

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа Аэрокосмических Технологий

На правах рукописи

Кхин Маунг Хтау

**Риформинг лигнина и лигноцеллюлозной массы
в электронно-пучковой плазме**

Специальность: 01.04.08 – «Физика плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Долгопрудный – 2020 г.

Работа прошла апробацию на кафедре логистических систем и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Васильева Татьяна Михайловна,**
доктор технических наук, доцент,
профессор департамента химии МФТИ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Защита состоится «24» декабря 2020 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ФАКТ.01.04.08.002 по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php>.

Работа представлена «2» октября 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национального исследовательского университета)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п. 3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Введение

Актуальность работы: В последнее время во всем мире наблюдается рост использования биомассы и биополимеров в качестве дешевых и возобновляемых источников энергии для широкого спектра применений. Химические свойства компонентов лигноцеллюлозных материалов (целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина) делают их подходящим сырьем для разнообразных (био)технологических применений. Кроме того, целлюлоза, основной компонент лигноцеллюлозной биомассы, считается наиболее подходящим кандидатом на замещение полимеров на нефтяной основе благодаря своим экологичным свойствам, таким как возобновляемость, биосовместимость и биоразлагаемость.

В настоящее время для предварительной обработки лигноцеллюлозы, ее фракционирования, повышения солюбилизации и получения продуктов с более низкой молекулярной массой и степенью полимеризации используется продолжительный химический гидролиз в разбавленных и концентрированных кислотах или щелочах при высокой температуре, который требует последующей нейтрализации вредных отходов. Другими методами подготовки лигноцеллюлозного сырья являются применение микроволнового и γ -излучений, облучение высокоэнергетическими электронными пучками (с энергиями МэВ), паровой взрыв, взрыв аммиачного волокна, органосольвентные процессы, влажное окисление, ферментативный гидролиз. Однако большинство из перечисленных методов не получило широкого распространения в целлюлозной промышленности вследствие их многочисленных недостатков (от необходимости использования сложного оборудования и агрессивных реагентов до низких выходов желаемых продуктов переработки лигноцеллюлозы). Таким образом, необходимы дальнейшие исследования для того, чтобы сделать процессы модификации растительной биомассы малозатратными, энергосберегающими, экологически чистыми и способными давать высокие выходы отдельных компонентов и олигомеров с низкими показателями полидисперсности.

Плазмохимические технологии, основанные на неравновесной низкотемпературной электронно-пучковой плазме (ЭПП), могут быть перспективной альтернативой указанным выше методам контролируемой деструкции лигноцеллюлозного комплекса и уменьшения молекулярной массы его компонентов (таких как целлюлоза и лигнин) с высокой степенью полимеризации. Пучково-плазменная обработка является сухим процессом, который не требует высококонцентрированных кислотных и щелочных растворов или других опасных реагентов. Она может рассматриваться как переход к «зеленой химии» и быть перспективной альтернативой методам, традиционно используемым для переработки биополимеров с целью получения на их основе новых ценных продуктов и материалов.

Научная новизна работы заключается в том, что в ходе выполнения работы электронно-пучковый плазмохимический реактор (ЭППР), был адаптирован для генерации ЭПП применительно к задачам обработки

материалов, являющихся сырьем для целлюлозно-бумажной промышленности а именно разработана оснастка рабочей камеры ЭППР, которая позволяет формировать реакционный объем, содержащий порошки и гранулы лигноцеллюлозной массы. Для впервые проведено компьютерное моделирование свойств ЭПП кислорода и гелия для условий эффективной обработки лигноцеллюлозы.

Получены новые экспериментальные данные об изменении свойств гидролизного лигнина и лигносульфонатов под воздействием ЭПП кислорода и гелия.

Практическая ценность результатов диссертации заключается в том, что в результате работы были определены области применения предложенных способов пучково-плазменного воздействия на лигноцеллюлозную массу, в которых они имеют существенные преимущества перед традиционными химическими технологиями. Сами продукты ЭПП-риформинга могут представлять интерес для целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности, а также для химической технологии в качестве сырья выделения низкомолекулярных соединений-прекурсоров органических синтезов, биотоплива и др.

Разработанные плазмохимические способы и плазмотехнические устройства могут быть применены и в других областях: для переработки отходов рыболовства и сырья, получаемого из водных биоресурсов, в микробиологии, пищевой промышленности, сельском хозяйстве, медицине, фармацевтике.

Целью настоящей работы является: экспериментально доказать возможность использования ЭПП-обработки для модификации лигнинов и лигноцеллюлозной массы с целью повышения химической реакционной способности этих материалов для их последующего использования, например, - в качестве ингредиентов композиционных материалов.

Задачи исследования:

1. Оснастить плазмохимический реактор лаборатории Пучково-плазменных систем и технологий реакционными камерами, обеспечивающими проведение экспериментов с материалами.
2. Для новых реакционных камер отладить процедуры обработки этих материалов в ЭПП кислорода и гелия; отработать методики измерения и регистрации параметров, характеризующих режимы обработки.
3. По отработанным методикам получить образцы продуктов пучково-плазменной обработки материалов в количествах достаточных для их анализа.
4. По результатам исследования образцов выявить эффекты, обусловленные воздействием на них электронно-пучковой плазмы.
5. Предложить плазмохимические модели, объясняющие выявленные эффекты.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные доказательства возможности использования пучково-плазменной обработки для модификации лигнинов и лигноцеллюлозной массы с целью повышения химической реакционной способности этих материалов для их последующего использования, в том числе – в качестве компонентов композиционных материалов.
2. Результаты экспериментов, проведенных с лигноцеллюлозными волокнами, порошками гидролизного лигнина и гранулами лигносульфонатов (эффекты карбонизации компонентов лигносульфонатной массы).
3. Механизмы модификации лигнинов и лигноцеллюлозы в плазме кислорода и гелия.

Апробация работы:

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на ведущих международных и российских конференциях:

1. Юбилейная 60-я научная конференция, МФТИ (Долгопрудный, 2017),
2. VIII Международный симпозиум “Теоретическая и прикладная плазмохимия” (Иваново, 2018),
3. 61-я Всероссийская научная конференция, МФТИ (Долгопрудный, 2018),
4. 14-я Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2019),
5. 24th International Symposium on “Plasma Chemistry” (Naples, Italy, 2019),
6. 12th International Conference on “Plasma Assisted Technologies” (Yalta, 2019),
7. 62-ой Всероссийская научная конференция, МФТИ (Долгопрудный, 2019),
8. 27-я научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (ТОК «Судак», Республика Крым, 2020).

Публикации:

Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах, из них 6 статей - в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК (в том числе 3 статьи в журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science).

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем: Автор принимал непосредственное участие в планировании экспериментов и в выборе методик их проведения. Им была получена значительная часть экспериментальных данных, проведен их анализ и обобщение. Автор выполнил вычислительные эксперименты, позволившие существенно уменьшить объем и снизить трудоемкость физических экспериментов, а также верифицировать предложенные физико-химические модели. Автором сформулированы выводы и рекомендации по практическому использованию результатов диссертационного исследования.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и библиографии. Общий объем диссертации 58 страниц, включая *** рисунка и *** таблиц. Библиография включает 38 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полу ученых результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава содержит краткий обзор наиболее значимых работ, посвященных проблеме переработки и риформинга лигноцеллюлозной массы и ее компонентов. Особое внимание уделено приложениям низкотемпературной плазмы, а также физико-химическим процессы, происходящие при плазмохимическом воздействии на лигноцеллюлозу.

Глава 2 посвящена описанию объектов исследования и методик, использованных для анализа структуры и свойств исходных материалов и продуктов их пучково-плазменной модификации, а также обоснованию методик экспериментов по исследованию механизмов пучково-плазменного воздействия на лигноцеллюлозу.

В главе 3 описаны конструкция ЭППР, используемого для модификации лигноцеллюлозы, принцип его работы, а также компьютерное моделирование ЭПП, генерирующейся при этом в реакционной камере.

Рис. 1 иллюстрирует конструкцию и работу ЭППР, используемого в экспериментах. Сфокусированный ЭП 3, генерируемый электронно-пучковой пушкой 1, находящейся в высоковакуумной камере 2, инжектируется в рабочую камеру 5, заполненную плазмообразующим газом, через инжекционное окно 4. При прохождении через газ ЭП рассеивается при упругих столкновениях, и энергия быстрых электронов постепенно уменьшается при различных неупругих взаимодействиях со средой (ионизация, возбуждение, диссоциация). В результате в рабочей камере образовалось облако 6 ЭПП, и плазма заполнила реакционную камеру 7, установленную внутри рабочей камеры на герметичном подшипнике 10.

Предварительно загруженный порошок, подлежащий обработке, был рассеян по реакционной камере при вращении камеры и образовании аэрозольной реакционной зоны 8. Оптимальная частота вращения ω была выбрана экспериментально для получения максимальной эффективности обработки при любом заданном режиме генерации плазмы.

Концентрации активных частиц плазмы (n_j) и температура (T_s) частиц порошка характеризовали режимы обработки и отвечали за них следующие параметры: энергия электронов (E_b), ток электронного пучка (I_b), давление газа (P_m). Если не будут приняты специальные меры, то n_j и T_s будут функциями координат x , y и z (z -ось инъекции ЭП). Для получения приемлемой однородности пространственных распределений n_j и T_s применялось специальное сканирование электронного пучка. Электромагнитная сканирующая система 12, размещенная внутри рабочей камеры вблизи

выводного окна, была способна отклонять ось впрыскиваемого ЭП в направлениях x и y , образуя круговой растр переменного диаметра. Программируемый контроллер поддерживает режим сканирования и специально разработаны алгоритмы сканирования.

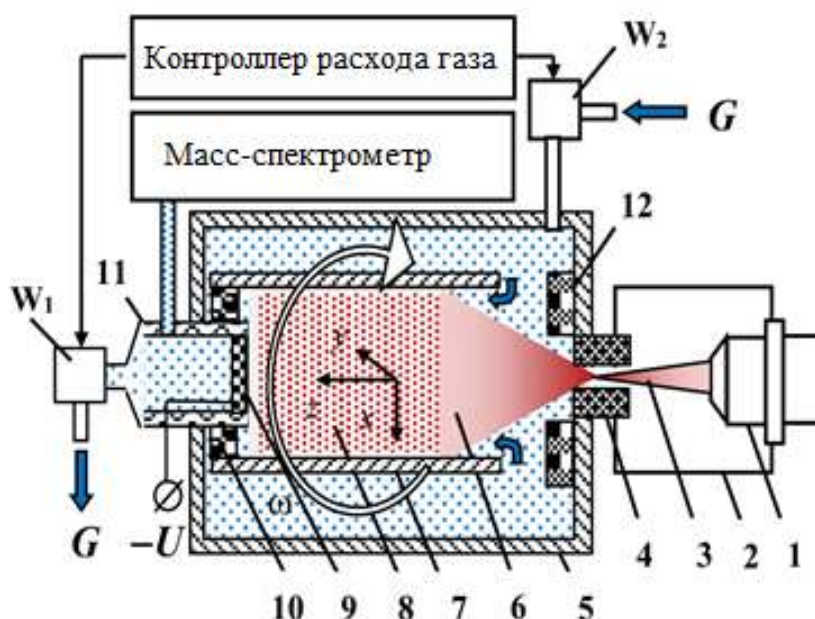


Рис. 1. Конструкция плазмохимического реактора и процедуры обработки: 1–электронно-пучковая пушка; 2 – высоковакуумная камера; 3 – оригинальная ЭП; 4 – выводное окно; 5 – рабочая камера; 6 – инжектируемая ЭП (ЭПП); 7 – реакционная камера; 8 – аэрозольная реакционная зона; 9 – металлическая сетка; 10 – герметичный подшипник; 11 – диэлектрическая трубчатая вставка; 12 – сканирующая система; W_1 , W_2 –клапаны

Рабочая камера предварительно вакуумировалась до давления $P_m \approx 10^{-2}$ Торр, а затем через управляемый клапан W_2 заполнялась плазмообразующим газом (кислородом). Одновременно газ был эвакуировано по трубопроводу 11, оборудованному управляемым клапаном W_1 . В результате вдоль реакционной камеры образовался газовый поток. Скорость потока w зависела от расхода газа G ; настройки клапанов W_1 и W_2 контролировались установившимся давлением P_m .

Для предотвращения газодинамического удаления отрицательно заряженных частиц порошка из реакционной камеры металлическая сетка 9 размещалась на входе диэлектрического трубопровода 11, а отрицательный потенциал U подавался на сетку.

Электростатический заряд частиц порошка ЭП вызывает их отталкивание, что также может провоцировать неоднородности и даже потерю стабильности реакционного объема. Такие явления можно предотвратить путем правильного подбора P_m . В частности, при давлениях $P_m > 5$ Торр отталкивания частиц не наблюдалось, и реакционный объем оставался стабильным.

В настоящем исследовании условия обработки лигноцеллюлозы были следующими:

- Плазмообразующая среда кислород спектроскопического класса (научно-промышленный центр НИЦ "Курчатовский институт", Россия) при давлении $P_m = 5,0$ Торр.
- Расстояние между выводным окном и входом в реакционную камеру – 250 мм.
- Режим сканирования ЭП - концентрические круги минимального и максимального диаметра 1 и 130 мм соответственно.
- Время обработки τ лигноцеллюлозы варьировалось от 2 до 10 мин.

Для предотвращения термического разрушения образцы обрабатывали при температуре $T_s = 40$ °С. Температура образца контролировалась во время обработки дистанционным ИК-пирометром Optris LS (Optris GmbH, Германия). Контроль температуры осуществлялся путем выбора тока ЭП. В большинстве экспериментов I_b составлял 2 мА; некоторые эксперименты с лигноцеллюлозной биомассой проводились при $I_b = 5$ мА.

Масс-спектрометр непрерывно контролировал химический состав газа в реакционной камере. Когда газовый поток G был достаточно высок, плазмообразующая среда содержала только кислород и некоторое количество воды, выделяемой нагретым порошком при субатмосферных давлениях. Это гарантировало чистоту плазмообразующей среды и отсутствие загрязняющих ее газообразных побочных продуктов.

Обработка гидролизного лигнина и лигносульфоната проводилась в ЭПП гелия класса А (научно-промышленный центр НИЦ "Курчатовский институт", Россия) при давлении $P_m = 5,0$ Торр. Расстояние между выводным окном и входом в реакционную камеру было тем же, что и в экспериментах с лигноцеллюлозой, а именно 250 мм. Реакционная камера представляла собой отрезок кварцевой трубы внутренним диаметром 30 мм, внутри которой размещался стальной тигель специальной конструкции. В тигель закладывалась навеска порошка или гранул обрабатываемого вещества массой не более 1 г. Небольшое количество материала обеспечивало удовлетворительную однородность обработки по объему образца. Температура обработки контролировалась вольфрам-рениевой термопарой W-Re 5/20, которая была погружена в массу образца. В экспериментах с лигнином и лигносульфонатом реакционная камера не вращалась. Во избежание электростатической зарядки образца тигель заземлялся.

Целями компьютерного моделирования был предварительный расчет компонентного состава ЭПП газов, использовавшихся в экспериментах, а именно кислорода и гелия. Методом Монте-Карло моделировалось движение электронов пучка в газе с учетом влияния стенок реакционной камеры на процесс распространения ЭП. Пример такого расчета приведен на Рис. 2.

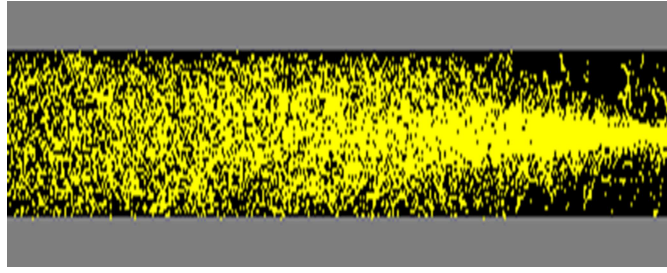


Рис. 2. Визуализация процесса распространения ЭП в кварцевой трубе диаметром 30 мм, заполненной гелием: $E_b = 27$ кэВ, $I_b = 5$ мА, $P_m = 5,0$ Торр

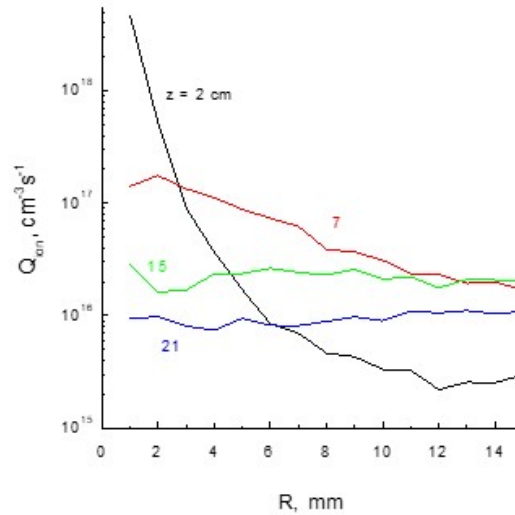


Рис. 3. Радиальное распределение скорости ионизации гелия при температуре 800 К на различных расстояниях от выводного окна (числа на кривых): $E_b = 25$ кэВ, $I_b = 8$ мА, $P_m = 15,0$ Торр

Моделирование методом Монте-Карло позволяет рассчитать энерговклад электронного пучка в газ при в каждой точке реакционной камеры при неупругих столкновениях быстрого электрона с молекулой плазмообразующего газа. Параметрами, характеризующими энерговклад пучка в газ, являются скорости ионизации $Q_{\text{ion}} = v^+ n$ и возбуждения $Q_{\text{ex}} = v^* n$ газа. Они зависят от плотности тока и энергии электронов пучка, степени его рассеяния и характеристик элементарных процессов ионизации и возбуждения газа электронным ударом.

Частота ионизации равна:

$$v^+ = j_b / eFL(E)/U_i,$$

где e – заряд электрона, E – текущее значение энергии электронов в процессе его торможения, F – геометрический фактор, учитывающий рассеяние электронов пучка в газе, U_i – энергия образования электрон-ионной пары (U_i для кислорода 32,0 эВ и гелия 27,8 эВ),

$$L(E) = 2\pi Ze^4 E^{-1} \ln E/E_{\text{ср}},$$

где $L(E)$ эффективное торможение или функция потерь в аналитическом приближении теории Бете [3], Z – заряд ядра, $E_{cp} \sim 13 Z$ эВ – средняя энергия возбуждения атома.

Для сравнения эффективности ионизации и возбуждения газа электронным ударом можно воспользоваться относительными величинами $W_{ion} = Q/Q_{ion}$ и $W_{ex} = Q/Q_{ex}$, где Q есть удельные потери энергии быстрого электрона в одном кубическом сантиметре газа за одну секунду $[Q] = \text{см}^{-3} \times \text{с}^{-1}$.

Рис. 3. иллюстрирует пространственное распределение удельного энерговклада ЭП по объему реакционной камеры. Таблица 1 иллюстрирует характерные значения концентраций электронов плазмы (n_{ep}), ионов (n_i), и возбужденных частиц (n_{ex}), нарабатываемых в ЭПП кислорода в условиях, оптимизированных для обработки лигноцеллюлозной биомассы. На Рис. 4 и 5 приведены результаты расчетов концентраций заряженных частиц в ЭПП гелия зависимости от температуры и давления газа при $Q = 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Таблица 1. Концентрации электронов плазмы (n_{ep}), ионов (n_i), и возбужденных частиц (n_{ex}), нарабатываемых в ЭПП кислорода в условиях, оптимизированных для обработки лигноцеллюлозной биомассы

Условия генерации плазмы				Концентрация частиц, см^{-3}		
P_m , Торр	T_m , К	E_b , КэВ	I_b , мА	n_{ep}	n_i (O_2^+)	n_{ex} $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$
1	300	30	10	$1,51 \times 10^{11}$	$1,49 \times 10^{11}$	8×10^9
5	300	30	10	$3,75 \times 10^{10}$	$5,81 \times 10^{10}$	2×10^{10}

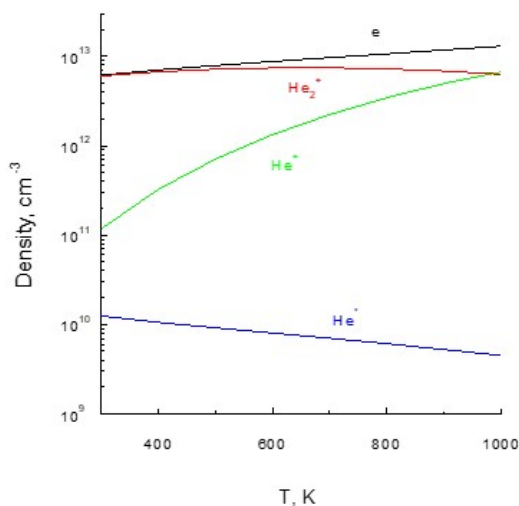


Рис. 4. Зависимость концентраций заряженных частиц в ЭПП гелия от температуры газа при $Q = 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

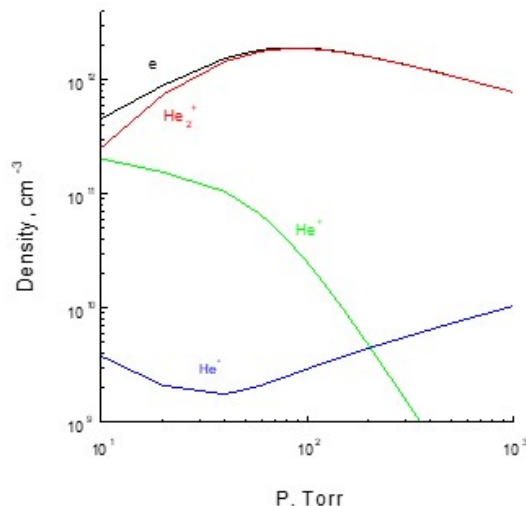


Рис. 5. Зависимость концентраций заряженных частиц в ЭПП гелия от давления газа при $Q = 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Глава 4 посвящена исследованию процессов ЭПП-стимулированной переработки лигноцеллюлозной биомассы и характеристике полученных при этом продуктов.

Таблица 2. Индекс кристалличности и размер кристаллитов целлюлозы до и после обработки в ЭПП кислорода ($I_b = 2$ мА)

Образец	CrI, %	Dhkl(200), нм
Исходная целлюлоза	84,5	3,9
ЭПП-обработка $\tau = 2$ мин	79,1	3,4
ЭПП-обработка $\tau = 10$ мин	71,3	3,2

В Таблице 2 приведена динамика изменения индексов кристалличности и размеров кристаллита исходной и ЭПП-обработанной целлюлозы при фиксированном токе ЭП ($I_b = 2$ мА) в зависимости от длительности ЭПП-воздействия. Результаты свидетельствуют о частичном разрушении лигноцеллюлозных волокон под воздействием ЭПП. Данные также были подтверждены термогравиметрическими анализами.

ИК-спектроскопия выявила образование дополнительных карбонильных и карбоксильных групп за счет ЭПП-обработки. Содержание окисленных функциональных групп увеличивалось с увеличением I_b : содержание $-\text{COOH}$ и $-\text{COH}$ было в 1,3-2,6 и 3,4-7,1 раза больше, чем в исходной лигноцеллюлозе. Кроме того, при увеличении I_b до 5 мА произошла частичная карбонизация лигноцеллюлозных волокон.

При пучково-плазменной обработке гидролизного лигнина и лигносульфонатов также наблюдается карбонизация. Наиболее выраженным эффектом воздействия ЭПП на лигносульфонаты является существенное, (в десятки раз) увеличение размера их гранул. Следовательно, значительно увеличивается эффективная поверхность, что может быть полезно при использовании лигносульфонатов в качестве сорбента и при изготовлении на его основе (или в качестве компонента) композиционных материалов различного назначения.

Состав ЭПП сложен, поэтому во время плазмохимической обработки на структуру лигноцеллюлозных волокон, могут влиять следующие факторы:

- Химически активные тяжелые частицы ЭПП: возбужденные молекулы и атомы, ионы, радикалы в основных и возбужденных состояниях, взаимодействующие с поверхностью частиц порошка; В кислородсодержащих плазмообразующих средах это частицы активного кислорода (O , синглетный кислород) и особенно гидроксильные радикалы $\text{OH}\cdot$, образующиеся в плазменных химических реакциях, являются наиболее важными для деполимеризации лигноцеллюлозы и лигнинов. Радикалы $\text{OH}\cdot$ могут образовываться за счет плазмоллиза как молекул воды, связанных с исходными веществами, так и воды, элиминированной в результате плазменно-стимулированной дегидратации химических связей в весьма сложных молекулах лигноцеллюлозы, лигносульфонатов и гидролизных лигнинов.
- Быстрые электроны частично деградировавшего ЭП, бомбардирующие лигноцеллюлозу;

- Вторичные электроны умеренных энергий (до 0,01-1 кэВ), набирающиеся в ЭПП за счет ионизации молекул плазмообразующих сред, могут участвовать в процессах модификации материала, поскольку обладают энергией, достаточной для ионизации молекул полисахарида и диссоциации химических связей;
- Излучения, генерируемые в ЭПП, особенно ультрафиолетовое и рентгеновское (тормозное) могут стимулировать фотохимические и радиационно-химические реакции;
- Возможен нагрев материала вследствие прямой электронной бомбардировки и за счет теплопередачи между плазменным облаком и образцом.

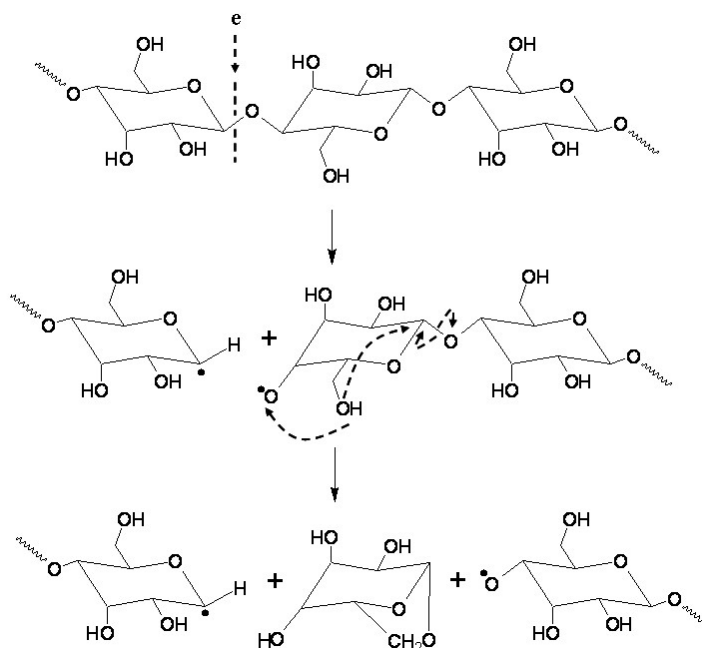


Рис. 6. Механизм разрушения β -1,4-гликозидных связей под воздействием быстрых электронов

Каждый из этих факторов в отдельности способен вызывать превращения полимерных молекул, входящих в лигноцеллюлозный комплекс, но интегральный эффект модификации макромолекул полисахаридов, скорее всего, будет обусловлен их совместным действием (т. е. ожидается синергизм).

Возможная реакция быстрых электронов с полисахаридными цепями приводит к разрушению β -1,4-гликозидных связей и дегидратации с образованием левоглюкозана (Рис. 6). Увеличение дозы облучения может стимулировать дальнейшую дегидратацию и выработку низкомолекулярных органических соединений, таких как фурфурол и 5-гидроксиметилфурфурол, фурфуриловый спирт, енолактоны и различные ароматические структуры. Эти вещества являются маркерами глубокого повреждения полисахаридов и их карбонизации, которого следует избегать. Однако, радиационное и термическое повреждение полисахаридов, вызванное электронами высокой

энергии, было минимизировано путем правильного выбора давления плазмообразующего газа и режима сканирования ЭП.

Выводы

1. Экспериментально доказана возможность использования пучково-плазменной обработки для модификации лигнинов и лигноцеллюлозной массы с целью повышения химической реакционной способности этих материалов для их последующего использования.

2. В экспериментах, проведенных с лигноцеллюлозными волокнами, порошками гидролизного лигнина и гранулами лигносульфонатов наблюдались эффекты карбонизации компонентов лигносульфонатной массы.

3. Эксперименты по пучково-плазменной обработке лигносульфонатов наблюдалось существенное, (в десятки раз) увеличение размера гранул, сопровождающееся разрыхлением материала и увеличением его пористости.

4. На основании накопленных экспериментальных данных и с учетом известных моделей, описывающих пучково-плазменное воздействие на биополимеры, определены механизмы модификации лигнинов и лигноцеллюлозы в плазме кислорода и гелия. Активные формы кислорода и гидроксил-радикалы, образующиеся в плазмохимических реакциях, являются наиболее важными для модификации использованных в нашей работе биополимеров.

В заключение отметим, что пучково-плазменная обработка - это быстрый, ресурсосберегающий и экологически чистый метод переработки природных биоматериалов и биомассы. Такая обработка является сухим процессом, который не требует высококонцентрированных кислотных и щелочных растворов или других опасных реагентов. Учитывая вышеперечисленные преимущества, пучково-плазменная обработка может рассматриваться как переход к «зеленой химии» и быть перспективной альтернативой методам, традиционно используемым для переработки биополимеров с целью получения на их основе новых ценных продуктов и материалов.

Материалы диссертации опубликованы автором в следующих работах:

1. **[Индексируется базой данных RSCI, Scopus]:** *Зау Йе Мьинт, Кхин Маунг Хтау, Хтет Вэй Ян Чжо, Хтет Ко Ко Зау, Т. М. Васильева.* Модификация тонких пленок хитозана в электронно-пучковой плазме // Прикладная Физика. 2019. №. 1 - С. 71 – 76.
2. **[Индексируется базой данных RSCI]:** *Кхин Маунг Хтау, Хтет Вэй Ян Чжо, Т. М. Васильева.* Пучково плазменные технологии переработки целлюлозы и лигнинов // ТРУДЫ МФТИ. 2019. Том 11, № 1. С. 124 – 129.
3. **[Индексируется базой данных RSCI]:** Васильева Т. М, Васильев М. Н, Гараева В. В, Злобин И. С, Зау Йе Мьинт, *Кхин Маунг Хтау*, Хтет Вэй Ян Чжо, Хтет Ко Ко Зау. Гибридная плазма - перспективы применения для медицины и биологии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62, № 11. С. 123-131, DOI: 10.17223/00213411/62/11/123.
4. **[Индексируется базой данных Scopus]:** *T.M. Vasilieva, I.K. Naumova, O.V. Galkina, E.V. Udoratina, L.A. Kuvschinova, M.N. Vasiliev, Khin Maung Htay, Htet Ko Ko Zaw.* Electron-Beam Plasma for Biopolymers Modification // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020 .Vol. 48. P. 1035–1041. DOI:10.1109/TPS.2020.2980200.
5. **[Индексируется базой данных RSCI]:** *Кхин Маунг Хтау, Т. М. Васильева, Л. А. Кувишинова, Е. В. Удоратина.* Электронно-пучковые плазменные системы - новые возможности для технологий переработки лигноцеллюлозной биомассы // ТРУДЫ МФТИ. 2020. Том 12, № 2. С. 111 – 116.
6. **[Индексируется базой данных Scopus, WoS]:** *T. M. Vasilieva, M. N. Vasiliev, V. V. Garaeva, I. S. Zlobin, Zaw Ye Mint, Khin Maung Htau, Htet Wai Yan Kyaw, Htet Ko Ko Zaw.* Hybrid Plasma – Prospects for Application in Medicine and Biology // Russian Physics Journal. 2020, Vol. 62, No. 11, pp. 2092–2100. DOI: 10.1007/s11182-020-01951-6.

Отпечатано с оригинал-макетов Заказчика
в типографии "Переплетофф"
Адрес: г. Долгопрудный, ул. Циолковского, 4.
Тел: 8(903) 511 76 03. www.perepletoff.ru
Формат 148 x 210 мм. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Тираж 20 экз.
Твердый (мягкий) переплет.
Заказ № _____. 20.10.20 г.