

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ БИОКОНВЕРСИИ
ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КУЛЬТУРЫ ГРИБА *Trichoderma viride***

В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
a.slepix@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: динамическое и статическое ферментирование; субстрат; твердофазная биоконверсия; целлюлозосодержащее сырье.

Аннотация: Предложена технология твердофазной биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в барабанном аппарате с использованием культуры гриба *Trichoderma viride*. Проведено исследование кинетики процесса биоконверсии в статическом и динамическом режимах организации процесса ферментирования. Установлено, что биоконверсия в динамическом режиме обеспечивает более высокую интенсивность ферментирования с получением культуры высокой активности, позволяющей снизить продолжительность процесса более чем на 40 часов.

Отсутствие достаточных объемов отечественного качественного и недорогого органического субстрата является одним из основных препятствий для развития предприятий по производству макро- и микроскопических грибов, и в том числе грибов продовольственного назначения [1]. Как было отмечено ранее [2], наблюдаемый дефицит доступного и качественного отечественного субстрата может быть преодолен путем развития технологической базы для его производства методом твердофазного ферментирования целлюлозосодержащих производственных отходов. Это объясняется наличием в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства России большого количества органических целлюлозосодержащих отходов, являющихся перспективным сырьем для производства субстрата, богатого питательными веществами и аминокислотами. С позиции энергопотребления и экологической безопасности твердофазный ферментализ является наиболее предпочтительным технологическим приемом биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в органический субстрат. Кроме того важно отметить, что развитие соответствующей технологической базы обеспечит решение проблемы утилизации отходов, которая осуществляется в настоящее время экономически нецелесообразными и экологически вредными способами.

На предыдущем этапе исследования [2], при разработке технологии твердофазной биоконверсии целлюлозосодержащего сырья, осуществлен обоснованный выбор продуцента белка с высокой целлюлазной активностью и технологичного

в применении. При выборе отдано предпочтение штамму микроскопических грибов *Trichoderma viride*. Микромицет данного штамма является активным продуцентом целлюлолитического фермента, проявляет высокую целлюлазную активность на широком спектре питательных сред, вырабатывает ферменты, играющие важную роль в биодегидратации лигнина, и характеризуется высокой устойчивостью к экологическому стрессу [3].

В качестве базовой принята технология биоконверсии целлюлозосодержащего сырья, используемая для получения белкового корма, включающая подготовку сырья (отходов растениеводства), питательной среды, засев микробной культуры, твердофазную ферментацию в статическом режиме и сушку [4]. Базовая технология используется в качестве объекта для сравнительной оценки эффективности предложенной технологии, основным и по существу единственным отличием которой является организация процесса твердофазного ферментолиза в динамическом режиме. Вследствие чрезвычайной чувствительности мицелия штамма *Trichoderma viride* к механическому воздействию при проведении процесса ферментолиза в динамическом режиме взаимное перемещение элементов ферментативной среды организуют в режиме ее «мягкого» естественного обрушения на откосах. Откосы циклически формируются на открытой поверхности засыпки ферментативной среды в рабочем объеме медленно вращающегося барабана. При обрушении откоса происходит обновление поверхности контакта фаз, которое сопровождается повышением концентрации ростовых факторов в объеме ферментативной среды, ее разрыхлением и интенсификацией тепломассообменных процессов.

Для обеспечения сравнительной оценки предложенная и базовая технологии с учетом регионального акцента предполагают использование в качестве целлюлозосодержащего сырья отходов деревообработки лиственных пород. В соответствии с регламентом названных технологий используется аналогичная по составу и способу подготовки ферментативная среда. В целях повышения активности метаболизма мицелиальных грибов и, как следствие, интенсификации процесса твердофазного ферментолиза в питательную среду добавляют пшеничные отруби и солодовый экстракт. При этом первый из компонентов вводится как источник водорастворимых витаминов группы В и микроэлементов, второй – выступает как источник моносахаров, минеральных веществ и аминокислот [5]. В результате твердофазный субстрат представляет собой смесь древесных опилок, пшеничных отрубей и солодового экстракта (14 % сухих веществ), содержащихся в смеси в соотношении 3 : 2 : 2,5, соответственно. Процесс ферментолиза протекает под действием целлюлолитических ферментов, вырабатываемых культурой микроскопического гриба штамма *Trichoderma viride*. Посевная культура вводится в простерилизованный, высушенный и охлажденный стерильным воздухом субстрат в виде водной суспензии спор мицелиальных грибов с концентрацией последних 28,5 % из расчета 10 % массовых.

В соответствии с регламентом базовой технологии процесс культивирования организуют в статическом режиме, который обеспечивается путем поверхностного аэрирования неподвижного слоя ферментативной среды толщиной 35 мм влажным стерильным воздухом (относительная влажность 96 – 98 %). При ферментации в ферментативной среде поддерживается температура 28...30 °С, рН 4,5...6,5 и влажность 60 – 75 %. В отличие от базовой технологии в предложенном варианте ее организации культивирование осуществляется в динамическом режиме. Динамический режим реализуется при перемешивании среды «мягким» механическим воздействием гравитации в аппарате с вращающимся барабаном в условиях объемной аэрации с помощью устройства, размещенного в центре циркуляции материала в засыпке [2].

В работе [2] проведена оценка эффективности предложенного технического решения косвенным методом путем исследования относительной скорости прироста массы ферментативной среды в процессе статического и динамического ферментирования. В результате исследования установлено, что по указанному показателю интенсивность процесса в динамическом режиме его организации на 40 – 50 % выше, чем в статическом. В настоящей работе сравнительная оценка эффективности предложенного и базового вариантов организации процесса ферментализации целлюлозосодержащего сырья проводится прямыми методами. Используемые методы обеспечивают возможность проанализировать динамику биоконверсии целлюлозы и изменения содержания лигнина в ферментативной среде, с одной стороны, и динамику наращивания биомассы и изменения содержания редуцирующих сахаров, с другой.

На очередном этапе экспериментального исследования проводился отбор образцов ферментативной среды через равные промежутки времени (24 часа) для определения концентрации протеина и содержания легкоперевариваемых сахаров для двух вариантов организации процесса. В целях минимизации влияния случайных погрешностей на результат исследования анализу подвергались пять образцов. Полученные значения после проверки на статистическую однородность при 95%-й доверительной вероятности осреднялись. В итоге, полученные результаты исследования использованы для сравнительной оценки динамики относительного прироста белковой массы и количества легкоперевариваемых сахаров в процессах динамического и статического культивирования. Для измерения концентрации протеина использовали колориметрический метод с применением биуретового реактива [6], а содержание легкоперевариваемых редуцирующих сахаров определяли йодометрическим методом [7].

На рисунке 1 представлены результаты исследования кинетики роста биомассы в виде кривых изменения концентрации протеина в ферментативной среде для вариантов ферментирования в статическом и динамическом режимах. Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать вывод о принципиальном различии динамики процесса в названных вариантах его организации в первые двое суток его протекания. В данном периоде в статическом режиме ферментирования наблюдается относительно умеренное и постепенное возрастание концентрации белка с интенсивностью, соответствующей линейному закону, в динамическом – «лавиноное» наращивание массы протеина с интенсивностью, соответствующей экспоненциальному закону. В результате, в режиме динамического культивирования через двое суток концентрация белка в ферментативной среде в 2,5 раза превышает его концентрацию, достигаемую статическим режимом культивирования (см. рис. 1).

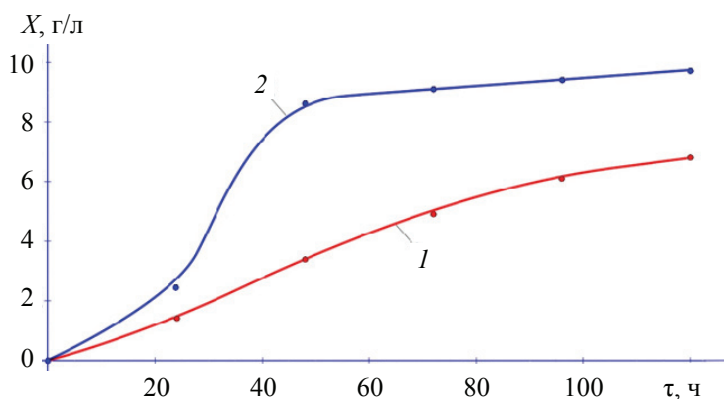


Рис. 1. Изменение концентрации белка в ферментативной среде в процессе статического (1) и динамического (2) культивирования

Сделанные выводы в полной мере подтверждаются результатами исследования кинетики роста биомассы в ферментативной среде в процессе культивирования, представленными зависимостями удельной скорости прироста протеина для динамического и статического режимов организации процесса (рис. 2).

Удельная скорость роста белка в условиях динамического режима в конце вторых суток примерно в 2,5 раза больше, чем для статического. Однако в последующие трое суток ферментирования кинетические закономерности процесса роста белковой массы претерпевают существенные изменения. Увеличение удельной скорости прироста концентрации белка, наблюдаемое в первые двое суток, в последующий период процесса сменяется ее снижением. Особенно резкое снижение удельной скорости роста белка (более чем в 10 раз) отмечается на третьи сутки для динамического режима организации процесса. Данный результат в сочетании с отмечаемой при этом максимальной массой белка свидетельствует о снижении концентрации ростовых факторов и доступных питательных веществ в субстрате.

В свою очередь в статическом режиме удельная скорость роста белка изменяется в более узком диапазоне на протяжении всего процесса ферментации. Данный результат в сочетании с возможностью существенного сокращения времени ферментации можно рассматривать как прямое подтверждение целесообразности организации процесса ферментализации целлюлозосодержащего сырья с использованием культуры гриба *Trichoderma viride* в динамическом режиме. При этом значительное снижение продолжительности процесса в условиях «мягкого» механического воздействия очевидным образом обеспечивает снижение энергетических затрат. Интенсификация ферментации в динамическом режиме достигается за счет активного обновления и более развитой поверхности межфазного контакта, а также более интенсивного теплообмена. При этом важнейшим положительным эффектом мягкого механического воздействия, приводящим к развитию поверхности межфазного контакта, вполне может быть увеличение центров активного роста мицелия.

Результаты исследования динамики изменения содержания сахаров в процессе биоконверсии целлюлозосодержащего сырья представлены на рис. 3. Результаты измерения, имеющие положительные значения, соответствуют содержанию редуцирующих легкоперевариваемых сахаров (моно- и дисахаров), концентрация которых определена в соответствии с традиционным йодометрическим методом. В дополнение к традиционным данным на рисунке приведены условные отрицательные значения, которые косвенным образом указывают на содержание нередуцирующих сахаров (олигосахаров). Вследствие отсутствия альдегидной группы в химическом составе нередуцирующих сахаров они не обнаруживают

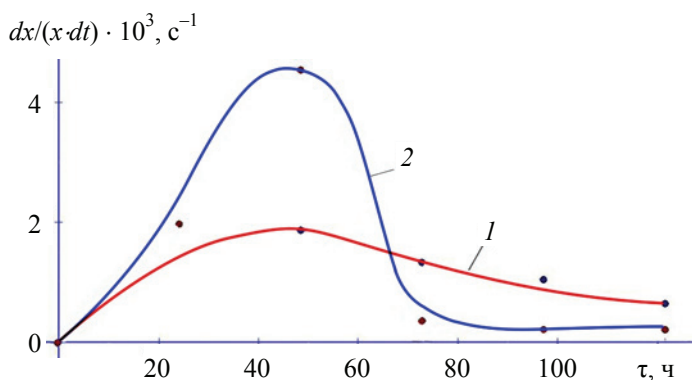


Рис. 2. Изменение удельной скорости прироста содержания белка в ферментативной среде в процессе статического (1) и динамического (2) культивирования

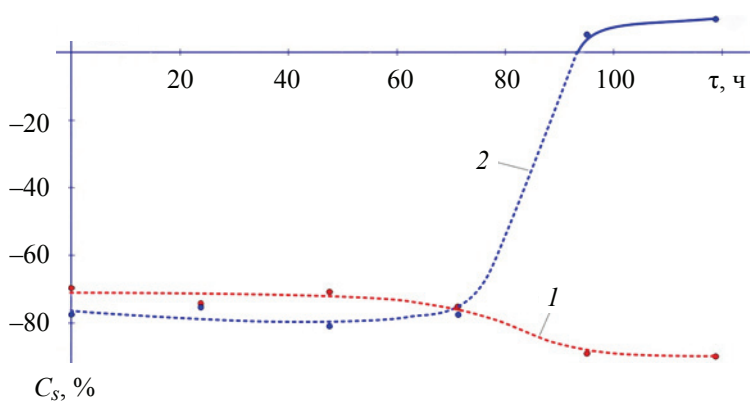


Рис. 3. Динамика тестовых показателей содержания сахаров в ферментативной среде в процессе статического (1) и динамического (2) культивирования

реакционной способности, поэтому традиционный тест приводит к отрицательному результату [8]. Однако при достаточном подкислении реакционного раствора олигосахара деструктируют до редуцирующих сахаров. Примерно одинаковые отрицательные значения для альтернативных вариантов организации процесса косвенно свидетельствуют об одинаковом составе олигосахаров.

Сравнительный анализ динамики содержания сахаров в альтернативных вариантах организации процесса биоконверсии показывает, что в течение первых трех суток ферментирования в обоих режимах культивирования в субстрате содержатся только нередуцирующие сахара. При этом концентрация сахаров находится в обоих случаях примерно на одном уровне. Наблюдаемой динамике можно дать следующее гипотетическое объяснение. Отсутствие редуцирующих сахаров на начальной стадии ферментирования указывает на интенсивное их потребление культурой гриба. На четвертые и последующие сутки в условиях динамического культивирования содержание легкоперевариваемых сахаров резко снижается, и в составе ферментативной среды наряду с нередуцирующими сахарами появляются редуцирующие. По-видимому, такое изменение вызвано достижением концентрации белка в ферментативной среде, близкой к предельной в условиях ферментализа, при сопутствующем снижении интенсивности ростовых факторов и, как следствие, меньшим потреблением редуцирующих сахаров.

При ферментировании в статическом режиме на завершающем этапе процесса такого рода трансформации в содержании сахаров не наблюдается и, более того, состав нередуцирующих сахаров к концу процесса несколько изменяется. Такую динамику можно объяснить тем, что удельная скорость роста культуры находится в данном периоде на достаточно высоком уровне при сохраняющейся высокой концентрации в культуре ростовых факторов. В связи с этим процесс ферментализа целлюлозосодержащего субстрата и потребления образующихся при этом редуцирующих сахаров остается достаточно интенсивным. Полученный результат можно рассматривать как дополнительное подтверждение целесообразности организации процесса биоконверсии целлюлозосодержащего сырья с использованием культуры гриба *Trichoderma viride* в динамическом режиме при условии «мягкого» механического воздействия на ферментативную среду.

Дополнительные подтверждения целесообразности организации процесса биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в динамическом режиме ферментирования получены путем экспериментального определения изменения содержания целлюлозы и остаточного лигнина. С этой целью проведено исследование кинетики биоконверсии целлюлозы и деструкции лигнина в процессах динамического и статического культивирования. Для получения статистически значимых результатов отбор проб обработка опытных данных проводилась по методике, анало-

гичной использованной в предыдущем эксперименте. Содержание целлюлозы в образцах определяли по методике, регламентированной ГОСТ Р 55293–2012 [9], а количество лигнина оценивали методом, предложенным Всесоюзным научно-производственным объединением целлюлозно-бумажной промышленности, с использованием 72%-й серной кислоты.

Результаты исследования кинетики снижения содержания остаточной целлюлозы в ферментативной среде в процессе биоконверсии для вариантов статического и динамического культивирования представлены на рис. 4. При одинаковом начальном содержании целлюлозы в ферментативной среде ее количество снижается более интенсивно в условиях динамического режима культивирования. Результаты свидетельствуют о том, что на всех этапах процесса скорость биоконверсии целлюлозы в динамическом режиме выше, чем в статическом. Вследствие более высокого темпа снижения концентрации клетчатки в ферментативной среде в динамическом режиме культивирования через трое суток обеспечивается эффект конверсии, аналогичный тому, который наблюдается в статическом режиме лишь спустя еще двое суток. Интенсификация ферментативного гидролиза клетчатки в динамическом режиме достигается за счет более развитой поверхности межфазного контакта, более активного ее обновления и интенсивного теплообмена.

На рисунке 5 представлены кинетические кривые, позволяющие оценить темп снижения содержания лигнина в процессе ферментации целлюлозы для вариантов статического и динамического культивирования. При сравнении зависимостей 1 и 2 можно сделать вывод о том, что количество остаточного лигнина в ферментируемом субстрате более интенсивно снижается при культивировании в динамическом режиме на всех этапах процесса. Результаты исследования кинетики снижения содержания остаточной целлюлозы и лигнина в ферментативной среде можно рассматривать как прямое подтверждение целесообразности организации процесса ферментации целлюлозосодержащего сырья в условиях «мягкого» механического воздействия в динамическом режиме в аппарате с вращающимся барабаном с использованием культуры гриба *Trichoderma viride* [10].

Таким образом, приведенные результаты, с учетом работы [2], позволяют сделать вывод о том, что благодаря правильно подобранному составу питательной среды и созданию благоприятных условий культивирования выбранного микроорганизма в динамическом режиме организации процесса поддерживается более

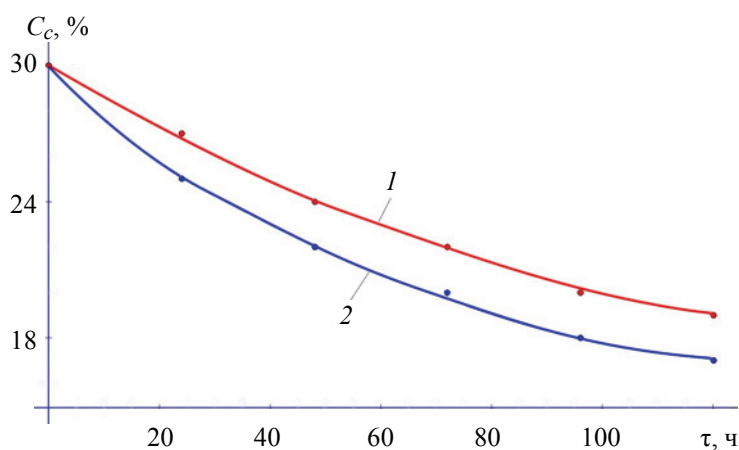


Рис. 4. Изменение количества целлюлозы в ферментативной среде в процессе статического (1) и динамического (2) ферментирования

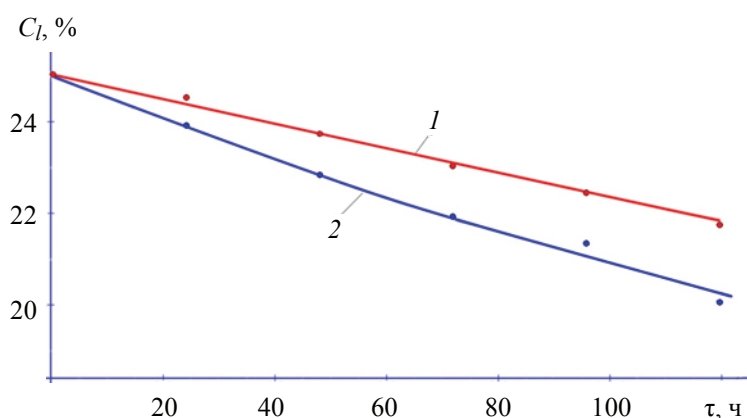


Рис. 5. Изменение содержания лигнина в ферментативной среде в процессе статического (1) и динамического (2) ферментирования

высокая его биологическая активность. Динамический режим ферментирования обеспечивает протекание процесса при минимальном спорообразовании с формированием больших плодовых тел при их однородном распределении в объеме ферментативной среды. Активная культура обеспечивает интенсивное наращивание в ферментируемой среде белковой массы, концентрация которой через двое суток ферментализации в 2,5 раза выше концентрации, достигаемой в соответствии с базовым вариантом технологии (культивирование в статическом режиме). Интенсивность биоконверсии целлюлозосодержащего сырья на всех этапах процесса в динамическом режиме ферментирования выше, что обеспечивает возможность сокращения продолжительности процесса, по сравнению с базовым вариантом технологии, более чем на 40 часов.

Список литературы

1. Гайва, Е. Топ-10 грибных проектов. Заявлены производства на 28 млрд рублей / Е. Гайва // *Агроинвестор*. – 2016. – № 9. – URL : <https://www.agroinvestor.ru/rating/article/24141/> (дата обращения: 30.06.2020).
2. Долгунин, В. Н. К разработке технологии и аппаратного оформления производства субстрата из целлюлозосодержащего сырья / В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 595 – 602. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602
3. Гнеушева, И. А. Биологическая активность грибов рода *Trichoderma* и их промышленное применение / И. А. Гнеушева, Н. Е. Павловская, И. В. Яковлева // *Вестн. Орловского гос. аграрного ун-та*. – 2010. – № 3 (24). – С. 36 – 39.
4. Пат. 27416 Республика Казахстан, МПК А21К 1/00. Способ получения соломобелкового корма / Э. Ж. Сауран, Д. Т. Мирталипов, Г. Ж. Ташимбетов ; заявитель и патентообладатель ТОО «Региональный технопарк в Южно-Казахстанской области». – № 2012/1308.1 ; заявл. 12.12.2012 ; опубл. 15.10.2013, Бюл. № 10. – 3 с.
5. Химический состав солодовых экстрактов. – Текст : электронный / Н. А. Емельянова, В. Н. Кошечкина, А. В. Данилевская, Л. В. Диченко // *Пищевая промышленность*. – 1987. – URL : <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/10292/1/10.pdf> (дата обращения: 30.06.2020).
6. ОФС.1.2.3.0012.15 Определение белка. Метод 5 (колориметрический метод с биуретовым реактивом). – Текст : электронный // *Фармакопей.рф*. – URL : <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-2-3-0012-15-opredelenie-belka/> (дата обращения: 30.06.2020).

7. Теоретические основы пищевой биотехнологии : лабораторные работы / О. В. Зюзина, О. Б. Шуняева, Е. И. Муратова, О. О. Иванов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 48 с.

8. ГОСТ 11960–79. Полуфабрикаты волокнистые и сырье из однолетних растений для целлюлозно-бумажного производства. Метод определения лигина. – Взамен ГОСТ 11960–66 ; введ. 1981–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 5 с.

9. ГОСТ Р 55293–2012 Ферментные препараты для пищевой промышленности. Метод определения целлюлазной активности. – Введ. 2014-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 7 с.

10. Иванов, О. О. Управление сегрегированными потоками сыпучих материалов для их обработки методами разделения и соединения / О. О. Иванов, В. А. Пронин, Е. А. Рябова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 397 – 410. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410

Kinetic Regularities of Bioconversion of Cellulose-Containing Raw Materials Using a Culture of the Fungus *Trichoderma Viride*

V. N. Dolgunin, A. V. Slepikh, V. A. Pronin

*Department of Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries,
a.slepix@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: dynamic and static fermentation; sub-stratum; solid phase bioconversion; cellulose-containing raw materials.

Abstract: The technology of solid-phase bioconversion of cellulose-containing raw materials in a drum apparatus using a culture of the fungus *Trichoderma viride* is proposed. The study of the kinetics of the bioconversion process in the static and dynamic modes of the organization of the fermentation process was carried out. It has been established that bioconversion in a dynamic mode provides a higher intensity of fermentation with obtaining a culture of high activity, which makes it possible to reduce the duration of the process by more than 40 hours.

References

1. <https://www.agroinvestor.ru/rating/article/24141/> (accessed 30 June 2020).
2. Dolgunin V.N., Slepikh A.V., Pronin V.A. [On the development of technology and hardware design for the production of a substrate from cellulose-containing raw materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 595-602, doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Gneusheva I.A., Pavlovskaya N.Ye., Yakovleva I.V. [Biological activity of fungi of the genus *Trichoderma* and their industrial application], *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Oryol State Agrarian University], 2010, no. 3 (24), pp. 36-39. (In Russ.)
4. Sauran E.Zh., Mirtalipov D.T., Tashimbetov G.Zh. *Sposob polucheniya solomobelkovogo korma* [Method of obtaining straw-protein feed], Republic of Kazakhstan, 2013, Pat. 27416. (In Russ.)
5. Yemel'yanova N.A., Koshevaya V.N., Danilevskaya A.V., Dichenko L.V. [The chemical composition of malt extracts], *Pishchevaya promyshlennost'* [Food industry], 1987, № <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/10292/1/10.pdf>
6. <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-2-3-0012-15-opredelenie-belka/> (accessed 30 June 2020).

7. Zyuzina O.V., Shunyayeva O.B., Muratova Ye.I., Ivanov O.O. *Teoreticheskiye osnovy pishchevoy biotekhnologii: laboratornyye raboty* [Theoretical foundations of food biotechnology: laboratory work], Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006, 48 p. (In Russ.)

8. *GOST 11960–79. Polufabrikaty voloknistyye i syr'ye iz odnoletnikh rasteniy dlya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. Metod opredeleniya ligina* [GOST 11960–79. Semi-finished fibrous products and raw materials from annual plants for pulp and paper production. Method for the determination of lignin], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1980, 5 p. (In Russ.)

9. *GOST R 55293–2012 Fermentnyye preparaty dlya pishchevoy promyshlennosti. Metod opredeleniya tsellyulaznoy aktivnosti* [GOST R 55293–2012 Enzyme preparations for the food industry. Method for determination of cellulase activity], Moscow: Standartinform, 2014, 7 p. (In Russ.)

10. Ivanov O.O., Pronin V.A., Ryabova Ye.A. [Management of segregated flows of bulk materials for their processing by separation and connection methods], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 397–410, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410 (In Russ., abstract in Eng.)

Kinetische Regelmäßigkeiten der Biokonversion von Cellulose-haltigen Rohstoffen unter Verwendung der Pilzkultur *Trichoderma viride*

Zusammenfassung: Es ist die Technologie der Festphasen-Biokonversion von Cellulose-haltigen Rohstoffen in einem Trommelapparat unter Verwendung der Kultur des Pilzes *Trichoderma viride* vorgeschlagen. Es ist die Untersuchung der Kinetik des Biokonversionsprozesses im statischen und dynamischen Modus der Organisation des Fermentationsprozesses durchgeführt. Es ist festgestellt, dass die Biokonversion im dynamischen Modus eine höhere Fermentationsintensität bietet, wobei eine Kultur mit hoher Aktivität erhalten wird, die es ermöglicht, die Dauer des Prozesses um mehr als 40 Stunden zu reduzieren.

Régularités cinétiques de la bioconversion de matières premières contenant de la cellulose à l'aide d'une culture de champignon *Trichoderma viride*

Résumé: Est proposée la technologie de la bioconversion en phase solide des matières premières contenant de la cellulose dans un appareil à tambour utilisant une culture de champignon *Trichoderma viride*. Est étudiée la cinétique du processus de la bioconversion dans les modes statiques et dynamiques de l'organisation du processus de fermentation. Est établi que la bioconversion en mode dynamique produit une intensité de fermentation plus élevée avec une culture à forte activité permettant de réduire la durée du processus de plus de 40 heures.

Авторы: *Долгунин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Слепых Анастасия Вячеславовна* – магистрант; *Пронин Василий Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.