

КИНЕТИКА И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТВЕРДОФАЗНОЙ БИОКОНВЕРСИИ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В. Н. Долгунин, Д. А. Власов, В. А. Пронин

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
dolgunin-vn@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: биоконверсия; статический и статико-динамический режим; твердофазное ферментирование; целлюлозосодержащее сырье.

Аннотация: Проведено исследование кинетики твердофазной биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме ферментирования. Исследовано влияние интенсивности перемешивания на кинетические закономерности процесса ферментирования с использованием микроскопического гриба *Trichoderma viride*. Определены параметры мягкого динамического воздействия на ферментативную среду, обеспечивающего наиболее высокую эффективность статико-динамического режима твердофазной биоконверсии.

Производства макро- и микроскопических грибов, а также их продуцентов для нужд различных отраслей промышленности, медицины, сельского хозяйства и агропромышленного комплекса испытывают острую потребность в твердофазных субстратах с регламентными показателями качества. Например, дефицит качественного субстрата для культивирования макроскопических грибов продовольственного назначения приводит к необходимости использования импортного сырья, что сопровождается трехкратным снижением рентабельности производства [1]. Основным препятствием для полного импортозамещения зарубежного субстрата является отсутствие технологической базы, необходимой для осуществления процессов ферментации дисперсной твердой фазы.

Это связано с тем, что различные отрасли промышленности, агропромышленного комплекса и сельского хозяйства связаны с переработкой растительного сырья, сопровождаемой образованием больших объемов целлюлозосодержащих отходов (отходов деревообработки и растениеводства, лузги масличных и крупяных культур, кукурузных кочерыжек и др.). Несмотря на то что такого рода отходы могут служить источником сырья для производства высококачественного биотехнологического субстрата, богатого углеводами и аминокислотами, значительная их часть утилизируется способами (сжиганием, формированием отвалов и т.д.), целесообразность которых не подтверждается ни экономическими ни экологическими критериями.

Такое положение сохраняется несмотря на то, что в большинстве случаев растительные отходы характеризуются богатым сырьевым потенциалом с разнообразным компонентным составом, включающим углеводы, белки, жиры, неорганические соли при обычно относительно большом содержании полисахаридов

в виде смеси целлюлозы (15 – 60 %), гемицеллюлозы (10 – 30 %) с примесью органического полимера – лигнина (5 – 30 %) [2]. Для конверсии подобного рода отходов в качественное сырье для биотехнологий первостепенное значение имеет перевод целлюлозосодержащих компонентов в легко усвояемую форму, организация которого традиционными способами (кислотного гидролиза и глубинного жидкофазного культивирования) сопряжена со значительными технологическими проблемами. Соответствующие производства характеризуются низкой рентабельностью вследствие недостаточно высокого выхода целевого продукта, значительной энергоемкости и больших объемов трудно утилизируемых отходов [1, 2].

Результаты исследований свидетельствуют, что значительную часть перечисленных недостатков возможно преодолеть при использовании твердофазной ферментации целлюлозосодержащего сырья, которая по сравнению с глубинной ферментацией характеризуется низким водопотреблением, высокими значениями удельной производительности и концентрации биопродукта, малыми энергозатратами и значительным снижением остроты проблемы утилизации отходов [3, 4]. Важным преимуществом твердофазной ферментации целлюлозосодержащего сырья является также возможность ее реализации с применением экономичных относительно простых и надежных конструкций биореакторов [3, 4].

В работах [5, 6] обоснована целесообразность организации твердофазного ферментирования целлюлозосодержащего сырья на основе отходов деревообрабатывающего производства в динамическом режиме с использованием целлюлолитических ферментов, являющихся продуктом метаболизма культуры микроскопического гриба *Trichoderma viride*. В результате исследований подтверждены преимущества ферментирования в динамическом режиме при мягком механическом воздействии на мицелий микроскопического гриба по сравнению со статическим ферментированием по комплексу основных показателей эффективности.

Динамический режим ферментирования реализован в аппарате с гладким вращающимся барабаном, особенностью которого является возможность выполнения функции универсальной единицы оборудования, адаптированной для организации процессов смешивания субстрата, его стерилизации, однородного распределения посевного материала, ферментирования и сушки белоксодержащего продукта [7, 8]. Целесообразность применения универсального оборудования в обсуждаемой технологии подтверждается абсолютным доминированием продолжительности операции ферментализации в общем технологическом цикле. Установлено, что объемное аэрирование и перемешивание ферментативной среды в мягком режиме в процессе биокаталитического гидролиза способствует его интенсификации при увеличении массы плодовых тел, однородности их распределения и снижению спорообразования по сравнению со статическим ферментированием.

Вместе с тем на фоне полной определенности сравнительных характеристик статического и динамического режимов полностью отсутствует понимание степени влияния интенсивности перемешивания на эффективность биоконверсии. Ответ на данный вопрос представляется чрезвычайно важным, поскольку, очевидно, существует некоторое предельное значение интенсивности перемешивания, с увеличением которой будет усиливаться негативный эффект механического воздействия на мицелий микроскопического гриба, приводящий к разрушению плодовых сред и доминированию спорообразования. Результаты исследования, представленные в работах [5, 6], отражают кинетические закономерности процесса биоконверсии в динамическом режиме ферментирования, для которого параметры механического воздействия на культуру определены исключительно интуитивным образом.

В рамках настоящей статьи представлены результаты экспериментального исследования, посвященного определению условий перемешивания ферментативной среды в биореакторе с вращающимся барабаном, при которых достигается предельная концентрация ростовых факторов, наиболее благоприятная для протекания ферментативного гидролиза целлюлозосодержащего сырья. Простейший анализ процесса перемешивания ферментативной среды во вращающемся барабане, организованного в эксперименте по биоконверсии [5, 6] в режиме мягкого механического воздействия, указывает на то, что относительное перемещение элементов среды происходило только на этапах периодического гравитационного обрушения засыпки материала. В условиях чрезвычайно малой скорости вращения барабана периоды между обрушениями оказываются продолжительными и измеряются многими десятками минут. С учетом же того, что при каждом обрушении перемешиванию подвергалась только ограниченная часть засыпки материала в барабане, то средняя продолжительность циклов перемешивания ферментативной среды составляла более половины суток. Изложенные особенности процесса перемешивания при биоконверсии среды, позволяют вполне обоснованно утверждать, что в рамках проведенного эксперимента [5, 6] ферментирование протекало в статико-динамическом режиме. Отсюда следует, что для характеристики технологических условий, благоприятных для организации процесса твердофазного ферментализа, необходимо внести определенность в продолжительность периодов между операциями перемешивания ферментативной среды.

Исследование кинетики процесса твердофазного ферментализа проведено с использованием субстрата, представляющего смесь опилок лиственных пород деревьев, пшеничных отрубей и солодового экстракта [5]. Ферментализ осуществляется под воздействием целлюлолитических ферментов, продуцируемых штаммом микроскопического гриба *Trichoderma viride*, который вводится в стерильный субстрат в виде водной 28,5%-й суспензии спор в количестве 10 % от его массы.

В целях формирования базы для сравнительных оценок вариантов организации процесса ферментализа в статико-динамическом режиме параллельно проведено исследование процесса в статическом режиме его организации. Во всех вариантах организации процесса ферментализа организуется при азрировании ферментативной среды при температуре 28...30 °С, влажности 60 – 75 % и рН 4,5...6,5 стерильным воздухом с относительной влажностью 96 – 98 %. Статикодинамический режим ферментализа реализован с использованием плоской модели барабанного аппарата диаметром 0,6 м с устройством для ввода аэрирующего воздуха по центру циркуляции в засыпке ферментативной среды [5].

В соответствии с результатами предыдущего исследования общая продолжительность процесса ферментализа для всех вариантов его организации принята равной 96 часам [5, 6]. В ходе эксперимента контролировались масса ферментативной среды с целью анализа интенсивности анаболизма культуры микроскопического гриба и визуальная оценка состояния среды и культуры для различных вариантов статико-динамического ферментирования. Кроме того осуществлялся отбор проб для определения содержания белка, легкоперевариваемых сахаров, целлюлозы, лигнина и ферментативной активности мицелиального гриба *Trichoderma viride*. Аналогичные исследования проводились параллельно и в процессе ферментирования в статическом режиме.

Статико-динамический режим ферментирования реализован при скоростях вращения барабана от 7×10^{-4} мин⁻¹ до $8,5 \times 10^{-3}$ мин⁻¹, что позволило варьировать продолжительностью периода между операциями перемешивания ферментативной среды от 24 до 2 часов. В дальнейшем приводятся результаты исследования кинетических закономерностей процесса ферментализа целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме при продолжительностях названного периода, равных 24, 12, 6, 3, и 2 часам.

Визуальная информация, касающаяся состояния ферментативной среды после трех суток биокатализа твердофазного субстрата, представлена на рис. 1 для всех вариантов организации процесса. Анализ приведенной информации позволяет сделать следующие выводы:

1) при ферментировании в статическом режиме на периферийных участках объема ферментативной среды наблюдаются чрезвычайно слабые признаки биоконверсии, а плодовые тела, формируемые в остальной части ферментативной среды, характеризуются небольшим объемом и на поверхности плодовых тел наблюдается ярко выраженное спорообразование (рис. 1, *a*);

2) при ферментировании в статико-динамическом режиме процесс ферментализации сопровождается образованием однородно распределенных в среде плодовых тел большого объема и протекает без заметного спорообразования на их поверхности (рис. 1, *б – e*);

3) наибольший объем плодовых тел наблюдается при ферментировании в статико-динамическом режиме, когда продолжительность периода между операциями перемешивания ферментативной среды составляет три часа (рис. 1, *д*).

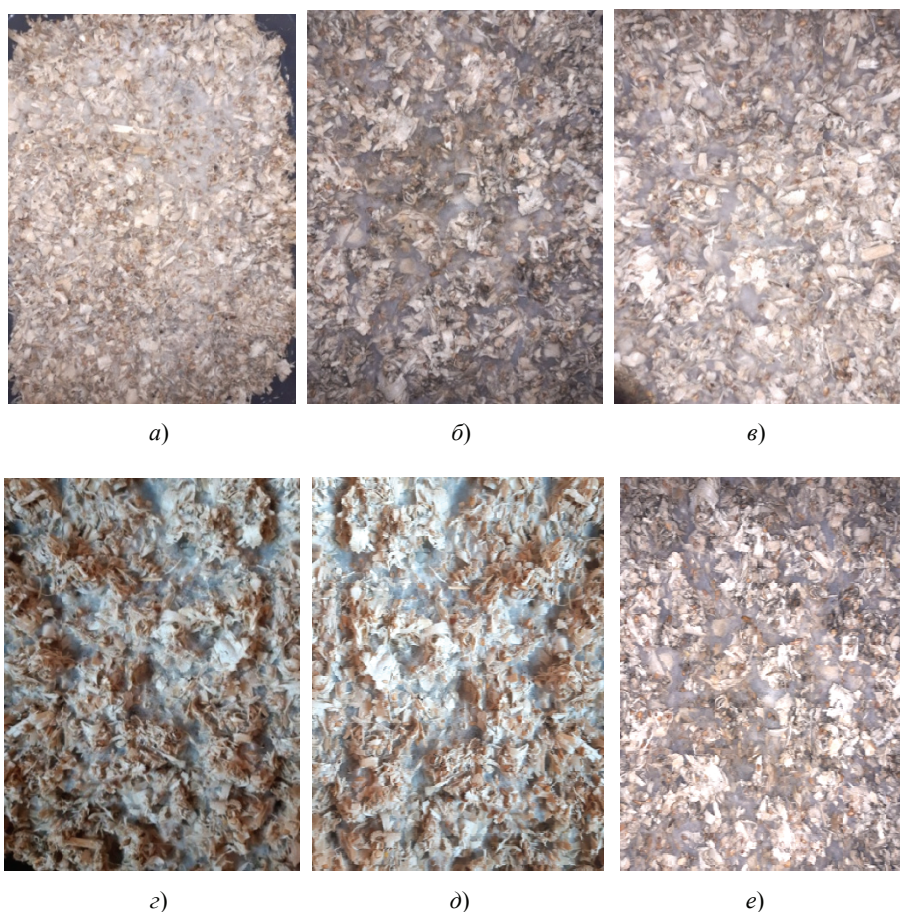


Рис. 1. Характерные фрагменты ферментативной среды после трех суток культивирования микроскопического гриба *Trichoderma viride* на твердом целлюлозосодержащем субстрате в статическом (*a*) и статико-динамическом (*б – e*) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч: *б* – 24; *в* – 12; *г* – 6; *д* – 3; *e* – 2

С целью качественной сравнительной оценки интенсивности анаболизма культуры микроскопического гриба *Trichoderma viride* для различных вариантов его культивирования приведены соответствующие зависимости относительной скорости прироста массы M ферментативной среды от времени τ (рис. 2). Результаты свидетельствуют о значительно более высокой интенсивности анаболизма культуры в режиме статико-динамического ферментирования и ее увеличении с уменьшением периода между операциями перемешивания. Однако при величине периода менее чем 3 часа эффект повышения относительной скорости прироста массы ферментативной среды с увеличением интенсивности перемешивания исчезает, что свидетельствует о снижении концентрации ростовых факторов вследствие деструктивного воздействия на мицелий гриба. Данный вывод согласуется с результатами визуального контроля (см. рис. 1).

Более определенное суждение в отношении анаболизма культуры можно сделать, основываясь на результатах исследования кинетики роста биомассы, представленных на рис. 3 в виде кривых изменения концентрации протеина

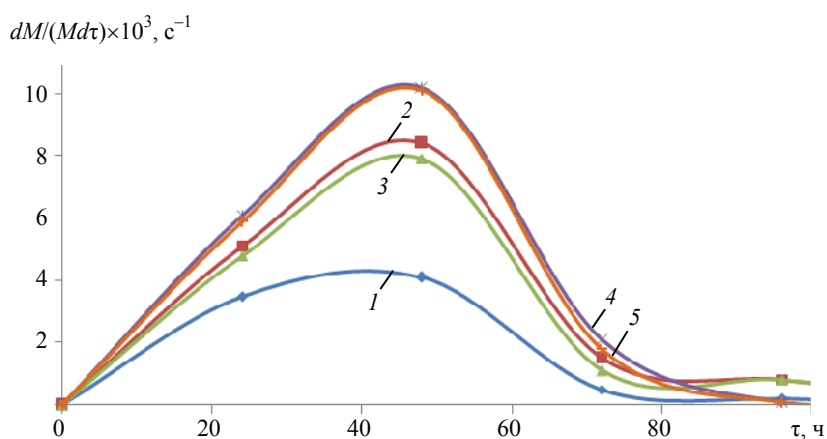


Рис. 2. Относительная скорость прироста массы ферментативной среды в процессах ферментирования в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч:
2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

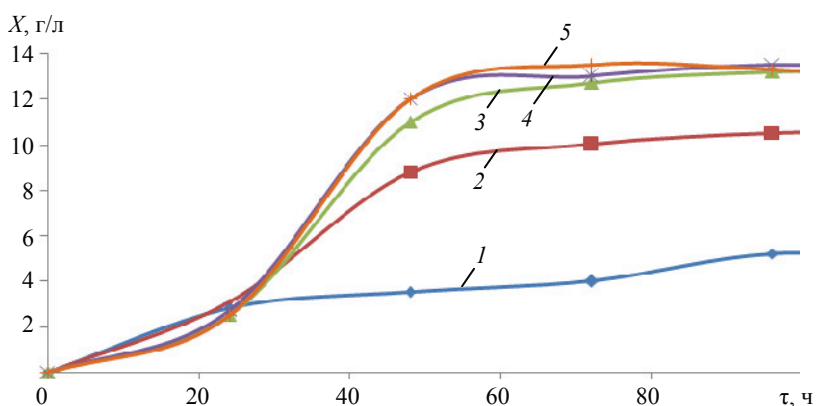


Рис. 3. Изменение концентрации белка в процессе ферментализации в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч:
2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

для вариантов ферментирования в статическом и статико-динамическом режимах. Концентрация протеина определялась колориметрическим методом с применением биуретового реактива [9].

Приведенные зависимости свидетельствуют о принципиальном различии динамики анаболизма на начальном этапе (первые двое суток) ферментализации в статическом и статико-динамическом режимах его организации. В этом периоде в статическом режиме ферментализации наблюдается относительно умеренное увеличение концентрации белка с интенсивностью, близкой линейному закону. В то же время в статико-динамическом режиме ферментализации наблюдается «лавинообразное» возрастание концентрации протеина с интенсивностью, соответствующей экспоненциальному закону. В результате, при ферментализации в статико-динамическом режиме с периодом перемешивания 12 часов концентрация белка через двое суток культивирования более чем в 2 раза превышает его концентрацию для статического режима, а при ферментализации с периодом перемешивания 6 и менее часов такое превышение достигает 3 – 3,5 раз (см. рис. 3).

Сделанные ранее выводы в отношении снижения концентрации ростовых факторов с уменьшением периода между операциями перемешивания среды менее трех часов (см. рис. 1 и 2) особенно ярко подтверждаются при интерпретации результатов исследования по содержанию белка в виде удельной скорости приращения его концентрации. Результаты, представленные на рис. 4, свидетельствуют о наиболее высоких значениях удельной скорости наращивания белковой массы и максимальной концентрации ростовых факторов в течение всего цикла ферментализации при трехчасовых периодах между операциями перемешивания среды.

Интенсификация ферментации в статико-динамическом режиме достигается за счет активного обновления и более развитой поверхности межфазного контакта и 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 кинетики биоконверсии целлюлозы для вариантов статического и статико-динамического твердофазного ферментализации целлюлозо-содержащего субстрата свидетельствуют о том, что на всех этапах процесса скорость биоконверсии целлюлозы в статико-динамических режимах выше скорости процесса, организованного в статическом режиме (рис. 5). Вследствие более

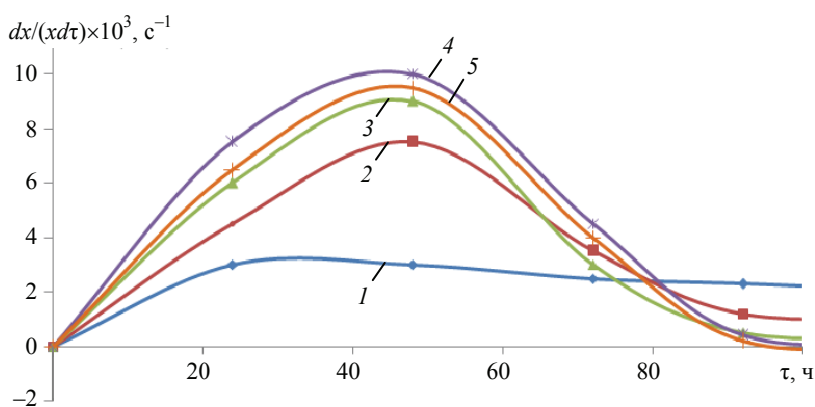


Рис. 4. Относительная скорость увеличения концентрации белка в процессе ферментализации в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч:

2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

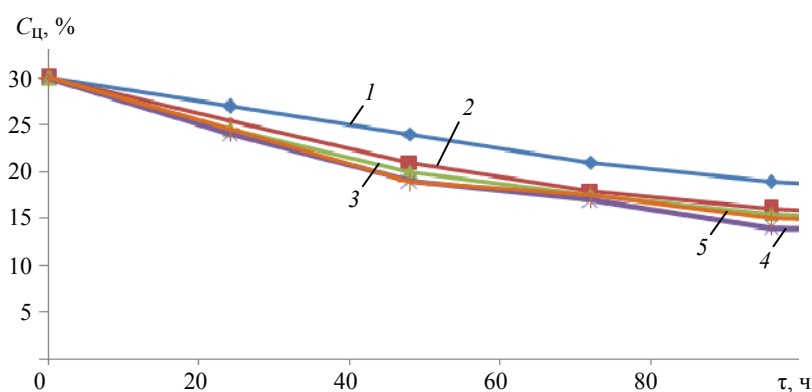


Рис. 5. Кинетика биоконверсии целлюлозы в процессе ферментализации в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч:
2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

высокого темпа биокатализа клетчатки в статико-динамическом режиме ферментализации через двое суток достигается эффект конверсии, превышающий таковой для случая четырех суток ферментирования в статическом режиме. Интенсификация ферментализации клетчатки в статико-динамическом режиме обеспечивается за счет формирования условий для жизнедеятельности активной культуры при интенсивном обновлении высоко развитой поверхности межфазного контакта и интенсификации теплообменных процессов в объеме ферментативной среды. Исследование показывает, что наряду с ферментализацией целлюлозы биоконверсия подвергается и ее особая форма – лигнин. Кинетика биоконверсии лигнина в процессах твердофазного ферментализации целлюлозосодержащего субстрата представлена на рис. 6 для вариантов организации процесса в статическом и статико-динамическом режимах. Концентрация лигнина определена методом, разработанным Всесоюзным научно-производственным объединением целлюлозно-бумажной промышленности, с применением 72%-й серной кислоты [10]. Кинетические кривые свидетельствуют о том, что количество остаточного лигнина в твердофазном целлюлозосодержащем субстрате более интенсивно снижается при ферментализации в статико-динамическом режиме на всех этапах процесса (рис. 6). Результаты исследования динамики изменения остаточных концентраций целлюлозы и лигнина в процессе ферментализации целлюлозосодержащего субстрата (см. рис. 5 и 6) являются прямым подтверждением целесообразности осуществления процесса биоконверсии растительных полисахаридов с использованием культуры микроскопического гриба *Trichoderma viride* в статико-динамическом режиме. Согласно полученным результатам процесс ферментализации следует проводить в условиях мягкого механического воздействия на ферментативную среду при ее перемешивании с частотой, не превышающей $0,33 \text{ ч}^{-1}$. Для обеспечения такого рода условий при ферментализации целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме целесообразно использовать аппарат с гладким вращающимся барабаном, позволяющий организовать циклическое перемешивание ферментативной среды при периодическом гравитационном обрушении откосов материала.

Таким образом, в результате исследования кинетических закономерностей твердофазного ферментализации целлюлозосодержащего сырья с использованием микроскопического гриба *Trichoderma viride* в режимах статического и статико-динамического культивирования определены благоприятные условия для жизнедеятельности активной культуры. Условия обеспечивают максимальную концентрацию ростовых факторов в ферментативной среде за счет ее периодического перемешивания

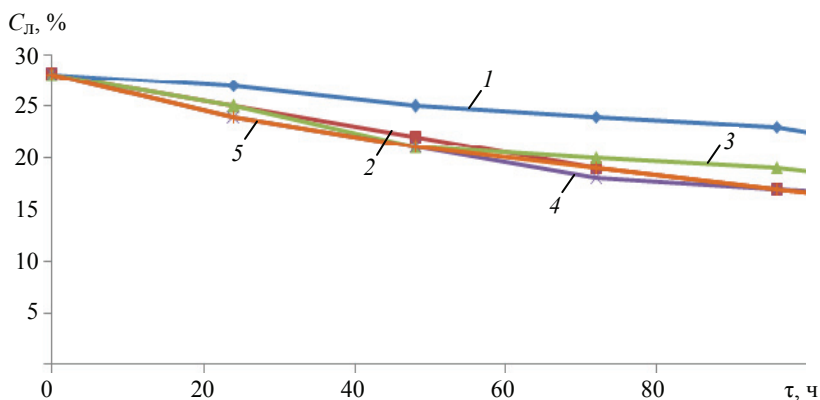


Рис. 6. Кинетика биоконверсии лигнина в процессе ферментации в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч: 2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

при мягком механическом воздействии с частотой $0,33 \text{ ч}^{-1}$. Ферментация целлюлозосодержащего субстрата в статико-динамическом режиме протекает при минимальном спорообразовании с формированием больших плодовых тел при их однородном распределении в объеме ферментативной среды. Повышенная активность культуры в условиях статико-динамического режима ее культивирования обеспечивает интенсивное наращивание в ферментируемой среде белковой массы, концентрация которой через двое суток ферментации до 3,5 раз выше концентрации, достигаемой при ферментации в статическом режиме. Высокая интенсивность биоконверсии целлюлозы и лигнина в статико-динамическом режиме ферментации позволяет в течение двух суток протекания процесса превзойти показатели конверсии, достигаемые в течение четырех суток ферментации в статическом режиме.

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: 05.04.2022).
2. Емцев, В. Т. Микробиология : учебник / В. Т. Емцев, Е. Н. Мишустин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2005. – 445 с.
3. Кулишов, Б. А. Применение технологии твердофазной ферментации в производстве биопродуктов / Б. А. Кулишов, Ле Ань Туан. – *Вестн. Казанского технол. ун-та*. – 2014. – Т. 17, № 23. – С. 258 – 261.
4. 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.
5. 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
6. Долгунин, В. Н. Кинетические закономерности биоконверсии целлюлозосодержащего сырья с использованием культуры гриба *Trichoderma viride* / В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 393 – 401. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.393-401

7. 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

8. Иванов, О. О. Технология подготовки зернового сырья для биоконверсии с повышенной экстрактивностью / О. О. Иванов, Е. А. Парфенова, В. Н. Долгунин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 656 – 664. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.656-664

9. ОФС.1.2.3.0012.15 Определение белка. Метод 5 (колориметрический метод с биуретовым реактивом). – Текст : электронный // Фармакопоя.рф. – URL : <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-2-3-0012-15-opredelenie-belka/> (дата обращения: 05.04.2022).

10. Определение лигнина : реферат. – Текст : электронный // Smekni.com. – М., 2006. – 3 с. – URL : <https://mirznanii.com/a/325212-2/opredelenie-lignina-2/> (дата обращения: 05.04.2022).

Kinetics and Hydrodynamic Conditions of Solid-Phase Bioconversion of Cellulose-Containing Raw Materials in Static-Dynamic Mode

V. N. Dolgunin, D. A. Vlasov, V. A. Pronin

*Department of Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries,
dolgunin-vn@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: bioconversion; static and static-dynamic mode; solid phase fermentation; cellulose raw materials.

Abstract: A study of the kinetics of solid-phase bioconversion of cellulose-containing raw materials in the static-dynamic mode of fermentation was made. The effect of mixing intensity on the kinetic patterns of the fermentation process using the microscopic fungus *Trichoderma viride* is studied. The parameters of a mild dynamic effect on the enzymatic medium, which ensures the highest efficiency of the static-dynamic mode of solid-phase bioconversion, are determined.

References

1. <https://www.agroinvestor.ru/rating/article/24141/> (accessed 5 April 2022).
2. Yemtsev V.T., Mishustin Ye.N. *Mikrobiologiya: uchebnik* [Microbiology: textbook], Moscow: Drofa, 2005, 445 p. (In Russ.)
3. Kulishov B.A., Le An' Tuan [Application of solid-phase fermentation technology in the production of bioproducts], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2014, vol. 17, no. 23, pp. 258-261. (In Russ.)
4. 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.)
5. 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.)

6. Dolgunin V.N., Slepikh A.V., Pronin V.A. [Kinetic patterns of bioconversion of cellulose-containing raw materials using the culture of the fungus *Trichoderma viride*], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 393-401, doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.393-401 (In Russ., abstract in Eng.)

7. 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.)

8. Ivanov O.O., Parfenova Ye.A., Dolgunin V.N. [Technology for the preparation of grain raw materials for bioconversion with increased extractivity], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 656-665, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.656-665 (In Russ., abstract in Eng.)

9. <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-2-3-0012-15-opredelenie-belka/> (accessed 5 April 2022).

10. <https://mirznanii.com/a/325212-2/opredelenie-lignina-2/> (accessed 5 April 2022).

Kinetik und hydrodynamische Bedingungen der Festphasen-Biokonversion von zellstoffhaltigen Rohstoffen im statisch-dynamischen Modus

Zusammenfassung: Es ist eine Untersuchung der Kinetik der Festphasen-Biokonversion von zellstoffhaltigen Rohstoffen im statisch-dynamischen Fermentationsmodus durchgeführt. Der Einfluss der Rührintensität auf die kinetischen Regelmäßigkeiten des Fermentationsprozesses unter Verwendung des mikroskopisch kleinen Pilzes *Trichoderma viride* ist untersucht. Es sind die Parameter einer milden dynamischen Wirkung auf das enzymatische Medium bestimmt, die die höchste Effizienz des statisch-dynamischen Modus der Festphasen-Biokonversion gewährleistet.

Cinétique et conditions hydrodynamiques de la bioconversion en phase solide de la matière première contenant de la cellulose en mode statique-dynamique

Résumé: Est réalisée une étude sur la cinétique de la bioconversion en phase solide de la matière première contenant de la cellulose dans le mode statique-dynamique de la fermentation. Est étudié l'effet de l'intensité du mélange sur la cinétique du processus de la fermentation avec l'utilisation du champignon microscopique *Trichoderma viride*. Sont définis les paramètres de l'effet dynamique doux sur le milieu enzymatique ce qui assure la plus grande efficacité du régime statique-dynamique de la bioconversion en phase solide.

Авторы: *Долгунин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Власов Денис Анатольевич* – студент; *Пронин Василий Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.