

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i6.02>

Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions by sorption with activated carbon. Review

B.K. Kenzhaliyev, S.S. Temirova, D.E. Fisher, Zh.A. Baltabekova*

Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: zh.baltabekova@satbayev.university

Abstract. The article considers sources of hexavalent chromium in the environment, its toxicity, methods of removal, main adsorbents used for Cr(VI) removal, obtaining of carbon sorbents using different raw materials. The interpretation of the mechanism of Cr(VI) removal is given. Chromium is widely used in many industries, which results in the generation of a large amount of hazardous waste - wastewater from steel, metalworking, electroplating, tanning, automotive, paint, paper-pulp and textile plants. Chromium is one of the most dangerous inorganic pollutants because of its carcinogenic effects on biological species. In aquatic environments, chromium usually exists in the trivalent Cr(III) or hexavalent Cr(VI) state. Hexavalent chromium ions in aqueous media are highly toxic even in small amounts, and their removal from solution poses a serious wastewater treatment problem. Methods such as adsorption ion exchange, membrane separation, coagulation, chemical precipitation, extraction and electrochemical separation can remove hexavalent chromium from wastewater. Adsorption is considered to be the most efficient, economically feasible, environmentally sustainable and technologically promising process. Among adsorbents of different nature, activated carbon is the most widely used. Wood is the most common source of activated carbon but given the importance of wood in maintaining the ecosystem, alternative sources of activated carbon production are being sought. Activated carbon is produced from various materials by high temperature carbonization. Activated carbon materials have high specific surface area and developed porous structure. The micropores in activated carbon account for the physical adsorption of chromium ions. The presence of functional groups containing O and N in activated carbon affects the chemical structure and the process of chemical sorption.

Keywords: *environmental systems, hexavalent chromium, removal, sorption, activated carbon.*

1. Введение

Загрязнение окружающей среды вследствие интенсивного технологического развития и недостаточности экологических ограничений является одной из наиболее важных проблем в современном мире.

Тяжелые металлы являются основными загрязнителями водных ресурсов, так как часто присутствуют в промышленных сточных водах.

Хром, один из распространенных тяжелых металлов, в основном используется для производства феррохромовых и ферромарганцевых сплавов. Хром проникает в различные экологические системы (воздух, вода, почва и т.д.) в результате производственной деятельности: металлургия, переработка нефти, нанесение гальванических покрытий, дубление, производство аккумуляторов, текстиля и красителей [1-3]. В целом, содержание хрома в подземных водах достаточно низкое (ниже 2 мг/л), в то же время выявлены концентрации до 120 мг/л [4-6].

Соединения Cr³⁺ и Cr⁶⁺ представляют собой распространенные и стабильные образования. При этом именно соединения шестивалентного хрома – одни из наиболее опасных для живых организмов веществ даже при низких их концентрациях в воде.

Они способны проникать через клеточную мембрану за счет структурного подобия с сульфатами и реагиро-

вать с внутриклеточным материалом, взаимодействовать с ДНК. Эти вещества имеют выраженный канцерогенный и ряд других токсических эффектов [7-10].

Из-за высокой токсичности иона Cr⁶⁺ необходимы меры по снижению его концентрации до приемлемого уровня перед сбросом в водную среду. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения, максимально допустимая концентрация хрома в питьевой воде составляет 0.05 мг/л (стандарт качества питьевой воды) [11, 12]. Допустимый предел содержания Cr⁶⁺ при сбросе в поверхностные воды составляет 0.2 мг/л в соответствии со стандартом промышленных сточных вод [11, 12].

В природных условиях адсорбция Cr⁶⁺ обычно уменьшается с увеличением pH [13]. Соединения Fe²⁺, Mn²⁺, некоторые органические соединения с сульфгидрильными группами и сульфиды могут эффективно восстанавливать Cr⁶⁺. Отмечено также, что Cr³⁺ быстро окисляется MnO₂ и постепенно кислородом воздуха.

С целью описания геохимических процессов, приводящих к восстановлению шестивалентного хрома в природных водах, была изучена реакция Cr⁶⁺ с Fe²⁺ в зависимости от pH и температуры [14]. Отмечено, скорость процесса зависит от реакционной способности и концентрации каждой разновидности Fe²⁺, присутствующей в растворе: Fe²⁺, FeOH⁺ и Fe(OH)₂. Исходя из полученных результатов сделан вывод, что восстановление Cr⁶⁺ про-

исходит в течение времени от минут до месяцев в Fe^{2+} -содержащих отложениях, почвах и водах.

Миграция соединений, содержащих ионы Cr^{3+} и Cr^{6+} , зависит от pH, наличия окислительных или восстановительных соединений, кинетики окислительно-восстановительных реакций, образования комплексов Cr^{3+} или нерастворимых солей Cr^{3+} , а также общей концентрации Cr [15]. Соли Cr^{6+} более растворимы, чем соли Cr^{3+} , что делает Cr^{6+} умеренно подвижными [16].

Cr^{6+} существует в растворе в виде мономерных ионов: H_2CrO_4 , HCrO_4^- и CrO_4^{2-} ; или в виде димерного иона $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (дихромат существует в кислом растворе) [17]. Ион HCrO_4^- преобладает в диапазоне pH от одного до шести, CrO_4^{2-} является единственным ионом, присутствующим при pH раствора выше 7 (рисунок 1). Хроматная и дихроматная формы Cr^{6+} (CrO_4^{2-} , HCrO_4^- и $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) обладают сильными окислительными свойствами и высокой растворимостью [17].

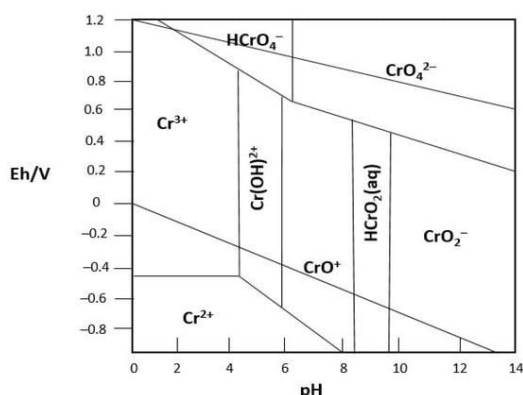


Рисунок 1. Диаграмма Пурбе для ионов Cr в водном растворе [17]

Наиболее часто используемые методы удаления Cr^{6+} из сточных вод включают восстановление [17, 18], осаждение [19], мембранную фильтрацию [20], биоредукцию и биосорбцию [21–24], ионный обмен [25] и адсорбцию [26–31].

Изучен процесс удаления хрома из сточных вод гальванического производства с использованием процесса электрохимического осаждения [19]. Гальванические сточные воды содержали Cr^{6+} в количестве 215–3860 мг/л, pH их составлял 1.5. При оптимальных условиях процесса: электрический потенциал 75 В, продолжительность 50 мин., начальный pH 3.2 остаточная концентрация Cr^{6+} в стоках составила менее 0.2 мг/л. Анализ осадка показал образование Fe_2O_3 и FeCr_2O_4 в качестве основных продуктов.

В процессе хромового дубления от 20 до 40% используемого хрома обычно попадает в сбросовые воды и оказывает вредное воздействие на окружающую среду [20]. Анализ отработанных хромовых стоков показал, что концентрация хрома находится в пределах 1300–2500 мг Cr^{6+} /л. Проведены испытания по удалению хрома с использованием опытно-промышленной мембранной установки обратного осмоса. Установлено, что мембранный метод позволяет эффективно отделять хром из сточных вод кожевенного производства.

Метод адсорбции с использованием активированного угля является одним из доступных процессов обработки отходов шестивалентного хрома. Активированный уголь

широко используется для удаления тяжелых металлов из водных систем благодаря его высокой пористости, большой площади поверхности, повышенной поглощающей способности и высокой устойчивости к термическим и химическим воздействиям.

Сорбционное удаление ионов шестивалентного хрома из водных растворов активированным углем

Адсорбция является наиболее часто используемым методом удаления тяжелых металлов из водных растворов из-за простоты эксплуатации, низкой стоимости и высокой эффективности.

В статье [32] обсуждаются источники шестивалентного хрома в природной среде, механизм удаления хрома, классификация адсорбентов и их характеристики, тенденции в синтезе и приготовлении адсорбентов. Для удаления Cr(VI) из водных растворов были исследованы адсорбенты различной природы: синтетические полимеры, активированный уголь, оксид графена, углеродные нанотрубки, биосорбенты, хитин, целлюлоза, материалы на основе мезопористого кремнезема, глинистые минералы. Большинство адсорбентов для повышения их прочностных характеристик и селективности сорбции подвергают модификации.

Отмечается, что адсорбция Cr(VI) осуществляется не только благодаря электростатическому притяжению, Cr(VI) является сильным окислителем, способным к превращению в Cr(III). Восстановление Cr(VI) до Cr(III) может происходить за счет атомов O, N и S (доноров электронов), присутствующих в большинстве адсорбентов. На механизм удаления Cr(VI) также влияют химический состав поверхности и физические свойства сорбционных материалов. Отмечается, что большинство адсорбентов используются в модифицированном виде.

В обзоре [33] представлен сравнительный анализ существующих технологий удаления шестивалентного хрома из водных растворов. Рассмотрены различные способы очистки сточных вод от хрома: адсорбция, электрохимическая обработка, физико-химические методы и биологическое удаление Cr^{3+} и Cr^{6+} из воды с учетом влияния pH, начальной концентрации Cr, температуры. Описаны преимущества и недостатки различных методов. Сделан вывод, что выбор наиболее подходящей технологии очистки зависит от исходной концентрации хрома, характеристик сточных вод и эксплуатационных затрат.

В работе [34] для удаления хрома (VI) из раствора использовали несколько активированных углей в порошкообразной и гранулированной форме, приготовленных из различного сырья и полученных разными способами активации. Проведен анализ влияния pH, концентрации исходного Cr(VI) и времени контакта углерода с раствором на эффективность сорбции Cr(VI) активированным углем. Количество удерживаемого Cr(VI) увеличивалось с повышением pH и начальной концентрации Cr(VI). Было обнаружено, что при $\text{pH} < 1$ на удерживание Cr(VI) активированным углем влияет его восстановление до Cr(III), при этом чем ниже pH, тем легче происходит процесс восстановления.

Степень адсорбции и восстановления зависит от пористости текстуры, природы и процедуры приготовления активированного угля, наилучшие результаты достигаются при использовании угля, полученного путем физической активации.

Полученный из угля активированный уголь с большой площадью поверхности ($3452.8 \text{ м}^2/\text{г}$) исследован на эффективность удаления ионов Cr(VI) из воды [35]. Максимальное поглощение 194 мг/г ионов Cr(VI) достигалось в кислой среде. Большие значения отрицательной энергии адсорбции свидетельствуют об энергетически выгодной хемосорбционной природе процесса и наличии водородных связей (слабых сил Ван-дер Ваальса).

В работе [36] путем контроля фазового превращения хрома в гидротермальных условиях Cr(VI) был полностью извлечен из опасного хромсодержащего гипсового шлама с очень высокой эффективностью – более 99.5% (рисунок 2).

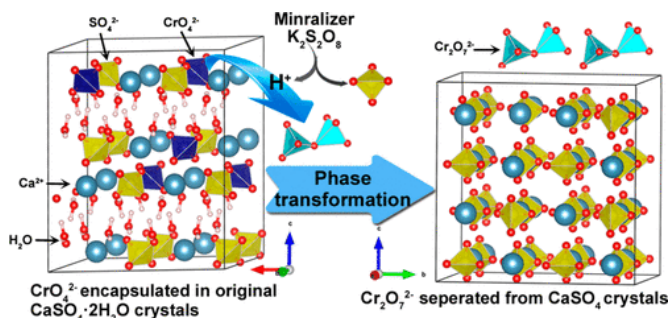


Рисунок 2. Трансформация ионов Cr⁶⁺ при фазовых превращениях хромсодержащего гипса [36]

С применением комплекса физико-химических методов установлено, что растворение-перекристаллизация CaSO₄·2H₂O в CaSO₄ является ключевым фактором для полного высвобождения, инкапсулированного Cr(VI). В кислой среде выделившийся ион CrO₄²⁻ трансформировался в ион Cr₂O₇²⁻, менее похожий по структуре на SO₄²⁻, что препятствовало рекомбинации выделившегося иона с гипсом (рисунок 3). При этом создавались условия для роста кристаллов сульфата кальция и улучшения экстракции Cr(VI).

Для улучшения сорбционных характеристик углеродных адсорбентов (функциональности, реакционной способности, создания активных центров) проводится химическая модификация их поверхности [37, 38].

В работе [39] свежий активированный уголь и обработанный активированный уголь предварительно обрабатывали серной и азотной кислотой при нагревании. Определено влияние температуры, скорости перемешивания и pH для выбора оптимальных условий. Максимальная адсорбционная емкость адсорбентов, обработанных серной и азотной кислотой, рассчитанная по изотерме Ленгмюра, составляет 7.485 и 10.929 мг/г , соответственно. Было обнаружено, что оптимальная скорость перемешивания, температура и pH составляют 220 об/мин , 38°C и 2.0 соответственно. Установлено, что адсорбент, модифицированный азотной кислотой, обладает большей способностью удалять Cr(VI), чем адсорбент, модифицированный серной кислотой.

Целью исследования [40] являлось сравнение эффективности 2 активированных углей, полученных из древесины: один был приготовлен с последующей обработкой KOH, другой – коммерческий активированный уголь Acticarbon CXV получали путем активации H₃PO₄. Показано, что KOH-активированный уголь является микропористым с большой площадью поверхности пор, кис-

лотно-активированный уголь имеет более мезопористую структуру. Адсорбция Cr(VI) максимальна при самых низких значениях pH (pH3) и увеличивается с температурой для обоих адсорбентов. KOH-активированный уголь демонстрирует более высокую способность к адсорбции Cr(VI), чем уголь Acticarbon CXV.

Изучена адсорбция ионов Cr(III) и Cr(VI) на образцах гранулированных активированных углей из водных растворов в диапазоне концентраций $20\text{--}1000 \text{ мг/л}$ [41]. Определены изотермы адсорбции после модификации поверхности активированного угля различными окислителями: азотной кислотой, персульфатом аммония, пероксидом водорода и газообразным кислородом при 350°C и после дегазации при различных температурах.

Увеличение концентрации Cr(III) и уменьшение Cr(VI) при окислении, а также уменьшение содержания Cr(III) и увеличение Cr(VI) при дегазации объясняются тем, что окисление углеродной поверхности усиливает количество кислых углерод-кислородных поверхностных групп, при дегазации эти поверхностные группы удаляются. Таким образом, наличие кислотных поверхностных групп усиливает адсорбцию катионов Cr(III) и подавляет адсорбцию анионов Cr(VI).

Цель исследования [42] состояла в оценке эффективности адсорбента, полученного из местного бурого угля, обработанного 4 M соляной кислотой. Результаты показывают, что модифицированный бурый эфиопский уголь является хорошим адсорбентом: удаление Cr(VI) достигало 98% при дозировках 3.5 г при исходной концентрации Cr(VI) 20 мг/л . Адсорбция ионов Cr(VI) сильно зависит от pH. Оптимальной является сильноокислая среда – pH 1, при которой Cr(VI) существует преимущественно в виде наиболее легко адсорбируемой формы HCrO₄. FTIR-анализ показал, что углеродный материал содержит различные кислородсодержащие функциональные группы: карбоксильную, аминную, метиленовую и гидроксильную.

Наноразмерные частицы Fe₃O₄ на поверхности углеродных микросфер могут образовывать внешнесферные комплексы с Cr(VI) и восстанавливать Cr(VI) до Cr(III) [43].

В работе [44] охарактеризована адсорбция тяжелых металлов, включая хром, активированным углем, импрегнированным Fe₃O₄. Авторы установили, что концентрация, дозировка, pH и время контакта являются ключевыми переменными процесса. Исследования десорбции 0.1 M HCl показали, что наночастицы можно эффективно регенерировать и использовать после четырех циклов адсорбции-десорбции без потери массы.

Проведены исследования по поглощению ионов Cr(VI) из водного раствора нанокомпозитом на основе активированного угля, пропитанного магнитными наночастицами Fe₃O₄ размером 42 нм [45]. Параметры процесса, такие как концентрация Cr(VI), дозировка наночастиц Fe₃O₄ в активированном угле и pH водного раствора, были оптимизированы с помощью методологии поверхности отклика. При pH3, концентрации водного раствора 12 мг/л , дозировке 1.5 г/л получены наилучшие результаты по адсорбции Cr(VI).

В работе [46], используя в качестве сырья коммерческий активированный уголь, методом химического осаждения был получен магнитный оксид железа/активированный уголь (Fe₃O₄@AC) для адсорбции

Cr(VI) в воде. Оценено влияние исходной концентрации Cr(VI), температуры и времени адсорбции на адсорбционный эффект: максимальная адсорбция Cr(VI) составила 45.3 мг/г со степенью удаления 88.8% при pH 2.0 и продолжительности 12 часов. Установлено, что удаление Cr(VI) с использованием Fe₃O₄@AC происходит в основном за счет хемосорбции, дополняемой физической адсорбцией. Механизм удаления Cr(VI) представлен на рисунке 3.

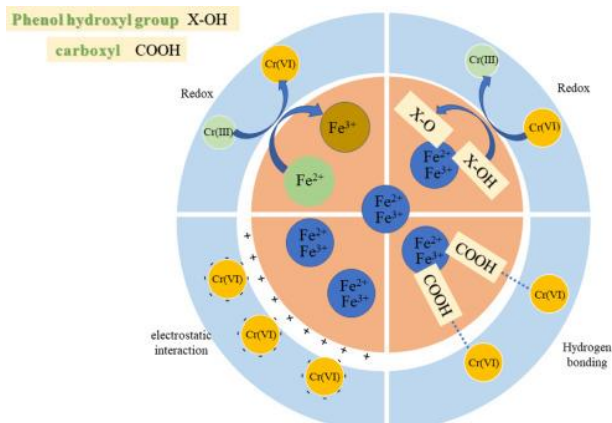


Рисунок 3. Механизм удаления Cr(VI) композиционным адсорбентом магнитный оксид железа/активированный уголь [46]

Предметом исследования [47] являлось применение модифицированного активированного угля с комбинацией оксидов железа и марганца или меди для удаления Cr(VI) из воды. Структура полученных композиционных адсорбентов изучена с применением методов БЭТ и СЭМ. Наиболее эффективным адсорбентом оказался материал углерод, модифицированный оксидами Fe-Mn: удаление Cr(VI) достигло 99.7%. Максимальная адсорбционная способность, обнаруженная с использованием модели Ленгмюра, составила 44.42 мг/г.

В работе [48] получена и использована для адсорбции ионов Cr(VI) в сточных водах нефтехимии серия эффективных магнитных композиционных адсорбентов, содержащих Fe₃O₄ и углерод. Обсуждено влияние различных факторов, таких как pH, время адсорбции, начальная концентрация ионов Cr(VI), загрузка Fe₃O₄ и время адсорбции, на характер адсорбции. Результаты показали, что адсорбент 8% Fe₃O₄@ММС демонстрирует большую адсорбционную емкость и высокую степень удаления Cr(VI), которые могут достигать 132.80 мг·г⁻¹ и 99.60%

Известно, что материалы, полученные на основе металлоорганических соединений, так называемые металлоорганические каркасы, эффективны в адсорбции Cr(VI) благодаря их разветвленной структурам, которые можно легко функционализировать для селективной адсорбции ионов различных тяжелых металлов [49-51].

Применение в практике металлоорганических соединений затрудняется из-за их агрегатного состояния в виде тонкодисперсного порошка. В исследовании [52] предложено перспективное решение по получению пористого композиционного материала, представляющего собой активированный уголь, пропитанный металлоорганическим соединением – терефталатом железа. Новый композиционный адсорбент демонстрирует превосходное поглощение Cr(VI) по сравнению с не модифициро-

ванным активным углем, возможность повторного использования и высокую скорость адсорбции. Степень удаления Cr(VI) новым композитом достигает 85% за 50 мин, то есть его эффективность значительно выше по сравнению с коммерческими активированными углями.

Среди адсорбентов различной природы (происхождения) активированный уголь – один из важнейших материалов для удаления тяжелых металлов из промышленных сточных вод благодаря его высокой удельной поверхности и объему пор, простоте синтеза и высокой эффективности. Большинство коммерческих активированных углей обычно имеют достаточно высокую стоимость из-за процесса обработки исходного сырья, процедур регенерации и реактивации.

Необходимость в производстве недорогого и высокоэффективного активированного угля стимулировала исследования по получению угольных сорбентов на основе отходов растительного сырья с высоким содержанием углерода и низким содержанием неорганических веществ [53-56].

Исследована адсорбционная способность по отношению к ионам Cr(VI) порошкообразного активированного угля, полученного ультразвуковой обработкой семян растения Peganumharmala. Обнаружено, что приготовленный материал обладает превосходными адсорбционными свойствами с точки зрения морфологии, функциональных групп, площади поверхности и размера пор. Установлено, что процесс адсорбции включает одновременно физический процесс и химические реакции ионов Cr(VI) на гетерогенных адсорбционных центрах активированного угля. Эффективность удаления концентрации Cr(VI) более 90% была достигнута при pH3, и времени контакта 30 мин. [57].

Результаты исследований [58] показывают, что активированный уголь, полученный из семян лонгана и модифицированный гидроксидом натрия, является эффективным адсорбентом для удаления Cr(VI) из водных растворов. Полученный материал имеет большую площадь поверхности (1511.8 м²/г) и пористую структуру, оптимальное значение pH составляет 3.0, а процент удаления Cr(VI) увеличивается с увеличением дозы адсорбента.

Предложен способ удаления шестивалентного хрома из кислых водных растворов углеродом, полученным из рисовой соломы [59]. Скорлупа плодов Bael была эффективно использована в качестве прекурсора для производства микропористого активированного угля с последующей активацией ZnCl₂ [60].

Проведены работы по адсорбции Cr(VI) активированным углем из скорлупы лесного ореха [61]. Кокосовая койра рассматривается биосорбент для удаления Cr(VI) из сточных вод лабораторий [62].

Исследован процесс удаления шестивалентного хрома из водной среды активированным углем, полученным из скорлупы арахиса [63]. Изучена биосорбция иона хрома(VI) из водных растворов с использованием скорлупы грецкого ореха, фундука и миндаля [64]. Показана эффективность сорбции хрома(VI) кислотнo-активированной банановой кожурой над органо-монтмориллонитом в водных растворах [65, 66].

Получены химически модифицированные неорганическими кислотами активированные угли из скорлупы орехов макадами и оценена величина биосорбции Cr(VI) из водного раствора при их применении [67].

Исследована адсорбция шестивалентного хрома с использованием адсорбентов на основе кожуры тамаринда [68]. Очистка сточных вод, содержащих токсичный хром, проведена с использованием активированного угля, полученного из семян финиковой пальмы [69].

Рассмотрены различные модели адсорбции хрома (VI) из водного раствора активированным углем из жома оливок [70]. Удаление Cr(VI) из воды с использованием биоуглей, полученных из кожуры ананаса, показало потенциал адсорбции и возможность их повторного использования [71].

Осуществлено преобразование жома сахарного тростника карбонизацией при 600°C с предварительной обработкой КОН в активный уголь для удаления Cr(VI) [72]. Проведено сравнительное исследование персиковой косточки и активированных углей на основе сополимера акрилонитрила и дивинилбензола как сорбентов хрома (VI) [73].

Опилки гевеи бразильской были преобразованы в углеродистый адсорбент и использованы для удаления Cr(VI) из сточных вод. Установлено, что адсорбция Cr(VI) эффективна в нижнем диапазоне pH и при более высоких температурах [74].

Проведен анализ адсорбционной способности активированного угля, полученного из тропического дерева *Samanea saman*, исследована морфология поверхности адсорбента (наличие макро-, мезо- и микропор) в зависимости от способа его приготовления. Установлено, что полученный материал обладает превосходными характеристиками по удалению шестивалентного хрома и имеет потенциал промышленного применения [75].

Проведенные исследования показали, что сельскохозяйственные отходы могут быть успешно использованы в качестве прекурсоров для производства адсорбентов.

4. Выводы

Таким образом, данные по распространению соединений Cr⁶⁺ в почве и водной среде и, особенно, воздействию на здоровье человека свидетельствуют о их значительной экологической опасности.

Как концентрация иона Cr⁶⁺, так и общее содержание хрома определяют качество воды. Даже при низком содержании Cr⁶⁺ представляет собой канцерогенную опасность, так как легко усваивается организмом человека и вступает во взаимодействие с клеточными структурами.

В связи с этим в мире интенсивно проводятся исследования по созданию новых типов адсорбентов, характеризующихся высокой адсорбционной способностью и быстрой кинетикой процесса.

Адсорбенты на основе углеродистых материалов обладают большой площадью поверхности, высокой пористостью и активной адсорбционной способностью. Для обеспечения таких характеристик большинство адсорбентов не используются в их первоначальном виде, проводится их модификация путем обработки различными реагентами и функционализация за счет привития активных сорбционных центров.

Так как коммерческие активированные угли на основе древесины являются дорогостоящими материалами, активно осуществляется разработка альтернативных, более дешевых адсорбентов из доступных источников углерода, включая растительные материалы.

Финансирование

Данное исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882140).

References / Литература

- [1] Vimercati, L., Gatti, M.F., Gagliardi, T., Cuccaro, F., De Maria, L., Caputi, A., Quarato, M. & Baldassarre, A. (2017). Environmental exposure to arsenic and chromium in an industrial area. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 11528-11535. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8827-6>
- [2] Hasan, S.M., Akber, A., Bahar, M., Islam, Az., Akbor, A., Siddique, A.B. & Islam, At. (2021). Chromium Contamination from tanning industries and phytoremediation potential of native plants: a study of savar tannery industrial estate in Dhaka, Bangladesh. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 106(6), 1024-1032. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03262-z>
- [3] Adriá-Cerezo, D.M., Llobat-Estellés, M. & Maurí-Aucejo, A.R. (2000). Preconcentration and speciation of chromium in waters using solid-phase extraction and atomic absorption spectrometry. *Talanta*, 51(3), 531-536. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(99\)00309-4](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(99)00309-4)
- [4] Janus, J. A., Krajnc, E. I. (1990). Integrated criteria document chromium: effects. – Bilthoven: National Institute of Public Health and Environmental Protection. Retrieved from: https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/1238490
- [5] Kenzhaliyev, B. (2019). Innovative technologies providing enhancement of non-ferrous, precious, rare and rare earth metals extraction. *Complex Use of Mineral Resources*, 310(3), 64-75. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.30>
- [6] Kuldeyev, E., Bondarenko, I. & Temirova, S. (2020). Promising ways to increase raw material base of the chrome industry of the metallurgical industry of the Kazakhstan. *Complex Use of Mineral Resources*, 313(2), 64-70. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.19>
- [7] Owlad, M., Aroua, M.K., Daud, W.M.A.W. & Baroutian S. (2009). Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: A review. *Water Air and Soil Pollution*, 200(1-4), 59-77. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9893-7>
- [8] Barnowski, C., Jakubowski, N., Stuewer, D. & Broekaert, J.A. (1997). Speciation of chromium by direct coupling of ion exchange chromatography with inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 12(10), 1155-1161. <https://doi.org/10.1039/a702120h>
- [9] Gil, R., Cerutti, S., Gásquez, J., Olsina, R. & Martinez, L. (2006). Preconcentration and speciation of chromium in drinking water samples by coupling of on-line sorption on activated carbon to ETAAS determination. *Talanta*, (68), 1065-1070. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.06.069>
- [10] Ukhurebor, K.E., Aigbe, U.O., Onyancha, R.B., Nwankwo, W., Osibote, O.A., Paumo, H.K., Ama, O.M., Adetunji, C.O. & Siloko, I.U. (2021). Effect of hexavalent chromium on the environment and removal techniques: A review. *Journal of Environmental Management*, (280), 111809. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111809>
- [11] World Health Organization. (2020). Chromium in drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality. Retrieved from: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/chromium.pdf?sfvrsn=37abd598_6
- [12] World Health Organization. (2006). The world health report 2006: Working together for health. Retrieved from: <https://www.who.int/publications/i/item/9241563176>
- [13] Faust, S.D., Aly O.M. (2018). Chemistry of water treatment. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781315139265>

- [14] Sedlak, D.L., Chan, P.G. (1997). Reduction of hexavalent chromium by ferrous iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(11), 2185-2192. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00077-X)
- [15] Sharma, S.K., Petrusevski, B. & Amy, G. (2008). Chromium removal from water: a review. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 57(8), 541-553. <https://doi.org/10.2166/aqua.2008.080>
- [16] Rakhunde, R., Deshpande, L. & Juneja, H.D. (2012). Chemical Speciation of Chromium in Water: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(7), 776-810. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.534029>
- [17] Barrera-Díaz, C.E., Lugo-Lugo, V. & Bilyeu, B. (2012). A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr(VI) reduction. *Journal of Hazardous Materials*, (223–224), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.05>
- [18] Pradhan, D., Sukla, L.B., Sawyer, M. & Rahman, P.K. (2017). Recent bioreduction of hexavalent chromium in wastewater treatment: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, (55), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.06.040>
- [19] Kongsricharoern, N. & Polprasert, C. (1995). Electrochemical precipitation of chromium (Cr⁶⁺) from an electroplating wastewater. *Water Science and Technology*, 31(9), 109-117. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00412-G](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00412-G)
- [20] Hafez, A.I., El-Manharawy, M.S. & Khedr, M.A. (2002). RO membrane removal of unreacted chromium from spent tanning effluent. A pilot-scale study, Part 2. *Desalination*, 144(1-3), 237-242. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00318-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00318-1)
- [21] Sahinkaya, E., Altun, M., Bektas, S. & Komnitsas, K. (2012). Bioreduction of Cr(VI) from acidic wastewaters in a sulfidogenic ABR. *Minerals Engineering*, (32), 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.014>
- [22] Chen, J., Tian, Y. (2021). Hexavalent chromium reducing bacteria: mechanism of reduction and characteristics. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(17), 20981-20997. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13325-7>
- [23] Zhang, R., Tian, Y. (2020). Characteristics of natural biopolymers and their derivative as sorbents for chromium adsorption: A review. *Journal of Leather Science and Engineering*, (2), 24. <https://doi.org/10.1186/s42825-020-00038-9>
- [24] Mudhoo, A., Garg, V. & Wang, S. (2012). Heavy Metals: Toxicity and Removal by Biosorption, in Lichtfouse, E. and Schwarzbauer, J. and Robert, D. (ed). *Environmental Chemistry for a Sustainable World, Netherlands: Springer*. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2439-6_10
- [25] Sahu, S.K., Meshram, P., Pandey, B.D., Kumar, V. & Mankhand, T.R. (2009). Removal of chromium(III) by cation exchange resin, Indion 790 for tannery waste treatment. *Hydrometallurgy*, 99(3-4), 170-174. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.08.002>
- [26] Dakiky, M., Khamis, M., Manassra, A. & Mer'eb, M. (2002). Selective adsorption of chromium(VI) in industrial wastewater using low-cost abundantly available adsorbents. *Advances in Environmental Research*, 6(4), 533-540. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(01\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(01)00079-X)
- [27] Hokkanen, S., Bhatnagar, A., Repo, E., Lou, S. & Sillanpää, M. (2016). Calcium hydroxyapatite microfibrillated cellulose composite as a potential adsorbent for the removal of Cr(VI) from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, (283), 445-452. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.035>
- [28] Jiang, W., Pelaez, M., Dionysiou, D.D., Entezari, M.H., Tsoutsou, D. & O'Shea, K. (2013). Chromium(VI) removal by magnetite nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, (222), 527-533. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.049>
- [29] Deveci, H., Kar, Ya. (2013). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solutions by bio-chars obtained during biomass pyrolysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(1), 190-196. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.08.001>
- [30] Albadarin, A.B., Mangwandi, C., Al-Muhtaseb, A.H., Walker, G.M., Allen, S.J. & Ahmad, M.N.M. (2012). Kinetic and thermodynamics of chromium ions adsorption onto low-cost dolomite adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, (179), 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.080>
- [31] Yuan, X., Wang, Yu., Wang, J., Zhou, Ch., Tang, Q. & Rao, X. (2013). Calcinated graphene/MgAl-layered double hydroxides for enhanced Cr(VI) removal. *Chemical Engineering Journal*, (221), 204-213. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.01.090>
- [32] Pakade, V.E., Tavengwab, N.T. & Madikizela, L.M. (2019). Recent advances in hexavalent chromium removal from aqueous solutions by adsorptive methods. *RSC Advances*, 45(9), 26142-26164. <https://doi.org/10.1039/C9RA05188K>
- [33] Islam, M.M., Mohana, A.A., Rahman, M.A., Rahman, M., Naidu, R. & Rahman, M.M. (2023). A Comprehensive review of the current progress of chromium removal methods from aqueous solution. *Toxics*, (11), 252. <https://doi.org/10.3390/toxics11030252>
- [34] Pérez-Candela, M., Martín-Martínez, J.M. & Torregrosa-Maciá, R. (1995). Chromium(VI) removal with activated carbons. *Water Research*, 29(9), 2174-2180. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00035-J](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00035-J)
- [35] Jan, S.U., Ahmad, A., Khan, A.A., Ahmad, I. & Ahmad, R. (2024). Cr(VI) sequestration by activated carbon: experimental and theoretical study. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(6), 5557-5568. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05362-1>
- [36] Liu, W., Zheng, J., Ou, X., Liu, X., Song, Y., Tian, C., Rong, W., Shi, Z., Dang, Z. & Lin, Z. (2018). Effective Extraction of Cr(VI) from hazardous gypsum sludge via controlling the phase transformation and chromium species. *Environmental Science & Technology*, 52(22), 13336-13342. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02213>
- [37] Mehdi-pour-Ataei, S., Aram, E. (2023). Mesoporous carbon-based materials: a review of synthesis, modification, and applications. *Catalysts*, 13, 2. <https://doi.org/10.3390/catal13010002>
- [38] Tripathi, P.K., Gan, L., Liu, M. & Rao, N.N. (2014). Mesoporous carbon nanomaterials as environmental adsorbents. *Journal of Nanosci. Nanotechnol.*, (14), 1823-1837. <https://doi.org/10.1166/jnn.2014.8763>
- [39] Ghosh, P.K. (2009). Hexavalent chromium [Cr(VI)] removal by acid modified waste activated carbons. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.121>
- [40] Khezami, L., Capart, R. (2005). Removal of chromium(VI) from aqueous solution by activated carbons: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 123(1-3), 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.04.012>
- [41] Aggarwal, D., Goyal, M. & Bansal, R.C. (1999). Adsorption of chromium by activated carbon from an aqueous solution. *Carbon*, 37(12), 1989-1997. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00072-X)
- [42] Beksissa, R., Tekola, B., Ayala, T. & Dame, B. (2021) Investigation of the adsorption performance of acid-treated lignite coal for Cr (VI) removal from aqueous solution. *Environmental challenges*, (4), 100091. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100091>
- [43] Senamart, N., Deekamwong, K., Wittayakun, J., Prayoonpokarach, S., Chanlek, N., Poo-Arporn, Y., Wannapaiboon, S., Kidkhunthod, P. & Loiha, S. (2022). Structural elucidation of hexavalent Cr adsorbed on surfaces and bulks of Fe₃O₄ and α-FeOOH. *RSC Advances*, 12(39), 25578-255868. <https://doi.org/10.1039/d2ra03676b>
- [44] Jain, M., Yadav, M., Kohout, T., Lahtinen, M., Garg, V.K. & Sillanpää, M. (2018). Development of iron oxide/activated carbon nanoparticle composite for the removal of Cr(VI), Cu(II) and Cd(II) ions from aqueous solution. *Water Resources and Industry*, (20), 54-74. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2018.10.001>
- [45] Natrayan, L., Rajalakshmi, R., Singh, K.A., Patil, P.P., Veeman, D. & Paramasivam, P. (2022) Synthesis and optimization of Cr

- (VI) removal from aqueous solution by activated carbon with magnetic Fe₃O₄ nanoparticles by response surface methodology. *Adsorption Science & Technology*, 9366899. <https://doi.org/10.1155/2022/9366899>
- [46] Wu, Zh., Zhang, H., Ali, E., Shahab, A., Huang, H., Ullah, H. & Zeng, H. (2023). Synthesis of novel magnetic activated carbon for effective Cr(VI) removal via synergistic adsorption and chemical reduction. *Environmental Technology & Innovation*, (30), 103092. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103092>
- [47] Tolkou, A.K., Vaclavikova, M., Gallios, G.P. (2022). Impregnated activated carbons with binary oxides of iron-manganese for efficient Cr(VI) removal from water. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233, 343. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05826-z>
- [48] Long, W., Chen, Z., Chen, X. & Zhong, Z. (2022). Investigation of the adsorption process of chromium (VI) ions from petrochemical wastewater using nanomagnetic carbon materials. *Nanomaterials*, 12(21), 3815. <https://doi.org/10.3390/nano12213815>
- [49] Li, L.L., Feng, X., Han, R., Zang, Sh. & Yang, G. (2017). Cr(VI) removal via anion exchange on a silver-triazolate MOF. *Journal of Hazardous Materials*, (321), 622-628. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.029>
- [50] Guo, J., Li, J. & Wang, Ch. (2019). Adsorptive removal of Cr(VI) from simulated wastewater in MOF BUC-17 ultrafine powder. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102909. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102909>
- [51] Abuzalat, O., Tantawy, H., Mokhtar, M. & Baraka, A. (2022). Nano-porous bimetallic organic frameworks (Fe/Co)-BDC, a breathing MOF for rapid and capacitive removal of Cr(VI) from water. *Journal of Water Process Engineering*, (46), 102537. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102537>
- [52] Abuzalat, O., Wong, D., Mohamed, A. & Elsayed, M.A. (2022). Nano-porous composites of activated carbon-metal organic frameworks (Fe-BDC@AC) for rapid removal of Cr(VI): Synthesis, adsorption, mechanism, and kinetics studies. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, (32), 1924-1934. <https://doi.org/10.1007/s10904-022-02237-9>
- [53] Yrjälä, K., Ramakrishnan M. & Salo, E. (2022). Agricultural waste streams as resource in circular economy for biochar production towards carbon neutrality. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, (26), 100339. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100339>
- [54] Rani, L., Kaushal, J. & Lal Shrivastav, A. (2022). Biochar as sustainable adsorbents for chromium ion removal from aqueous environment: A review. *Biomass Convers. Biorefinery*, 14(2), 6083-6096. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02784-8>
- [55] Shrivastava, P.K., Gupta S.K. (2015). Removal of chromium from waste water by adsorption method using agricultural waste materials. *International Journal of Chemical Sciences and Applications*, 6(1), 2278-6015.
- [56] Akram, M., Bhatti, H.N., Iqbal, M., Noreen, S. & Sadaf, S. (2017). Biocomposite efficiency for Cr(VI) adsorption: Kinetic, equilibrium and thermodynamics studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 400-411. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.002>
- [57] Nasseh, N., Khosravi, R., Rumman, G. A., Ghadirian, M., Eslami, H., Khoshnamvand, M., Al-Musawi, T.J. & Khosravi, A. (2021). Adsorption of Cr(VI) ions onto powdered activated carbon synthesized from Peganum harmala seeds by ultrasonic waves activation. *Environmental Technology & Innovation*, (21), 101277. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101277>
- [58] Yang, J., Yu, M. & Chen, W. (2015). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by activated carbon prepared from longan seed: Kinetics, equilibrium and thermodynamics. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, (21), 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.02.054>
- [59] Hsu, N., Wang, Sh., Liao, Y., Huang, Sh., Tzou, Y. & Huang, Y. (2009). Removal of hexavalent chromium from acidic aqueous solutions using rice straw-derived carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 1066-1070. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.112>
- [60] Gottipati, R., Mishra, S. (2016). Preparation of microporous activated carbon from Aegle Marmelos fruit shell and its application in removal of chromium(VI) from aqueous phase. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, (36), 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.03.005>
- [61] Kobya, M. (2004). Adsorption, kinetic and equilibrium studies of Cr(VI) by hazelnut shell activated carbon. *Adsorption Science and Technology*, 22(1), 51-64. <https://www.researchgate.net/publication/244738862>
- [62] Gonzalez, M.H., Araújo, G.C.L., Pelizaro, C.B., Menezes, E.A., Lemos, S.G., de Sousa, G.B. & Nogueira, A.R.A. (2008). Coconut coir as biosorbent for Cr(VI) removal from laboratory wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 159(2-3), Pp. 252-256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.014>
- [63] Al-Othman, Z.A., Ali, R. & Naushad, Mu. (2012). Hexavalent chromium removal from aqueous medium by activated carbon prepared from peanut shell: Adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. *Chemical Engineering Journal*, (184), 238-247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.048>
- [64] Pehlivan, E., Altun, T. (2008). Biosorption of chromium(VI) ion from aqueous solutions using walnut, hazelnut and almond shell. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1-2), 378-384. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.071>
- [65] Ali, A., Saeed, Kh. & Mabood, F. (2016). Removal of chromium (VI) from aqueous medium using chemically modified banana peels as efficient low-cost adsorbent. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2933-2942. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.05.011>
- [66] Ashraf, A., Bibi, I., Niazi, N.K., Ok, Y.S., Murtaza, G., Shahid, M., Kunhikrishnan, A., Li, D. & Mahmood, T. (2017). Chromium(VI) sorption efficiency of acid-activated banana peel over organo-montmorillonite in aqueous solutions. *International journal of Phytoremediation*, 19(7), 605-613. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1256372>
- [67] Lesoana, M., Mlaba, R.P.V., Mtunzi, F.M., Klink, M.J., Ejidike, P. & Pakade, V.E. (2019). Influence of inorganic acid modification on Cr(VI) adsorption performance and the physicochemical properties of activated carbon. *South African Journal of Chemical Engineering*, (28), 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.01.001>
- [68] Verma, A., Chakraborty, S. & Basu, J.K. (2006). Adsorption study of hexavalent chromium using tamarind hull-based adsorbents. *Separation and Purification Technology*, 50(3), 336-341. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.12.007>
- [69] El Nemr, A., Khaled, A., Abdelwahab, O. & El-Sikaily, A. (2008). Treatment of wastewater containing toxic chromium using new activated carbon developed from date palm seed. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), 263-275. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.091>
- [70] Demiral, H., Demiral, İ., Tümsük, F. & Karabacakoglu, B. (2008). Adsorption of chromium(VI) from aqueous solution by activated carbon derived from olive bagasse and applicability of different adsorption models. *Chemical Engineering Journal*, 144(2), 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.01.020>
- [71] Shakyia, A., Agarwal, T. (2019). Removal of Cr(VI) from water using pineapple peel derived biochars: Adsorption potential and re-usability assessment. *Journal of Molecular Liquids*, (293), 111497. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111497>
- [72] Pratama, B.S., Aldriana, P., Ismuyanto, B. & Hidayati, A. D. S. N. (2018). Konversi ampas tebu menjadi biochar dan karbon aktif untuk penyisihan Cr(VI). *Jurnal Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan*, 2(1), 7-12. <https://doi.org/10.21776/ub.rbaet.2018.002.01.02>
- [73] Duranoğlu, D., Trochimczuk, A.W. & Beker, Ü.G. (2010). A comparison study of peach stone and acrylonitrile-divinylbenzene copolymer based activated carbons as chromi-

- um(VI) sorbents. *Chemical Engineering Journal*, 165(1), 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.08.054>
- [74] Karthikeyan, T., Rajgopal, S. & Miranda, L.R. (2005). Chromium(VI) adsorption from aqueous solution by Hevea Brasiliensis sawdust activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 124(1-3), 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.05.003>
- [75] Niam, A.C., Fenelon, E., NingsihE., Mirzayanti, Y.W. & Kristanti, E. (2022). High-efficiency adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by Samanea saman activated carbon. *Adsorption Science & Technology*, 8960379. <https://doi.org/10.1155/2022/8960379>
- [76]

Белсендірілген көмір сорбциясының сулы ерітінділерінен алтывалентті хромды алып тастау. Қысқаша шолу

Б.К. Кенжалиев, С.С. Темирова, Д.Е. Фишер, Ж.А. Балтабекова*

Металлургия және қен байыту институты, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: zh.baltabekova@satbayev.university

Аңдатпа. Мақалада, қоршаған ортадағы алтывалентті хромның яғни, оның уыттылығы, Cr(VI) алып тастаудағы қолданылатын негізгі адсорбенттер, әртүрлі шикізаттарды қолдана отырып, көмірді сорбенттерді алудың деректі көздері қарастырылады. Cr(VI) алып тастау механизмінің түсіндірмесі келтірілді. Хром өнеркәсіптің көптеген салаларында кеңінен қолданылады, демек болат құятын, металлөңдейтін, гальваникалық, былғары, автомобильді, лак және бояу жасайтын, қағазды -целлюлоза және тоқыма кәсіпорындарының ағынды суларының - қалдық үйінділеріне үлкен мөлшерде қауіп әкеледі. Хром биологиялық тұрғыдан канцерогенді әсер ететіндіктен, ең қауіпті бейорганикалық ластанушы заттардың бірі болып табылады. Әдетте, хром сулы үш валентті Cr(III) немесе алты валентті Cr(VI) күйде кездеседі. Сулы ортада, тіпті аз мөлшерде болса да алтывалентті хром иондарының уыттылығы жоғары болып келеді және оларды ерітіндіден шығарудағы ағынды суларды тазартуда күрделі мәселе тудырады. Айталық, адсорбциялық ион алмасу, мембранды бөлу, коагуляция, химиялық тұндыру, экстракция және электрохимиялық бөлу сияқты әдістермен ағынды сулардан алты валентті хромды алып тастауға болады. Адсорбция әдісі, экономикалық тұрғыдан анағұрлым тиімді, экологиялық тұрақты және технологиялық үрдіс. Әртүрлі табиғи адсорбенттердің ішіндегі анағұрлым қолданылатыны белсендірілген көмір болып табылады. Сүрек (древесина), белсендірілген көмірдің кеңінен таралған дерек көзі болып табылады, бірақ экожүйені сақтаудағы ағаштың маңыздылығын ескере отырып, белсендірілген көмір өндірудің баламалы дерек көздері іздестірілуде. Белсендірілген көмірдегі микрокеуектер хром иондарының физикалық адсорбциясын тудырады. Белсендірілген көмір құрамындағы О және N функционалдық топтары химиялық құрылым мен химиялық сорбция үрдісіне әсер етеді.

Негізгі сөздер: экологиялық жүйелер, алтывалентті хром, алып тастау, сорбция, белсендірілген көмір.

Удаление шестивалентного хрома из водных растворов сорбционным методом с использованием активированного угля. Обзор

Б.К. Кенжалиев, С.С. Темирова, Д.Е. Фишер, Ж.А. Балтабекова*

Институт металлургии и обогащения, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: zh.baltabekova@satbayev.university

Аннотация. В статье рассмотрены источники шестивалентного хрома в окружающей среде, его токсичность, способы удаления, основные адсорбенты, используемые для удаления Cr(VI), получение угольных сорбентов с использованием различного сырья. Приведена интерпретация механизма удаления Cr(VI). Хром имеет широкое применение во многих отраслях промышленности, что приводит к образованию большого количества опасных отходов – сточных вод сталелитейных, металлообрабатывающих, гальванических, кожевенных, автомобильных, лакокрасочных, бумажно-целлюлозных и текстильных предприятий. Хром является одним из наиболее опасных неорганических загрязнителей из-за его канцерогенного воздействия на биологические виды. В водной среде хром обычно существует в состоянии трехвалентного Cr(III) или шестивалентного Cr(VI). Ионы шестивалентного хрома в водных средах высокотоксичны даже в незначительных количествах, и их удаление из раствора представляет серьезную проблему очистки сточных вод. Такие методы, как адсорбция ионный обмен, мембранное разделение, коагуляция, химическое осаждение, экстракция и электрохимическое разделение позволяют удалить шестивалентный хром из сточных вод. Адсорбция считается наиболее эффективным, экономически целесообразным, экологически устойчивым и технологически перспективным процессом. Среди адсорбентов различной природы наибольшее применение находит активированный уголь. Древесина является наиболее распространенным источником активированного угля, однако учитывая важность дерева в поддержании экосистемы, проводится поиск альтернативных источников производства активированного угля. Ак-

тивированный уголь получают из различных материалов высокотемпературной карбонизацией. Материалы из активированного угля имеют высокую удельную поверхность и развитую пористую структуру. Микропоры в активированном угле обуславливают физическую адсорбцию ионов хрома. Наличие в активированном угле функциональных групп, содержащих O и N, влияет на химическую структуру и процесс химической сорбции.

Ключевые слова: экологические системы, шестивалентный хром, удаление, сорбция, активированный уголь.

Received: 13 June 2024

Accepted: 16 December 2024

Available online: 31 December 2024