

УДК 533.9:630\*86

**Ю.В. Чуркина, О.М. Соколов, М.Н. Васильев, Д.Г. Чухчин**

Чуркина Юлия Викторовна родилась в 1974 г., окончила в 1997 г. Поморский государственный университет, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры биотехнологии Архангельского государственного технического университета. Имеет 5 печатных работ в области химической переработки растительного сырья.



Соколов Олег Михайлович родился в 1936 г., окончил в 1960 г. Ленинградский технологический институт ЦБП, доктор химических наук, профессор, ректор, заведующий кафедрой биотехнологии Архангельского государственного технического университета, академик Международной академии наук, РИА, РАЕН, Академии проблем качества РФ, чл.-кор. МИА, заслуженный деятель науки РФ. Имеет более 170 научных трудов в области исследования процессов сульфатной варки, изучения свойств и применения технических лигнинов.



Васильев Михаил Николаевич родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский физико-технический институт, доктор технических наук, зам. проректора МФТИ по научной работе. Имеет более 80 печатных трудов в области физики и химии плазмы.



Чухчин Дмитрий Германович родился в 1971 г., окончил в 1993 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии Архангельского государственного технического университета. Имеет более 30 печатных работ в области химической переработки древесины.



### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЭНТАЛЬПНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ НА ТОРФ**

Исследовано воздействие низкоэнтальпийной электронно-пучковой плазмы на торф; предложены пути использования продуктов обработки в промышленности.

Ключевые слова: торф, обработка, низкоэнтальпийная электронно-пучковая плазма.

Несмотря на огромные запасы торфа в мире и в России, в частности, применение его в народном хозяйстве крайне незначительно. В настоящее время торф используется в сельском хозяйстве и как топливо, исключая другие, быть может более перспективные, направления.

Основными компонентами торфа, как и древесины, являются целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин и экстрактивные вещества. Элементарный состав растений-торфообразователей сходен с элементарным составом древесины хвойных и лиственных пород.

Известные методы химической переработки растительного сырья, в том числе и торфа, требуют высоких затрат реагентов, энергии и приводят, как правило, к инициированию нежелательных процессов и образованию большого количества отходов.

Физические способы воздействия, основанные на использовании современных методов радиационной обработки, также не находят применения в промышленности из-за низкого КПД и высокой энергоемкости процессов.

Поэтому актуален поиск методов безреагентного воздействия на торф, позволяющих увеличить растворимость обработанного продукта в воде и водных растворах реагентов и тем самым повысить коэффициент использования сырья, а также снизить уровень антропогенного воздействия на окружающую среду.

Для этой цели предложено использовать низкоэнтальпийную электронно-пучковую плазму (ЭПП), генерируемую при инъекции электронного пучка в газообразную среду [3]. В качестве объекта исследования использовали комплексный торф верхового типа моховой группы со степенью разложения 5 и 20 %. Степень разложения торфа характеризуется процентным содержанием в нем аморфной массы. Частицы измельченного торфа (фракция 0,09 ... 0,50 мм) закрепляли на фильтровальной бумаге (мишень диаметром 200 мм) в листоотливном аппарате путем высаживания из водной взвеси и последующего высушивания. Варьируя состав и давление плазмообразующей среды, а также параметры электронного пучка, обработку ЭПП проводили на специальной установке [2], разработанной на кафедре физической механики МФТИ. После обработки мишени делили на примерно одинаковые по массе зоны, для каждой из которых были рассчитаны удельные энергозатраты на обработку.

Интересным представлялось исследовать влияние удельного расхода энергии ( $E_{уд}$ ) ЭПП на обработку и вида плазмообразующей среды на деструкцию торфа. Изменение компонентного состава торфа в результате воздействия оценивали в соответствии со стандартными методиками определения химического состава растительного сырья по следующим параметрам: содержание веществ, экстрагируемых горячей водой; содержание легко- и трудногидролизуемых полисахаридов (ЛГП и ТГП), негидролизуемого остатка.

Влияние удельной дозы обработки ЭПП на деструкцию верхового торфа со степенью разложения 5 %

Обработка торфа в течение 10 мин при использовании  $H_2O$  в качестве плазмообразующего газа, мощности пучка электронов 140 Вт (ускоряющее напряжение и ток –  $28 \text{ кВ} \times 5 \text{ МА}$ ) и давления 14 мм рт. ст. показала, что воздействие на торф низкоэнтальпийной ЭПП приводит к значительному изменению его компонентного состава (рис. 1). Так, при повышении

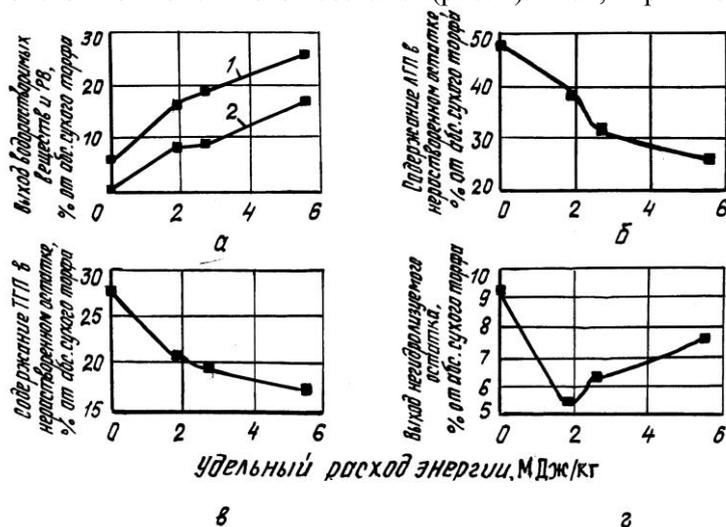


Рис. 1. Влияние удельного расхода энергии на содержание основных компонентов торфа: 1 – водорастворимые вещества (ВВ); 2 – редуцирующие вещества (РВ) после инверсии; а – выход ВВ и РВ; б – содержание ЛГП; в – содержание ТГП; г – выход негидролизующего остатка (■ – плазмообразующий газ  $H_2O$ )

удельных энергозатрат на обработку торфа происходит снижение содержания ЛГП (вследствие их превращений в низкомолекулярные соединения) и ТГП (в результате деструкции макромолекул целлюлозы). Продукты деструкции ЛГП и ТГП переходят в водорастворимое состояние, что подтверждается увеличением количества водорастворимых веществ с 5,4 % в исходном торфе до 25,5 % ( $E_{уд} = 5,6 \text{ МДж/кг}$ ). Рост выхода негидролизующего остатка вследствие конденсационных процессов наблюдается при  $E_{уд} = 1,9 \text{ МДж/кг}$ .

Влияние удельных энергозатрат на плазмохимическую обработку и вида плазмообразующей среды на деструкцию верхового торфа со степенью разложения 20 %

Обработка торфа со степенью разложения 20 % при использовании плазмообразующих газов  $O_2$  и  $H_2O$  и мощности пучка электронов 260 Вт ( $26 \text{ кВ} \times 10 \text{ МА}$ ) в течение 10 мин показала, что плазмохимическое воздействие, как и в эксперименте с торфом со степенью разложения 5 %, повышает

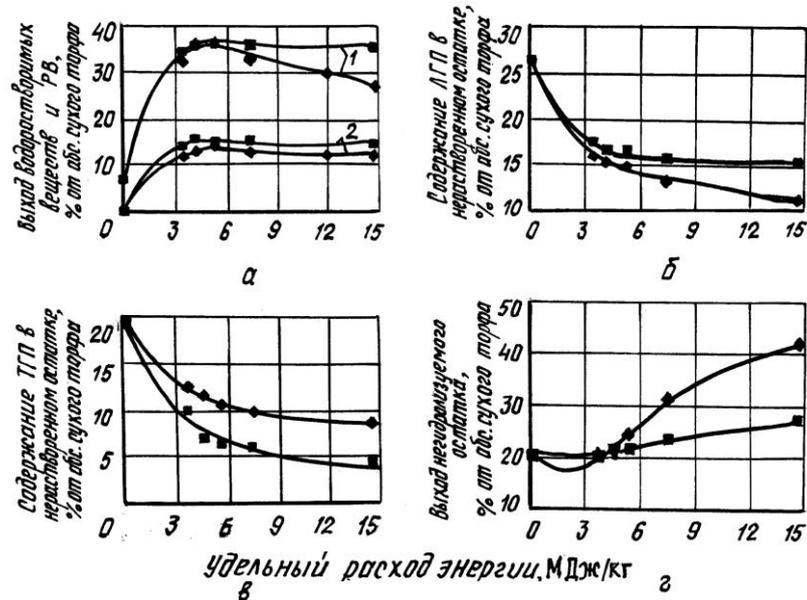


Рис. 2. Влияние удельного расхода энергии на содержание основных компонентов торфа (см. обозначения на рис. 1; ■ – плазмообразующий газ  $H_2O$ , ◆ –  $O_2$ )

выход водорастворимых веществ (ВВ) за счет уменьшения содержания ЛГП и ТГП (рис. 2). Причем, максимальный выход ВВ в обоих вариантах достигается при  $E_{уд}$  до 4,2 МДж/кг, и дальнейшее увеличение удельного расхода энергии на обработку практически не приводит к росту этого показателя. Такая же закономерность характерна и для содержания редуцирующих веществ (РВ) в составе этой фракции.

Однако не все водорастворимые вещества определяются как углеводы, о чем свидетельствует значительная разница (более чем в 2 раза) между количеством ВВ и РВ после инверсии в составе этой фракции.

Некоторая часть продуктов превращения полисахаридов, не перешедших в водный раствор, по-видимому, через промежуточные низкомолекулярные соединения участвует в конденсационных процессах, о чем можно судить по увеличению выхода негидролизованного остатка.

Сравнение результатов обработки торфа в среде плазмообразующих газов  $H_2O$  и  $O_2$  показало, что процессы конденсации происходят интенсивнее в присутствии  $O_2$ , о чем свидетельствует больший выход (до 41,7 % при  $E_{уд} = 14,7$  МДж/кг) негидролизованного остатка (рис. 2, з).

Обработка ЭПП при расходе энергии свыше 4,2 МДж/кг сопровождается высокими энергозатратами, однако она не приводит к увеличению количества ВВ. Поэтому с целью поиска оптимального интервала удельного расхода энергии (дозы) была проведена обработка (продолжительность обработки 5 мин, мощность пучка электронов 260 Вт, давление 7 мм рт. ст.)

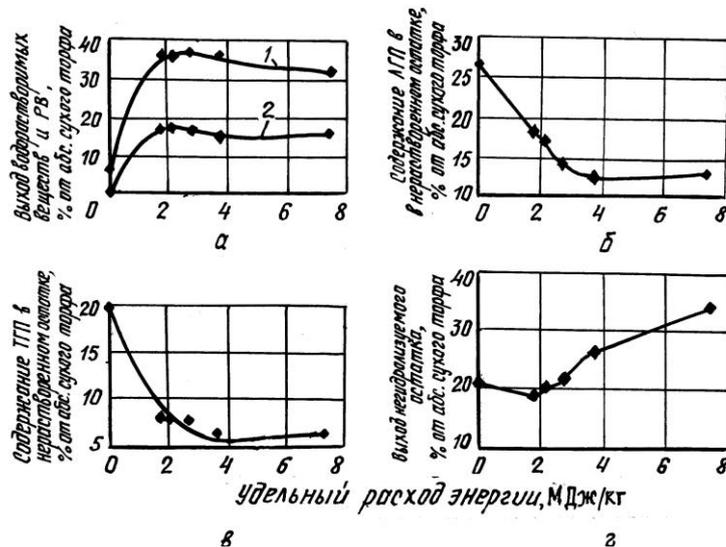


Рис. 3. Влияние удельного расхода энергии на содержание основных компонентов торфа (см. обозначения на рис. 1;  $\blacklozenge$  – плазмообразующий газ  $O_2$ )

в среде  $O_2$  в интервале  $E_{уд} = 1,8 \dots 7,4$  МДж/кг (рис. 3). Полученные данные подтверждают общие закономерности изменения компонентного состава торфа в результате воздействия ЭПП. Удельный расход энергии на плазмохимическую обработку можно снизить  $E_{уд} < 1,8$  МДж/кг, так как при этом значении достигается максимальный выход ВВ. Дальнейшее увеличение удельного расхода энергии приводит к усилению конденсационных процессов. Следует отметить, что использовать плазму, образованную газом  $H_2O$ , предпочтительнее, нежели образованную  $O_2$ .

*Оптимизация обработки торфа ЭПП с целью достижения максимального выхода водорастворимых веществ при минимальных энергозатратах*

Обработка ЭПП в среде  $H_2O$  при мощности пучка электронов 150 Вт (25 кВ  $\times$  6 мА) и продолжительности обработки от 0,5 до 5,0 мин показала, что достаточно высокий выход водорастворимых веществ (26 %) достигается уже при энергозатратах до 1,0 МДж/кг. Дальнейшее увеличение дозы обработки приводит к незначительному (на 2,0 ... 2,5 %) росту их количества (рис. 4).

Удельная мощность обработки незначительно влияет на выход ВВ, что позволяет интенсифицировать процесс и уменьшить продолжительность воздействия до нескольких секунд.

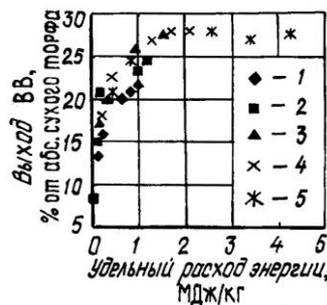


Рис. 4. Зависимость выхода ВВ от удельного расхода энергии на обработку при различных значениях удельной мощности: 1 – 3,4; 2 – 4,0; 3 – 5,1; 4 – 7,1; 5 – 14,3 кВт/кг

*Исследование состава и свойств водорастворимых веществ  
плазмохимически обработанного верхового торфа*

Химическое и спектрометрическое исследование экстрактов водорастворимых веществ торфа, обработанного в среде  $O_2$ , показало, что плазмохимическая обработка приводит к увеличению содержания карбоксильных (до 8,3 %) и карбонильных (до 12,9 %) групп (в исходном торфе соответственно 5,0 и 5,2 %).

При изучении экстрактов водорастворимых веществ методом эксклюзионной ВЭЖХ с УФ детектором при 280 нм было обнаружено (рис. 5), что обработка торфа ЭПП не приводит к коренным изменениям размеров макромолекул полимеров, поглощающих при этой длине волны и переходящих в водорастворимое состояние.

При малых дозах обработки коэффициент экстинкции  $\epsilon$  водорастворимых веществ при  $\lambda = 280$  нм снижается, при больших (более  $E_{уд} = 4,2$  МДж/кг) – увеличивается (рис. 6). Возрастание выхода ВВ совпадает с уменьшением  $\epsilon$ , и наоборот. Снижение  $\epsilon$  связано с разрушением ароматических структур, а его рост совпадает с процессом их конденсации, о чем свидетельствует и увеличение выхода негидролизованного остатка (см. рис. 2, 3).

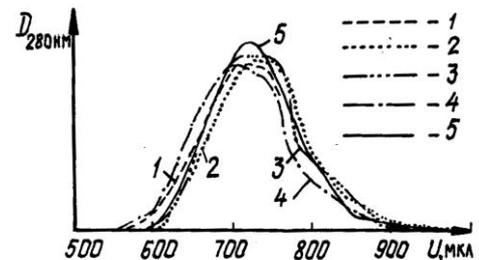


Рис. 5. Нормированные хроматограммы ВВ торфа при различных значениях удельного расхода энергии на обработку: 1 – 14,7 МДж/кг; 2 – 7,4; 3 – 5,3; 4 – 3,5 МДж/кг (5 – исходный образец)

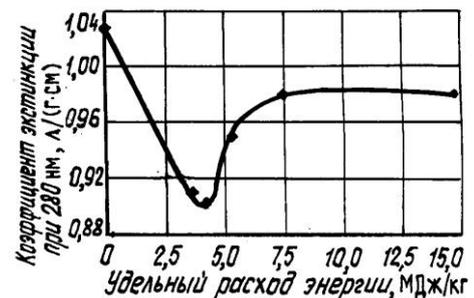


Рис. 6. Зависимость коэффициента экстинкции ВВ от удельных энергозатрат на обработку торфа

*Исследование возможности применения верхового торфа,  
обработанного ЭПП, для производства кормовых дрожжей*

Нами проведен маломодульный гидролиз исходного торфа со степенью разложения 5 % и обработанного торфа ( $E_{уд} = 1,9$  МДж/кг, плазмообразующий газ –  $H_2O$ ). Выращивание кормовых дрожжей на полученных гидролизатах показало благоприятное влияние плазмохимической предобработки торфа электронно-пучковой плазмой на рост биомассы дрожжей. В проведенных экспериментах выход дрожжей достигал соответственно 53 и 140 кг на 1 т абс. сухого торфа.

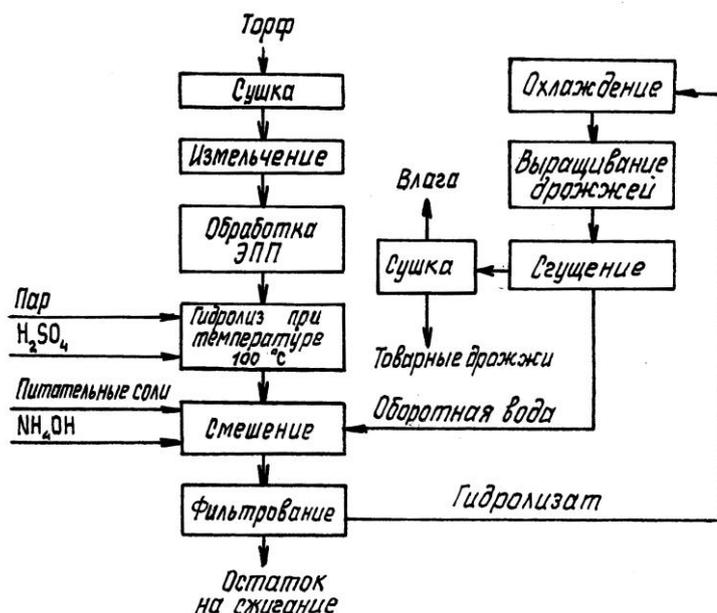


Рис. 7. Принципиальная схема переработки верхового торфа на кормовые дрожжи с включением обработки ЭПП

Исходя из полученных данных, была разработана блок-схема производства кормовых дрожжей на верховом торфе, обработанном ЭПП (рис. 7).

Особенностью данной схемы является проведение гидролиза при атмосферном давлении, что упрощает технологический процесс и практически сводит к минимуму разложение образующихся моносахаридов. Схема почти полностью исключает сброс сточных вод и вредных парогазовых выбросов. Применение в этой схеме предобработки торфа ЭПП позволит повысить долю извлекаемых из торфа и ассимилируемых микроорганизмами органических веществ и значительно увеличить выход дрожжей. Проведение гидролиза при малом гидромодуле (1–3) дает возможность снизить энергозатраты на нагрев варочной кислоты, расходы воды, кислоты и нейтрализующих реагентов.

#### *Оценка эффективности применения экстрактов верхового торфа, обработанного ЭПП, в производстве бумаги*

Благодаря высокому содержанию гемицеллюлоз верховой торф может служить источником углеводов, подобных тем, что применяют в качестве добавки при производстве бумаги для увеличения межволоконных сил связи. Дополнительное воздействие ЭПП на торф позволяет увеличить количество экстрагируемых водой веществ, значительно снизить степень полимеризации гемицеллюлоз и целлюлозы, а также увеличить содержание в этих полимерах гидрофильных функциональных групп.

Ранее [3] было установлено, что вносимые в целлюлозу добавки водорастворимых веществ способствуют улучшению механических свойств бумаги. При расходе добавки в количестве 0,5 % разрывная длина бумаги увеличивается на 11 % при одновременном росте сопротивления продавливанию на 14 %. Добавка в целлюлозу такого же количества специального катионитного крахмала дает увеличение этих показателей соответственно на 10 и 20 %.

Предложена блок-схема получения добавок водорастворимых веществ, извлеченных из плазмохимически обработанного верхового торфа, для применения в ЦБП с целью увеличения прочности бумажного листа. Согласно этой схеме высушенный до воздушно-сухого состояния верховой торф обрабатывают ЭПП, затем экстрагируют горячей водой при гидромодуле 5. После фильтрования полученный экстракт вносится в бумажную композицию. В экстракт переходит до 26 % от массы торфа, остаток рекомендуется использовать для сжигания.

Проведенный расчет себестоимости полученной добавки показал, что применение экстракта водорастворимых веществ плазмохимически обработанного торфа более чем в 4 раза экономичнее, чем использование для этой цели модифицированного крахмала.

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы.

1. Обработка торфа ЭПП приводит к увеличению количества веществ, экстрагируемых горячей водой, с 6,7 до 36,7 % за счет деструкции ЛГП, ТГП, лигнина. Однако при высоком удельном расходе энергии на обработку (свыше 2,7 МДж/кг) происходит уменьшение количества водорастворимых веществ за счет процессов конденсации, циклизации продуктов гидролиза, в результате чего увеличивается выход негидролизуемого остатка.

2. Определены оптимальные условия обработки торфа ЭПП: плазмообразующий газ –  $H_2O$ , удельный расход энергии – до 1,0 МДж/кг, давление газа – 12 ... 20 мм рт. ст. при ускоряющем напряжении 26...28 кВ.

3. Предобработка верхового торфа ЭПП с последующим маломодульным гидролизом позволит организовать экологически безопасное производство кормовых дрожжей.

4. Водорастворимый продукт деструкции плазмохимически обработанного торфа может быть использован в качестве связующего материала в производстве бумаги. При его введении в композицию улучшаются прочностные характеристики бумажного листа. Например, при введении добавки водорастворимых веществ в количестве 0,5 % разрывная длина увеличивается на 11 %, сопротивление продавливанию – на 14 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков В.Л., Васильев М.Н., Коротеев А.С. Электронно-пучковая плазма. Генерация, свойства, применение: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГОУ, 1993. – 168 с.

2. Соколов О.М., Васильев М.Н., Чухчин Д.Г. Исследование изменения состава древесины при обработке низкоэнтальпийной электронно-пучковой плазмой // Лесн. журн. – 1999. – № 2–3. – С. 167–175. – (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Соколов О.М. и др. Перспективы использования плазмохимически обработанного торфа в ЦБП / О.М. Соколов, В.И. Комаров, Ю.В. Чуркина и др. // Перспективы освоения минерально-сырьевой базы Архангельской области: Сб. науч. тр. межд. научно-практ. конф. – Архангельск, 2002. – С. 161–164.

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 21.03.03

*Yu. V. Churkina, O. M. Sokolov, M. N. Vasiljev, D. G. Chukhchin*  
**Study of Influence of Low-enthalpy Electron-beam Plasma on Peat**

The influence of low-enthalpy electron-beam plasma on peat has been studied. The ways of utilizing treatment products in industry are suggested.

---