

Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 3. С. 179-189.  
Animal Husbandry and Fodder Production. 2023. Vol. 106, no 3. P. 179-189.

## КОРМОПРОИЗВОДСТВО И КОРМА

Научная статья

УДК 631.5/9:577.15.07

doi:10.33284/2658-3135-106-3-179

### Проектирование и эксплуатация биореактора для переработки отходов растениеводства

Елена Владимировна Шейда<sup>1,7</sup>, Галимжан Калиханович Дускаев<sup>2</sup>, Сергей Александрович Мирошников<sup>3</sup>, Иван Сергеевич Мирошников<sup>4</sup>, Дмитрий Александрович Проскурин<sup>5</sup>, Максим Владимирович Овечкин<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

<sup>7</sup>Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

<sup>1,7</sup>elena-shejjda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X>

<sup>2</sup>gduskaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9015-8367>

<sup>3</sup>fncbst@mail.ru, <https://orcid.org/orcid.org/0000-0003-1173-1952>

<sup>4</sup>sparco911@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0190-0612>

<sup>5</sup>dimitrpro@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7030-0912>

<sup>6</sup>maxov-1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6314-6822>

**Аннотация.** Проектирование и эксплуатации биореакторов содержат широкий набор инженерных теорий, методологий и инструментов, основанных на способности биологических систем преобразовывать различные субстраты в готовые продукты. В своей работе мы представляем основные этапы биотехнологии, влияющие на конструкцию биореактора, требования и элементы концепций проектирования и эксплуатации. Предлагаем основные принципы проектирования и конструкцию лабораторной модели ферментёра для утилизации отходов промышленных производств. Изучено влияние времени ферментации на активность метаболических процессов в рубцовом содержимом биореактора, а также степень разложения некоторых растительных субстратов (льняной и конопляный жмыхи). Длительность ферментации составила 20 суток. Установлено, что длительность процесса не оказывала значительное влияние на значения рН в ферментационной жидкости, и колебание значений было в пределах 6,9-7,1, при этом изменялся характер ферментации. Уровень летучих жирных кислот и метаболитов азота в содержимом ферментёра сохраняли высокие значения до 9 суток ферментации, затем была выявлена тенденция к снижению данных показателей. В ходе 9-суточной ферментации отмечено снижение количества сухого вещества на 51,7 % и других питательных компонентов в изучаемых субстратах, жира – на 88,1 %, клетчатки – на 30,5 %, сырого протеина – на 13,2 % и золы – на 66,7 % соответственно.

**Ключевые слова:** биореактор, моделирование, ферментация, микробный белок, ферментер, летучие жирные кислоты, формы азота, конопляный жмых

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-16-00088-П.

**Для цитирования:** Проектирование и эксплуатация биореактора для переработки отходов растениеводства / Е.В. Шейда, Г.К. Дускаев, С.А. Мирошников, И.С. Мирошников, Д.А. Проскурин, М.В. Овечкин // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, №. 3. С. 179-189. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-179>

## FODDER PRODUCTION AND FODDERS

Original article

**Design and operation of a bioreactor for processing plant waste****Elena V Sheida<sup>1,7</sup>, Galimzhan K Duskaev<sup>2</sup>, Sergey A Miroshnikov<sup>3</sup>, Ivan S Miroshnikov<sup>4</sup>, Dmitry A Proskurin<sup>5</sup>, Maxim V Ovechkin<sup>6</sup>**<sup>1,2,3,4,5,6</sup>Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia<sup>7</sup>Orenburg State University, Orenburg, Russia<sup>1,7</sup>elena-snejda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X><sup>2</sup>gduskaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9015-8367><sup>3</sup>fncbst@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1173-1952><sup>4</sup>sparco911@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0190-0612><sup>5</sup>dimitrpro@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7030-0912><sup>6</sup>maxov-1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6314-6822>

**Abstract.** The design and operation of bioreactors include a wide range of engineering theories, methodologies and tools based on the ability of biological systems to transform various substrates into finished products. In our work, we provide the main stages of biotechnology that affect the design of a bioreactor, requirements and elements of concepts for the design and operation of bioreactors. We offer the basic principles of design and construction of a laboratory model of a fermenter for the disposal of industrial waste. The effect of fermentation time on the activity of metabolic processes in the rumen content of the bioreactor, as well as the degree of decomposition of some plant substrates (flax and hemp cake), was studied. The duration of fermentation was 20 days. It was found that the duration of the process had no significant effect on the pH values in the fermentation fluid and the fluctuation of values was in the range of 6.9-7.1, while the nature of fermentation changed. The level of volatile fatty acids and nitrogen metabolites in the contents of the fermenter maintained high values up to 9 days of fermentation, then a downward trend in these indicators was revealed. During the 9-day fermentation, there was a decrease in the amount of dry matter by 51.7% and other nutritional components in the studied substrates, fat by 88.1%, fiber by 30.5%, crude protein by 13.2% and ash by 66.7%, respectively.

**Keywords:** bioreactor, modeling, fermentation, microbial protein, fermenter, volatile fatty acids, nitrogen forms, hemp cake

**Acknowledgments:** the work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 20-16-00088-P.

**For citation:** Sheida EV, Duskaev GK, Miroshnikov SA, Miroshnikov IS, Proskurin DA, Ovechkin MV. Design and operation of a bioreactor for processing plant waste. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(3):179-189. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-179>

**Введение.**

Мировое потребление белков из животных источников, таких как рыба, мясо, яйца и молоко, в последние годы растёт и, как ожидается, продолжит расти в ближайшем будущем (OECD-FAO, 2018). По сути, животноводство можно рассматривать как процесс создания продуктов с высоким спросом и ценой из дешёвых источников белка. Недостатком является то, что на земле не хватает пахотных земель для производства сои (OECD-FAO, 2018) и мелкой рыбы для устойчивого производства рыбной муки (Olsen RL and Hasan MR, 2012). Если поступление белка из источников животного происхождения будет идти в ногу с имеющимся спросом, необходимо изучить альтернативные сырьевые источники кормового белка. Одной из потенциальных альтернатив является использование дешёвых источников углерода, таких как метан, для получения богатого белком продукта из биомассы быстрорастущих метанотрофных бактерий (Villadsen J et al., 2011, Petersen LAN et al., 2019). Хотя этот процесс, известный в литературе под названием производство одноклеточного или микробного белка, многообещающий, он также представляет немало проблем с химической и инженерной точек зрения (Villadsen J et al., 2011). Требования процесса к теплопередаче и массообмену газа/жидкости не могут быть выполнены в обычных сосудах, используемых в биотехнологической промышленности, а кинетика реакции чрезвычайно сложна из-за природы микроорганизмов (Lieven C et al., 2018). Нетрадиционный реактор, ферментёр с U-образным контуром (Larsen EB, 2002), показал большие перспективы в преодолении ограничений массообмена и теплопередачи (Petersen LAN et al., 2017), и более глубокое понимание кинетики реакции было получено благодаря публикациям подробного исследования имитации метаболических процессов (Petersen LAN et al., 2017). По мере углубления понимания фундаментальных процессов и систем становится всё более актуальным изучение проблемы: как избежать нежелательной динамики процесса при постоянном поддержании благоприятных условий (Bequette BW, 1998; Bequette BW, 2003).

Ферментёры непрерывного действия – это лабораторное оборудование, разработанное с целью моделирования условий в рубце для изучения метаболизма в нём. Они вырабатывают ферментирующую жидкость, начиная с исходной рубцовой жидкости, полученной из рубца жвачных, и путём непрерывного притока искусственной слюны, выделения продуктов ферментации и постоянного поступления питательных веществ (субстратов).

Новизна нашего исследования заключается в установлении степени разлагаемости протеина, жира и белка растительного субстрата в результате непрерывной ферментации в течение 20 суток.

#### **Цель исследования.**

Изучение процессов ферментации в биореакторе, разработанного для утилизации отходов пищевых производств с учётом временного фактора.

#### **Материалы и методы исследования.**

**Объект исследования.** Растительные отходы масложировой промышленности – конопляный жмых, ферментированная рубцовая жидкость.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов (1987 г.; Приказ Минздрава СССР № 755 от 12.08 1977 «О мерах по дальнейшему совершенствованию организационных форм работы с использованием экспериментальных животных») и «Guide for the Care and Use of Laboratory Animals» (National Academy Press, Washington, D.C., 1996). При проведении исследований были предприняты меры, чтобы свести к минимуму страдания животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

**Схема эксперимента.** Авторским коллективом была разработана конструкция биореактора. Ферментацию осуществляли в течение 20 суток непрерывной ферментации без дополнительного включения субстрата.

Ферментёр заполняли на 80 % от объёма ёмкости ( $V=100$  л), причём 2/3 этого объёма загружали опытными образцами растительных субстратов. Ферментация в биореакторе была проведена на растительном субстрате (отходы масложировой промышленности) – конопляный жмых. Образцы жмыха высушивали ( $+60$  °С) до константного веса. Анализировали химический состав до и после ферментации.

Жидкую часть ферментёра представляла рубцовая жидкость, полученная от бычков с хронической фистулой рубца ( $n=4$ ), возраст – 15 месяцев, породы казахская белоголовая. Рацион кормления подопытных животных был организован с учётом рекомендаций (Калашников А.П. и др., 2003) и включал: сено разнотравное – 47,4 %, сено бобовое – 32,6 %, зерновая смесь – 19 %, минеральный премикс – 1,0 %. В рационе содержится: сухое вещество – 94,7 %, сырой протеин – 5,9 %, сырая клетчатка – 28 %, НДК – 6,3 %, КДК – 4,6 %, гемицеллюлоза – 1,65 %, сырой жир – 2,73 %, органическое вещество – 93,4 %, Са – 0,51 %, Р – 0,37 %. Корм задавался два раза в день, животные имели свободный доступ к питьевой воде.

Рубцовую жидкость у фистульных животных получали через 3 часа после кормления. Транспортировку осуществляли в термосе в течение 30 минут с поддержанием температуры  $+38,5$ – $+39,0$  °С. Фильтровали через 4 слоя марли и смешивали с буферным раствором солей (имитирующим слюну) в соотношении 1:4. Буферный раствор по химическому составу представляет слюну, поддерживает рН ферментёра близкую к физиологической. Состав буфера включал следующие реактивы:  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , мочевины. Перед смешиванием буферный раствор подогревали до  $+39$  °С и насыщали  $\text{CO}_2$  (нагнетали углекислоту через специальное отверстие до закрытия специального клапана).

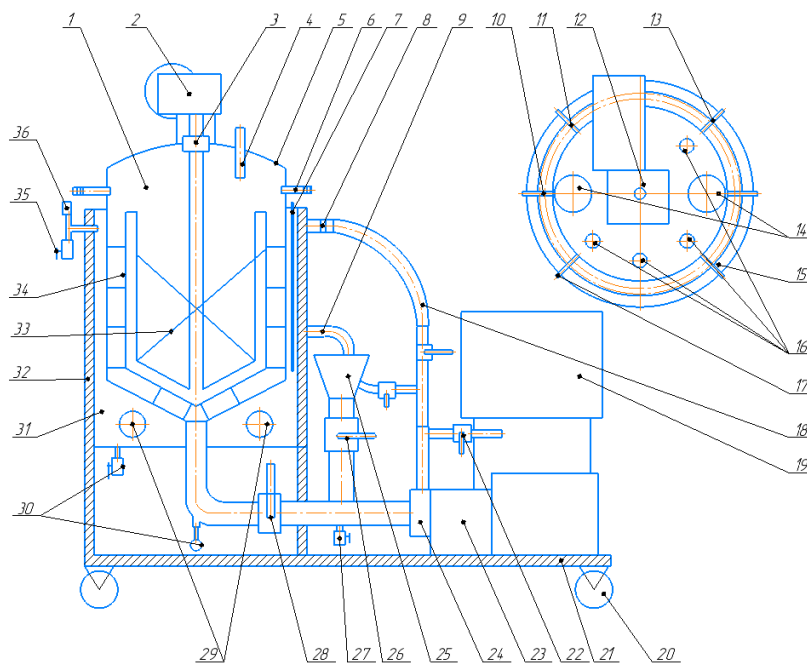
Рубцовое содержимое ферментёра отбирали на 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 20 сутки инкубации, отцеживали через 4 слоя марли и немедленно отправляли в лабораторию для определения уровня летучих жирных кислот (ЛЖК) и форм азота. Уровень ЛЖК в содержимом рубца определяли методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием на хроматографе газовом «Кристаллюкс-4000М». Определение форм азота производили по ГОСТ 26889-86.

Для определения химического состава испытуемого субстрата длительность ферментации составляла 9 дней. Данный анализ осуществлялся по общепринятым методикам и ГОСТам. Определяли массовую долю сухого вещества (ГОСТ 31640-2012), сырого протеина (ГОСТ 13496.4-2019), массовую долю сырого жира (ГОСТ 13496.15-2016), массовую долю сырой клетчатки (ГОСТ 31675-2012), массовую долю сырой золы (ГОСТ 26226-95).

**Оборудование и технические средства.** Исследования выполнены в ЦКП БСТ РАН <http://цкп-бст.рф>. Хроматограф газовый «Кристаллюкс-4000М» (СКБ Хроматек, Россия), автоматический экстрактор жира SER 148/6 (VELP Scientifica, Италия), автоматический анализатор

FIWE 6 (предназначен для определения сырой клетчатки; VELP Scientifica, Италия), комплект оборудования для определения белка/азота по Кьельдалю (Millab, Италия).

Авторским коллективом совместно с ООО «Основа» (г. Москва) была разработана конструкция биореактора, представленная на рисунке 1.



**Примечание:** 1 – цилиндрическая рабочая ёмкость; 2 – привод мешалки; 3 – герметичная муфта вала мешалки; 4 – моющая головка; 5 – съёмная крышка; 6 – ниппель для подачи газа; 7 – датчик температуры воды в рубашке; 8 – верхний тангенциальный гомогенизирующий ввод в ёмкость; 9 – нижний тангенциальный ввод в ёмкость; 10 – ниппель с манометром; 11 – запасной ниппель; 12 – верхняя часть привода мешалки; 13 – ниппель для подачи пара; 14 – диоптры; 15 – запасной ниппель; 16 – ниппели для установки датчиков pH; 17 – ниппель для подачи пара; 18 – гибкий трубопровод; 19 – щит управления; 20 – ролики для перемещения; 21 – рама; 22 – разгрузочный штуцер с краном; 23 – насос-гомогенизатор; 24 – соединительный штуцер; 25 – тройник с загрузочной воронкой; 26 – кран для слива продуктов; 27 – кран для слива остатков продукта и промывных растворов; 28 – кран для регулировки потока продукта; 29 – ТЭНы; 30 – ниппели с кранами; 31 – водяная рубашка; 32 – теплоизоляция; 33 – наклонные серповидные лопасти; 34 – плавающие скребки из фторопласта; 35 – тройник с краном для контроля уровня заполнения рубашки; 36 – дыхательный клапан.

**Note:** 1 – cylindrical working tank; 2 – agitator drive; 3 – sealed coupling of the agitator shaft; 4 – washing head; 5 – removable lid; 6 – nipple for gas supply; 7 – water temperature sensor in the jacket; 8 – upper tangential homogenizing inlet into the tank; 9 – lower tangential inlet into capacity; 10 – nipple with pressure gauge; 11 – spare nipple; 12 – upper part of the agitator drive; 13 – nipple for steam supply; 14 – diopters; 15 – spare nipple; 16 – nipples for installing pH sensors; 17 – nipple for steam supply; 18 – flexible pipeline; 19 – control panel; 20 – rollers for moving; 21 – frame; 22 – discharge fitting with a crane; 23 – homogenizer pump; 24 – connecting fitting; 25 – tee with a loading funnel; 26 – faucet for draining products; 27 – faucet for draining product residues and washing solutions; 28 – faucet for adjusting product flow; 29 – heating elements; 30 – nipples with taps; 31 – water jacket; 32 – thermal insulation; 33 – inclined crescent-shaped blades; 34 – floating scrapers made of fluoroplast; 35 – tee with a tap to control the filling level of the shirt; 36 – exhaust valve.

**Рис. 1 – Схема-конструкция биореактора (ферментёра)**

**Figure 1 – Diagram-design of a bioreactor (fermenter)**

Установка состоит из реактора, который представляет собой цилиндрическую ёмкость (1) рабочим объёмом 50 л с конусным дном и нижним выпуском ДУ50. Внутри ёмкости расположена рамная мешалка с плавающими скребками из фторопласта (34) и наклонными серповидными лопастями (33). Такая мешалка позволяет эффективно перемешивать как густые, так и жидкие продукты, и уменьшает конус на поверхности жидкости при перемешивании. В верхней части ёмкости установлена герметичная съёмная крышка (5), на быстросъёмных откидных зажимах (на схеме не показаны). На крышке установлены:

- герметичное уплотнение вала мешалки (3);
- два разборных диоптра (14) (ДУ 73 мм) (показаны только на крышке для упрощения);
- привод мешалки (2) (мотор-редуктор NMRV050 со шпоночным валом);
- моющая головка (4);
- три ниппеля (16) (ДУ25, нар. резьба 1", длина 70 мм для установки датчиков PH).

**Статистическая обработка.** Численные данные были обработаны с помощью программы SPSS «Statistics 20» («IBM», США), рассчитывали средние (M), среднеквадратичные отклонения ( $\pm\sigma$ ), ошибки стандартного отклонения ( $\pm SE$ ). Для сравнения вариантов использовали непараметрический метод анализа. Различия считали статистически значимыми при  $P \leq 0,05$ ,  $P \leq 0,01$ .

#### Результаты исследования.

Перед загрузкой в биореактор был проведён химический анализ испытуемого образца конопляного жмыха (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав конопляного жмыха, %  
Table 1. Chemical composition of hemp cake, %

Наименование показателей / Name of indicators	Жмых конопляный / Hemp cake
Массовая доля сухого вещества/ Mass fraction of dry matter	93,6
Массовая доля жира/ Mass fraction of fat	12,6
Массовая доля сырой клетчатки/ Mass fraction of crude fiber	35,4
Массовая доля сырого белка/ Mass fraction of crude protein	28,3
Массовая доля сырой золы/ Mass fraction of crude ash	4,8

Ферментацию растительного субстрата осуществляли непрерывно в течение 20 суток (без дополнительного введения), однако было установлено, что активность рубцовых метаболитов нарастала и сохранялась до 9 суток инкубации, далее происходило угнетение данных показателей к снижению до значений ниже, чем до загрузки в ферментёр к 20 суткам эксперимента (рис. 2, 3).

На первые сутки исследования данные по содержанию различных форм азота и концентрации ЛЖК представлены в контрольном образце рубцовой жидкости, смешанной с буфером, перед загрузкой в ферментёр. На 3 сутки эксперимента отмечено что уровень общего азота увеличился относительно нулевой точки на 4,2 %, на 5 сутки – на 51,8 % ( $P \leq 0,05$ ), на 7 – на 102,1 % ( $P \leq 0,05$ ). Такая же тенденция была выявлена и в отношении белкового и небелкового азота.

Спустя 9 суток ферментации конопляного жмыха общий азот увеличился на 107,1 % ( $P \leq 0,05$ ), белковый – на 113,1 % ( $P \leq 0,05$ ) и небелковый – на 266,5 % ( $P \leq 0,01$ ).

Концентрация ЛЖК в рубцовом содержимом свидетельствует об активности рубцовой микробиоты. Начиная со 2 суток эксперимента, отмечено постепенное нарастание концентрации ЛЖК к 9 суткам ферментации, на данном этапе исследования отмечено увеличение содержания уксусной, пропионовой и масляной кислот в 2,9 ( $P \leq 0,05$ ), 5,7 ( $P \leq 0,01$ ) и 4 раз ( $P \leq 0,05$ ) относительно 1 суток эксперимента.

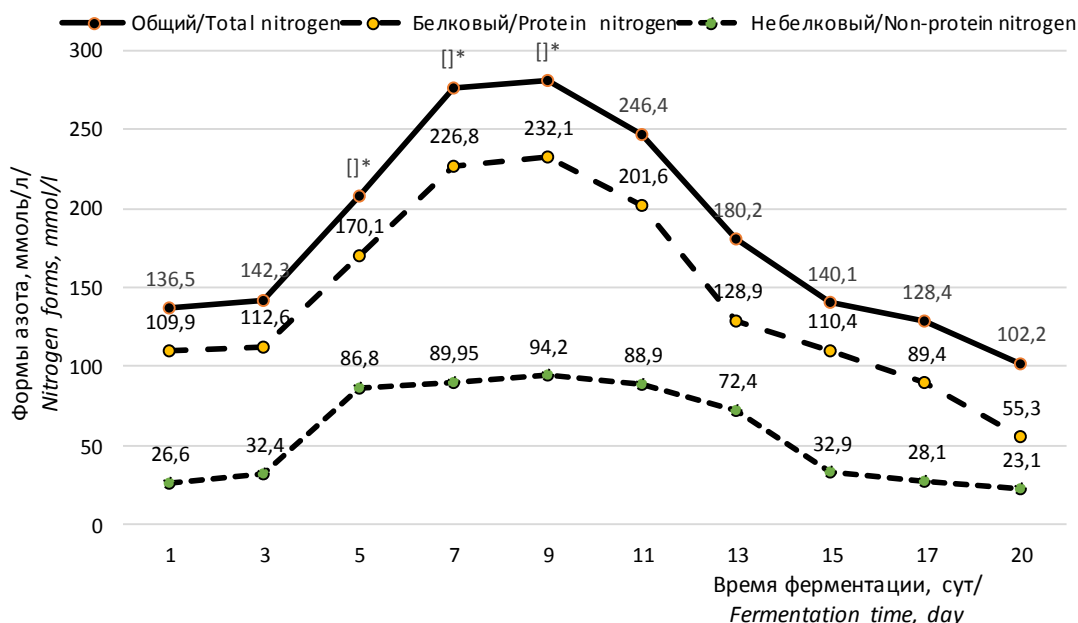


Рис. 2 – Концентрация форм азота в рубцовом содержимом при ферментации конопляного жмыха, ммоль/л

Figure 2 – Concentration of nitrogen forms in the rumen content during fermentation of hemp cake, mmol/l

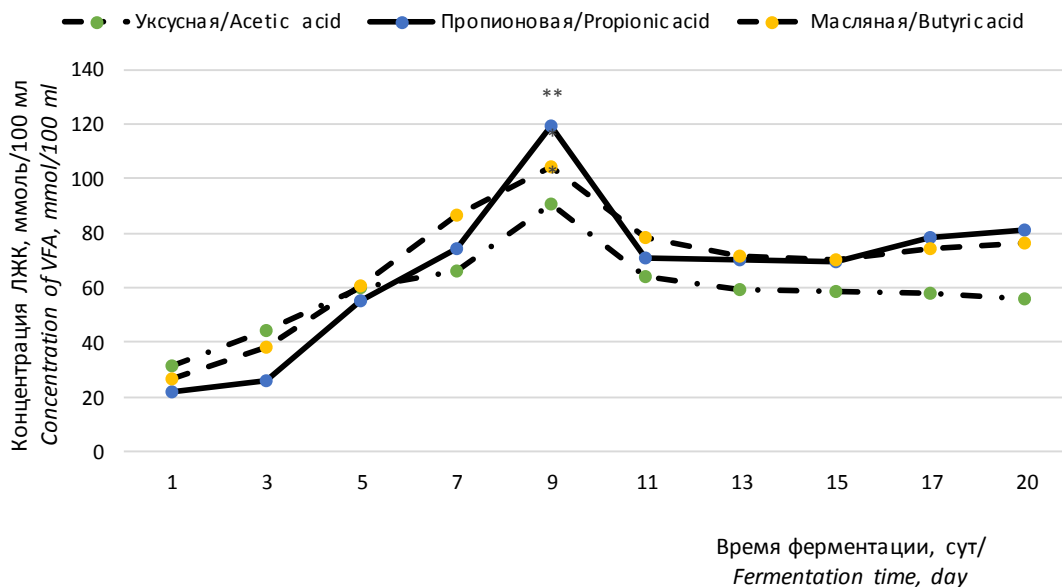


Рис. 3 – Концентрация ЛЖК в рубцовом содержимом при ферментации конопляного жмыха, ммоль/100мл

Figure 3 – The concentration of VFA in the rumen content during fermentation of hemp cake, mmol/100ml

В опытном образце после разложения в ферментёре массовая доля сухого вещества уменьшилась с 93,6 % до 41,9 %. В пересчёте на сухое вещество в конопляном жмыхе после 9-суточной ферментации уменьшилось содержание жира на 88,1 %, клетчатки – на 30,5 %, сырого протеина – на 13,2 % и золы – на 66,7 % (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав конопляного жмыха после ферментации, %  
Table 2. Chemical composition of hemp cake after fermentation, %

Наименование показателей / Name of indicators	Жмых конопляный / Hemp cake
Массовая доля сухого вещества/ Mass fraction of dry matter	41,9
Массовая доля жира/ Mass fraction of fat	3,4
Массовая доля сырой клетчатки/ Mass fraction of crude fiber	55,0
Массовая доля сырого белка/ Mass fraction of crude protein	55,0
Массовая доля сырой золы/ Mass fraction of crude ash	3,6

Следует отметить, что уровень pH в течение всего периода ферментации был в пределах 6,9-7,1. Длительность ферментации на данный показатель существенного влияния не оказывал.

#### Обсуждение полученных результатов.

Многими исследователями предпринимались различные попытки разработать системы непрерывной ферментации, имитирующие ферментацию в рубце, и оценить количество продуктов ферментации, которые выходят из рубца в качестве питательных веществ для животных. Системы варьируются от очень простых аппаратов с периодической подачей до более сложных систем непрерывного действия, в которых скорости оборота жидкости и твёрдых веществ могут устанавливаться независимо, а конечные продукты удаляются путём фильтрации или диализа содержимого ферментёра (Muetzel S et al., 2009).

Одной из основных проблем, связанных с системами *in vitro*, является поддержание активности микробиома ферментативного содержимого, а также создание благоприятных условий для разложения питательных веществ и выведения субстрата (Deitmers JH et al., 2022; Arowolo MA et al., 2022).

Предложенная в данном исследовании модель ферментёра имеет достаточно прочную ёмкость, чтобы выдерживать давление большого объёма перемешиваемой среды. Материалы, из которых изготовлены ёмкость и другие части ферментёра (выходы, трубки, мешалка, крышка) устойчивы к коррозии и не токсичны для внутреннего содержимого. Это включает в себя тщательный дизайн каждого аспекта деталей сосуда и других отверстий, соприкасающихся аксессуаров и т. д. Все элементы конструкции и пуско-запорная арматура, контактирующая с продуктом, – сталь AISI304.

Также нами предусмотрены меры для борьбы с загрязняющими организмами для быстрого введения стерильного воздуха в среду таким образом, чтобы кислород воздуха растворялся в среде и, следовательно, был легко доступен для микроорганизмов, а CO<sub>2</sub>, образующийся в результате микробного метаболизма, удалялся из среды.

Для поддержания определённого температурного режима (+39,0...+ 39,5 °C) состав установки входит щит управления, который выполняет следующие функции:

- поддержание в реакторе заданной температуры путём нагрева воды в рубашке реактора ТЭНами;
- управление ТЭНами в автоматическом или ручном режимах;
- отключение питания ТЭНов при недостаточном уровне воды в рубашке по сигналу датчика уровня;
- ручной пуск и остановка приводов мешалки (10-40 об./мин) и насоса-гомогенизатора (1000-3000 об./мин.);

- плавный пуск и остановка приводов мешалки и насоса-гомогенизатора, регулировка числа оборотов мешалки и насоса-гомогенизатора.

Конструкция ферментёра отвечает поставленным перед ним эксплуатационным требованиям, благодаря простоте конструкции из имеющихся в продаже компонентов, надёжности в эксплуатации, возможности автоматизации подачи и простоте получения пробы содержимого ферментёра.

Параметры ферментации (образование летучих жирных кислот и метаболитов азота, перевариваемость питательных компонентов ферментируемых субстратов и процентное содержание сухих веществ в ферментёре) находятся в пределах нормы для показателей ферментации в рубце (Hungate RE, 1966; Clarke RTJ et al., 1982; Teather RM et al., 1984).

Очевидно, что система искусственной ферментации не может полностью имитировать ферментацию в рубце *in vivo* во всех её аспектах, таких как высокое содержание СВ в рубце или селективное удаление конечных продуктов ферментации (Muetzel S et al., 2009). Кроме того, могут существовать взаимодействия животного-хозяина и микроба, которые ещё не были обнаружены и не изучены до конца, что является дальнейшим предметом нашего исследования.

#### **Заключение.**

Разработанная модель биореактора (ферментёра) позволит проводить исследования ферментации в масштабе, близком к производственному, но без слишком больших затрат на среду, рабочую силу, энергозатраты и т. д. В ходе проведённого испытания получен положительный результат использования разработанной модели ферментёра для разложения растительных отходов пищевых производств с целью получения более доступного кормового сырья для производства кормовых добавок для сельскохозяйственных животных и птицы.

#### **Список источников**

1. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. пособие / под ред. А.П. Калашникова, В.И. Фисинина, В.В. Щеглова, Н.И. Клейменова. 3-е изд., доп. и перераб. М., 2003. 456 с. [Kalashnikov AP, Fisinin VI, Shheglov VV, Klejmenov NI. Normy i raciony kormlenija sel'skohozejstvennyh zhivotnyh: spravocnoe posobie. 3-e izd., dop. i pererab. Moscow; 2003:456 p. (*In Russ.*)].
2. Arowolo MA, Zhang XM, Wang M, Wang R, Wen JN, Hao LZ, He JH, Shen WJ, Ma ZY, Tan ZL. Proper motility enhances rumen fermentation and microbial protein synthesis with decreased saturation of dissolved gases in rumen simulation technique. *Journal of Dairy Science*. 2022;105(1):231-241. doi: 10.3168/jds.2021-20165
3. Bequette BW. *Process Control: Modeling, Design and Simulation*, Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, Prentice Hall PTR; 2003:769 p.
4. Bequette BW. *Process Dynamics: Modeling, Analysis and Simulation*, Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, Prentice Hall PTR 1998:621 p.
5. Clarke RTJ, Ulyatt MJ, John A. Variations in numbers and mass of ciliate protozoa in the rumens of sheep fed chaffed alfalfa (*Medicago sativa*). *Appl Environ Microbiol*. 1982;43(5):1201-1204. doi: <https://doi.org/10.1128/aem.43.5.1201-1204.1982>
6. Deitmiers JH, Gresner N, Südekum KH. Opportunities and limitations of a standardisation of the rumen simulation technique (RUSITEC) for analyses of ruminal nutrient degradation and fermentation and on microbial community characteristics. *Animal Feed Science and Technology*. 2022;289:115325. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2022.115325
7. Hungate RE. *The rumen and its microbes*. Academic Press INC: New York and London; 1966:533 p.
8. Larsen EB, inventor. U-shape and/or nozzle-u-loop fermentor and method of carrying out a fermentation process. United States patent US 6492135. 2002 Dec 10.



9. Lieven C, Herrgård MJ, Sonnenschein N. Microbial methylotrophic metabolism: recent metabolic modeling efforts and their applications in industrial biotechnology. *Biotechnology Journal*. 2018;13(8):1800011. doi: <https://doi.org/10.1002/biot.201800011>
10. Muetzel S, Lawrence P, Hoffmann EM, Becker K. Evaluation of a stratified continuous rumen incubation system. *Animal Feed Science and Technology*. 2009;151(1-2):32-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.11.001>
11. OECD-FAO, OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027, OECD Publishing, Paris/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome; 2018:107 p. doi: [10.1787/agr\\_outlook-2018-en](https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2018-en)
12. Olsen RL, Hasan MR. A limited supply of fishmeal: Impact on future increases in global aquaculture production. *Trends Food Sci Technol*. 2012;27(2):120-128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.06.003>
13. Petersen LAH, Lieven C, Nandy SK, Villadsen J, Jørgensen SB, Christensen I, Gernaey KV. Dynamic investigation and modeling of the nitrogen cometabolism in *Methylococcus capsulatus (Bath)*. *Biotechnol Bioeng*. 2019;116(11):2884-2895. doi: <https://doi.org/10.1002/bit.27113>
14. Petersen LAH, Villadsen J, Jørgensen SB, Gernaey KV. Mixing and mass transfer in a pilot scale U-loop bioreactor. *Biotechnol Bioeng*. 2017;114(2):344-354. doi: <https://doi.org/10.1002/bit.26084>
15. Teather RM, Mahadevan S, Erfle JD, Sauer FD. Negative correlation between protozoal and bacterial levels in rumen samples and its relation to the determination of dietary effects on the rumen microbial population. *Appl Environ Microbiol*. 1984;47(3):566-570. doi: <https://doi.org/10.1128/aem.47.3.566-570.1984>
16. Villadsen J, Nielsen J, Lidén G. *Bioreaction Engineering Principles*. Third Edition. Springer New York, NY, 2011:561 p. doi: [10.1007/978-1-4419-9688-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9688-6)

### References

1. Kalashnikov AP, Fisinin VI, Shcheglova VV, Kleimenov NI. Norms and rations of feeding of farm animals: reference. manual. 3rd ed., add. and reprint. Moscow; 2003:456 p.
2. Arowolo MA, Zhang XM, Wang M, Wang R, Wen JN, Hao LZ, He JH, Shen WJ, Ma ZY, Tan ZL. Proper motility enhances rumen fermentation and microbial protein synthesis with decreased saturation of dissolved gases in rumen simulation technique. *Journal of Dairy Science*. 2022;105(1):231-241. doi: [10.3168/jds.2021-20165](https://doi.org/10.3168/jds.2021-20165)
3. Bequette BW. *Process Control: Modeling, Design and Simulation*, Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, Prentice Hall PTR; 2003:769 p.
4. Bequette BW. *Process Dynamics: Modeling, Analysis and Simulation*, Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, Prentice Hall PTR; 1998:621 p.
5. Clarke RTJ, Ulyatt MJ, John A. Variations in numbers and mass of ciliate protozoa in the rumens of sheep fed chaffed alfalfa (*Medicago sativa*). *Appl Environ Microbiol*. 1982;43(5):1201-1204. doi: <https://doi.org/10.1128/aem.43.5.1201-1204.1982>
6. Deitmiers JH, Gresner N, Südekum KH. Opportunities and limitations of a standardisation of the rumen simulation technique (RUSITEC) for analyses of ruminal nutrient degradation and fermentation and on microbial community characteristics. *Animal Feed Science and Technology*. 2022;289:115325. doi: [10.1016/j.anifeedsci.2022.115325](https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115325)
7. Hungate RE. *The rumen and its microbes*. Academic Press INC: New York and London; 1966:533 p.
8. Larsen EB, inventor. U-shape and/or nozzle-u-loop fermentor and method of carrying out a fermentation process. United States patent US 6492135. 2002 Dec 10.
9. Lieven C, Herrgård MJ, Sonnenschein N. Microbial methylotrophic metabolism: recent metabolic modeling efforts and their applications in industrial biotechnology. *Biotechnology Journal*. 2018;13(8):1800011. doi: <https://doi.org/10.1002/biot.201800011>

10. Muetzel S, Lawrence P, Hoffmann EM, Becker K. Evaluation of a stratified continuous rumen incubation system. *Animal Feed Science and Technology*. 2009;151(1-2):32-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.11.001>
11. OECD-FAO, OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027, OECD Publishing, Paris/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome; 2018:107 p. doi: 10.1787/agr\_outlook-2018-en
12. Olsen RL, Hasan MR. A limited supply of fishmeal: Impact on future increases in global aquaculture production. *Trends Food Sci Technol*. 2012;27(2):120-128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.06.003>
13. Petersen LAH, Lieven C, Nandy SK, Villadsen J, Jørgensen SB, Christensen I, Gernaey KV. Dynamic investigation and modeling of the nitrogen cometabolism in *Methylococcus capsulatus (Bath)*. *Biotechnol Bioeng*. 2019;116(11):2884-2895. doi: <https://doi.org/10.1002/bit.27113>
14. Petersen LAH, Villadsen J, Jørgensen SB, Gernaey KV. Mixing and mass transfer in a pilot scale U-loop bioreactor. *Biotechnol Bioeng*. 2017;114(2):344-354. doi: <https://doi.org/10.1002/bit.26084>
15. Teather RM, Mahadevan S, Erfle JD, Sauer FD. Negative correlation between protozoal and bacterial levels in rumen samples and its relation to the determination of dietary effects on the rumen microbial population. *Appl Environ Microbiol*. 1984;47(3):566-570. doi: <https://doi.org/10.1128/aem.47.3.566-570.1984>
16. Villadsen J, Nielsen J, Lidén G. *Bioreaction Engineering Principles*. Third Edition. Springer New York, NY; 2011:561 p. doi: 10.1007/978-1-4419-9688-6

#### **Информация об авторах:**

**Елена Владимировна Шейда**, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, сот.: 8-922-862-64-02, старший научный сотрудник института биоэлементологии, Оренбургский государственный университет, 460018, пр. Победы, 13, г. Оренбург. тел.: 89228626402.

**Галимжан Калиханович Дускаев**, доктор биологических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)30-81-70.

**Сергей Александрович Мирошников**, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)30-81-70.

**Иван Сергеевич Мирошников**, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, Оренбург, ул. 9 Января 29, тел.: 89228060101.

**Дмитрий Александрович Проскурин**, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, Оренбург, ул. 9 Января 29, тел.: 89128464366.

**Максим Владимирович Овечкин**, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, Россия, Оренбург, ул. 9 Января 29, тел.: 89226294453.

**Information about the authors:**

**Elena V Sheida**, Cand. Sci. (Biology), Researcher at the Laboratory of Biological Tests and Examinations, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 460000, Orenburg, January 9, 29, cell: 8-922-862-64-02; Senior Researcher at the Institute of Bioelementology, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, tel.: 89228626402.

**Galimzhan K Duskaev**, Dr. Sci. (Biology), Professor of Russian Academy of Sciences, Leading Researcher of the Department of Farm Animal Feeding and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8(3532)30-81-70.

**Sergey A Miroshnikov**, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Department of Farm Animal Feeding and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8(3532)30-81-70.

**Ivan S Miroshnikov**, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of the Department of Farm Animal Feeding and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 89228060101.

**Dmitry A Proskurin**, Cand. Sci. (Technical), Researcher of the Department of Farm Animal Feeding and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 89128464366.

**Maxim V Ovechkin**, Cand. Sci. (Technical), Researcher of the Department of Farm Animal Feeding and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 89226294453.

Статья поступила в редакцию 08.06.2023; одобрена после рецензирования 24.08.2023; принята к публикации 11.09.2023.

The article was submitted 08.06.2023; approved after reviewing 24.08.2023; accepted for publication 11.09.2023.