopadhyaya M.C. Heavy Metals In Water: Presence, Removal and Safety. UK: The Royal Society of Chemistry, 2014. 24 p. DOI: 10.1039/9781782620174-00001.
2. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation // ISRN Ecology. 2011. Vol. 2011. Pp. 1–20. DOI:10.5402/2011/402647.
3. Arora S., Jain C.K., Lokhande R.S. Review of heavy metal contamination in soil // International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources. 2017. Vol. 3. N5. Pp. 001–006. DOI: 10.19080/IJESNR.2017.03.555625.
4. Menné T. Quantitative aspects of nickel dermatitis. Sensitization and eliciting threshold concentrations // Science of The Total Environment. 1994. Vol. 148. N2–3. Pp. 275–281.
5. Shen H.M., Zhang Q.F. Risk assessment of nickel carcinogenicity and occupational lung cancer // Environ Health Perspect. 1994. Vol. 102. N1. Pp. 275–282. DOI: 10.1289/ehp.94102s1275.
6. Canaz E., Kilinc M., Sayar H., Kiran G., Ozyureke E. Lead, selenium and nickel concentrations in epithelial ovarian cancer, borderline ovarian tumor and healthy ovarian tissues // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 2017. Vol. 43. Pp. 217–223. DOI: 10.1016/j.jtemb.2017.05.003.
7. Zambelli B., Uversky V.N., Ciurli S. Nickel impact on human health: An intrinsic disorder perspective // Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Proteins and Proteomics. 2016. Vol. 1864. N12. Pp. 1714–1731. DOI: 10.1016/j.bbapap.2016.09.008.
8. Forgacs Z., Massányi P., Lukac N., Somosy Z. Reproductive toxicology of nickel – review // J. Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. 2012. Vol. 47. N9. Pp. 1249–1260. DOI: 10.1080/10934529.2012.672114.
9. Apostoli P., Catalani S. Metal ions affecting reproduction and development // Met Ions Life Sci. 2011. Vol. 8. Pp. 263–303. DOI: 10.1039/9781849732116-00263.
10. Barragán-Peña P., Macedo-Miranda M.G. Sorption of heavy metals with natural adsorbents: a review // Open Access Journal of Toxicology. 2018. Vol. 3. N1. Pp. 001–003. DOI: 10.19080/OAJT.2018.03.555602.
11. Radjenovic A., Malina J., Štrkalj A. Removal of Ni (II) from aqueous solution by low-cost adsorbents // The Holistic Approach to Environment. 2011. Vol. 1. N3. Pp. 109–120.
12. Ortiz N.M., Pires M.A.F., Bressian J.C. Use of steel converter slag as nickel adsorbent to wastewater treatment // Waste management. 2001. Vol. 21. Pp. 631–635. DOI: 10.1016/S0956-053X(00)00123-9.
13. Tyler G., Balsberg Pahlsson A.-M., Bengtsson G., Baath E., Tranvik L. Heavy metal ecology of terrestrial plant, microorganisms and invertebrates // Water Air Soil Pollute. 1989. Vol. 47. N3–4. Pp. 189–215.
14. Nikiforova T.E., Kozlov V.A. Specific features of sorption of heavy metal ions by a cellulose-containing sorbent from aqueous media // Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. Vol. 83. N10. Pp. 1781–1784. DOI: 10.1134/S1070427210100095.
15. Chauhan S. Use of cellulose and its derivatives for metal ion sorption // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2016. Vol. 8. N4. Pp. 416–420.
16. Krishna R.H., Gilbert W.B. Biosorption of Ni (II) from aqueous solution using Acer saccharum leaves (ASL) as a potential sorbent // International Journal of Advanced Chemistry. 2014. Vol. 2. N1. Pp. 1–5. DOI: 10.14419/ijac.v2i1.1531.

17. Anastopoulos I., Bhatnagar A., Hameed B.H., Ok Y.S., Omirou M. A review on waste-derived adsorbents from sugar industry for pollutant removal in water and wastewater // *Journal of Molecular Liquids*. 2017. Vol. 240. Pp. 179–188. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.05.063.
18. Kumar R., Sharma R.Kr., Singh A.P. Cellulose based grafted biosorbents – Journey from lignocellulose biomass to toxic metal ions sorption applications – A review // *Journal of Molecular Liquids*. 2017. Vol. 232. Pp. 62–93. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.02.050.
19. Berłowska J., Pielech-Przybylska K., Balcerek M., Dziekońska-Kubczak U., Patelski P., Dziugan P., Kręgiel D. Simultaneous saccharification and fermentation of sugar beet pulp for efficient bioethanol production // *BioMed Research International*. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2016/3154929.
20. Synytsya A., Copırkovara J., Matejkab P., Machovicc V. Fourier transform Raman and infrared spectroscopy of pectins // *Carbohydrate Polymers*. 2003. Vol. 54. Pp. 97–106. DOI: 10.1016/S0144-8617(03)00158-9.
21. Oh S.Y., Yoo D.I., Shin Y., Seo G. FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide // *Carbohydrate Research*. 2005. Vol. 340. N3. Pp. 417–428. DOI: 10.1016/j.carres.2004.11.027.
22. Hu H., Xue J., Wen X., Li W., Zhang C., Yang L., Xu Y., Zhao G., Bu X., Liu K., Chen J., Wu J. Sugar-metal ion interactions: the complicated coordination structures of cesium ion with d-ribose and myo-inositol // *Inorg. Chem*. 2013. Vol. 52. Pp. 13132–13145. DOI: 10.1021/ic402027j.
23. Alekseev Yu.E., Garnovskii A.D., Zhdanov Yu.A. Complexes of natural carbohydrates with metal cations // *Russian Chemical Reviews*. 1998. Vol. 67. N8. Pp. 649–669. DOI: 10.1070/RC1998v067n08ABEH000343.
24. Gyurcsik B., Nagy L. Carbohydrates as ligands: coordination equilibria and structure of the metal complexes // *Coordination Chemistry Reviews*. 2000. Vol. 203. Pp. 81–149. DOI: 10.1016/S0010-8545(99)00183-6.
25. Ummartyotin S., Manuspiya H. A critical review on cellulose: From fundamental to an approach on sensor technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 41. Pp. 402–412. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.050.

*Поступила в редакцию 9 октября 2019 г.*

*После переработки 22 ноября 2019 г.*

*Принята к публикации 5 декабря 2019 г.*

**Для цитирования:** Кузнецова Т.А., Пестов Н.А., Ревин В.В. Исследование сорбционных свойств целлюлозы свекловичного жома по отношению к ионам никеля // *Химия растительного сырья*. 2020. №2. С. 307–314. DOI: 10.14258/jcrpm.2020026573.

*Kuznetsova T.A.\**, *Pestov N.A.*, *Revin V.V.* STUDY OF THE ADSORPTION PROPERTIES OF PLANT CELLULOSE WITH RESPECT TO NICKEL IONS

*National Research Ogarev Mordovia State University, ul. Bol'shevistskaya, 68, Saransk, 430032 (Russia), e-mail: tatyanaatayana96@yandex.ru*

In this paper, we studied the sorption properties of cellulose isolated from sugar beet pulp in relation to Ni<sup>2+</sup>. Plant cellulose from sugar beet pulp was isolated by successive acid and alkaline extraction, the effectiveness of which was evaluated by infrared spectroscopy. The sorption test showed that cellulose extracted from sugar beet pulp sorbed the main amount of Ni<sup>2+</sup> within 1 hour. The maximum sorption capacity of cellulose from beet pulp pulp was 5.01 mmol Ni<sup>2+</sup> per 1 kg of dry cellulose from pulp beet pulp. The amount of sorbed Ni<sup>2+</sup> depended on the initial Ni<sup>2+</sup> concentration in the solution. The most effective recovery of Ni<sup>2+</sup> occurred from solutions with a Ni<sup>2+</sup> concentration no more than 23.17 μmol/l, allowing to achieve a degree of recovery of this heavy metal of 67.9%. An increase in the initial concentration of Ni<sup>2+</sup> in the solution resulted in a reduction in the degree of recovery of this element to 18.6%, which indicates the feasibility of using cellulose from sugar beet pulp for purification of water contaminated with nickel compounds in low concentrations. Comparison of the efficiency of Ni<sup>2+</sup> sorption at different pH values showed that this process is pH dependent and the amount of sorbed Ni<sup>2+</sup> and the degree of recovery of Ni<sup>2+</sup> by cellulose from sugar beet pulp increased with increasing of pH values from 3.0 to 7.0.

*Keywords:* cellulose, beet pulp, adsorption, desorption, heavy metals, cleaning.

---

\* Corresponding author.

**References**

1. Gautam R.K., Sharma S.K., Mahiya S., Chattopadhyaya M.C. *Heavy Metals In Water: Presence, Removal and Safety*. UK: The Royal Society of Chemistry, 2014, 24 p. DOI: 10.1039/9781782620174-00001.
2. Wuana R.A., Okieimen F.E. *ISRN Ecology*, 2011, vol. 2011, pp. 1–20. DOI:10.5402/2011/402647.
3. Arora S., Jain C.K., Lokhande R.S. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 2017, vol. 3, no. 5, pp. 001–006. DOI: 10.19080/IJESNR.2017.03.555625.
4. Menné T. *Science of The Total Environment*, 1994, vol. 148, no. 2–3, pp. 275–281.
5. Shen H.M., Zhang Q.F. *Environ Health Perspect*, 1994, vol. 102, no. 1, pp. 275–282. DOI: 10.1289/ehp.94102s1275.
6. Canaz E., Kilinc M., Sayar H., Kiran G., Ozyureke E. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2017, vol. 43, pp. 217–223. DOI: 10.1016/j.jtemb.2017.05.003.
7. Zambelli B., Uversky V.N., Ciurli S. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Proteins and Proteomics*, 2016, vol. 1864, no. 12, pp. 1714–1731. DOI: 10.1016/j.bbapap.2016.09.008.
8. Forgacs Z., Massányi P., Lukac N., Somosy Z. *J. Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.*, 2012, vol. 47, no. 9, pp. 1249–1260. DOI: 10.1080/10934529.2012.672114.
9. Apostoli P., Catalani S. *Met Ions Life Sci.*, 2011, vol. 8, pp. 263–303. DOI: 10.1039/9781849732116-00263.
10. Barragán-Peña P., Macedo-Miranda M.G. *Open Access Journal of Toxicology*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 001–003. DOI: 10.19080/OAJT.2018.03.555602.
11. Radjenovic A., Malina J., Štrkalj A. *The Holistic Approach to Environment*, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 109–120.
12. Ortiz N.M., Pires M.A.F., Bressian J.C. *Waste management*, 2001, vol. 21, pp. 631–635. DOI: 10.1016/S0956-053X(00)00123-9.
13. Tyler G., Balsberg Pahlsson A.-M., Bengtsson G., Baath E., Tranvik L. *Water Air Soil Pollute*, 1989, vol. 47, no. 3–4, pp. 189–215.
14. Nikiforova T.E., Kozlov V.A. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2010, vol. 83, no. 10, pp. 1781–1784. DOI: 10.1134/S1070427210100095.
15. Chauhan S. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 416–420.
16. Krishna R.H., Gilbert W.B. *International Journal of Advanced Chemistry*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 1–5. DOI: 10.14419/ijac.v2i1.1531.
17. Anastopoulos I., Bhatnagar A., Hameed B.H., Ok Y.S., Omirou M. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, vol. 240, pp. 179–188. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.05.063.
18. Kumar R., Sharma R.Kr., Singh A.P. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, vol. 232, pp. 62–93. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.02.050.
19. Berłowska J., Pielech-Przybylska K., Balcerk M., Dziekońska-Kubczak U., Patelski P., Dziugan P., Kręgiel D. *BioMed Research International*, 2016, vol. 2016, pp. 1–10. DOI: 10.1155/2016/3154929.
20. Synytsyaa A., Copirkovara J., Matejkab P., Machovicc V. *Carbohydrate Polymers*, 2003, vol. 54, pp. 97–106. DOI: 10.1016/S0144-8617(03)00158-9.
21. Oh S.Y., Yoo D.I., Shin Y., Seo G. *Carbohydrate Research*, 2005, vol. 340, no. 3, pp. 417–428. DOI: 10.1016/j.carres.2004.11.027.
22. Hu H., Xue J., Wen X., Li W., Zhang C., Yang L., Xu Y., Zhao G., Bu X., Liu K., Chen J., Wu J. *Inorg. Chem.*, 2013, vol. 52, pp. 13132–13145. DOI: 10.1021/ic402027j.
23. Alekseev Yu.E., Garnovskii A.D., Zhdanov Yu.A. *Russian Chemical Reviews*, 1998, vol. 67, no. 8, pp. 649–669. DOI: 10.1070/RC1998v067n08ABEH000343.
24. Gyurcsik B., Nagy L. *Coordination Chemistry Reviews*, 2000, vol. 203, pp. 81–149. DOI: 10.1016/S0010-8545(99)00183-6.
25. Ummartyotin S., Manuspiya H. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 41, pp. 402–412. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.050.

Received October 9, 2019

Revised November 22, 2019

Accepted December 5, 2019

**For citing:** Kuznetsova T.A., Pestov N.A., Revin V.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 2, pp. 307–314. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcpm.2020026573.