

Этап 5 (заключительный)

Основные результаты

Проведена сравнительная оценка полученных результатов исследований каталитических свойств разработанных катализаторов Кат-1 и Кат-2 в процессе гидролиза-дегидратации холоцеллюлозы. Показано, что катализатор Кат-1 (на основе модифицированного углеродного материала Сибунит-4) позволяет достичь более высоких выходов целевых продуктов и является перспективным для производства сахаров и фурфуролов из растительного сырья. Для целевого производства фурфурола перспективен катализатор Кат-2 (оксид ниобия, нанесенный на оксид циркония).

Обобщены полученные результаты по исследованию каталитической конверсии лигнина в ценные продукты. Уточнение данных о взаимосвязи между содержанием рутения в твердых катализаторах и их каталитической активностью в процессе деполимеризации лигнина в сверхкритическом этаноле показало, что применение катализатора на основе окисленного углеродного материала Сибунита-4 с меньшим содержанием рутения позволяет достичь более высокого выхода жидких ароматических продуктов (>87%).

Проведены дополнительные исследования по оптимизации процесса разделения лигноцеллюлозного сырья на основные компоненты методом органосольвентной варки. Определено влияние щелочи на процесс делигнификации ЛЦ-биомассы. Показано, что использование варочных растворов с низкой концентрацией щелочи позволяет селективно извлекать из сырья лигнин без существенной деструкции гемицеллюлоз при остаточном количестве лигнина в составе холоцеллюлозы не выше 9 %. Предложенные методы делигнификации позволяют квалифицированно разделить растительное сырье на компоненты.

Проведены дополнительные испытания штаммов дрожжей на субстратах, соответствующих по составу ферментативным гидролизатам биомассы, изучено влияние ингибиторов ферментации на продуктивность по этанолу. При использовании смесей ксилозы (1%) и глюкозы (2%) наибольший выход этанола по потребленным сахарам отмечался у штаммов *K. marxianus C1* ($9,8 \pm 0,9$ г/г) и *K. marxianus B5* ($9,8 \pm 0,8$ г/г). Штамм *O. polymorpha CBS4732* обладает наилучшими характеристиками в отношении продуктивности по этанолу из биомассы на смесях глюкозы и ксилозы и может быть рекомендован для применения в процессах получения биоэтанола на ферментативных гидролизатах биомассы.

Иностранном партнером проведены работы по разработке процесса получения ароматических веществ из лигнина методом ферментативной делигнификации биомассы, совмещенной с гидравлической кавитационной активацией. Полученные результаты показали перспективность предлагаемого подхода для получения ценных ароматических соединений и возможность масштабирования разработанного процесса.

Проведена оценка решения заявленных в работе задач и сопоставление полученных результатов с современным уровнем исследований и разработок. Показано, что в части разработанного процесса биоделигнификации, разработанных ферментов гидролиз гидролаз, штаммов-продуцентов этанола и изобутанола, а также способов получения 5-ГМФ, этанола и ароматических соединений проведенные работы превышают российские и зарубежные аналоги.

Основная новизна использованного в проекте подхода состоит в концепции комплексной переработки отходов ЛЦ-биомассы, объединяющей новейшие механические, нанокаталитические и биотехнологические методы, основанные на разработках авторов проекта, для получения целого набора востребованных в химической, нефтехимической, топливной и других отраслях промышленности продуктов (глюкоза, ксилоза, 5-гидроксиметилфурфурола, изобутанол, этанол алкиларильные эфиры). Комплексный подход к переработке ЛЦ-биомассы позволит повысить экономическую эффективность процесса в целом благодаря использованию продуктов одних процессов в качестве субстратов и реагентов в других, упрощению процессов за счет стадий выделения продуктов, уменьшения логистических затрат и т.д. Кроме того, новыми являются следующие научно-технологические решения:

- твердые катализаторы на основе модифицированного углеродного материала Сибунит-4 с низким содержанием рутения (1%) для процесса деполимеризации и трансэтерификации лигнина, позволяющие получать жидкие ароматические продукты с высоким выходом (выше 87 %), превышающим требования технического задания;
- использование экологически безопасных методов для квалифицированного разделения лигноцеллюлозной биомассы на основные компоненты;
- новые штаммы термофильных дрожжей для применения в процессах получения биоэтанола при культивировании на продуктах деполимеризации биомассы (ксилозы и глюкозы).

Полученные результаты соответствуют техническому заданию выполняемого проекта по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.613.21.0017 и сопоставимы с результатами аналогичных работ, определяющими мировой уровень, а по некоторым параметрам существенно превосходят аналогичные работы.

Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках прикладного научного исследования и экспериментальной разработки.

1. Изобретение, заявка № 2015120759 от 01.06.2015 (патент №2583953, от 10.05.2016), "Способ получения 5-гидроксиметилфурфурола", РФ.
2. Изобретение, заявка № 2016140268 от 12.10.2016, "Способ получения 5-гидроксиметилфурфурола и этанола из целлюлозы", РФ.
3. Изобретение, заявка № 2016140267 от 12.10.2016, "Штамм ДРОЖЖЕЙ *Kluyveromyces marxianus* ВКПМ У-4290, применяемый для получения этанола на каталитических гидролизатах целлюлозы", РФ.

Ожидаемый эффект от внедрения результатов проекта

Внедрение результатов проекта за счет коммерциализации технологии обеспечит существенный рост конкурентоспособности отечественных компаний биотехнологического, лесоперерабатывающего и топливного сектора, а также их технологическую независимость. Применение комплексной технологии переработки основных компонентов растительного сырья с использованием растворителей и продуктов, полученных из этого же сырья, позволит создать высокорентабельное замкнутое безотходное производство по производству таких основных продуктов, как 5-гидроксиметилфурфурол (5-ГМФ), алкил-арильные соединения, этанол. 5-ГМФ может быть использован в качестве сырья для производства пластиков (мировой рынок 50 млн.

тонн/год) и высокооктановых топливных добавок (мировой рынок 40 млн. тонн/год). Использование разработанных твердых катализаторов для процесса конверсии лигнина в среде «зеленых растворителей» позволит получать с высоким выходом ароматические соединения, только российский рынок которых оценивается в 1.5 млн. тонн в год.

Возможные формы и объемы коммерциализации результатов проекта

Наиболее перспективными результатами ПНИ с точки зрения коммерциализации являются следующие достигнутые по итогам выполнения проекта результаты:

- разработанный комбинированный процесс получения 5-ГМФ и этанола из целлюлозы;
- разработанные по оригинальным методикам твердые катализаторы для получения ароматических соединений из лигнина, путем его деполимеризации в среде сверхкритического этанола.

Основным направлением коммерциализации результатов ПНИ является создание предприятий по комплексной переработке лигноцеллюлозного сырья совместно со стратегическими партнерами. Кроме того возможны следующие формы коммерциализации:

- продажа лицензии на технологию;
- оказание инжиниринговых услуг (создание опытных производств катализаторов, проведение ОКР и т.д.);
- подготовка высококвалифицированных кадров.

Руководитель работ по проекту, научный руководитель ИК СО РАН, академик
В.Н. Пармон