

# Корректировка липидного статуса животного сырья

Московский государственный  
технический университет  
(национальный исследовательский  
университет) имени Н.Э. Баумана,  
г. Мытищи, Российская Федерация

А. Н. Веревкин, А. Н. Иванкин

## КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Андрей Николаевич Иванкин  
E-mail: aivankin@inbox.ru

## ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Иванкин, А. Н., & Веревкин, А. Н. (2024).  
Корректировка липидного статуса  
животного сырья. *Хранение и перера-  
ботка сельхозсырья*, 32(4), 18-32.  
[https://doi.org/10.36107/  
spfp.2024.4.539](https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.539)

ПОСТУПИЛА: 10.05.2024

ДОРАБОТАНА: 23.11.2024

ПРИНЯТА: 16.12.2024

ОПУБЛИКОВАНА: 27.12.2024

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии  
конфликта интересов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась  
за счет средств бюджета МГТУ  
им. Н.Э. Баумана. Никаких  
дополнительных грантов на  
проведение или руководство данным  
исследованием получено не было.



## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Липидный состав жирового сырья животного происхождения играет ключевую роль в создании сбалансированных кормов для сельскохозяйственных животных. Однако природные жиры часто не соответствуют требованиям по содержанию жирных кислот, что ограничивает их использование в кормовых композициях. Несмотря на достижения в области биотехнологической переработки жиров, остается недостаточно изученным вопрос применения ферментативных методов для корректировки их липидного состава.

**Цель:** Разработка методологии переэтерификации жирового сырья для получения липидных композиций с измененным жирнокислотным составом, пригодных для использования в рецептурах кормов для сельскохозяйственных животных.

**Материалы и методы:** Объектами исследования выступали жировые отходы мясокомбинатов, нутряной свиной жир и костный жир крупного рогатого скота. Переэтерификация проводилась в присутствии рыбьего жира. Контролировались дисперсность системы и жирнокислотный состав. Методология включала совмещение жировых компонентов с ферментами, их нагревание и механическое или ультразвуковое диспергирование для повышения эффективности переработки.

**Результаты:** Было определено содержание основных жирных кислот в исходном сырье и полупродуктах. Получены эмульсии с размером липидных частиц 0,1–200 мкм. Установлены оптимальные условия ферментативной обработки: концентрация субстрата 300–350 г/л, температура  $60 \pm 2$  °C, pH 5,0; ферментная активность 500 ед/л, термическая активация фермента — 20 мин при 60 °C. Гидролизаты, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для улучшения кормовой базы.

**Выводы:** Разработанная методология переработки жирового сырья позволяет эффективно трансформировать как природные жиры, так и отходы мясоперерабатывающих предприятий в высокодисперсную биомассу. Определены оптимальные условия ферментативной обработки, что обеспечивает возможность создания сбалансированных липидных компонентов для производства кормов.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

коррекция липидного состава жирового сырья; переэтерификация жиров; ферментативные методы обработки жиров; жировые отходы мясопереработки; кормовые композиции для сельскохозяйственных животных; жирнокислотный профиль липидных композиций; биотехнологическая переработка жирового сырья; ультразвуковая обработка липидов; ферментативная активность липаз

# Adjustment of the Lipid Status of Animal Raw Materials

Bauman Moscow State Technical  
University (National Research  
University), Mitishi, Russian Federation

Alexey N. Verevkin, Andrey N. Ivankin

## CORRESPONDENCE:

**Andrey N. Ivankin**

E-mail: aivankin@inbox.ru

## FOR CITATIONS:

Ivankin, A.N., Verevkin, A.N. (2024).  
Adjustment of the lipid status of animal  
raw materials. *Storage and Processing of  
Farm Products*, 32(4), 18-32.  
[https://doi.org/10.36107/  
spfp.2024.4.539](https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.539)

**RECEIVED:** 10.05.2024

**REVISED:** 23.11.2024

**ACCEPTED:** 16.12.2024

**PUBLISHED:** 27.12.2024

## DECLARATION OF COMPETING

**INTEREST:** none declared.

## FUNDING

This work was financed by the budget  
of Bauman Moscow State Technical  
University. No additional grants were  
received for conducting or supervising  
this research.



## ABSTRACT

**Introduction:** The lipid composition of animal-derived fat raw materials plays a pivotal role in formulating balanced feeds for livestock. However, natural fats often fail to meet the required fatty acid profile, limiting their application in feed formulations. Despite advancements in the biotechnological processing of fats, the use of enzymatic methods to modify their lipid composition remains insufficiently explored.

**Purpose:** To develop a methodology for the transesterification of fat raw materials to obtain lipid compositions with a modified fatty acid profile suitable for livestock feed formulations..

**Materials and Methods:** The study focused on fat waste from meat processing plants, namely pork lard and cattle bone fat. Transesterification was performed in the presence of fish oil. The dispersity of the system and fatty acid composition were monitored. The methodology involved combining fat components with enzymes, their heating, and mechanical or ultrasonic dispersion to enhance processing efficiency..

**Results:** The content of major fatty acids in raw materials and intermediate products was determined. Emulsions with lipid particle sizes ranging from 0.1 to 200  $\mu\text{m}$  were obtained. Optimal conditions for enzymatic processing were established: substrate concentration of 300–350 g/L, temperature of  $60 \pm 2$  °C, pH of 5.0; enzyme activity of 500 U/L, and thermal activation of the enzyme for 20 minutes at 60 °C. The resulting hydrolysates are potential products for improving livestock feed bases.

**Conclusion:** The developed methodology for processing fat raw materials enables the efficient transformation of both natural animal fats and difficult-to-process fat waste from meat processing plants into highly dispersed biomass. Optimal conditions for enzymatic processing were determined, ensuring the creation of balanced lipid components for feed production.

## KEYWORDS

adjustment of the lipid composition of fat raw materials; transesterification of fats; enzymatic methods for fat processing; fat waste from meat processing; feed compositions for livestock; fatty acid profile of lipid compositions; biotechnological processing of fat raw materials; ultrasonic treatment of lipids; enzymatic activity of lipases

## ВВЕДЕНИЕ

Значительные объемы жиросодержащих отходов, образующихся на мясокомбинатах, представляют собой проблему, как из-за потенциальной экологической нагрузки, так и из-за их невысокого качества, заключающегося в неблагоприятном жирнокислотном составе для практического использования в пищевых системах. Простая переработка таких отходов традиционно включает возможность получения товарного продукта, путем, как правило, образования относительно сыпучего материала без какой либо корректировки качества составляющих компонентов сырья. Рациональная переработка таких малоценных жировых отходов для повышения их качества требует проведения соответствующих исследований в данной области (Бабурина и соавт., 2015; Verevkin et al., 2022).

Современные мясоперерабатывающие предприятия производят значительные объемы жиросодержащих отходов, которые представляют собой экологическую и технологическую проблему. С одной стороны, эти отходы создают потенциальную нагрузку на окружающую среду из-за своей биологической активности и сложности утилизации (Diaz et al., 2020; Kim & Kim, 2023). С другой стороны, их низкое качество, определяемое неблагоприятным жирнокислотным составом, ограничивает возможности их использования в пищевых системах и сельскохозяйственном производстве (Kashi et al., 2017; Ates et al., 2020). Таким образом, возникает необходимость в разработке эффективных методов переработки жировых отходов с целью повышения их ценности и экологической безопасности.

Жировые компоненты занимают важное место в системе питания человека и животных, определяя энергетическую ценность пищи и качество продукции сельскохозяйственного происхождения (Lu et al., 2021; Short & Hahn, 2023). Качественный состав жиров, включая содержание эссенциальных жирных кислот и соотношение  $\omega 3:\omega 6$ , оказывает значительное влияние на метаболизм и биологическую активность живых организмов (Nguyen et al., 2023; Zapata et al., 2022).

Введение липидных компонентов с измененным жирнокислотным профилем в кормовые рационы способствует улучшению качества мясной продукции, что особенно важно в условиях глобального

дефицита продовольственных ресурсов (Budak et al., 2023; Xiaoyan et al., 2019). Однако текущие методы переработки жировых отходов не обеспечивают целенаправленного изменения их химического состава, что ограничивает их ценность как сырья (De Caro et al., 2014; Zupancic et al., 2023).

Природное сырье растительного, животного и морского происхождения давно используется в пищевых системах человека, а также при изготовлении животных кормов (Bikker & Jansman, 2023; Shurson et al., 2023). Химический состав такого сырья представлен важнейшими составляющими — белками, жирами и углеводами, содержание которых варьируется в зависимости от источника происхождения и позволяет оценивать или прогнозировать питательную ценность используемого сырья (Bychkova et al., 2023; Land et al., 2017; Yang et al., 2023).

Содержание важных составляющих различается для разных сырьевых источников. Учитывая значительный мировой дефицит пищевого сырья, особенно в развивающихся регионах, возникает проблема не только наличия самого сырья для получения высококачественной пищи, которая должна обеспечивать полноценное существование живого организма, но и возникает проблема обязательного потребления всех необходимых компонентов в наиболее благоприятных соотношениях для питающегося организма. Потребление эссенциальных компонентов во многом определяет понятие «качества» пищи (Budak et al., 2024; Bures et al., 2024; Liang et al., 2023).

Важнейшими веществами пищи являются белки, однако роль жировых компонентов для полноценного питания не менее важна (Lu et al., 2021; Short & Hahn, 2023). Сельскохозяйственное производство направлено на расширение объемов выпуска продукции, включающей все необходимые для полноценного развития составляющие, которые идут на пищевые цели. Практическое решение данной задачи в ходе ее реализации сопровождается образованием значительного количества техногенных отходов, которые ухудшают экологическую ситуацию из-за приверженности к активному воздействию микрофлоры и служат источником заболеваний различной этиологии (Diaz et al., 2020; Kim & Kim, 2023).

Образование отходов представляет собой проблему. При переработке сырья животного происхож-

дения, как одного из наиболее ценного источника пищи, образуются такие органические отходы как мясная обрезь, содержащее желудочно-кишечного тракта животных, кровь и др. Все это в той или иной мере относится к трудно перерабатываемым жиросодержащим отходам (Kashi et al., 2017; McQuilken, 2021).

Липиды содержатся во всех видах природного сырья, включая как животные, так и морские источники (Duan et al., 2023; Liu et al., 2023; Salami et al., 2019). При этом, жировые отходы от переработки липидов создают немало трудностей, связанных с образованием плотных отложений на внутренних стенках производственного оборудования (Kashi et al., 2017; Ates et al., 2020). Образующаяся в отстойниках очистных сооружений биомасса содержит более трети сырого жира, до четверти и более белоксодержащих тканей, а также органические и неорганические примеси различного состава. При убое 1000 голов скота образуется более 10 т жи-ро-белковой массы отходов (Ates et al., 2020).

Жиросодержащие отходы используются недостаточно эффективно, хотя они могут служить ценным сырьем в сельскохозяйственном производстве. Кормовые рационы сельскохозяйственных животных в значительной степени определяют качество производимого мяса (Gillespie, 2023). Липидные составляющие кормов во многом влияют на процесс его производства. На примере жиров данная зависимость может проявляться наиболее заметно (Ates et al., 2020; Bikker & Jansman, 2023; Huuskonen et al., 2023). Так, при откорме свиней в рецептурах кормов содержатся, как правило, «обычные» жировые компоненты, состав которых более, чем на 70–80% представлен мало полезными жирными кислотами — стеариновой и пальмитиновой, а также мононенасыщенной жирной кислотой — олеиновой (Budak et al., 2023; Tejeda et al., 2023).

Введение в корма липидных компонентов с измененным жирнокислотным составом, в котором увеличена доля значимых для полноценного биологического развития организма полиненасыщенных жирных кислот, позволяет изменять характеристики мяса, получаемого от животных (Бабурина с соавт., 2015; Quaresma et al., 2022; Xiaoyan et al., 2019). Жиры животного происхождения имеют разное качество, в т.ч. находясь в состоянии отходов.

Для описания полезности жира в питательной системе, используют, как правило, соотношение  $\omega 3 : \omega 6$  (Zapata et al., 2022; Ma et al., 2021).

По иной классификации вместо индекса омега ( $\omega$ ), химики применяют индекс  $n$ . В группу семейства  $\omega 6$  входят, прежде всего, линолевая  $C18:2$ ,  $\gamma$ -линоленовая (*цис*-6,9,12-октадекатриен)  $C18:3$ , арахидоновая (*цис*-5,8,14-эйкозатетраеновые)  $C20:4$ . Группа омега 3 включает *альфа*-линоленовую (*цис*-9,12,15-октадекатриен)  $C18:3$ , *цис*-5,8,11,14,17-эйкозапентаеновую  $C20:5$ , а также *цис*-4,8,12,15,21-докозапентаеновую  $C22:5$  и *цис*-4,7,10,13,16,19-докозагексаеновую  $C22:6$  кислоты (Huang et al., 2021).

Показатель  $\omega 3 : \omega 6$  применяется, прежде всего, для описания значимости эссенциальных полиненасыщенных жирных кислот в составе жиров. Данная группа соединений способствует эффективному метаболизму липидов в любом живом организме, что важно, в том числе, для долгой здоровой жизни человека. Этот показатель, по-видимому, играет такую же значимую роль при выращивании животных (Orzuna-Orzuna et al., 2023; Sun et al., 2022).

Установлено, что для описания свойств жиров показатель  $\omega 3 : \omega 6$  в морепродуктах соответствует своему назначению, в то время как у животных жиров доля  $\omega 6$  жирных кислот преобладает над  $\omega 3$  (Katan et al., 2019). Поэтому для животных жиров чаще используется показатель  $\omega 6 : \omega 3$ . Несмотря на необходимость наличия в пищевой системе жиров с жирными кислотами обеих групп, преобладание  $\omega 3$  в жировой ткани рассматривается как более благоприятное состояние. Соотношение  $\omega 6 / \omega 3$  для животных жиров является важным показателем (для морепродуктов обычно используют обратный показатель  $\omega 3 / \omega 6$ , так как это соотношение почти зеркально к объектам животного происхождения). Оптимальное соотношение должно быть, по-видимому, равно 4 : 1, а еще лучше 2,5 : 1, хотя в действительности для животных жиров  $\omega 6 / \omega 3$  превышает соотношение (6...14) : 1 (Nguyen et al., 2023).

Различия в соотношении  $\omega 3 / \omega 6$  позволяют разрабатывать диеты с использованием животных, растительных или морских жиров. Переработка жиросодержащих отходов с отличающимся соотношением жирных кислот путем их последующего усвоения животными позволит целенаправленно получать мясо с измененными характеристиками,

в том числе, путем возможного использования биопроцессов, аналогичных природным (Nguyen et al., 2023; Neklyudov et al., 2008).

Перспективным направлением переработки жиродержащих отходов является использование технических препаратов липаз. Липазы, как природные ферменты класса гидролаз, катализируют расщепление триглицеридов жира до глицерина и свободных жирных кислот. У человека и животных липазы в больших количествах обнаруживаются в тканях, а также в соке поджелудочной железы. Известный препарат панкреатин и его различные аналоги, полученные из поджелудочной железы, содержат активные липазы, трансформирующие липиды в живом организме *in vivo* а также *in vitro* (De Caro et al., 2014; Zupancic et al., 2023).

Липазы представляют собой гетерогенный белок, имеющий небелковый компонент — гликопротеин с относительно низкой молекулярной массой в диапазоне 22–60 кДа, способный к переэтерификации жирных кислот в составе нативных триглицеридов (Mateos et al., 2021). Существует несколько точек зрения на химическую природу небелковой составляющей фермента. Небелковый компонент может иметь липидную природу, при удалении которого липаза потеряет свою активность. Этот компонент необходим для функционирования фермента в гетерогенной среде. Специфичность липолитических ферментов к физическому состоянию субстрата в ряде случаев связана с их супрамолекулярной структурой, однако активность липаз проявляется всегда в условиях, приближенных к физиологическим параметрам живого организма (Fan & Jia, 2023). Поэтому, возникает целесообразность использования данного фермента для переработки жирового сырья.

В научной литературе имеется достаточно много сообщений о гидролитической переработке природного сырья, позволяющей изменять молекулярную массу связанных сырьевых макрокомплексов различной природы. Гидролиз, как процесс расщепления таких составляющих фрагментов, позволяет не только решать проблему биодоступности при питании, но и вводить в пищевой оборот с полноценной усвояемостью трудно ассимилируемые компоненты (Kocabas et al., 2022; Neklyudov et al., 2008; Chantakun et al., 2022).

Одной из перспективных технологий переработки жировых отходов является использование липаз — ферментов, способных катализировать процессы гидролиза и переэтерификации триглицеридов, позволяя изменять жирнокислотный состав липидных комплексов (Mateos et al., 2021; Fan & Jia, 2023). Липазы уже применяются в технических и фармацевтических целях, однако их потенциал для улучшения пищевой ценности жиров остается недостаточно исследованным (Kocabas et al., 2022; Chantakun et al., 2022). В научной литературе отмечается высокая эффективность липаз в процессах переработки природного сырья, однако методология их применения для улучшения качества жировых отходов в контексте кормовых технологий требует дальнейших исследований (Verevkin et al., 2022).

Целью настоящей работы является разработка методологии переработки жирового сырья с использованием липаз для получения липидных композиций с измененным жирнокислотным составом, которые могут быть интегрированы в рецептуры кормов для сельскохозяйственных животных. Данное исследование предполагает комплексный подход к переработке жировых отходов, включающий использование биокатализаторов для их модификации и последующей оценки их влияния на питательные свойства кормов и мясной продукции.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Объекты и материалы

Объектом исследования являлись жировые отходы, образующиеся на Пятигорском мясокомбинате (Россия), а также нутряной свиной и костный жир крупного рогатого скота с массовой долей жира 94%.

Характеристики жирового отхода: плотность при 18 °С, 0,92–0,95 г/см<sup>3</sup>; вязкость при 60 °С, 16–18 мПа·с; температура плавления 45–48 °С; йодное число, 40 % I<sub>2</sub>; содержание насыщенных жирных кислот 60...65 % от суммы. Жирнокислотный состав исследуемых объектов приведен в Таблице 1.

Для балансирования жирнокислотного состава трансформируемого сырья использовали отходы рыбьего жира из сиговых и лососевых рыб.



В качестве ферментов для гидролитической трансформации использовали сырую липазу, полученную трехкратной экстракцией поджелудочной железы свинины ацетоном (1:1) при 0 °С с последующей сушкой под вакуумом. Перед использованием панкреатической липазы ее суспензию предварительно активировали нагреванием в течение 0,2...1 ч при 50 °С. Использовали также панкреатин с липазной активностью 0,7 ЕД/мг и протеазной активностью 40 ЕД/мг, а также очищенную микробную липазу из *Candida Rugosa* L8525–1MU Sigma, EC 3.1.1.1, с молекулярной массой 52 кДа, липазной активностью 15 ЕД/мг, протеазной активностью < 0,05 ЕД/мг.

## Методы и инструменты

Жировую массу в смеси 1:1 с водой измельчали на миксере и дополнительно подвергали ультразвуковой обработке на установке Branson (США) с частотой 25 кГц и мощностью 200 Вт/л.

Ферментативное превращение жирных кислот осуществляли обработкой смеси 50 %-ной водной эмульсии липидов и гексана в соотношении 1:1 в течение 2...8 ч при температуре 40–60 °С в присутствии 1 % липазы от массы жирового компонента. В ходе процесса отбирали пробы и определяли в них количество свободных жирных кислот.

Жирнокислотный состав анализировали на газовом хроматографе 7890А с масс-селективным детектором 5975С VLMSD фирмы Agilent Technologies (США). Для этого образец в количестве 1 г подвергали обработке в течение 3 ч смесью 10 мл хлороформа и 10 мл метанола по модифицированному методу Фолча в присутствии 1 % раствора KCl для растворения липидных компонентов, экстракт фильтровали через бумажный обеззоленный фильтр и после удаления избытка растворителей выпариванием досуха подвергали кислотному гидролизу с целью получения смеси метиловых эфиров кислот, которую анализировали методом газовой хроматографии. Обработывали 0,01 г липидов в 3 мл 15 %-ного раствора ацетилхлорида в метаноле при 100 °С в течение 2 ч с последующей нейтрализацией смеси 1,25 мл насыщенного КОН в СН<sub>3</sub>ОН до pH 5,0–6,0. К смеси добавляли 3 мл насыщенного водного раствора NaCl и 3 мл гексана, выдерживали несколько минут и отбирали на анализ 0,2 мкл про-

зрачного гексанового слоя, содержащего метиловые эфиры жирных кислот. Условия анализа на капиллярной колонке 5 мкм: повышение температуры колонки в термостате от 100 до 260 °С со скоростью 10 °С/мин; температура инжектора 250 °С, детектора 300 °С; расход водорода от генератора — 35 см<sup>3</sup>/мин; поток азота — 20 см<sup>3</sup>/мин; деление потока 1:100; время анализа 30 мин; введение 1 мкл образца. Для расчета содержания изомеров использовали автоматическую базу данных для поиска и идентификации данных хроматомасс-спектрометрии NIST08 MS Library с вероятностью корреляции пиков более 85 %.

Для количественного определения использовали стандартные растворы смеси метиловых эфиров жирных кислот C4–C24 в метаноле № 47885 Supelco, массовая концентрация 10 мг/см<sup>3</sup>: масляной (C4:0), капроновой (C6:0), каприловой (C8:0), каприновой (C10:0), деценовой (C10:1), ундекановой (C11:0), лауриновой (C12:0), тридекановой (C13:0), миристиновой (C14:0), миристолеиновой (цис-9-тетрадеценовой C14:1), пентадекановой (C15:0), цис-10-пентадеценовой (C15:1), пальмитиновой (C16:0), пальмитолеиновой (цис-9-гексадеценовой C16:1), маргариновой (C17:0), цис-10-гептадеценовой (C17:1), стеариновой (C18:0), олеиновой (цис-9-октадеценовой C18:1n9c), элаидовой (транс-9-октадеценовой C18:1n9t), линолевой (цис-9,12-октадекадиеновой C18:2n6), гамма-линоленовой (цис-6,9,12-октадектриеновой C18:3n6), альфа-линоленовой (цис-9,12,15-октадектриеновой C18:3n3), нондекановой (C19:0), арахидоновой (C20:0), гадолеиновой (цис-9-эйкозеновой C20:1n9), цис-11,14-эйкозатриеновой (C20:2n6), цис-8,11,14-эйкозатриеновой (C20:3n6), цис-11,14,17-эйкозатриеновой (C20:3n3), арахидоновой (цис-5,8,11,14-эйкозатетраеновой C20:4n6), эйкозапентаеновой (цис-5,8,11,14,17-эйкозапентаеновой C20:5n3), генейкозановой (C21:0), бегеновой (C22:0), эруковой (цис-13-докозеновой C22:1n9), цис-13,16-докозановой (цис-13,16-докозатриеновой C22:2n6), лупанодоеновой (цис-7,10,13,16,19-докозапентаеновой C22:5n3), докозагексаеновой (цис-4,7,10,13,16,19-докозагексаеновой C22:6n3), трикозановой (C23:0), лигноцериновой (C24:0), нервоновой (цис-15-тетракозеновой C24:1) №46951U Supelco.

Морфологические свойства дисперсных эмульсий (размер частиц) определяли с помощью светового

микроскопа (×200) Olympus CX23 (Япония) и вставленной оптической решеткой, позволяющей оценивать размеры частиц в световом поле.

Контроль липазной активности осуществляли стандартным методом (Ivankin et al., 2021).

Контроль процесса биотрансформации осуществляли путем отбора проб и установления в них достигаемого оптимального жирнокислотного состава с максимальным содержанием кислот семейства ω3.

Процедура исследования

Процедура исследования включает сбор жирового сырья, смешивание его с другим видом жирового сырья и биотрансэтерификацию смеси низкокачественного жира с добавкой иного жира высококачественную композицию в присутствии липаз.

Анализ данных

Метрологические характеристики методов при доверительной вероятности  $P = 0,95$ . Предел повторяемости  $r = 0,5\%$ . предел воспроизводи-

мости  $R = 1\%$ ; границы абсолютной погрешности  $\Delta \pm 10\%$ . Результаты представлены в виде средних значений не менее трехкратных повторов ( $n$ ) с расчетом стандартного отклонения. Статистическую обработку результатов осуществляли на основе подсчета средних значений величин и стандартной средней ошибки. Полученные результаты не выходили за пределы доверительной вероятности  $p = 0,85-0,95$ , при доверительном интервале  $\Delta \pm 10\%$ .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методология переработки жирового сырья должна включать получение достоверной информации об исходном жирнокислотном составе и его превращении в липидную композицию с заданным оптимальным содержанием жирных кислот.

В Таблице 1 представлены результаты анализа жирнокислотного состава исследуемых объектов. Из представленных данных видно, что за счет осуществления процесса переэтерификации, происходит снижение в продукте доли насыщенных жирных кислот и возрастание содержания ценных ненасыщенных жирных кислот.

Таблица 1  
Жирнокислотный состав животного сырья и модифицированных продуктов (n = 3)  
Table 1  
Fatty Acid Composition of Animal Raw Materials and Modified Products (n = 3)

| Наименование жирной кислоты | Жир нутряной свиней |                            | Костный жир крупного рогатого скота |                            | Жировые отходы мясокомбината |                            |
|-----------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
|                             | Сырье > продукт     |                            |                                     |                            |                              |                            |
|                             | исход-<br>ное       | биотрансформи-<br>рованное | исход-<br>ное                       | биотрансфор-<br>мированное | исход-<br>ное                | биотрансфор-<br>мированное |
| Масляная C4:0               | 0,02                | 0,01                       | —*                                  | —                          | —                            | —                          |
| Капроновая C6:0             | 0,08                | 0,06                       | 0,06                                | 0,04                       | 0,03                         | 0,05                       |
| Каприловая C8:0             | 0,07                | 0,05                       | 0,07                                | 0,04                       | 0,04                         | 0,03                       |
| Каприновая C10:0            | 0,86                | 0,31                       | 0,68                                | 0,33                       | 0,18                         | 0,1                        |
| Дециновая C10:1             | 0,05                | 0,01                       | 0,1                                 | 0,01                       | 0,1                          | 0,08                       |
| Ундециловая C11:0           | 0,12                | 0,11                       | 0,34                                | 0,37                       | 0,13                         | 0,08                       |
| Лауриновая C12:0            | 0,18                | 0,12                       | 0,28                                | 0,25                       | 1,38                         | 0,81                       |
| Тридекановая C13:0          | 0,17                | 0,08                       | 0,2                                 | 0,09                       | 0,26                         | 0,33                       |
| Миристиновая C14:0          | 6,59                | 3,77                       | 5,9                                 | 3,42                       | 5,68                         | 3,47                       |
| Миристолеиновая C14:1       | 0,1                 | 0,06                       | 0,07                                | 0,07                       | 2,1                          | 1,26                       |
| Пентадекановая C15:0        | 1,48                | 0,51                       | 1,31                                | 0,38                       | 1,3                          | 0,36                       |
| цис-10-пентадеценовая C15:1 | 0,43                | 0,13                       | 0,55                                | 0,16                       | 0,66                         | 0,47                       |

Окончание Таблицы 1

| Наименование жирной кислоты          | Жир нутряной свиной |                        | Костный жир крупного рогатого скота |                        | Жировые отходы мясокомбината |                        |
|--------------------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
|                                      | Сырье > продукт     |                        |                                     |                        |                              |                        |
|                                      | исход-ное           | биотрансформи-рованное | исход-ное                           | биотрансфор-мированное | исход-ное                    | биотрансфор-мированное |
| Пальмитиновая C16:0                  | 26,99               | 24,11                  | 27,8                                | 24,88                  | 28,05                        | 26,3                   |
| Пальмитолеиновая C16:1               | 2,93                | 0,67                   | 3,11                                | 0,72                   | 1,23                         | 0,55                   |
| Маргариновая C17:0                   | 0,45                | 1,08                   | 0,26                                | 1,09                   | 0,35                         | 0,9                    |
| Гептадеценовая C17:1                 | 0,12                | 0,14                   | 0,22                                | 0,43                   | 0,23                         | 0,82                   |
| Стеариновая C18:0                    | 4,41                | 1,2                    | 3,57                                | 1,3                    | 20,77                        | 18,2                   |
| Олеиновая C18:1n9c                   | 30,24               | 46,02                  | 28,67                               | 44,26                  | 19,33                        | 15,8                   |
| Элаидиновая C18:1n9t                 | 0,01                | 0,01                   | 0,03                                | 0,04                   | 0,18                         | 0,32                   |
| Линолевая C18:2 n6                   | 0,58                | 0,74                   | 0,46                                | 0,32                   | 1,05                         | 0,93                   |
| γ-Линоленовая C18:3n6                | 1,13                | 0,33                   | 1,44                                | 0,37                   | 1,18                         | 0,21                   |
| α-Линоленовая C18:3n3                | 1,35                | 1,48                   | 1,4                                 | 1,33                   | 1,14                         | 1,32                   |
| Нондекановая C19:0                   | 0,18                | 0,16                   | 0,22                                | 0,23                   | 0,17                         | 0,22                   |
| Гадолеиновая C20:1n9                 | 2,38                | 0,6                    | 1,69                                | 0,58                   | 1,06                         | 0,25                   |
| цис-8,11,14-эйкозатриеновая C20:3n6  | 0,51                | 0,44                   | 0,31                                | 0,28                   | 0,31                         | 0,26                   |
| цис-11,14,17-эйкозатриеновая C20:3n3 | 0,21                | 0,66                   | 0,12                                | 0,53                   | 0,31                         | 0,55                   |
| Арахидоновая C20:4n6                 | 0,36                | 0,1                    | 0,29                                | 0,08                   | 0,24                         | 0,19                   |
| Эйкозапентаеновая C20:5n3            | 0,1                 | 0,16                   | 0,08                                | 0,06                   | 0,1                          | 0,15                   |
| Генэйкозановая C21:0                 | 0,27                | 0,09                   | 0,34                                | 0,1                    | 0,23                         | 0,12                   |
| Бегеновая C22:0                      | 0,22                | 0,13                   | 0,31                                | 0,26                   | 0,43                         | 0,18                   |
| Эруковая C22:1n9                     | 0,1                 | 0,12                   | 0,15                                | 0,41                   | 0,22                         | 0,35                   |
| цис-13,16,17-докозациеновая C22:2    | 0,03                | 0,01                   | 0,03                                | 0,02                   | 0,08                         | 0,06                   |
| цис-13,16-докозановая C22:2n6        | 0,04                | 0,06                   | 0,05                                | 0,03                   | 0,1                          | 1,04                   |
| Лупанодоновая C22:5n3                | 0,03                | 0,05                   | 0,01                                | 0,02                   | 0,04                         | 0,09                   |
| Докозапентаеновая C22:5n3            | 0,01                | 0,02                   | 0,01                                | 0,01                   | 0,05                         | 1,06                   |
| Докозагексаеновая C22:6n3            | 0,38                | 1,13                   | 0,21                                | 0,29                   | —                            | 0,44                   |
| Трикозановая C23:0                   | 2,23                | 3,07                   | 3,6                                 | 3,9                    | 2,78                         | 4,43                   |
| Лигноцериновая C24:0                 | 1,56                | 2,12                   | 2,45                                | 3,48                   | 4,11                         | 4,56                   |
| Нервоновая C24:1                     | 0,36                | 0,57                   | 0,41                                | 0,52                   | 0,15                         | 0,23                   |

Примечание. \* не обнаружено с уровнем содержания менее 0,01.

Note. \*not detected at a content level below 0.01.

Процессы переработки сложного по компонентному составу жирового сырья в силу своих физико-химических характеристик протекают недостаточно интенсивно, поэтому целесообразно использование методов активного физико-химического воздействия, особенно ультразвука, позволяющего сравнительно легко получать высокодисперсные эмульгированные системы В Таблицах 2 и 3 пока-

заны некоторые результаты предварительной механической и ультразвуковой обработки.

Методология корректировки липидного статуса животного сырья основана на использовании процесса биоэтерификации одного жира в присутствии другого жира с благоприятным составом с получением продукта в две основные стадии, включающие



Таблица 2

Влияние времени ультразвуковой обработки жировых отходов мясокомбината с частотой 25 кГц на размер частиц образующейся эмульсии (n = 4)

Table 2

Effect of Ultrasonic Treatment Time at a Frequency of 25 kHz on the Particle Size of the Resulting Emulsion from Meat Processing Plant Fat Waste (n = 4)

| Номер пробы | Время ультразвуковой обработки, мин | Средний размер частиц в эмульсии, мкм |
|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1           | 0                                   | 26,5 ± 1,7                            |
| 2           | 5                                   | 15,9 ± 0,9                            |
| 3           | 7                                   | 9,8 ± 0,4                             |
| 4           | 10                                  | 4,6 ± 0,3                             |
| 5           | 15                                  | 2,2 ± 0,2                             |
| 6           | 20                                  | 2,1 ± 0,2                             |

Таблица 3

Полидисперсность 40 % жировой эмульсии в зависимости от условий обработки (n = 3)

Table 3

Polydispersity of 40% Fat Emulsion Depending on Processing Conditions (n = 3)

| Наименование                              | Средний диаметр, мкм, % от суммы частиц |               |                |                 |              |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------|----------------|-----------------|--------------|
|                                           | 0,1...<br>1,0                           | 1,0...<br>2,0 | 2,0...<br>10,0 | 10,0...<br>40,0 | 40...<br>200 |
| Жировой отход, миксер 5000 об/мин, 1 ч.   | 23                                      | 23            | 38             | 13              | 3            |
| Жировой отход, ультразвук, 200 Вт/л, 2 ч. | 36                                      | 30            | 21             | 12              | 1            |
| Говяжий жир, миксер, 2000 об/мин, 2 ч.    | 22                                      | 23            | 39             | 13              | 3            |
| Жир говяжий, ультразвук 200 Вт/л, 2 ч.    | 45                                      | 26            | 21             | 7               | 1            |

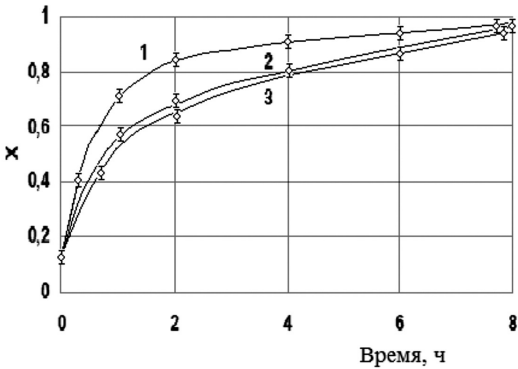
сперва гидролиз исходного жира с последующим переносом в его состав жирных кислот из второго компонента в присутствии липаз. Кинетика этих стадий предопределяет оптимальные технологические параметры всего процесса. На Рисунке 1 представлены кинетические кривые гидролитического процесса обработки животного жира в присутствии ферментных препаратов. На Рисунке 2 представлены кинетические кривые выхода продукта и расхода жирового сырья в процессе переэтерификации, позволяющие оценивать скорость процесса биотрансформации.

Рисунок 1

Выход продукта (X) в зависимости от времени обработки ферментом

Figure 1

Product Yield (X) Depending on Enzyme Treatment Time



Примечание. 1 – микробная липаза, 2 – панкреатин, 3 – липаза поджелудочной железы. Температура 60°C, pH 5,0, начальная концентрация субстрата 300 г/л, начальная липазная активность 500 ед/л.

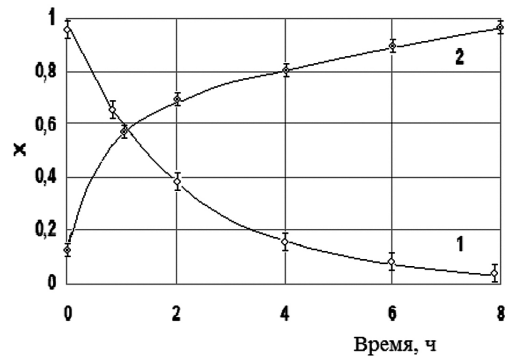
Note. 1 – microbial lipase, 2 – pancreatin, 3 – pancreatic lipase. Temperature: 60°C, pH: 5.0, initial substrate concentration: 300 g/L, initial lipase activity: 500 U/L.

Рисунок 2

Кинетика выхода продуктов (X), потребления субстрата (1) и накопления продуктов гидролиза (2) жировых отходов при обработке панкреатической липазой во времени в присутствии 20 % рыбьего жира

Figure 2

Kinetics of Product Yield (X), Substrate Consumption (1), and Accumulation of Hydrolysis Products (2) from Fat Waste During Pancreatic Lipase Treatment over Time in the Presence of 20% Fish Oil



Примечание. Температура 60 °С, pH 5,0, начальная концентрация субстрата 350 г/л, начальная активность липазы 500 ед/л, предварительная инкубация фермента 20 мин.

Note. Temperature: 60°C, pH: 5.0, initial substrate concentration: 350 g/L, initial lipase activity: 500 U/L, pre-incubation of the enzyme: 20 minutes.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выбор объектов исследования обусловлен необходимостью отработать методологию переработки бросовых жиров отходов мясоперерабатывающих предприятий. Для сопоставления использовали жировое сырье животного происхождения, которое используются на пищевые цели с точки зрения возможности корректировки их липидного статуса.

Анализ данных, представленных в Таблице 1 показывает, что сырье животного происхождения как в нативной форме, так и в виде технологических отходов, имеет жирнокислотный состав, который, по-видимому, не может рассматриваться в целом, как оптимальный для пищевых систем. В исходном животном (свином) жире, а также жире говяжьего происхождения содержится достаточно много предельных жирных кислот, которые, как известно не являются благоприятными для внутренних биохимических процессов живого организма (Zhang et al., 2024). Соотношение  $\omega 6/\omega 3$  для выявленных жирных кислот в этом случае составляло более 10. В составе жиров технических отходов данный показатель был больше 12...15, а доля предельных жирных кислот превышала 60 %, что не соответствует составу высококачественных природных животных жиров.

Для эффективного осуществления процесса корректировки липидного статуса животного сырья использовали принцип максимально возможного диспергирования исходного субстрата с образованием 40...50 %-ной эмульсии, которую далее подвергали гидролизу липазой в установленных оптимальных условиях: концентрация субстрата 300...400 г/л, температура 55...60 °C.

Корректировка липидного статуса, т.е. изменение относительного состава жирных кислот с повышением доли эссенциальных жирных кислот, в первую очередь семейства  $\omega 3$  может быть осуществлена за счет переэтерификации жира в присутствии липаз. В работе использовали разные варианты данного фермента, включающего как очищенную микробную липазу, так и различные ее формы в виде нативного комплекса поджелудочной железы и комплексного ферментативного препарата — панкреатина.

Все три формы фермента позволяли получать результат при условии введения процесса в сопоставимых условиях.

Анализ кинетических кривых процесса биотрансформации, показанных на Рисунке 1 позволяет сравнивать эффективность использованных ферментных систем. Видно, что очищенный фермент проявляет при прочих равных условиях максимальную активность, в то время как для достижения приемлемого выхода при использовании других форм липазного фермента требуется больше времени, за которое достигается максимальная конверсия.

Выбранные условия обработки исходного жира обеспечивали конверсию жировых отходов и нативного животного жира на уровне более 90 %. Использование микробной липазы в заданных условиях позволило получить продукт с аналогичным выходом почти в 1,5 раза быстрее. Ферментный комплекс из поджелудочной железы подвергался предварительной активации путем нагревания его суспензии в течение 20...30 мин при температуре 50 °C.

Технические отходы мясоперерабатывающих предприятий характеризуются высокой плотностью и вязкостью, что обусловлено значительным содержанием в них насыщенных жирных кислот. Нативная структура животных жиров также достаточно плотная, что ограничивает доступность жирового субстрата воздействию ферментного комплекса, поэтому важным технологическим приемом, обеспечивающим эффективность липазных превращений, является поддержание стабильной эмульсии. При этом общая тенденция эффективности процесса возрастает при увеличении дисперсности и снижении размера частиц в системе эмульсии (Таблица 2).

Для сравнения в Таблицах 2 и 3 представлены результаты формирования эмульсий механическими способами при интенсивном перемешивании и ультразвуком. В ряде случаев, при нехватке формирования устойчивости эмульсии за счет содержащихся примесей белка, в систему можно вводить дополнительно 1 % эмульгатора, например, карбоксиметилцеллюлозы. Во всех случаях наиболее эффективное диспергирование достигалось за счет использования ультразвука. Было целесообразно обрабатывать жиры ультразвуком с частотой 25 кГц в течение 15...20 минут.

Выход продукта для эмульгированной системы с частицами менее 2 мкм оказывался в 1,5...3 раза выше при прочих равных условиях по сравнению с проведением аналогичного процесса с частицами капель жира размером более 2...10 мкм.

Естественное состояние жировых компонентов природного сырья, в том числе и отходы от их промышленной переработки включает комплекс нативных жирных кислот, однако их состав и соотношения в ряде случаев целесообразно подвергать принудительной корректировке. Для изменения липидного статуса животного жира процесс обработки проводили в присутствии 20 % добавки рыбьего жира. В таких жирах содержание кислот семейства  $\omega 3$  максимально по сравнению с другими видами природного сырья (г/100 г): C18:3n3 0,5...2,0; C20:3n3 0,5...3,0; C20:5n3 0,7...1,0; C22:6n3 5,0...20,5.

Общую схему переработки жировых отходов мясокомбинатов в панкреатический гидролизат, а также, при необходимости низкокачественных животных жиров, можно представить в виде следующей последовательности: сырье (жиродержащие отходы) >> диспергирование и обработка ультразвуком >> получение эмульсии жировых отходов >> гидролиз панкреатической липазой в условиях: температура 60°C, pH 5,0, начальная концентрация субстрата 200 г/л, начальная активность 500 ЕД/л, предварительная инкубация с ферментом 20 мин >> ферментативный гидролизат, содержащий глицерин и высшие жирные кислоты с измененным жирнокислотным составом.

В животных жирах обычно можно идентифицировать следующие жирные кислоты (ЖК, %): сумма жирных кислот ( $\Sigma$  ЖК) — 96,3; насыщенные (НЖК) — 42,8, в том числе: C4:0 (масляная) 0,1...1, C6:0 (капроновая) 0,05...0,1, C8:0 (каприловая) 0,1...1,4, C10:0 (каприновая) 0,1...1,3, C12:0 (лауриновая) 0,2...2,0, C14:0 (миристиновая) 0,8...1,6, C15:0 (пентадекановая) 0,04...1,1, C16:0 (пальмитиновая) ) 25,0...29,1, C17:0 (гептадекановая) 0,1...1,0, C18:0 (стеариновая) 13,8...18,2, C19:0 (нондекановая) 0,1...2,3, C20:0 (эйкозановая) 0,1...0,4, C22:0 (бегеновая) 0,3...0,55; мононенасыщенные (МНЖК) 41,9, в том числе: C14:1 (миристолеиновая) 0,01...0,5, C15:1 (цис-10-пентадеценная) 0,1...2,2, C16:1 (пальмитолеиновая) 1,7...2,5, C17:1 (цис-10-гептаде-

ценная) 0,5...3,3, C18:1n9c (цис-9-олеиновая) 30,0...44,5, C18:1n9t (транс-9-элаидовая) 0,1...2,2, C20:1 (цис-11-эйкозеновая) 0,5...1,5, C22:1n9 (эруковая) 0,1...1,5; полиненасыщенные (ПНЖК) 11,6, в том числе: C18:2n6c (линолевая) 7,2...9,6, C18:3n6 (γ-линоленовая) 0,5...2,0, C18:3n3 (α-линоленовая) 0,3...1,0, C20:2 (цис-11,14-эйкозадиеновая) 0,1...1,5, C20:3n6 (цис-8,11,14-эйкозатриеновая) 0,1...2,4, C20:4 (арахидоновая) 0,5...2,0, C22:2 (цис-13,16,17-докозадиеновая) 0,1...2,0, C22:6 (цис-4,7,10,13,16,19-докозагексаеновая) 0,1...1,5. В скобках указан диапазон значений содержания отдельных кислот для сырья разных партий.

Жирнокислотный состав исходного исследованного жирового отхода преимущественно содержал насыщенные жирные кислоты с соотношением насыщенных, мононенасыщенных и полиненасыщенных кислот НЖК : МНЖК : ПНЖК более 60 : 35 : 5. Из такого сырья гидролитическим методом сложно получить качественные липидные продукты (Gasco et al., 2020).

Для производства жировых продуктов с выгодным соотношением ненасыщенных жирных кислот и высоким индексом  $\omega 3/\omega 6$  ферментативную обработку целесообразно проводить в присутствии других жиров, богатых полиненасыщенными кислотами группы ПНЖК, что и было проделано.

Введение в гидролизуемую смесь отходов животноводства до 50 % жирового сырья с повышенным содержанием кислот  $\omega 3$  практически не изменяло кинетику процесса под влиянием липаз. Как следует из данных Рисунка 2, процесс гидролиза жиров завершался за 8 ч более чем на 80...90 % с высвобождением всех свободных жирных кислот, связанных в жировом субстрате.

Полученный продукт из жировых отходов предполагалось использовать для кормления продуктивных животных. Процесс гидролиза сырья целесообразно перевести в режим переэтерификации, завершая его в течение первых 2 часов с достижением 50 %-ной конверсии.

Испытания показали, что в результате получается продукт со сбалансированным жирнокислотным составом, содержащим до 22 г/100 г всех свободных жирных кислот.

Основной жирнокислотный состав переэтерифицированного продукта из жировых отходов включал (%): C4:0  $0,04 \pm 0,02$ ; C6:0  $0,06 \pm 0,02$ ; C8:0  $0,16 \pm 0,04$ ; C10:0  $0,14 \pm 0,05$ ; C12:0  $0,18 \pm 0,06$ ; C14:0  $0,71 \pm 0,25$ ; C15:0  $0,06 \pm 0,03$ ; C16:0  $22,5 \pm 3,09$ ; C17:0  $1,22 \pm 0,26$ ; C18:0  $16,1 \pm 1,89$ ; C19:0  $1,4 \pm 0,6$ ; C20:0  $0,16 \pm 0,05$ ; C22:0  $1,74 \pm 0,31$ ; C14:1  $0,04 \pm 0,02$ ; C15:1  $0,15 \pm 0,04$ ; C16:1  $4,4 \pm 0,5$ ; C17:1  $0,5 \pm 0,2$ ; C18:1n9c  $28,2 \pm 2,4$ ; C18:1n9t  $1,2 \pm 0,4$ ; C20:1  $0,7 \pm 0,2$ ; C22:1n9  $0,45 \pm 0,06$ ; C18:2n6c  $4,4 \pm 0,4$ ; C18:3n6  $0,4 \pm 0,1$ ; C18:3n3  $0,5 \pm 0,2$ ; C20:2  $4 \pm 0,2$ ; C20:3n6  $0,5 \pm 0,1$ ; C20:4  $1,6 \pm 0,17$ ; C22:2  $0,5 \pm 0,2$ ; C20:5n3  $0,6 \pm 0,2$ ; C22:6  $1,3 \pm 0,2$ . Полученный продукт имел рН 4,5...4,8; сухой остаток 35...40%; вязкость при 60 °C, 7...9 мПа·с; содержание глицерина 10...13%.

В литературе отмечалось, что присутствие в питательных системах компонентов морского происхождения может носить отрицательный характер из-за неблагоприятной вкусовой гаммы (Simonini et al., 2021).

В нашем случае проведение панкреатической переработки жировых отходов, позволило получить продукт, не только содержащий все необходимые для организма млекопитающих жирные кислоты с повышенным содержанием  $\omega 3$  жирных кислот, но и в том числе свободные короткие жирные кислоты с привлекательными свойствами — капроновая и каприловая в количествах 0,03...0,06%. Минимальная пороговая концентрация вкусового восприятия этих алифатических кислот составляет менее 5 мг/л, что повышает привлекательность продукта в случае его использования в составе животного корма, как отмечено в работе (Banaszak et al., 2020). Испытания показали, что их присутствие в питательном рационе, в частности свиней, вызывает повышенное потребление кормов. Наличие глицерина в составе полученного продукта со сладким вкусом также способствует привлекательности животного корма.

Полученные данные по скорректированному жирнокислотному составу позволяют их интерпретировать как подтверждение возможности получения липидных жировых композиций с повышенным содержанием важных эссенциальных жирных кислот при использовании низкокачественного жирового сырья. Это означает, что переработка комбинированных жировых смесей в при-

сутствии ферментов позволяет вводить в оборот ранее мало или практически неиспользуемые жироросодержащие отходы.

Подходы к эффективному осуществлению процесса переэтерификации жиров высказывались нами ранее (Neklyudov et al., 2008; Бабурина и соавт., 2015; Baburina et al., 2015). В данной работе была экспериментально подтверждена техническая возможность получения биотрансформированных жировых продуктов из животного сырья. Аналогичные подходы были реализованы в последних работах некоторых исследователей (Duan, 2023; Fan, 2023; Huang, 2023).

Ограниченное влияние некоторых примесей, прежде всего белков, не позволяют выявить полностью достоверную картину их влияния на кинетические характеристики описанных процессов, поскольку жировые отходы различных мясокомбинатов существенно различаются. В этом случае состав получаемых продуктов может отличаться, однако общие основные соотношения жирных кислот зависят в основном от массового соотношения трансформируемого и добавляемого жирового сырья, что приводит к получению примерно тех скорректированных по составу жирных кислот продуктов, которые описаны в статье.

Использованная методология позволяет в целом корректировать естественный липидный статус пищевых животных жиров, повышая в них содержание полезных  $\omega 3$  жирных кислот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы был выработан подход к созданию методологии переработки отходов мясоперерабатывающих предприятий в полноценные биохимические добавки, а также, при необходимости, корректировки состава эссенциальных жирных кислот в промышленных животных жирах для повышения их биологической ценности. Основными ограничениями данного исследования являются невозможность осуществления анализа различных видов бросового жирового сырья, поскольку на предприятиях не осуществляется их раздельный сбор.



Полученные результаты исследования могут быть использованы для создания новых высокоэффективных питательных систем, а реализация работы может позволить существенно улучшить методологию получения жировых ингредиентов для расширения кормовой базы сельскохозяйственных животных.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на использование методологии для получения липидных компонентов из жиров иного филогенетического происхождения.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Алексей Николаевич Веревкин:** концептуализация, написание-рецензирование и редактирование рукописи

**Андрей Николаевич Иванкин:** концептуализация, написание-рецензирование и редактирование рукописи

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

**Alexey N. Verevkin:** conceptualization, writing-review and editing of the manuscript

**Andrey N. Ivankin:** conceptualization, writing-review and editing of the manuscript

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Бабурина, М.И., Иванкин, А.Н., & Красноштанова А. А. (2015). Биотрансформация жировых отходов как метод прижизненного формирования качества мясного сырья путем применения аттрактивных кормов. *Все о мясе*, (4), 44–48.
- Baburina, M. I., Ivankin, A. N., & Krasnoshtanova A. A. (2015). Biotransformation of fat waste as a method of intravital formation of the quality of raw meat through the use of attractive feed. *All About Meat*, (4), 44–48 (In Russ).
- Иванкин, А. Н., Олиференко, Г. Л., & Куликовский, А. В. (2021). *Аналитическая химия*. Москва: Кнорус.
- Ivankin, A. N., Olfierenko, G. L., Kulikovskiy, A. V. (2021). *Analytical chemistry*. Moscow: Knorus. (In Russ).
- Ates, S., Keles, G., Demirci, U., Dogan, S., Kirbas, M., Filley, S. J., & Parker, N. B. (2020). The effects of feeding system and breed on the performance and meat quality of weaned lambs. *Small Ruminant Research*, 192, Article 106225. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2020.106225>
- Banaszak, M., Kuzniacka, J., Biesek, J., Maijano, G., & Adamski, M. (2020). Meat quality traits and fatty acid composition of breast muscles from ducks fed with yellow lupin. *Animal*, 14(9), 1969–1975. <https://doi.org/10.1017/S1751731120000610>
- Bikker, P., & Jansman, A. J. M. (2023). Review: Composition and utilisation of feed by monogastric animals in the context of circular food production systems. *Animal*, 17(7), Article 100892. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100892>
- Budak, D., Taşdemir, U., Avdatek, F., & Yeni, D. (2023). The effects of long-chain fatty acids supplemented to rations during the transition and early lactation periods on reproductive performance in Simmental cattle with low estrus signs. *Livestock Science*, 278(12), Article 105371. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2023.105371>
- Bures, D., Needham, T., Barton, L., Lebedova, N., Kotrba, R., Rehak, D., Kucerovala, I., Kloucek, P., & Hoffman, L. C. Consumer acceptance and quality of game meat “droewors” sausages with different levels of added fat. *Meat Science*, 210(4), Article 109424. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109424>
- Bychkova, E., Rozhdestvenskaya, L., Podgorbunskikh, E., & Kudachyova, P. (2023). The problems and prospects of developing food products from high-protein raw materials. *Food Bioscience*, 56(12), Article 103286. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103286>
- Chantakun, K., Nilsuwan, K., Tagrida, M., Sumpavapol, P., & Benjakul, S. (2022). Tender coconut water fortified with edible bird's nest protein hydrolysate subjected to sterilization and high hydrolytic pressure processes: Qualities, acceptability and changes during refrigerated storage. *Food Control*, 140(10), Article 109116. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109116>
- Diaz, J. H., Warren, R. J., & Osterm M. J. (2020). The disease ecology, epidemiology, clinical manifestations and management of trichinellosis linked to consumption of wild animal meat. *Wilderness & Environmental Medicine*, 31(2), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.wem.2019.12.003>
- De Caro, J., Sias B., Grandval, P., Ferrato, F., Halimi, H., Carriere, F., & De Caro, A. (2014). Characterization of pancreatic lipase-related protein 2 isolated from human pancreatic juice. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Proteins and Proteomics*, 1701(9), 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2004.06.005>



- Duan, Z., Quan, X., Chen, M., Shi, H., Wang, Z., Li, X., & Qiao, Y. (2023). Compositional characteristics and indication of n-fatty acids in alpine meadow plants and soils. *Biochemical Systematics and Ecology*, 107(4), Article 104613. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104613>
- Fan, Z., & Jia, W. (2023). Long short-term memory based quasi-targeted lipidomics reveals propane-1,2-diol expediting the digestion of lipids via mediating the  $\alpha$ -helices to a random curl or  $\beta$  folding of lipase. *Food Research International*, 173(11), Article 113411. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113411>
- Gasco, L., Biancarosa, I., & Liland, N. S. (2020). From waste to feed: A review of recent knowledge on insects as producers of protein and fat for animal feeds. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 23, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.03.003>
- Gillespie, J. (2023). Feed rations fed by US dairy producers. *Journal of Dairy Science*, 106(11), 8152–8168. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23363>
- Huang, Y., Li, H., Wang, Z., Fu, Y., Chen, Y., & Wang, X. (2023). Enzymatic synthesis of branched chain fatty acid-enriched structured triacylglycerols via esterification with glycerol. *Food Chemistry*, 429(15), Article 136943. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136943>
- Huuskonen, A., Hietala, S., Hyvonen, J., Leinonen, I., & Manni, K. (2023). Environmental impacts and animal performance of finishing bulls fed different silage-based total mixed rations. *Livestock Science*, 286(2), Article 105166. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2023.105166>
- Kashi, S., Satari, B., Lundin, M., Horvath, I. S., & Othman, M. (2017). Application of a mixture design to identify the effects of substrates ratios and interactions on anaerobic co-digestion of municipal sludge, grease trap waste, and meat processing waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6156–6164. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.045>
- Katan, T., Caballero-Solares, A., Taylor, R. G., Rise, M. L., & Parrish, C. C. (2019). Effect of plant-based diets with varying ratios of  $\omega 6$  to  $\omega 3$  fatty acids on growth performance, tissue composition, fatty acid biosynthesis and lipid-related gene expression in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 30(6), 290–304. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2019.03.004>
- Kim, B. K., & Kim, S. A. (2023). Investigation of microbial ecology of salted seafood based on culture method and metagenome sequencing. *LWT*, 187(9), Article 115275. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115275>
- Kocabas, D. S., Lyne, J., & Ustunol, Z. (2022). Hydrolytic enzymes in the dairy industry: Applications, market and future perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 119(1), 467–475. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.013>
- Land, M., Vanderperren, E., & Raes, K. (2017). The effect of raw material combination on the nutritional composition and stability of four types of autolyzed fish silage. *Animal Feed Science and Technology*, 234(12), 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.10.009>
- Liang, Y., Chen, P., Chen, S., Liu, D., Jiang, F., Zhu, Z., Dong, K., Wei, L., & Hou, X. (2023). A greater ratio of thigh subcutaneous fat to abdominal fat is associated with protection against non-alcoholic fatty liver disease. *JHEP Reports*, 5(7), Article 100730. <https://doi.org/10.1016/j.jhepr.2023.100730>
- Liu, Y., Shen, N., Xin, H., Yu, L., Xu, Q., & Cui, Y. (2023). Unsaturated fatty acids in natural edible resources, a systematic review of classification, resources, biosynthesis, biological activities and application. *Food Bioscience*, 53(6), Article 102790. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102790>
- Lu, Y., Cao, J., Zhou, C., He, J., Sun, Y., Xia, Q., & Pan, D. (2021). The technological and nutritional advantages of emulsified sausages with partial back-fat replacement by succinylated chicken liver protein and pre-emulsified sunflower oil. *LWT*, 149(9), Article 111824. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111824>
- Ma, W., Li, H., Zhang, W., Zhai, J., Li, J., Liu, H., Guo, X.F., & Li, D. (2021). Effect of n-3 polyunsaturated fatty acid supplementation on muscle mass and function with aging. A meta-analysis of randomized controlled trials. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 165(2), Article 102249. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2021.102249>
- Mateos, P.S., Navas, M.B., Morcelle, S.R., Ruscitti, C., Matkovic, S. R., & Briand, L. E. (2021). Insights in the biocatalyzed hydrolysis, esterification and transesterification of waste cooking oil with a vegetable lipase. *Catalysis Today*, 372(7), 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.09.027>
- McQuilken S. A. (2021). The mouth, stomach and intestines. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 22(5), 330–335. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2021.04.001>
- Neklyudov, A. D., Fedotov, G. N., & Ivankin, A. N. (2008). Intensification of composting processes by aerobic microorganisms: a review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 44(1), 6–18. <https://doi.org/10.1134/S000368380801002>
- Nguyen, T. X., McGill, S., Weidt, S., Han, Q. H., Gelemanovic, A., McLaughlin, M., Savoini, G., Eckersall, P. D., & Burchmore, R. (2023). Proteomic changes associated with maternal dietary low  $\omega 6$ : $\omega 3$  ratio in piglets supplemented with seaweed. *Journal of Proteomics*, 270(1), Article 104739. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2022.104739>
- Orzuna-Orzuna, J. F., Hernandez-García, P. A., Chay-Canul, A. J., Galvan, C. D., & Ortiz, P. B. (2023). Microalgae as a dietary additive for lambs: A meta-analysis on growth performance, meat quality, and meat fatty acid profile. *Small Ruminant Research*, 227(10), Article 1070720. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2023.1070720>
- Quaresma, M. A. G., Antunes, I. C., Ferreira, B. G., Parada, A., Elias, A., Barros, M. (2022) The composition of the lipid, protein and mineral fractions of quail breast meat obtained from wild and farmed specimens of Common quail (*Coturnix coturnix*) and farmed Japanese quail (*Coturnix japonica domestica*). *Poultry Science*, 101(1), Article 101505. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101505>
- Salami, S.A., Luciano, G., Biondi, L., Newbold, C. J., Kerry, J. P., & Priolo A. (2019). Sustainability of feeding plant by-

- products: A review of the implications for ruminant meat production. *Animal Feed Science and Technology*, 251, 37–55. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.02.006>
- Simonini, R., Maggioni, F., Zanetti, F., Fai, S., Forti, L., Prevedelli, D., & Righia, S. (2021). Synergy between mechanical injury and toxins triggers the urticating system of marine fireworms. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 534(3), 151487. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2020.15148731>.
- Short, C. A., & Hahn, D. A. (2023). Review. Fat enough for the winter? Does nutritional status affect diapause? *Journal of Insect Physiology*, 145(3), Article 104488. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2023.104488>
- Shurson, G. C., Dierenfeld, E. S., & Dou, Z. (2023). Review. Rules are meant to be broken — Rethinking the regulations on the use of food waste as animal feed. Resources, *Conservation and Recycling*, 199(12), Article 107273. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107273>
- Sun, Y., Xiao, Y., Li, C., Yang, J., Yang, S., Yang, B., & Huang, L. (2022). A parallel survey on the fatty acid composition in backfat and longissimus lumborum and comparison of their associations with growth and carcass traits in pigs. *Livestock Science*, 263(9), Article 104984. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104984>
- Tejeda, J. F., Hernandez-Matamoros, A., & Gonzalez, E. (2023). Characteristics, lipogenic enzyme activity, and fatty acid composition of muscles in the Iberian pig: Effects of protein restriction and free-range feeding. *Livestock Science*, 267(1), Article 105142. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105142>
- Verevkin, S. P., Pimerzin, A. A., Glotov, F. P., & Vutolkina, A. V. (2022). Biofuels energetics: Reconciliation of calorific values of fatty acids methyl esters with help of complementary measurements and structure–property relationships. *Fuel*, 329(1), Article 125460. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125460>
- Xiaoyan, C., Zhongyong, G., Qiuli, F., Long, L., Xiajing, L., Yibing, W., Shouqun, J., & Zongyong, J. (2019). Effects of dietary perilla seed oil supplementation on lipid metabolism, meat quality, and fatty acid profiles in Yellow-feathered chickens. *Poultry Science*, 98(11), 5714–5723. <https://doi.org/10.3382/ps/pez358>
- Yang, M., Tao, L., Kang, X. R., Wang, Z. L., Su, L. Y., Li, L. F., Gu, F., Zhao, C. C., Sheng, J., & Tian, Y. (2023). Leaves as new raw food material: A review of its nutritional composition, functional properties, and comprehensive application. *Trends in Food Science & Technology*, 138(8), 399–416. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.05.013>
- Zapata, J., Gallardo, A., Romero, C., Valenzuela, R., Garcia-Diaz, D. F., Duarte, L., Bustamante, B., Gasaly, N., Gotteland, M., & Echeverria, F. (2022). n-3 polyunsaturated fatty acids in the regulation of adipose tissue browning and thermogenesis in obesity. Potential relationship with gut microbiota. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 177(2), Article 102388. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2021.102388>
- Zhang, W., Hu, W., Zhu, Q., Niu, M., An, N., Feng, Y., Kawamura, K., & Fu, P. (2024). Hydroxy fatty acids in the surface Earth system. *Science of The Total Environment*, 906(1), Article 167358. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167358>
- Zupancic, J., Kushwah, V., & Paudel, A. (2023). Pancreatic lipase digestion: The forgotten barrier in oral administration of lipid-based delivery systems. *Journal of Controlled Release*, 362(10), 381–395. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2023.08.024>