

УДК 602.4:606:663.1:579.66

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ КУЛЬТУРАМИ *PLEUROTUS* С ПОЛУЧЕНИЕМ КОРМОВЫХ ПРОДУКТОВ

© *В.В. Тарнопольская**, *Т.В. Рязанова*, *Н.Ю. Демиденко*, *О.Н. Ерёмченко*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, пр. Красноярский рабочий, 31, Красноярск, 660037 (Россия), e-mail: veronichkat@mail.ru

Разработана технология опытного производства по микробиологической переработке растительных отходов (смешанный субстрат из сосновых опилок и вегетативной части топинамбура) штаммами *Pleurotus ostreatus* РО-4.1 и *Pleurotus djamor* PD-3.2 в кормовые продукты, включающая гидродинамическую активацию сырья на стадии получения посевного материала. Технология предусматривает три основных стадии: получение чистой культуры продуцента в условиях глубинного периодического культивирования; получение посевного материала методом глубинно-твердофазного культивирования продуцента на гидродинамически активированном растительном сырье; получение кормового продукта методом твердофазной ферментации механически измельченного растительного сырья. В технологическом процессе успешно апробирован режим глубинно-твердофазного культивирования продуцентов на среде, содержащей до 3% гидродинамически активированного растительного сырья, с получением посевного материала, содержащего в среднем 14.5 г/л биомассы глубинной культуры, адаптированной к данному субстрату. Последующее применение такого посевного материала на стадии твердофазной ферментации позволяет втрое сократить продолжительность процесса по сравнению с известными технологиями прямой биоконверсии древесных отходов. Полученные на опытной установке результаты свидетельствуют о целесообразности проведения гидродинамического активирования сырья в целях повышения его биодоступности и, следовательно, глубины микробиологической конверсии. Продукт микробиологической переработки растительных отходов содержит 14–16% белка, клетчатку, витамины и минеральные элементы и может быть использован предприятиями агропромышленного комплекса в кормопроизводстве.

Ключевые слова: микробиологическая переработка, биоконверсия, сосновые опилки, вегетативная часть топинамбура, гидродинамическая активация, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus djamor*.

Введение

На долю России приходится более 20% мировых запасов древесины, при этом большая часть лесов (около 80%) сосредоточена в азиатской части страны, где произрастают в основном хвойные: лиственница, сосна, пихта, кедр [1]. Традиционно ведущими лесопромышленными районами страны являются Европейский Север и Восточная Сибирь, при этом основным крупнотоннажным отходом деревообрабатывающих предприятий в процессе механической обработки древесины являются опилки, объем которых может достигать 20% от объема обрабатываемого сырья [2]. В настоящее время актуальна проблема их переработки, поскольку до сих пор основными методами утилизации остаются складирование на полигонах, сжигание и уплотнение, что небезопасно экологически и нецелесообразно экономически. Очевидно, что изменение направленности лесопромышленной отрасли в пользу развития глубокой переработки сырья может существенно расширить ассортимент выпускаемой продукции, при этом уменьшить долю не утилизируемых отходов и существенно снизить техногенную нагрузку на окружающую среду.

Тарнопольская Вероника Валентиновна – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии древесины и биотехнологии, тел. (391)227-36-54, e-mail: veronichkat@mail.ru

Рязанова Татьяна Васильевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химической технологии древесины и биотехнологии, тел. (391) 227-36-54, e-mail: tatyana-htd09@mail.ru

Демиденко Наталья Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии древесины и биотехнологии, тел. (391)227-36-54, e-mail: natalie.demid@gmail.com

Ерёмченко Оксана Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии древесины и биотехнологии, тел. (391)227-36-54, e-mail: oks.eriomenko@yandex.ru

* Автор, с которым следует вести переписку.

Одним из наиболее перспективных направлений в данном случае является микробиологическая конверсия, основанная на трансформации структуры и состава растительного субстрата, сопровождающаяся значительным приростом биомассы продуцента и выделением им ряда биологически активных веществ. Однако масштабное применение биотехнологий для конверсии древесных отходов ограничивается наличием в них труднодеградируемого лигнина, поэтому одним из возможных вариантов утилизации посредством прямой биоконверсии является использование в качестве биологических агентов базидиомицетов, в частности, представителей рода *Pleurotus* (*Fr.*) *P. Kumm.* Они относятся к экологической группе лигнотрофных сапрофитов и, благодаря своей мультиферментной системе, содержащей как целлюлазы, так и активные оксидоредуктазы, способны к деградации потенциально богатого энергией лигнина при наличии в среде ростового субстрата, такого как глюкоза или целлюлоза [3, 4], что дает возможность культивирования их на отходах деревоперерабатывающей промышленности и сельского хозяйства [5–8].

Необходимо отметить, что помимо древесных отходов, в мире, и в России в частности, накапливаются многотоннажные отходы сельскохозяйственных растений, зачастую также не находящие эффективного применения. Их прямое использование в кормопроизводстве довольно малоэффективно, что связано с относительно низким содержанием в них перевариваемого протеина, к тому же лимитированного по ряду незаменимых аминокислот [9]. В этой связи топинамбур, или земляная груша, *Helianthus tuberosus L.* заслуживает особого внимания. Вегетативная часть топинамбура в некоторых хозяйствах входит в состав растительной массы, закладываемой на силосование [10]. Однако учитывая его физиолого-биохимические характеристики [11, 12], а также зимостойкость, экологическую чистоту и широкий ареал произрастания, в условиях Сибири и Красноярского края, в частности, характеризующихся непродолжительным сроком вегетации, топинамбур можно рассматривать как перспективное и ценное сырье для расширения кормовой базы сельского хозяйства методами микробиологической переработки [13–15].

Поскольку исходная реакционная способность природных лигноцеллюлозных материалов относительно невысока, в технологии биоконверсии растительных субстратов в целях повышения степени конверсии и сокращения продолжительности процесса целесообразно предусмотреть эффективную предобработку сырья. В настоящее время для более тонкого измельчения различных видов лигноцеллюлозных материалов активно применяются установки гидродинамического размола и кавитационного воздействия [16–18]. В ряде работ [19–21] показано, что такая предобработка растительного сырья способна оказывать не только размалывающее действие, но также изменять структуру и свойства обрабатываемых материалов. Подобное воздействие можно рассматривать как активацию сырья для дальнейшей биоконверсии, поскольку необходимым условием эффективной трансформации субстрата является контакт ферментной системой организма-продуцента с увеличенной удельной поверхностью сырья.

В Сибирском государственном университете науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева ведутся комплексные исследования процессов биоконверсии лигноуглеводных субстратов культурами ксилотрофных базидиомицетов, отрабатываются режимы культивирования продуцентов и предобработки субстратов, изучается химический состав и биологическая ценность биомассы мицелия базидиомицетов и продуктов биоконверсии [22–29]. Проведенные нами исследования показали, что при культивировании мицелия *Pleurotus* на субстратах из отходов деревообрабатывающей промышленности и сельского хозяйства возможно получение ценных биотехнологических продуктов: белково-углеводных добавок кормового и пищевого достоинства, высококачественных кормов, биоудобрений. Установлено, что продукты биоконверсии обогащены витаминами, полиненасыщенными жирными кислотами, характеризуются более высокой биологической ценностью (белка – 14–17%, незаменимых аминокислот в белке – до 40–45%, нуклеиновых кислот – менее 1%) и перевариваемостью (более 50%) по сравнению с известными кормовыми продуктами растительного происхождения [27, 29].

Цель работы – разработка технологии микробиологической конверсии растительных отходов глубинными культурами *Pleurotus ostreatus* PO-4.1 и *Pleurotus djamor* PD-3.2 с предварительной гидродинамической активацией сырья и получением обогащенных белком кормовых продуктов.

Экспериментальная часть

В работе использованы опилки сосновые воздушно-сухие, размер частиц 1–5 мм и вегетативная часть топинамбура, собранная в конце вегетационного периода (сентябрь 2014 и 2015 гг.) в пригородной зоне г. Красноярска, измельченная на механической мельнице, размер частиц – не более 10 мм.

Гидродинамическую активацию (предобработку) растительного сырья проводили на кавитационном гидроударном диспергаторе [18]: радиус ротора – 277 мм, частота вращения – 3000 об./мин, производительность – 25 м³/ч в водной среде в течение 30 мин, содержание сухих веществ в суспензии – до 10% по массе. Для определения фракционного состава и размеров частиц исходного сырья применяли набор сит с диаметром отверстий от 1 до 5 мм; для аналогичного исследования гидродинамически активированного сырья – аналитическую просеивающую машину Retsch AS 200 control (Германия) с диапазоном измерения от 20 мкм до 2 мм. Подготовку сырья для гидродинамической активации осуществляли пропусканием через сито для удаления крупноразмерных кусков, минеральных и металлических включений.

Для биоконверсии растительных субстратов использовали штаммы *Pleurotus ostreatus* PO-4.1 и *Pleurotus djamor* PD-3.2, чистые культуры которых выделены из коммерческих плодовых тел и хранятся в коллекции чистых культур кафедры химической технологии древесины и биотехнологии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». Для идентификации штаммов использован метод секвенирования ДНК [30]. Идентификацию видов проводили с помощью программы BLAST и GenBank NCBI [31]. Генетическая идентификация штаммов подтвердила их видовую принадлежность на 99%. По заключению КГБУ «Красноярская краевая ветеринарная лаборатория» оба использованных в данной работе штамма *Pleurotus* являются непатогенными для теплокровных организмов.

Чистая культура продуцента поддерживается на агаризованном пивном сусле. Штаммы *Pleurotus* культивировали на крахмалоаммонийной среде в лабораторном биореакторе «CeCa» (Великобритания) объемом 6 л, скорость перемешивания – 400 об./мин, подача воздуха – 100 л/ч на 1 л среды, температура среды – (25±1) °С, pH – 5.0. Для приготовления питательной среды крахмал предварительно клейстеризуется и обрабатывается при 60 °С в течение 30 мин термостабильной α-амилазой (Термоамил 120 L) для снижения вязкости; одновременно готовятся и стерилизуются растворы минеральных компонентов.

Глубинно-твердофазное культивирование проводили с внесением в питательную среду 3% гидродинамически активированного растительного сырья (сосновых опилок или измельченной вегетативной части топинамбура) при содержании крахмала не более 1% и сохранении условий культивирования. После трех суток ферментации полученную культуру использовали в качестве посевного материала для твердофазного культивирования на растительном сырье.

Твердофазное культивирование проводили на измельченной вегетативной части топинамбура (размер частиц – 5–10 мм) и сосновых опилках (размер частиц – 3–5 мм), а также на субстратах из смеси двух видов растительного сырья. Посевным материалом служили культуры *P. ostreatus* и *P. djamor*, полученные в условиях глубинно-твердофазного культивирования с активированным растительным сырьем, прошедшим гидродинамическую предобработку. Твердофазное культивирование осуществляли в сетчатых контейнерах при температуре (25±1) °С, высота слоя субстрата – 70–80 мм, влажность субстрата поддерживали на уровне 65–70%, продолжительность культивирования – 10–11 суток.

Обсуждение результатов

Полученные ранее экспериментальные данные [28, 29] свидетельствуют о качественных изменениях в составе лигноуглеводного комплекса обоих видов растительного сырья в результате гидродинамической активации. Очевидно, что при использовании сосновых опилок и вегетативной части топинамбура в качестве субстратов для микробиологической конверсии целесообразно проведение такой предобработки обоих видов сырья в целях повышения его биодоступности, а следовательно, и глубины биологической трансформации лигнотрофными сапрофитами *Pleurotus*. Получение кормового продукта методом прямой микробиологической конверсии с использованием в качестве посевного материала продукта глубинно-твердофазного культивирования штаммов на гидродинамически активированном сырье позволяет подвергать переработке значительные объемы растительных отходов.

На основе результатов экспериментального исследования процессов культивирования предложена технология опытного производства, блок-схема процесса получения кормового продукта приведена на рисунке 1.

Технология опытного производства включает в себя три основные стадии:

- получение чистой культуры в условиях глубинного периодического культивирования на крахмалоаммонийной среде;
- получение посевного материала для твердофазной ферментации методом глубинно-твердофазного культивирования продуцента на гидродинамически активированном растительном сырье;
- получение кормового продукта методом твердофазной ферментации механически измельченного растительного сырья.

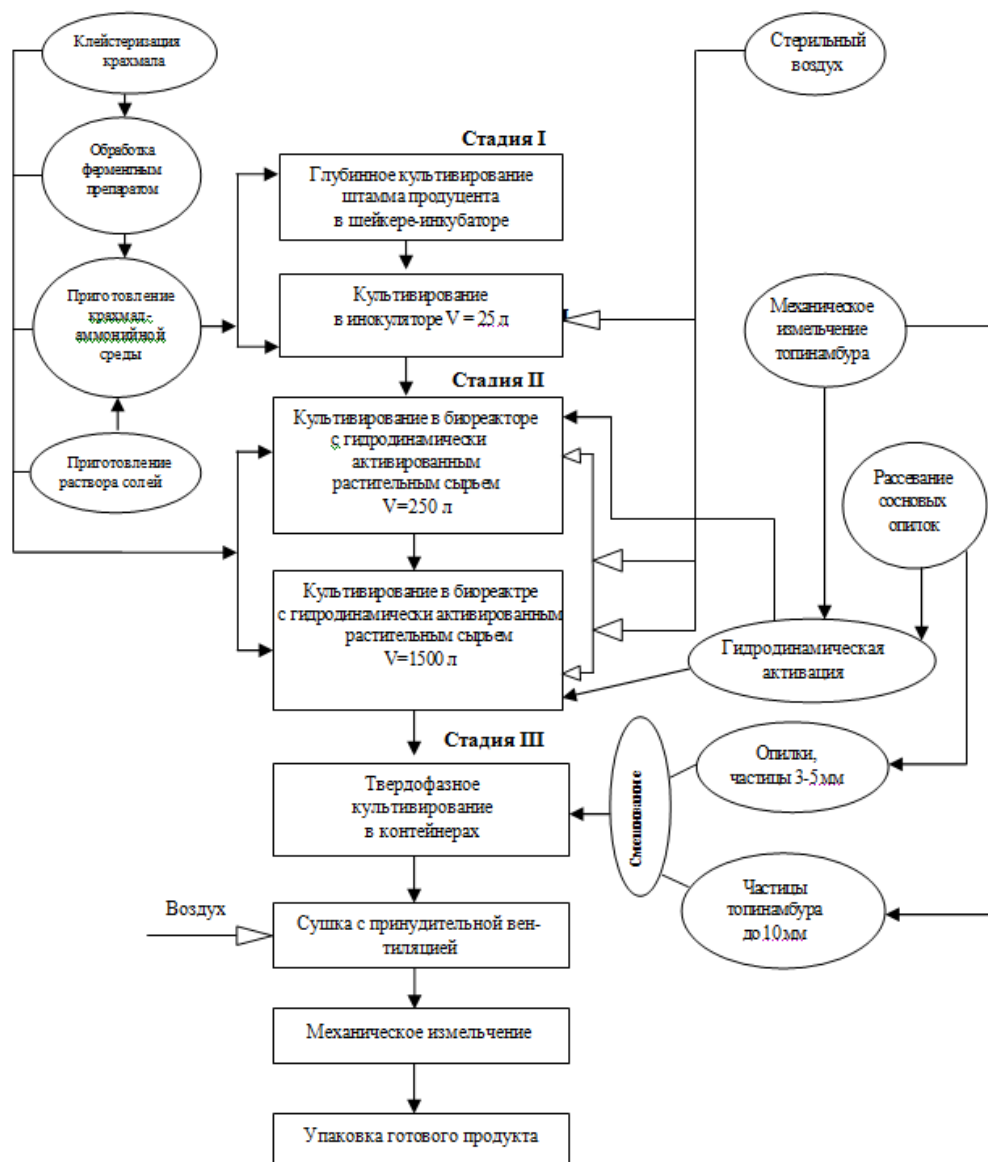


Рис. 1. Основные этапы технологического процесса получения кормового продукта

На стадии получения чистой культуры осуществляется подготовка и стерилизация питательной среды с содержанием крахмала 3%. Для засева биореактора чистой культуры объемом 25 л инокулят выращивают в колбах в шейкере-инкубаторе, концентрация биомассы продуцента в начале культивирования должна составлять 2.5–3.0 г/л для накопления биомассы в конце культивирования 9.5–10.5 г/л. Процесс ведется одновременно в трех биореакторах (коэффициент заполнения – 0.6), что позволяет получить посевной материал для следующей стадии – глубинно-твердофазного культивирования в объеме, достаточном для обеспечения засевной концентрации продуцента – 4.8 г/л.

Второй стадии предшествует подготовка исходного растительного сырья: вегетативная часть топинамбура измельчается на дезинтеграторе до размера частиц 5–10 мм и подается на кавитационный гидроударный диспергатор для гидродинамической активации; сосновые опилки рассеиваются на гирационной плоской сортировке, фракция с размером частиц менее 3 мм поступает на гидродинамическую активацию.

На стадии получения посевного материала активированное сырье и крахмалоаммонийная среда (крахмала 1%) подаются в биореактор-инокулятор объемом 250 л, стерилизуются и охлаждаются до температуры культивирования (25±1) °С. Сюда же по стерильному трубопроводу перекачивается инокулят, полученный на первой стадии. Культивирование ведется в течение 72 ч до достижения максимального накопления биомассы продуцента 14–14.5 г/л. Для масштабирования процесса последовательно задействуют два биореактора объемом 250 л, откуда посевной материал перекачивается в биореактор-инокулятор объемом 1200 л

(коэффициент заполнения – 0.6), где культивирование ведется до достижения заданного уровня накопления биомассы. Этот этап получения посевного материала предусматривает периодическое культивирование отъемно-доливным методом: при достижении конечной концентрации биомассы 14–14.5 г/л (в расчете на а.с.м. мицелия) две трети культуральной жидкости из биореактора сливают и передают на стадию твердофазной ферментации. В биореактор вносят свежую порцию гидродинамически активированного сырья и раствор 1%-го крахмала с питательными солями до рабочего объема 720 л; исходная концентрация биомассы – 4.8 г/л. При этом полный цикл процесса составляет около 24 ч с учетом времени на слив культуральной жидкости и заполнение биореактора свежей средой.

На стадии получения кормового продукта – третьей стадии технологического процесса – механически измельченную вегетативную часть топинамбура с размером частиц 10 мм и фракция сосновых опилок 3–5 мм подают в аппарат с тихоходной лопастной мешалкой, где растительное сырье предварительно стерилизуется и охлаждается до температуры (25±1) °С. Посевной материал, выращенный на гидродинамически активированном растительном сырье, по стерильному трубопроводу перекачивают в аппарат, где оно смешивается с механически измельченным сырьем.

В каждом цикле работы большого биореактора-инокулятора (объем 1200 л) производится 475 л посевного материала, содержащего 6.7–6.9 кг биомассы мицелия, что позволяет инокулировать до 475 кг растительного субстрата.

Засеянный субстрат насыпают слоем не более 7–8 см в лотки объемом 0.02 м³, которые составляют в этажерки высотой 2.5 м в специальном помещении, где поддерживается влажность 65–70% и температура (25±1) °С. По истечении 10 суток полученный микробиологической конверсией растительного субстрата кормовой продукт высушивают в сушильных шкафах с принудительной вентиляцией до остаточной влажности 10%, измельчают на дезинтеграторе и упаковывают.

Принципиальная технологическая схема получения кормового продукта приведена на рисунке 2.

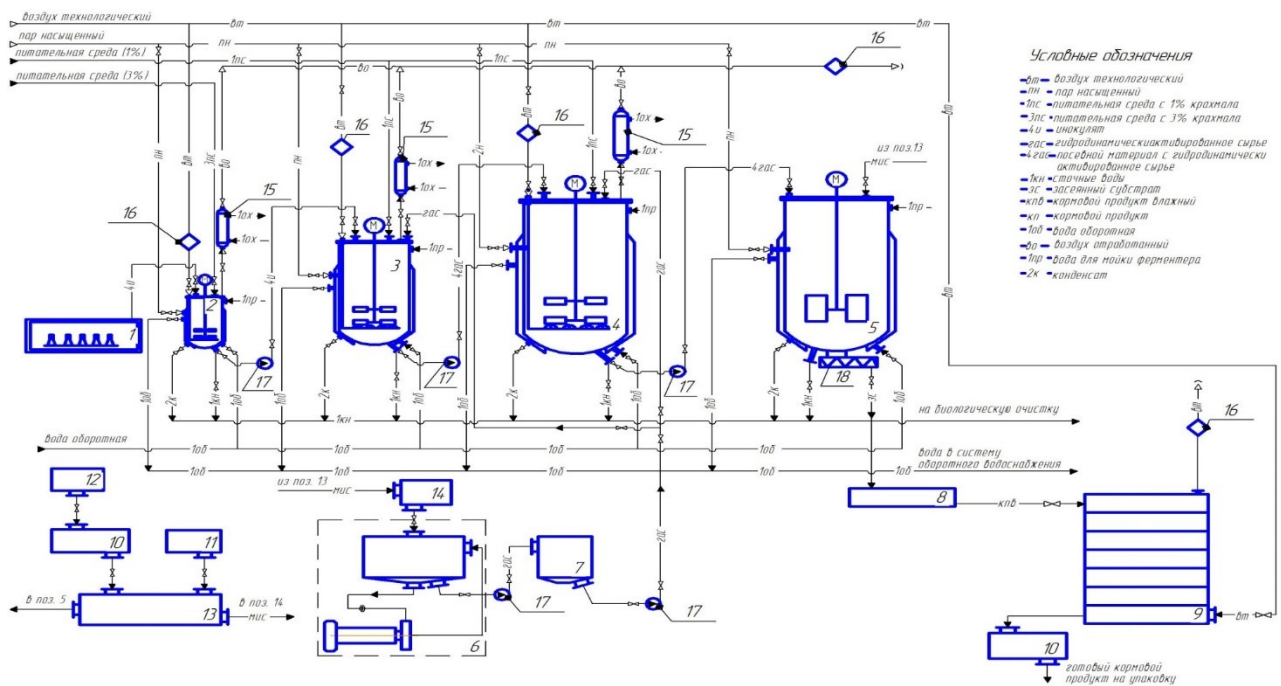


Рис. 2. Технологическая схема производства кормового продукта: 1 – шейкер-инкубатор; 2 – биореактор чистой культуры объемом 25 л; 3 – биореактор-инокулятор объемом 250 л; 4 – биореактор-инокулятор объемом 1200 л; 5 – аппарат с тихоходной лопастной мешалкой; 6 – кавитационный гидроударный диспергатор; 7 – сборник гидродинамически активированного сырья; 8 – лотки для твердофазного культивирования; 9 – растительная камера; 10 – дезинтегратор; 11 – сборник исходных опилок; 12 – сборник исходного топинамбура; 13 – гирационная плоская сортировка; 14 – сборник сырья на гидродинамическую активацию; 15 – конденсатор; 16 – воздушный фильтр; 17 – насос; 18 – шнековый дозатор

Чистая культура выращивается в отделении чистой культуры в колбах объемом 500 мл в шейкере-инкубаторе (1). Далее чистая культура подается в биореактор объемом 25 л (2), туда же подается питательная среда с содержанием крахмала 3%. Чистая культура выращивается в течение 72 ч при температуре (25 ± 1) °C, pH 5.0, непрерывном перемешивании и подаче технологического воздуха через фильтр (16). Продуктовые линии и трубопроводы стерилизуются с помощью автоматической системы индивидуальной стерилизации паром (СИП SIP).

В биореактор-инокулятор объемом 250 л (3) подается из сборника (7) предварительно обработанное на кавитационном гидроударном диспергаторе (6) растительное сырье и питательная среда с содержанием крахмала 1%, стерилизуются, охлаждаются до температуры (25 ± 1) °C и засеваются чистой культурой, которая по стерильному трубопроводу перекачивается из биореактора чистой культуры (2). Посевной материал выращивается на гидродинамически активированном растительном сырье до концентрации 14–14.5 г/л. При этом происходит адаптация штаммов-продуцентов к растительному сырью и питательной среде с низким содержанием крахмала, конверсия сырья до 70% и накопление белка до 16% от а.с.м. посевного материала.

В биореактор-инокулятор объемом 1200 л (4) подаются питательная среда с содержанием крахмала 1% и гидродинамически активированное растительное сырье из сборника (7), стерилизуются и охлаждаются до температуры (25 ± 1) °C, после чего по стерильному трубопроводу подается посевной материал из биореактора (3). Для интенсификации процесса выращивания посевного материала применяется отъемно-доливной метод: каждые 24 ч из биореактора (4) отбирают 475 л посевного материала и подают в аппарат свежую порцию питательной среды с 1% крахмала и гидродинамически растительного сырья.

В аппарат с тихоходной лопастной мешалкой (5) подается механически измельченное растительное сырье (топинамбур с размером частиц 5–10 мм, сосновые опилки – 3–5 мм), стерилизуется, охлаждается; затем из биореактора-инокулятора (4) подается посевной материал, содержащий гидродинамически активированное сырье и биомассу штамма-продуцента, адаптированного к сырью, в соотношении 1 : 10. Одна загрузка аппарата обеспечивает ферментацию 475 кг абсолютно сухого растительного сырья. Затем инокулированный растительный субстрат с помощью шнекового транспортера (18) выгружается в сетчатые контейнеры (8) (размером 70 × 40 × 10 см), которые перемещают на выращивание в растительную камеру (9). По истечении 10 суток режим растительной камеры переключают на сушку, и готовый продукт высушивают до остаточной влажности 10%. Высушенный кормовой продукт измельчают на дезинтеграторе (10) и упаковывают.

Сухой продукт имеет вид светло-коричневого порошка, содержит 14.2–16.7% белка, клетчатку, витамины и минеральные элементы [28, 30] и может быть рекомендован к использованию в качестве полноценного кормового продукта предприятиями агропромышленного комплекса.

Выводы

Разработана технология опытного производства по микробиологической переработке растительных отходов, в частности сосновых опилок и вегетативной части топинамбура, в кормовые продукты, включающая гидродинамическую активацию сырья.

Использование гидродинамической активации на стадии получения посевного материала является перспективным способом предобработки растительного сырья перед его микробиологической конверсией, поскольку позволяет адаптировать штаммы *Plerotus ostreatus* PO-4.1 и *Pleurotus djamor* PD-3.2 к сырью, активировать их мультиферментные комплексы и в дальнейшем провести процесс твердофазного культивирования на этих видах сырья в более короткий срок, наиболее полно утилизировать лигноуглеводный комплекс сырья и получить высокий выход обогащенного белком продукта.

Твердофазная ферментация на основной стадии технологического процесса позволяет перерабатывать значительные количества крупнотоннажных отходов деревообработки в обогащенные белком кормовые продукты, востребованные отечественным сельским хозяйством.

Список литературы

1. Матвеева Р.Н., Милютин Л.И., Буторова О.Ф. Интеграция исследований СибГТУ и ИЛ СО РАН по изучению биоразнообразия основных лесобразующих видов Сибири // Интеграция фундаментальной науки и высшего лесотехнического образования по проблемам ускоренного воспроизводства, использования и модификации древесины. Воронеж, 2000. Т. 1. С. 265–269.
2. Аккерман А.С., Антакова В.Н., Бабайлов В.Е. Плитные материалы и изделия из древесины. М., 1976. 360 с.

3. Куликова Н.А., Кляйн О.И., Степанова Е.В., Королева О.В. Использование базидиальных грибов в технологиях переработки и утилизации техногенных отходов: фундаментальные и прикладные аспекты // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47. №6. С. 619–634.
4. Русинова Т.В. Разработка технологий биосинтеза фермента лакказы базидиальными грибами *Trametes*: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2007. 191 с.
5. Рабинович М.Л., Болотова А.В., Кондращенко В.И.. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов: в 2 кн. Кн. I: Древесина и разрушающие ее грибы. М., 2001. 264 с.
6. Asgher M., Ijaz A., Bilal M. Lignocellulose-degrading enzyme production by *Pleurotus sapidus* WC 529 and its application in lignin degradation // Turkish Journal of Biochemistry. 2016. Vol. 41 (1). Pp. 26–36.
7. Федорова Т.В., Шахова Н.В., Кляйн О.И., Глазунова О.А., Малошенок Л.Г., Куликова Н.А., Псурцева Н.В., Королева О.В. Сравнительный анализ лигнолитического потенциала базидиальных грибов, принадлежащих к различным таксономическим и экологическим группам // Прикладная биохимия и микробиология. 2013. Т. 49. №6. С. 570–579.
8. Мурадов П.З., Гасымов Ш.Н., Гахраманова Ф.Х., Алиева А.А., Аббасова Д.М., Бабаева Ш.А., Рагимова М.М. Ксилотрофные грибы как активные деструкторы растительных отходов // Вестник МГОУ. Серия «Естественные науки». 2009. №1. С. 109–112.
9. Панфилов В.И. Биотехнологическая конверсия углеводсодержащего растительного сырья для получения продуктов пищевого и кормового назначения: дисс. ... докт. техн. наук. М., 2004. 359 с.
10. Рязанова Т.В., Чупрова Н.А., Дорофеева Л.А., Богданов А.В., Шалина Ж.В. Химический состав вегетативной части топинамбура и ее использование // Известия вузов. Лесной журнал. 1997. №4. С. 71–75.
11. Бойко С.М., Плохотников А.В., Кочнев Н.К. Особенности жизненного цикла растений топинамбура в условиях Восточной Сибири // Сельскохозяйственная биология. 2002. №4. С. 110–114.
12. Аникиенко Т.И. Химический и микроэлементный состав клубней и зеленой массы топинамбура // Вестник КрасГАУ. 2008. №2. С. 76–80.
13. Емелина Т.Н., Рязанова Т.В., Чупрова Н.А. Получение углеводсодержащих субстратов из вегетативной части топинамбура // Химия растительного сырья. 2002. №2. С. 177–179.
14. Пикозина М.А., Чупрова Н.А., Рязанова Т.В. Культивирование грибов рода *Trichoderma* на вегетативной части топинамбура // Химия растительного сырья. 2013. №1. С. 77–81.
15. Чупрова Н.А., Рязанова Т.В. Получение биоэтанола из вегетативной части топинамбура // Химия растительного сырья. 2010. №2. С. 49–52.
16. Алашкевич Ю.Д. Гидродинамические явления при безножевой обработке волокнистых материалов. Красноярск, 2004. 80 с.
17. Марченко Р.А., Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С. Сравнительная оценка показателей размола при ножевом и безножевом способах // Химия растительного сырья. 2012. №1. С. 191–198.
18. Патент №138045 (РФ). Кавитационный гидроударный диспергатор / В.Г. Мозговой. – 2014.
19. Баяндин М.А., Ермолин В.Н., Елисеев С.Г. Влияние механоактивации на аутогезионные свойства древесины // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. 31. №1–2. С. 159–163.
20. Катраков И.Б., Маркин В.И., Базарнова Н.Г. Получение пресс-масс и плитных материалов на основе кавитированного растительного сырья // Известия АлтГУ. 2014. Т. 1. №3. С. 204–208.
21. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казицин С.Н., Намятов А.В. Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки // Известия вузов. Лесной журнал. 2019. №5 (371). С. 148–156.
22. Тарнопольская В.В., Алаудинова Е.В., Саволайнен А.С., Роптопуло С.И. Химический состав глубинной культуры ксилотрофных базидиомицетов рода *Pleurotus* // Хвойные бореальные зоны. 2014. №1–2. С. 78–80.
23. Тарнопольская В.В., Васюк А.Е., Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Вещества липидной природы глубинной культуры ксилотрофного базидиомицета *Pleurotus citrinopileatus* // Хвойные бореальной зоны. 2015. № 5–6. С. 305–309.
24. Tamopol'skaya V.V., Kiseleva O.V., Alaudinova E.V., Mironov P.V. Fatty acids of xylophilic basidiomycetes of the genus *Pleurotus* in submerged culture // Chemistry of Natural Compounds. 2015. Vol. 51. N2. Pp. 328–329.
25. Васюк А.Е., Тарнопольская В.В., Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Флавоноиды глубинной культуры ксилотрофных базидиомицетов рода *Pleurotus* // Хвойные бореальной зоны. 2016. №1–2. С. 114–116.
26. Тарнопольская В.В., Васюк А.Е., Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Оценка перспектив использования биомассы глубинного мицелия ксилотрофных базидиомицетов рода *Pleurotus* в качестве комплексной кормовой добавки // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2015. С. 235–238.
27. Тарнопольская В.В., Васюк А.Е., Алаудинова Е.В. Биоконверсия вегетативной части топинамбура ксилотрофными базидиомицетами рода *Pleurotus* в условиях глубинного культивирования с получением комплексной кормовой добавки // Наука и современность: материалы Международной научно-практической конференции. Уфа, 2015. С. 128–132.
28. Тарнопольская В.В., Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Влияние гидродинамической активации растительного сырья на его конверсию ксилотрофными базидиомицетами рода *Pleurotus* // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: материалы Всероссийской научной конференции. Красноярск, 2016. С. 38–41.

29. Тарнопольская В.В., Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Перспективы использования базидиальных грибов для получения кормовых продуктов // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. XXXVII. №5–6. С. 338–341.
30. Баранов О.Ю., Яромлович В.А., Пантелеев С.В., Купреенко Д.Г. Молекулярно-генетическая диагностика грибных болезней в лесных питомниках // Лесное и охотничье хозяйство. 2012. №6. С. 21–29.
31. Падутов В.Е., Баранов О.Ю., Воропаев Е.В. Методы молекулярно-генетического анализа. М., 2007. 176 с.

Поступила в редакцию 30 сентября 2020 г.

Принята к публикации 13 ноября 2020 г.

Для цитирования: Тарнопольская В.В., Рязанова Т.В., Демиденко Н.Ю., Ерёменко О.Н. Технология микробиологической переработки растительного сырья культурами *Pleurotus* с получением кормовых продуктов // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 405–414. DOI: 10.14258/jcrpm.2020048445.

*Tarnopol'skaya V.V.**, *Ryazanova T.V.*, *Demidenko N.Yu.*, *Eryomenko O.N.* TECHNOLOGY OF PLANT RAW MATERIALS MICROBIOLOGICAL PROCESSING WITH *PLEUROTUS* STRAINS FOR FEED PRODUCTS PRODUCTION

Siberian State University of Science and Technology named after academician M.F. Reshetnev, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 31, Krasnoyarsk, 660037 (Russia), e-mail: veronichkat@mail.ru

A technology for pilot production of feed products via microbiological conversion of plant raw materials (mixed substrate of pine sawdust and vegetative part of Jerusalem artichoke) by *Pleurotus ostreatus* PO-4.1 and *Pleurotus djamor* PD-3.2 strains is developed. The technology includes hydrodynamic activation of substrate at the seed stock production stage. The overall technology includes three key stages: submerged fermentation of pure cultures of production strains; submerged-solid phase fermentation of hydrodynamically activated plant raw materials for seed stock production; solid-state fermentation of mechanically ground plant substrate for feed products production. A successful approbation of submerged-solid state fermentation of production strains on media containing 3% of hydrodynamically activated raw materials allowed for obtaining seed stock with 14.5 g/l yield of submerged mycelium biomass fully adopted for this type of substrate. Further use of this seed stock biomass at the solid state fermentation stage makes the overall process duration three times shorter compared to existing technologies for direct wood waste bioconversion. The pilot plant results show valuable practicability of plant raw material hydrodynamic activation with the purpose of enhancing its bioaccessibility with consequent increase in degree of microbiological conversion. The product of bioconversion contains 14–16% of protein, biofiber, vitamins and minerals and could be considered for successful use as feed by agricultural enterprises.

Keywords: microbiological processing, bioconversion, pine sawdust, Jerusalem artichoke vegetative part, hydrodynamic activation, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus djamor*.

* Corresponding author.

References

1. Matveyeva R.N., Milyutina L.I., Butorova O.F. *Integratsiya fundamental'noy nauki i vysshego lesotekhnicheskogo obrazovaniya po problemam uskorennoy vosproizvodstva, ispol'zovaniya i modifikatsii drevesiny*. [Integration of fundamental science and higher forestry education on the problems of accelerated reproduction, use and modification of wood]. Voronezh, 2000, vol. 1, pp. 265–269. (in Russ.).
2. Akkerman A.S., Antakova V.N., Babaylov V.Ye. *Plitnyye materialy i izdeliya iz drevesiny*. [Board materials and wood products]. Moscow, 1976, 360 p. (in Russ.).
3. Kulikova N.A., Klyayn O.I., Stepanova Ye.V., Koroleva O.V. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 619–634. (in Russ.).
4. Rusinova T.V. *Razrabotka tekhnologiy biosinteza lakkazy bazidial'nymi gribami Trametes: diss. ... kand. tekhn. nauk*. [Development of technologies for biosynthesis of the enzyme laccase by basidiomycetes Trametes: diss. ... Cand. tech. sciences]. Moscow, 2007, 191 p. (in Russ.).
5. Rabinovich M.L., Bolobova A.V., Kondrashchenko V.I. *Teoreticheskiye osnovy biotekhnologii drevesnykh kompozitov: V 2 kn., Kn. I: Drevesina i razrushayushchiye yeye griby*. [Theoretical foundations of biotechnology of wood composites: In 2 books. Book I: Wood and mushrooms that destroy it]. Moscow, 2001, 264 p. (in Russ.).
6. Asgher M., Ijaz A., Bilal M. *Turkish Journal of Biochemistry*, 2016, vol. 41 (1), pp. 26–36.
7. Fedorova T.V., Shakhova N.V., Klyayn O.I., Glazunova O.A., Maloshenok L.G., Kulikova N.A., Psurtseva N.V., Koroleva O.V. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 570–579. (in Russ.).
8. Muradov P.Z., Gasymov Sh.N., Gakhramanova F.Kh., Aliyeva A.A., Abbasova D.M., Babayeva Sh.A., Ragimova M.M. *Vestnik MGOU. Seriya «Yestestvennyye nauki»*, 2009, no. 1, pp. 109–112. (in Russ.).
9. Panfilov V.I. *Biotehnologicheskaya konversiya uglevodsoederzhashchego rastitel'nogo syr'ya dlya polucheniya produktov pishchevogo i kormovogo naznacheniya: diss. ... dokt. tekhn. nauk*. [Biotechnological conversion of carbohydrate-containing plant raw materials for obtaining food and feed products: diss. ... doct. tech. sciences]. Moscow, 2004, 359 p. (in Russ.).
10. Ryazanova T.V., Chuprova N.A., Dorofeyeva L.A., Bogdanov A.V., Shalina Zh.V. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal*, 1997, no. 4, pp. 71–75. (in Russ.).
11. Boyko S.M., Plokhonnikov A.V., Kochnev N.K. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2002, no. 4, pp. 110–114. (in Russ.).
12. Anikiyenko T.I. *Vestnik KrasGAU*, 2008, no. 2, pp. 76–80. (in Russ.).
13. Yemelina T.N., Ryazanova T.V., Chuprova N.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2002, no. 2, pp. 177–179. (in Russ.).
14. Pikoziina M.A., Chuprova N.A., Ryazanova T.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2013, no. 1, pp. 77–81. (in Russ.).
15. Chuprova N.A., Ryazanova T.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2010, no. 2, pp. 49–52. (in Russ.).
16. Alashkevich Yu.D. *Gidrodinamicheskiye yavleniya pri beznozhevoy obrabotke voloknistykh materialov*. [Hydrodynamic phenomena during knifeless processing of fibrous materials]. Krasnoyarsk, 2004, 80 p. (in Russ.).
17. Marchenko R.A., Alashkevich Yu.D., Reshetova N.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2012, no. 1, pp. 191–198. (in Russ.).
18. Patent 138045 (RU). 2014. (in Russ.).
19. Bayandin M.A., Yermolin V.N., Yeliseyev S.G. *Khvoynyye boreal'noy zony*, 2013, vol. 31, no. 1–2, pp. 159–163. (in Russ.).
20. Katrakov I.B., Markin V.I., Bazarnova N.G. *Izvestiya AltGU*, 2014, vol. 1, no. 3, pp. 204–208. (in Russ.).
21. Yermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal*, 2019, no. 5 (371), pp. 148–156. (in Russ.).
22. Tarnopol'skaya V.V., Alaudinova Ye.V., Savolaynen A.S., Roptopulo S.I. *Khvoynyye boreal'nyye zony*, 2014, no. 1–2, pp. 78–80. (in Russ.).
23. Tarnopol'skaya V.V., Vasyuk A.Ye., Alaudinova Ye.V., Mironov P.V. *Khvoynyye boreal'noy zony*, 2015, no. 5–6, pp. 305–309. (in Russ.).
24. Tarnopol'skaya V.V., Kiseleva O.V., Alaudinova E.V., Mironov P.V. *Chemistry of Natural Compounds*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 328–329.
25. Vasyuk A.Ye., Tarnopol'skaya V.V., Alaudinova Ye.V., Mironov P.V. *Khvoynyye boreal'noy zony*, 2016, no. 1–2, pp. 114–116. (in Russ.).
26. Tarnopol'skaya V.V., Vasyuk A.Ye., Alaudinova Ye.V., Mironov P.V. *Lesnoy i khimicheskii komplekсы – problemy i resheniya: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Forest and chemical complexes – problems and solutions: materials of the All-Russian scientific and practical conference]. Krasnoyarsk, 2015, pp. 235–238. (in Russ.).
27. Tarnopol'skaya V.V., Vasyuk A.Ye., Alaudinova Ye.V. *Nauka i sovremennost': materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Science and modernity: materials of an international scientific and practical conference]. Ufa, 2015, pp. 128–132. (in Russ.).
28. Tarnopol'skaya V.V., Alaudinova Ye.V., Mironov P.V. *Molodyye uchenyye v reshenii ak-tual'nykh problem nauki: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*. [Young scientists in solving urgent problems of science: materials of the All-Russian scientific conference]. Krasnoyarsk, 2016, pp. 38–41. (in Russ.).
29. Tarnopol'skaya V.V., Alaudinova Ye.V., Mironov P.V. *Khvoynyye boreal'noy zony*, 2016, vol. XXXVII, no. 5–6, pp. 338–341. (in Russ.).
30. Baranov O.Yu., Yarmolovich V.A., Panteleyev S.V., Kupreyenko D.G. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo*, 2012, no. 6, pp. 21–29. (in Russ.).

31. Padutov V.Ye., Baranov O.Yu., Voropayev Ye.V. *Metody molekulyarno-geneticheskogo analiza*. [Molecular genetic analysis methods]. Moscow, 2007, 176 p. (in Russ.).

Received September 30, 2020

Accepted November 13, 2020

For citing: Tarnopol'skaya V.V., Ryazanova T.V., Demidenko N.Yu., Eryomenko O.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 405–414. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020048445.