



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 662.641

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.026



ПЕРЕРАБОТКА ТОРФА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Юрий Владимирович Передерин ¹, Екатерина Германовна Анзельм ²,
Ирина Олеговна Усольцева ³

^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

¹ pereder@tpu.ru

² ega6@tpu.ru

³ cupa57@tpu.ru

Аннотация. В статье представлены результаты анализа российских патентов, исследований отечественных и зарубежных авторов, работы которых посвящены методам глубокой переработки низинного и верхового типов торфа. Большой инновационный потенциал имеют торф и продукты его переработки, так как в зависимости от вида обработки сырья они обладают легкодоступностью, высокой биологической активностью, антимикробными свойствами, способными связывать органические и неорганические соединения. Важно отметить, что целесообразность использования природного сырья определяется его доступностью, безопасностью для окружающей среды и конкурентоспособностью, по сравнению с синтетическими аналогами. В ходе проведенного обзора выявлено, что главная проблема выделения целевых компонентов из торфа состоит в плотно упакованной оболочке, состоящей в основной своей массе из лигнина и целлюлозы – негидролизруемых веществ. Для разрушения описанных соединений и перевода полезных компонентов в водорастворимое состояние применяют такие методы переработки, как механо-физическую (термолиз, ультразвук, СВЧ-излучение, диспергаторы, кавитаторы, радиация), химическую (гидролиз, экстракция, ферментация) и механохимическую активацию сырья. Исследовано, что более эффективным и высокоинтенсивным является комплексный подход к переработке торфа. Широкий перечень продуктов, получаемых из высокоуглеродного сырья, может быть использован в сельском хозяйстве как удобрение, в качестве восстановителя почв, в фармакологии как компонент лекарственных средств, в сорбционных процессах как очиститель от нефтяных разливов и тяжелых металлов.

Ключевые слова: торф, глубокая переработка торфа, механо-физическая активация торфа, химическая активация торфа, механохимическая активация торфа, целлюлоза, экстракция, гидролиз, радиолиз, термолиз.

Для цитирования: Передерин Ю. В., Анзельм Е. Г., Усольцева И. О. Переработка торфа: современное состояние технологий // Ползуновский вестник. 2024. № 4. С. 173–180. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.026, EDN: <https://elibrary.ru/MULIZF>.

Original article

APEAT PROCESSING: CURRENT STATE OF TECHNOLOGIES

Yuri V. Perederin ¹, Ekaterina G. Anzelm ², Irina O. Usoltseva ³

^{1, 2, 3} National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹ pereder@tpu.ru

² ega6@tpu.ru

³ cupa57@tpu.ru

© Передерин Ю. В., Анзельм Е. Г., Усольцева И. О., 2024

Abstract. *The article presents the results of an analysis of Russian patents and studies by domestic and foreign authors dedicated to deep processing methods of lowland and upland peat types. Peat and its processed products hold significant innovative potential due to their ease of accessibility, high biological activity, antimicrobial properties, and the ability to bind organic and inorganic compounds, depending on the type of raw material processing. It is important to note that the feasibility of using natural raw materials is determined by their accessibility, environmental safety, and competitiveness compared to synthetic counterparts. During the conducted review, it was identified that the primary challenge in extracting target components from peat lies in the tightly packed shell, primarily composed of non-hydrolyzable substances, such as lignin and cellulose. To break down these compounds and convert valuable components into a water-soluble state, various processing methods are employed. These include mechanical and physical methods (thermolysis, ultrasonication, microwave irradiation, dispersion techniques, cavitation, radiation), chemical methods (hydrolysis, extraction, fermentation), and mechanochemical activation of raw materials. It has been established that a more effective and high-intensity approach to peat processing involves a comprehensive combination of these methods. A wide range of products derived from carbonaceous raw materials can find application in agriculture as fertilizers, soil restoration in pharmacology as components of medicinal products, in sorption processes, and as agents for cleaning up oil spills and heavy metals.*

Keywords: *peat, deep peat processing, mechano-physical activation of peat, chemical activation of peat, mechanochemical activation of peat, cellulose, extraction, hydrolysis, radiolysis, thermolysis.*

For citation: Perederin, Yu.V., Anzelm, E.G. & Usoltseva, I.O. (2024). A peat processing: current state of technologies. *Polzunovskiy vestnik.* (4), 173-180. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.026, EDN: <https://elibrary.ru/MULIZF>.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день торф является уникальным сырьем, используемым в сельском хозяйстве для производства удобрений, в фармакологии, как лекарственные средства нового поколения, в качестве сорбентов тяжелых металлов или препаратов способных ликвидировать загрязнения нефтепродуктами. Гуминовые кислоты, содержащиеся в торфе, имеют высокую биодоступность, являются источниками физиологически активных веществ, а также способны связывать органические и неорганические соединения. Однако описанные свойства природный материал проявляет только после перехода полезных веществ в легкодоступную и водорастворимую форму путем деградации целлюлозной и лигнинной структуры торфа. Помимо этого, гумусосодержащее сырье является дешевым, возобновляемым ресурсом, при рациональной добыче которого не наносится вред окружающей среде. По этим причинам целевым направлением в технологии торфа является разработка новых способов его глубокой переработки. Экономическая целесообразность использования природного сырья складывается из высокой распространенности и богатства минеральных макро- и микроэлементов [1–4].

Торф до недавнего времени главным образом применялся в качестве источника энергии как топливное сырье. Для этого применяют такой способ переработки торфа, как термолиз. Нагревание торфа при высоких температурах

приводит к трансформации его структуры, при этом изменения тем глубже, чем выше конечная температура нагревания [5].

Помимо использования торфа как энергоресурса, существует возможность получения нефтяного сорбента на его основе. В патенте Бобошина А.Н. описывается техническое решение, при котором верховой торф мохового типа, со степенью разложения не более 20 %, зольностью не более 10 % сепарируется для отделения различных включений. Затем сырье подвергается термической обработке, что представляет из себя высушивание при 300–600 °С, в зависимости от исходной влажности сырья. В результате технологического процесса получается продукт с влажностью 18–24 % и дисперсностью 0,5–10 мм. Переработанный таким методом торф, покрывая поверхность нефтяного разлива, сорбирует и задерживает, предотвращая его дальнейшее распространение [6].

Температурная обработка применяется и в исследовании Валиева Н.Г., где верховой нейтрализованный торф, с показателем влажности и степенью разложения не более 55 % и 20 % соответственно, предварительно фракционируют в шнековом грануляторе до 0...10 мм. Дальнейшим этапом является сушка сырья при температуре 80 °С до достижения 25 % влажности. Полученный продукт смешивают с водным раствором солей тяжелых металлов. В результате получают сорбенты-мелиоранты, способные извлекать ионы тяжелых металлов Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{6+} до 92 % [7].

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТОРФА

В последнее время широко развиваются новые способы переработки торфа, например, механоактивация. За счет измельчения природного сырья повышается доля легкодоступных веществ.

Букейханов Н.Р. описывает использование роторно-дисперсионного кавитатора. Торф подвергается диспергированию на вибрмельнице МВ-30, представляющей собой насос с мощностью электродвигателя 11 кВт и 3000 об./мин. Интенсивное воздействие устройства разрушает лигнин на поверхности углеводного продукта окислительного аммонолиза, за счет чего высвобождаются гуминовые кислоты, применяемые для получения биоудобрений пролонгированного действия, улучшающих структуру почв [8].

В рамках научного исследования [9] был представлен метод активации природного сырья, основанный на использовании роторно-пульсационного гомогенизатора. При данном методе концентрация гуминовых кислот достигает уровня 22 г/л, в отличие от 4,8 г/л, полученных при применении автоклава.

Дудкин Д.В. предполагает, что кавитация торфа в щелочных водных средах с частотой вращения ротора 3000 об./мин представляет собой инновационный метод извлечения гуминовых веществ. В результате выход гуминовых кислот составил 25 %. Этот подход не только способствует более рациональному использованию торфяных ресурсов, но также позволяет интегрировать в экономическую деятельность продукты из верхового типа торфа с низкой степенью разложения (менее 15 %), характерного для Российской территории [10].

В другом исследовании [11] описывается методика механоактивации торфяного материала с использованием планетарной шаровой мельницы. Данный метод значительно увеличивает эффективность процесса извлечения гуминовых кислот в 6–7 раз, что сопровождается повышением числа кислых функциональных групп и усилением ионообменных характеристик гуминовых кислот. Кроме того, физико-механическое воздействие улучшает сорбционную способность торфа.

Авторами [12] освещается метод, основанный на механоактивации торфа с помощью роторно-пульсационного аппарата при гидромодуле 1:9,5. Концентрация гуминовых кислот в полученной пульпе составляла 15 г/л, что в 4 раза больше значений, полученных в вышеупомянутом патенте [13].

Альтернативным методом переработки торфа является электроимпульсное воздействие. При применении этого способа твердая составляющая торфа разрушается изнутри, что приводит к повышению агрономической эффективности.

Так, в проведенном исследовании Денисюк Е.А. доказывает, что под действием электрогидравлических ударов содержание питательных веществ и микроэлементов в торфе повышается. В зависимости от вида природного сырья наблюдается увеличение содержания аммиачного азота в 1,4–4,5 раза, а водорастворимого органического вещества – в 1,5–5 раза. Энергетические затраты на активацию торфа, по расчетам, не превышают 50–60 кВт на 1 т. Данный вид обработки может существенно снизить потребность в минеральных удобрениях, улучшить плодородие почв и обеспечить экономическую выгоду производства сельскохозяйственной продукции [14].

В патенте Мокшина В.В. представлено изобретение, предназначенное для производства органического удобрения из водорастворимой составляющей торфа. Технология основана на использовании электрогидродинамического ударного разрушения с частотой 1 Гц и временем обработки 10 минут. В отличие от существующих установок, данная обладает важными преимуществами, такими как выполнение процесса обработки торфа происходит в один этап без необходимости применения щелочных реагентов, возможность обкатывания частиц и уничтожения микроорганизмов благодаря действию ударной волны [15].

В дополнение известна технология получения гуминовых веществ из низинного торфа с использованием электрогидродуара при различных уровнях напряжения от 15 кВт до 60 кВт. Описанный метод позволяет получить продукт с содержанием гуминовых кислот не менее 60 %, сохраняя при этом естественную структуру продукта [16].

Ультразвуковая обработка представляет собой эффективный метод активации торфа. Воздействие на твердую фазу углеродного сырья трансформирует биологические свойства данного материала. Применение ультразвука способствует дисперсии сырья до наномасштабных размеров, что, в свою очередь, способствует повышению выхода гуминовых кислот.

Командой исследователей [17] было выявлено, что кратковременное ультразвуковое воздействие при частоте 22 кГц и продолжительностью процесса 3–15 минут на верховой торф с применением щелочных средств увеличивает выход гуминовых кислот на 68,6 % относительно классических методов.

В работе зарубежных авторов обсуждается экологически чистая альтернатива традиционной экстракции с применением ультразвука интенсивностью 200–400 мВт/см². При этом возрастает эффективность выхода гуминовых кислот, что может привести к увеличению экономической целесообразности процесса и к использованию углеродного препарата, полученного воздействием ультразвука, в качестве удобрения [18].

Авторами [19] сообщается об инновационном методе обработки торфа с использованием в течение получаса при статическом давлении в системе 4,5 атм "зеленой" ультразвуковой технологии, исключающей применение химических стабилизаторов для диспергирования гумусосодержащего материала. При достижении высокой степени дисперсии порядка 80–130 нм природное сырье приобретает высокую биодоступность и способность к сорбции, что ведет к повышению урожайности при его использовании.

В статье [20] описывается способ интенсификации разрушения верхового торфа до низкомолекулярных продуктов воздействием СВЧ-излучения с частотой 2,45 Гц и полной мощностью 1 кВт. Длительность микроволнового облучения составляла 16 мин.

Еще одним направлением глубокой переработки торфа является радиационный метод, в основе которого лежит интенсификация биологических процессов под действием ионизирующего излучения.

В трудах Касимовой Л.В. предлагается радиолит низинного торфа при максимальной дозе облучения 18 Мрад с использованием электронного ускорителя ИЛУ-8. При этом в ходе трансформации органического сырья максимальный выход водорастворимых веществ составлял 97 % за счет разрушения негидролизующей составляющей торфа [21].

В исследованиях [22, 23] говорится о воздействии излучения высокой энергии на растительное сырье, при котором происходит разрушение целлюлозы. Доза, равная 0,1 МГр, способствует разрушению лигнина, при дозе 2,7 МГр, наблюдается увеличение растворимости в водных растворах.

ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТОРФА

Помимо механических методов обработки торфа, существует ряд химических подходов, включая гидролиз торфа. В рамках данного процесса торф взаимодействует с водой при повышенных температурах в присутствии кислотных, щелочных катализаторов или под

воздействием ферментов. В этих условиях происходит распад полисахаридов, входящих в состав торфа (например, целлюлозы и инкрустирующих веществ, лигнина), с последующим превращением их в моносахара и образованием водорастворимых структур.

В исследованиях Смирнова В.В. и Бамбалова Н.Н. представлены результаты сравнения кислотного и щелочного гидролиза. Было выявлено, что в гуминовых кислотах, выделенных с использованием 2 % раствора аммиака при температуре 96–98 °С содержалось легкогидролизуемых веществ больше (45–51 % для низинного торфа и 22–23 % для верхового торфа соответственно) по сравнению с применением 2 % гидроксида натрия при тех же условиях (17–23 % для низинного торфа и 10–14 % для верхового торфа соответственно). Касательно кислотного гидролиза, структура поверхности природного сырья столь плотно упакованная, что водные растворы кислот не проникают вглубь, а взаимодействуют лишь с оболочкой частицы, поэтому выход легкогидролизуемых веществ при кислотном гидролизе составил 6–13 % [24,25].

Другими авторами был освещен способ использования активированного гумусового сырья для дезактивации тяжелых металлов (Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Hg^{2+} , Pb^{2+} и др.) и радионуклидов. Переработка торфа осуществлялась на основе патента [13], в котором использовался щелочной гидролиз с применением водного аммиака и перекиси водорода. По результатам анализа авторы утверждали об эффективной сорбционной способности активированного торфа [26].

В работе Кутищева Е.С. представлен способ извлечения гуминовых кислот с использованием щелочного раствора пиррофосфата натрия с последующим гидролизом раствором гидроксида натрия и их осаждением соляной кислотой. Полученный осадок переводили в раствор с применением аммиака и перекиси водорода. Также выяснено, что добавление перекиси водорода свыше 200 мл на кг раствора торфа в воде при гидромодуле 12 приводит к разрушению целевого продукта. В результате максимальный выход гуминовых кислот составлял 12,5 г/л [27].

Авторами следующего исследования проверяются методы щелочного гидролиза, разработанными в СибНИИСХиТ Россельхозакадемии, на низинном торфе с применением водного аммиака в присутствии перекиси водорода в первом способе и 2 % раствора гидроксида натрия во втором при 80 °С. Результаты исследования показывают, что при

первом методе выход гуминовых кислот составляет 78,9 %, при втором – 77,6 % при заявленном выходе 80–85 %. Авторами был выявлен главный недостаток предложенных способов гидролиза, которыми являются высокая кислотность среды ($\text{pH} = 13$). На основании этого, в опыте с применением аммиака, было предложено снизить его концентрацию до 0,6 %, в результате чего выход гуминовых кислот составил 80 % [28].

В трудах Лакина Н.В. и его команды освещается способ ферментативного гидролиза верхового торфа с применением комплексов «Агроцелл» и «Агроксилл». В таком методе деструкция целлюлозы достигается действием специфическими ферментами – целлюлазами. При этом проводить ферментативный гидролиз дешевле кислотного и щелочного гидролизом в силу умеренных условий протекания и отсутствия необходимости применения специального оборудования. Итогом работы было определение оптимальных условий проведения процесса, такие как интервал температур 50–55 °С и кислотность среды 4,5–5,5, в результате чего выход моносахаридов (глюкозы) равен 6 %. Предложенный метод переработки торфа может быть использован в фармацевтике [29].

Командой исследователей [30] освещается метод активации торфа с помощью азотно-фосфорных удобрений в течение 3–7 суток. При этом возрастает число углеводородокисляющей микрофлоры, содержащейся в природном сырье, за счет которой торф может выступать сорбентом нефтяных загрязнений. Для активации может использоваться торф любой влажности, в статье же рекомендуется использовать верховой торф моховой группы со степенью разложения 5–10 %, с высокой пористостью и сорбционной емкостью 8–10 г нефти / г сорбента. Проверка эффективности показала, что спустя 3,5 месяцев после внесения мелиоранта в почву деструкция нефти составила 89–55 % (в зависимости от уровня загрязнения нефти) по сравнению с контрольным вариантом без внесения сорбента – 4 %.

Для интенсификации переработки гумусосодержащего сырья также может использоваться метод экстракции – процесс, при котором извлечение ценных компонентов происходит из раствора или сухой смеси под действием растворителей, не смешивающихся с исходным сырьем.

В статье Селяновой С.Б. в качестве экстрагентов использовались этилацетат, этанол, гексан, этоксиэтан. Процесс проводили

при комнатной температуре (25 °С) и при температурах кипения соответствующих растворителей. Методами настаивания с постоянным перемешиванием и дефлегмации было выявлено, что высокую степень извлечения демонстрирует этоксиэтан и этанол. Оценка эффективности применяемых способов составлялась из содержания свободных кислот (75–85 %) и числа сложных эфиров, представляющих собой высокобиологически активные вещества – воски. На описываемый процесс помимо времени влиял температурный режим, так, повышая температуру, значительно увеличивалась интенсификация и глубина экстракции. Данная закономерность указывает на то, что лимитирующей стадией процесса является внутренняя диффузия. Решением данной проблемы является измельчение торфяного сырья [31].

Известно применение водно-спиртовой смеси в соотношении 1:1 в качестве экстрагента. Методом погружения, фракционно отобранное сырье с размером частиц 2–5 мм, заливали экстрагентом в массовом соотношении 1:5, процесс длился 4 часа. Результатом исследования является получение водно-спиртового экстракта из торфа, в котором содержатся тритерпеноиды от 0,2 % до 0,7 % в зависимости от типа природного сырья. Наличие описанного соединения позволяет говорить об антимикробных свойствах полученного продукта, который можно использовать как добавку в косметологическом и фармацевтическом производстве [32].

Экстракции восков и смол применяются и для создания сорбентов на основе торфа. В работе [33] верховой торф со степенью разложения 25 % предварительно алкилировали бутанолом в присутствии 9 % фосфорной кислоты при температуре кипения упомянутого спирта. Затем природное сырье последовательно подвергалось экстракционной обработке гексаном и смесью спирт-бензола. Описанная методика позволяет получить углеродные сорбенты с удельной поверхностью 326–360 м²/г и сорбционной способностью, определяющейся по поглощению паров бензола, 466–226 мг/г, по сравнению с исходным сырьем – 155–107 мг/г.

КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТОРФА

Наиболее эффективными являются те методы переработки, в основе которых лежит синергия. Таким способом, является механохимическая активация сырья, представляющая собой комплексный процесс, сопровож-

даемый разнообразными эффектами физической и химической природы. Важно отметить, что существенные изменения в составе и свойствах органического вещества могут предоставить новые технологические возможности эффективного использования природных ресурсов, подвергнутых тонкой переработке механохимией.

Специалистами Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) разработан и запатентован способ получения стимулятора роста растений. Механохимическая активация торфа осуществляется за счет применения роторно-пульсационного аппарата при частоте 45 Гц. Суспензия, состоящая из торфа и воды при гидромодуле 9,5:1, далее нагревается до 115–130 °С при добавлении 20–50 % аммиака и 20–30 % раствора перекиси водорода. Такой подход позволяет увеличить выход целевого продукта до 90 % на органическую массу торфа с сохранением качественных показателей и биологической активности [13].

В исследовании Селяниной С.Б., вышеупомянутого автора, экстракция была оптимизирована. Процесс проводился комплексно с применением физических методов переработки. Выявлено, что применение ультразвукового и микроволнового полей значительно ускоряет процесс экстракции с сохранением выхода ценных продуктов. Так, для УЗ-излучения время воздействия составило 2 часа, для СВЧ-излучения – 0,17 часа, по сравнению традиционным настаиванием – 24 часа [34].

Командой следующего исследования [35] была разработана технология тонкой переработки торфа на основе синергии механоактивации торфа с использованием роторно-пульсационного аппарата и химической активации с применением раствора аммиака 25 % и перекиси водорода 30 %. Выход гуминовых кислот при таком методе достигает 12 г/л.

Комплексный подход к процессу переработки торфа с применением ультразвукового воздействия, переменного и постоянного магнитных полей применяется в исследовании Москаленко Т.В. Продолжительность экстракции составляла 2 часа. Выход гуминовых кислот положительно изменялся в 1,2–1,5 раза, по сравнению с чисто химической активацией сырья [36].

В работе Никитиной И.М. описывается способ получения гумусового препарата, способного снизить содержание тяжелых металлов в сточных водах. Активация гуминовых кислот торфа происходила следующими методами: деминерализацией под действием

соляной кислоты, щелочным гидролизом гидроксидом натрия и гидроксидом кальция. Данные методы подготовки реагента не удовлетворяли поставленные требования, так как в очищенной воде дополнительно увеличивалась концентрация потенциально вредных элементов. Для решения недостатков описанных методов было предложено предварительно механоактивировать сырье с помощью шаровой мельницы при размере стальных шариков 1,5–2 мм в течение 30 минут. Далее торф обрабатывали гидроксидом кальция и высушивали. Такой метод приводил к дезактивации фульвокислот и увеличению выхода гуминовых кислот до 80 %. В результате степень очистки воды от марганца и стронция составила 98,9 % и 90,1 % соответственно. Показано, что осадки, образующиеся в процессе очистки торфяным препаратом, можно использовать в качестве почвенной основы, обеспечивающей увеличение всхожести семян [37].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая проведенное исследование, можно сказать, что на данный момент новые методы глубокой переработки торфа являются наиболее перспективными направлениями в химической технологии с целью получения гумусосодержащих, биологически активных удобрений, сорбентов и компонентов фармакологических препаратов. Результаты анализа показывают, что при использовании возобновляемого сырья, такое как торф, существует возможность повысить ресурсосберегающий эффект за счет малых отходов, простоты технологических решений, дешевизны используемого сырья и большого выхода целевого компонента.

На сегодняшний день, в основном, торф используется в качестве топлива, доля, занимаемая им в химической промышленности, крайне мала [38]. Поскольку в современном мире набирает обороты тенденция к использованию недорогих, простых в обработке и экологически чистых материалов, способных обеспечить конкурентоспособность синтетическим средствам, то особый интерес представляют собой торфяные месторождения.

Изготовление и применение препаратов на основе органических частей торфа приведет к восстановлению окружающей среды, например, к очистке почв от пестицидов или разливов нефти. Наиболее эффективно-пригодное сырье для получения таких продуктов получается при механохимической (комплексной) переработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование / под ред. Е.И. Ермакова. СПб. : Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2004. 248 с.
2. Орлов Д.С. Гуминовые вещества в биосфере // Сорос. Образоват. журн. 1997.
3. Зыкова М.В. Высокомолекулярные соединения гуминовой природы – перспективные биологически активные соединения / М.В. Зыкова, Л.А. Логвинова, М.В. Белоусов // Традиционная медицина, 2018. № 2 (53). С. 27–38.
4. Лиштван И.И. Основные свойства торфа и методы их определения / И.И. Лиштван, Н.Т. Король. Минск : Наука и техника, 1975. 320 с.
5. Недайводин Е.Г. Термохимическое исследование пиролиза верхового торфа / Е.Г. Недайводин, А.В. Петров, Н.Ш. Лебедева // Современные проблемы гражданской защиты. 2016. № 2(19). С. 17–21.
6. Сорбент торфяной и способ его получения: пат. 2560366 Рос. Федерация ; заявл. 01.04.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23.
7. Использование торфа в качестве сорбента тяжелых металлов / Н.Г. Валиев [и др.] // Известия ТулГУ. Наука о Земле. 2023. № 3, С. 137–146.
8. Букейханов Н.Р. Механохимия жидкофазного окислительного аммонолиза природного сырья / Н.Р. Букейханов, Т.П. Михайловская, И.М. Чмырь // Химический журнал Казахстана. 2022. № 1. С. 5–14.
9. Синчинов С.А. Интенсификация процесса извлечения гуминовых веществ с использованием роторного гомогенизатора / С.А. Синчинов, Ю.В. Передерин, И.О. Усольцева // Химия и химическая технология в XXI веке. 2021. № 22. С. 129–130.
10. Дудкин Д.В. Влияние ботанического состава и степени разложения торфа на состав гуминовых кислот, полученных механохимическим способом / Д.В. Дудкин, Е.А. Заров, А.С. Змановская // Химия растительного сырья. 2016. № 2. С. 109–116.
11. Особенности состава и свойств гуминовых кислот торфов при механохимической обработке / А.А. Иванов [и др.] // Вестник ТГПУ. 2008. № 4. С. 38–41.
12. Михайлов Н.К. Механоактивация органического сырья с целью перевода гуминовых веществ в раствор / Н.К. Михайлов, Ю.В. Передерин, И.О. Усольцева // Химия и химическая технология в XXI веке. 2021. № 22. С. 214–215.
13. Способ получения стимулятора роста растений: пат. 2748166 Рос. Федерация; заявл. 14.10.2020; опубл. 20.05.2021, Бюл. № 14.
14. Денисюк Д.В. Особенности электрогидравлической обработки торфа и песка / Е.А. Денисюк, Р.А. Митрофанов, И.А. Носова // Вестник НГИЭИ. 2013. № 6 (25). С. 36–46.
15. Установка для производства органического удобрения: пат. 2746546 Рос. Федерация; заявл. 11.04.2020; опубл. 15.04.2021, Бюл. № 11.
16. Способ получения гуминовых веществ из низинного торфа методом электрогидроудара и устройство для его реализации: пат. 2792350 Рос. Федерация; заявл. 14.10.2020; опубл. 20.05.2021, Бюл. № 14.
17. Интенсификация извлечения гуминовых кислот из горных торфов с использованием ультразвуковой

- обработки металлов / Г.В. Ларина [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 6. С. 23–29.
18. Niewes, D. [et al.]. (2022) Ultrasound-Assisted Extraction of Humic Substances from Peat: Assessment of Process Efficiency and Products' Quality Journal Molecules 27(11), 3413; <https://doi.org/10.3390/molecules27113413>.
19. Силкин С.В. Исследование управляемого ультразвукового диспергирования торфа и бурого угля в воде / С.В. Силкин, Е.Е. Куликов, И.А. Попов // Механика, труды МФТИ. 2018. № 3. С. 86–95.
20. Анализ продуктов низкотемпературного СВЧ-пиролиза торфа / Т.О. Крапивницкая [и др.] // Химия древесины. 1981. № 1. С. 101–103.
21. Влияние радиолитизации на процессы минерализации и трансформации органического вещества низинного торфа в почву / Л.В. Касимова [и др.] // Химия растительного сырья. 2009. № 4. С. 165–170.
22. Скворцов С.В., Климентов А.С. Радиационная деструкция целлюлозы древесины сосны и ели // Химия древесины. 1986. № 3. С. 31–33.
23. Влияние ионизирующей радиации на гидролитическую устойчивость древесины / Т.О. Крапивницкая [и др.] // Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. № 2. С. 339–348.
24. Смирнов В.В. Особенности физико-химических свойств гуминовых кислот, выделенных водным раствором аммиака / В.В. Смирнов, Н.Н. Бамбалов, С.В. Пармон // Природопользование. 2013. № 23. С. 173–181.
25. Смирнов В.В. Содержание легкогидролизуемых веществ в гуминовых кислотах, выделенных из торфа при различных условиях / В.В. Смирнов, Н.Н. Бамбалов // Природопользование. 2014. № 25. С. 179–183.
26. Козлова А.В. Дезактивация ионов тяжелых металлов и радионуклидов с использованием гуминовых веществ / А.В. Козлова, И.О. Усольцева, Ю.В. Передерин // Химия и химическая технология в XXI веке. 2022. № 2. С. 157–158.
27. Кутищева Е.С. Идентификация гуминовых веществ в растворах / Е.С. Кутищева, И.О. Усольцева, Ю.В. Передерин // Химия и химическая технология в XXI веке. 2012. № 23. С. 357–358.
28. Исследование способов извлечения из низинного торфа гуминовых препаратов / В.Р. Роганов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 23–31.
29. Исследование процесса ферментативного гидролиза торфа верхового типа тверской области с целью получения моносахаридов / Н.В. Лакина [и др.] // Вестник ТвГУ. Серия "Химия" 2019. № 1(35). С. 113–120.
30. Исследование свойств торфа для решения экологических проблем / Т.И. Бурмистрова [и др.] // Химия растительного сырья. 2009. № 3. С. 157–160.
31. Экстракция битумов из верхового торфа / С.Б. Селянина [и др.] // Arctic Environmental Research. 2013. № 1. С. 43–50.
32. Зайцева Т.Л. Влияние ботанического состава и степени разложения торфа на состав гуминовых кислот, полученных механохимическим способом / Т.Л. Зайцева // Химия твердого топлива. 2008. № 1. С. 3–6.
33. Получение углеродных сорбентов из бурых углей и торфа после извлечения восков и смол / Г.П. Хохлова [и др.] // Вестник Кузбасского государственного

го технического университета. 2005. № 4-1(48). С. 65–68.

34. Оптимизация процесса экстракции биологически активных веществ из верхового торфа / С.Б. Селянина [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН 2020. № 2–8. С. 108–116.

35. Уржумова Н.Д. Технологии глубокой переработки торфа / Н.Д. Уржумова, И.О. Усольцева, Ю.В. Передерин // Химия и химическая технология в XXI веке. 2022. № 23. С. 104–105.

36. Москаленко Т.В. Влияние ботанического состава и степени разложения торфа на состав гуминовых кислот, полученных механохимическим способом / Т.В. Москаленко, В.А. Михеева // Вестник ИрГТУ. 2012. № 7(66). С. 100–104.

37. Никитина И.М. Разработка способа получения реагента на основе торфа для снижения содержания тяжелых металлов в сточных водах горных предприятий : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 124 с.

38. Vambalov, N.N. (2012). Use of peat as an organic raw material for chemical processing. Solid Fuel Chem. 46, 282–288. <https://doi.org/10.3103/S0361521912050023>.

Информация об авторах

Ю. В. Передерин – кандидат химических наук, доцент отделения ядерного-топливного цикла, инженерной школы ядерных технологий,

Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Е. Г. Анзельм – лаборант отделения ядерного-топливного цикла, инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

И. О. Усольцева – старший преподаватель отделения ядерного-топливного цикла, инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Information about the authors

Yu.V. Perederin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Nuclear Fuel Cycle Department of the National Research Tomsk Polytechnic University.

E.G. Anzelm - Laborant of the Department of Nuclear Fuel Cycle of the National Research Tomsk Polytechnic University.

I.O. Usoltseva - Assistant of the Department of the Nuclear Fuel Cycle of the National Research Tomsk Polytechnic University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2024; одобрена после рецензирования 20 ноября 2024; принята к публикации 04 декабря 2024.

The article was received by the editorial board on 15 Feb 2024; approved after editing on 20 Nov 2024; accepted for publication on 04 Dec 2024.