

## ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ, ОБЗОРЫ

---

УДК 636.4.082.265:612.12.128

DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2025.3.5-22

### СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПИТАТЕЛЬНАЯ ЦЕННОСТЬ ЖИРОВЫХ ДОБАВОК ДЛЯ СВИНЕЙ: ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ (обзор)

Родионова О.Н.

*ВНИИ физиологии, биохимии и питания животных – филиал ФИЦ  
животноводства – ВИЖ им. Л.К. Эрнста, Боровск Калужской области*

Проблема разработки эффективных жировых добавок для молодняка современных высокопродуктивных пород и линий свиней осложняется трудностями изучения механизмов физико-химических трансформаций липидных комплексов, которые происходят в просвете кишечника и в процессе их всасывания. Решение проблемы осложняется наличием широкого спектра различий по составу и качеству в источниках жировых добавок для свиней. В связи с этим возникает необходимость в более глубоком изучении влияния химического состава липидов на их переваривание и метаболизм. Результаты изучения физиологических механизмов этих процессов и роли факторов, влияющих на усвоение жировых добавок, позволяют разработать способы повышения эффективности использования липидов. Основные разделы обзора: общая классификация липидов; переваривание и усвоение липидов; питательная ценность жиров и масел в рационах свиней; жирные кислоты в питании свиней; влияние уровня окисленности жиров и масел на их усвоение. Более тщательная оценка факторов, влияющих на физиологические эффекты липидных добавок в рационах свиней, требуется в связи с современными достижениями в области исследования процессов переваривания липидов, их метаболизма после всасывания, процессов клеточного деления, иммунной функции и метаболического стресса у продуктивных животных. В целом, для разработки эффективных жировых добавок и их применения в свиноводстве необходимо проведение дальнейших исследований по изучению физико-химических свойств липидных комплексов и физиологических эффектов их действия в просвете кишечника, в процессах всасывания и метаболизма.

*Ключевые слова: свиньи, липиды, жирные кислоты, жиры и масла, пищевая ценность, переваривание, усвоение, метаболизм, продуктивность.*

*Проблемы биологии продуктивных животных. 2025. 3: 5-22.*

#### **Введение**

Жиры являются концентрированным источником энергии; при переваривании клетчатки даже с использованием экзогенных ферментов выделяется меньше энергии, чем при переваривании жиров (Noblet, Shi, 1993). Увеличение количества жира, добавленного в рацион свиней, повышает доступность энергии для роста, поддержания жизнедеятельности и репродуктивной функции. Дополнительный жир также замедляет прохождение корма через пищеварительный тракт, что позволяет лучше переваривать и усваивать другие питательные вещества (Kim et al., 2007; Walleans et al., 2021). В связи с колебаниями цен на сырьё,

специалисты по кормлению всё больше интересуются тем, как максимально увеличить доступность энергии из жиров и масел, чтобы обеспечить высокие показатели продуктивности быстрорастущих и сверхплодовитых свиней (Mendoza, van Heugten, 2014; Walleans et al., 2021).

Для производства кормов используется широкий спектр жиров и масел, в том числе побочные продукты переработки, растительные масла, кислотные мыльные растворы и гидрогенизированные жиры. Основными компонентами жиров и масел являются триглицериды (триацилглицеролы). В отличие от животных жиров или растительных масел, другие источники липидов, используемые в рационах животных, такие как кислотные мыльные растворы, могут на 90% состоять из свободных жирных кислот (СЖК). Однако, даже в составе одного кормового источника, жиры и масла сильно различаются по составу, окислительному статусу и вкусовым качествам (Thng et al., 2020; Varona et al., 2021; Wealleans et al., 2021; Nur Mahendra et al., 2023). Кроме того, известно, что наличие продуктов первичного окисления может негативно влиять на эффективность корма и, как следствие, на продуктивность животных (Cabel et al., 1988; Walleans et al., 2021). Такая вариативность состава может привести к дополнительным сложностям при попытках оценки эффективности переваривания и усвоения питательных веществ с относительно сложным химическим составом.

Очевидно, что процесс переваривания жиров не изолирован от других пищеварительных процессов в кишечнике, и существует множество взаимодействий, влияющих на усвояемость жиров. Например, было установлено, что при повышении уровня пищевых волокон в рационе снижается усвояемость жиров (Urriola et al., 2012). Возможно, это связано с тем, что питательные вещества в кормах образуют комплексы с различными связями с белком, жиром, клетчаткой и другими сложными углеводами (Bedford, Schulze, 1998). Напротив, было показано, что усвояемость аминокислот повышается с увеличением количества добавленного жира (Li, Sauer, 1994). Поэтому изучение процессов переваривания и усвоения жиров, а также факторов, на них влияющих, представляет большой интерес для исследователей. Несмотря на их важность в составлении рационов, жиры и масла являются наименее изученным ингредиентом кормов (Kerr et al., 2015; Ravindran et al., 2016; Walleans et al., 2021).

Цель обзора – систематизация и обобщение факторов, влияющих на перевариваемость и усвоение жиров, с целью последующей разработки концепций и стратегий улучшения использования липидов в рационах свиней.

### **Общая классификация липидов.**

Липиды – группа структурно разнообразных соединений, нерастворимых в воде и растворимых в органических растворителях. Липиды содержат углеводородные цепи или кольца, которые являются основной частью их химической структуры. Основными типами углеводов являются жирные кислоты (ЖК) и стероиды. Жирные кислоты – линейные алифатические монокарбоновые кислоты  $[R-(CH_2)_nCOO^-]$ , которые почти всегда содержат чётное количество атомов углерода. Ненасыщенные ЖК могут содержать одну или несколько цис-двойных связей. В природе не встречаются липиды с сопряжёнными двойными связями, за исключением сопряжённой линолевой кислоты. Кроме того, в природе очень мало «транс»-жиров, но некоторые «транс»-жиры могут образовываться в результате процессов гидрирования, которые происходят в рубце и при промышленной переработке (Kerr et al., 2015).

Существует ряд соглашений о наименовании отдельных ЖК, в том числе тривиальные названия, систематические названия, а также описание по количеству атомов

углерода в цепи ЖК с последующим указанием количества двойных связей (Kerr et al., 2015). Расположение двойных связей в ЖК также подчиняется двум различным системам классификации. Международный союз теоретической и прикладной химии классифицирует липиды по положению двойной связи относительно карбоксильного углерода (например, линолевая кислота –  $\Delta 9,12-18:2$  или цис, цис- $9,12-18:2$ ). Другая система классификации основана на положении двойных связей относительно метильного конца жирной кислоты и использует либо систему обозначений  $\omega$  (омега), либо систему обозначений n- («n-минус»), где  $\omega$  или n- обозначает количество атомов углерода от метильного углерода в качестве позиции 1. Таким образом, в этой системе линолевая кислота определяется как  $18:2 \omega 6$  или  $18:2 n-6$ . В системе обозначений  $\omega$  или n- существует три основных семейства природных жирных кислот в зависимости от положения первой двойной связи. Наиболее распространёнными являются серии  $\omega 3$ ,  $\omega 6$  и  $\omega 9$  (n-3, n-6 и n-9 соответственно). Три жирные кислоты  $\omega 3$ , представляющие большой пищевой интерес – это  $\alpha$ -линоленовая кислота ( $18:3$ ), эйкозапентаеновая кислота ( $20:5$  или EPA) и докозагексаеновая кислотой ( $22:6$  или DHA). Эти три  $\omega 3$  ЖК необходимы для нормального роста, и они связаны со здоровьем сердечно-сосудистой системы, уменьшением воспаления и нормальным развитием мозга, глаз и нервов (Gogus, Smith, 2010; Siriwardhana et al., 2012; Kerr. et al., 2015). Двумя омега-6 ЖК, представляющими наибольший пищевой интерес, являются линолевая ( $18:2$ ) и арахидоновая ( $20:4$ ) кислоты; они превращаются в омега-6 эйкозаноиды (Das, 2006). Две жирные кислоты  $\omega 9$ , которым уделяется больше всего внимания – это олеиновая ( $18:1$ ) и эруковая ( $22:1$ ) кислоты. Олеиновая кислота содержится в больших количествах в оливковом масле и других мононенасыщенных липидах, а эруковая кислота ассоциируется с повреждениями сердца у крыс и снижением набора массы тела у сельскохозяйственных животных (Kerr. et al., 2015). В отличие от  $\omega 3$ - и  $\omega 6$ -жирных кислот,  $\omega 9$ -жирные кислоты не классифицируются как незаменимые, поскольку их можно получить из ненасыщенных жирных кислот, а из-за отсутствия двойной связи  $\omega 6$  они не играют важной роли в образовании эйкозаноидов. Несмотря на то, что у свиней трудно выявить явные признаки дефицита незаменимых жирных кислот (National Research Council. NRC Nutrient Requirements of Swine. 11th ed. Washington: National Academies Press, 2012), в последние годы возродился интерес к изучению влияния уровня и соотношения этих жирных кислот в питании людей и продуктивных животных (Shibabaw, 2021; Bromm et al., 2023; Wang et al., 2024; Zhang et al., 2024).

В качестве подгруппы липидов термины «жир» и «масло» часто ошибочно используются как взаимозаменяемые. Технически, термин «масло» обычно используется для обозначения липидов, которые являются жидкими при комнатной температуре и имеют растительное происхождение, а термин «жир» относится к липидам, которые обычно являются твёрдыми при комнатной температуре и имеют животное происхождение. Например, температура плавления льняного, соевого и подсолнечного масел составляет от -17 до  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура плавления кукурузного, рапсового и оливкового масел составляет от  $-5$  до  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В отличие от него, температура плавления куриного жира составляет примерно  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура плавления сала и смальца – от  $35$  до  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако разделение липидов по температуре плавления не всегда последовательно: кокосовое и пальмовое масла называют исключительно по их растительному происхождению, а не по физическим свойствам, поскольку температура плавления этих масел составляет от  $25$  до  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Большинство липидов состоит из. Стерины имеют высокую температуру плавления, они бесцветны и в некоторой степени инертны и составляют незначительную долю в природных липидах. Большая часть неомыляемых веществ, присутствующих в липидах, состоит из стеринов, при этом холестерин является основным компонентом стеринов в

животных жирах и рыбьем жире. Стерины также содержатся в растительных маслах, но лишь в незначительных количествах. Воски – это сложные эфиры жирных спиртов и жирных кислот с высокой температурой плавления, которые обычно имеют длину цепи 8 атомов углерода или больше и плохо растворяются в маслах. Воски имеют свойство затвердевать со временем, придавая маслу мутный вид, образуя неприглядные нити или слой затвердевшего материала. Фосфолипиды (которые производители масел называют фосфатидами) состоят из многоатомных спиртов, этерифицированных жирными кислотами и фосфорной кислотой, которые далее соединяются с азотсодержащими соединениями. Два фосфолипиды, обычно содержащиеся в растительных маслах, – это лецитины и цефалины. Токоферолы и токотриенолы также содержатся в растительных липидах и считаются натуральными антиоксидантами. Токоферолы имеют насыщенную боковую цепь, а токотриенолы – ненасыщенную боковую цепь, в результате токоферолы содержат больше витамина Е и обладают более высокой антиоксидантной активностью, чем токотриенолы. Фосфолипиды в сочетании с небольшим количеством углеводов и смол обычно называют камедями (Kerr et al., 2015).

Анализ содержания липидов в кормах, рационе, пищеварительном тракте или фекалиях проводится несколькими методами, которые различаются по типу растворителя (эфир, гексан или хлороформ), времени экстракции, температуре, давлению и влажности образца. Методы экстракции сырого жира обычно не позволяют полностью извлечь жирные кислоты, особенно если они связаны с углеводами или белками или присутствуют в виде солей двухвалентных катионов (Palmquist, Jenkins, 2003). Считается, что экстракция липидов с использованием кислотного гидролиза устраняет этот недостаток за счёт отщепления жирных кислот от три-, ди- и моноацилглицеролов, липидно-углеводных связей, липидно-белковых связей и фосфолипидов, что приводит к более полной экстракции. Таким образом, концентрация липидов в кормах, рационах, химусе или фекалиях обычно выше при использовании кислотного гидролиза, чем при экстракции сырого жира (National Research Council. NRC Nutrient Requirements of Swine. 11th ed. Washington: National Academies Press, 2012), хотя это не всегда так (Kerr et al., 2015). Метод экстракции жира и используемый растворитель также могут влиять на переваримость липидов в рационе или кормовом сырье. Выбор подходящего лабораторного метода необходим для точного определения состава липидов, а также для того, чтобы убедиться, что липидный продукт соответствует нормативным документам. При этом они практически не дают информации о степени перекисного окисления липидов и относительной питательной ценности (Shurson et al., 2015).

### **Переваривание и усвоение липидов.**

Переваривание пищевых липидов начинается со слюноотделения, пережёвывания корма и высвобождения липазы языка в концентрации 2-52 ед/л в ротовой полости (Akhtar et al., 2018). Высвободившись из серозных желёз языка, липаза гидролизует свободную жирную кислоту в структуре триацилглицерола в положении sn-3 («sn» относится к стереохимической нумерации глицеринового остова) в процессе перехода в желудок (Hamosh, 1990). Как только переваренная пища попадает в желудок, желудочная липаза продолжает гидролиз пищевых липидов, высвобождая, в основном, короткоцепочечные жирные кислоты, которые были этерифицированы как часть триацилглицерола (Hamosh, 1990). У новорожденных поросят активность лингвальной и панкреатической липазы может присутствовать при аналогичном или более высоком уровне активности, в сравнении с желудочной липазой (Dicklin et al., 2006; Wealleans et al., 2021), хотя биологическая значимость лингвальной липазы снижается по мере роста и развития свиней (Moreau et al., 1988). Сообщалось о наличии общей эстеразы – фермента, похожего на липазу, который специфически гидролизует водонерастворимые

длинноцепочечные триацилглицеролы с уровнем активности 75-324 ед/л в слюне у свиной (Tecles et al., 2017). Эти ферменты далее смешиваются с кормом посредством шлифовального действия зубов, при этом одновременно высвобождаются триглицеролы из матрицы корма и запускается процесс их эмульгирования.

В желудочной фазе первичный гидролиз триглицеролов происходит до диглицеролов и свободных жирных кислот; последующий гидролиз диглицеролов на этой стадии можно считать незначительным (Lairon et al., 1980; Lairon, 2009); далее начинается прямое всасывание короткоцепочечных свободных жирных кислот (Yan et al., 2014). Высвобождение и всасывание этих кислот являются основным триггером гормональных каскадов, включая реакцию холецистокинина (ССК), которая контролирует состояние сытости и голода (Little et al., 2007; Barakat et al., 2024). У людей желудочные липазы обеспечивают до 40% общего переваривания липидов (Armand, 2007), но свиные желудочные липазы необратимо инактивируются при pH 4 (Moreau et al., 1988; Wealleans et al., 2021).

Несмотря на действие слюнных и желудочных липаз, большая часть потребляемого жира всасывается в тонком кишечнике, при этом у свиней более 70% жира, поступающего в двенадцатиперстную кишку, присутствует в виде триглицеролов (Jones, Rideout, 2012). При попадании в водную среду двенадцатиперстной кишки после потребления корма большинство потреблённых жиров в течение часа остаётся ещё не эмульгированным (Wilfart et al., 2007) и присутствует в форме крупных капель. Разнообразные жирорастворимые питательные вещества, такие как витамины и каротиноиды, содержатся внутри этих капель; включение этих питательных веществ в липидные капли, а затем в мицеллярные структуры жизненно важно для их переваривания и всасывания (Wealleans et al., 2021).

Переваривание липидов в тонком кишечнике включает в себя два основных компонента: желчные соли и липазу поджелудочной железы. Желчные соли образуются из холестерина в печени и впоследствии концентрируются и накапливаются в желчном пузыре (Langlois et al., 1990). Высвобождение желчных солей в просвет кишечника происходит при образовании водно-масляной эмульсии и вызвано повышением уровня пептидного гормона холецистокинина (Langlois et al., 1990; Kerr et al., 2015). Хотя соли желчных кислот необходимы для образования мицелл, при попадании в просвет кишечника они сначала подавляют активность липазы поджелудочной железы. Это связано с тем, что соли желчных кислот физически препятствуют контакту липазы поджелудочной железы с липидными каплями в просвете (Kerr et al., 2015). Колипаза устраняет подавление липазы желчными солями, связываясь с липазой поджелудочной железы, которая после этого может прикрепиться к поверхности липидной капли (Kerr et al., 2015). Как только липаза поджелудочной железы прикрепляется к липидной капельке посредством связывания с колипазой, она ферментативно расщепляет эфирную связь триацилглицерола в положениях sn-1 и sn-3 (Borgstrom, Erlanson, 1973). В результате ферментативного гидролиза образуются две свободные жирные кислоты и моноацилглицерол с жирной кислотой, этерифицированной в положении sn-2. Эта ферментативная активность происходит очень быстро и приводит к образованию свободных жирных кислот и моноацилглицеролов быстрее, чем последующее включение в мицеллы (Vandermeers et al., 1974). Фосфолипиды, устойчивые к гидролизу липазой поджелудочной железы, расщепляются фосфолипазой A<sub>2</sub>, которая высвобождает жирные кислоты из sn-2-положения, образуя лизофосфоглицеролы и свободные жирные кислоты (Borgstrom, 1980). Колипаза переносит недавно гидролизованные продукты из липидных капель в просвете кишечника в формирующиеся мицеллы, содержащие соли желчных кислот (Shiau, 1981; Kerr et al., 2015).

Мицеллы образуются под действием солей желчных кислот и фосфолипидов, которые выделяются с желчью из желчного пузыря. Соли желчных кислот имеют полярную

часть, которая обращена к водной среде, и неполярную часть, которая обращена к центру мицеллы. Благодаря определённой ориентации солей желчных кислот и фосфолипидов создаются гидрофобный центр и гидрофильные края для конгломерата мицелл (Kerr et al., 2015). Имеются данные о том, что мицеллы обладают более высоким сродством к полиненасыщенным жирным кислотам (ПНЖК) и насыщенным моноацилглицеролам (Bracco, 1994). После образования смешанной мицеллы, она перемещается в просвете кишечника в неподвижный водный слой рядом с апикальной мембраной энтероцита (Kerr et al., 2015). Образование мицеллы решает проблему гидрофобности липидов, поступающих с пищей, в водной среде просвета кишечника (Shiau, 1981). Это позволяет липидам в составе смешанной мицеллы легко проходить через неподвижный слой воды, а также увеличивает концентрацию свободных жирных кислот, моноацилглицеролов и других липидов вблизи абсорбирующей поверхности энтероцитов в 100-1000 раз (Westergaard, Dietschy, 1976; Kerr et al., 2015).

Благодаря градиенту, созданному путём концентрирования липидов в мицеллах, липидные компоненты могут пассивно диффундировать в энтероцит посредством независимого от энергии процесса. Также есть доказательства того, что при низкой концентрации липидов в просвете кишечника процесс прохождения через липидный бислой энтероцита зависит от переносчика (Chow, Hollander, 1979). Этот двойной механизм поглощения липидов был теоретически предложен для поддержания необходимого уровня незаменимых жирных кислот при низком потреблении липидов с пищей, но неизвестно, важен ли перенос липидов с помощью переносчиков при нормальном или высоком потреблении липидов с пищей (Kindel et al., 2010). Мицеллы поддерживают равновесие с другими мицеллами благодаря перемешиванию в просвете кишечника, что обеспечивает почти непрерывный контакт между эпителием, мицеллами и липидными каплями (Kerr et al., 2015). Такая высокая степень контакта разделяет липидные компоненты между более и менее заполненными мицеллами. Такое разделение приводит к тому, что мицеллы равномерно поглощают и распределяют липидные компоненты, что в конечном итоге означает, что лимитирующим фактором переваривания липидов в просвете тонкого кишечника является насыщение мицелл (Kerr et al., 2015). Перенос липидных компонентов из мицелл через неподвижный слой воды представляет собой цепную реакцию, которая зависит от концентрации липидов в энтероцитах (Kindel et al., 2010). Кишечные белки, связывающие жирные кислоты, увеличивают поглощение жирных кислот, связываясь со свободными жирными кислотами и удерживая их вблизи апикальной мембраны (Stremmel et al., 2001). Соли желчных кислот эффективно перерабатываются путем всасывания в нижней части подвздошной кишки и транспортируются обратно в печень для повторного использования в процессе последующего переваривания липидов (Martinez-Augustin et al., 2008).

После прохождения в энтероцит жирные кислоты переэтерифицируются в эндоплазматическом ретикулуме по пути глицерол-3-фосфата или моноацилглицерола. После переэтерификации в триацилглицерол несколько молекул триглицеролов и эфиров холестерина упаковываются в хиломикрон (Sabesin, Frase, 1977). Хиломикроны содержат от 80 до 95 % триглицеролов, от 2 до 7 % холестерина и от 3 до 9 % фосфолипидов (Kerr et al., 2015). Снаружи хиломикроны покрыты двойным слоем фосфолипидов и аполипопротеинов, которые повышают растворимость и ферментативное распознавание (Shiau, 1981). Затем хиломикроны попадают в кровеносную систему через лимфатическую систему в грудном протоке (Shiau, 1981).

Как только хиломикроны попадают в кровоток, они могут накапливаться в адипоцитах или окисляться в мышечных волокнах и других клетках (Kerr et al., 2015). Если уровень инсулина и других анаболических гормонов повышен, хиломикроны направляются

в адипоциты для накопления (Wang, Eckel, 2009). Этот процесс регулируется стимулирующим действием инсулина на липопротеинлипазу адипоцитов, в то время как изоформа липопротеинлипазы в мышечных клетках не стимулируется инсулином (Wang, Eckel, 2009). Многофункциональный фермент липопротеинлипаза экспрессируется также в просвете капилляров жировой ткани для переработки богатых триглицеридами хиломикронов и других липопротеинов (Wang, Eckel, 2009). Жирные кислоты пассивно диффундируют по отдельности, а затем переэтерифицируются для хранения в виде триацилглицеролов в адипоцитах (Kerr et al., 2015).

В отличие от длинноцепочечных триацилглицеролов, которые содержат жирные кислоты с 16-20 атомами углерода, среднецепочечные триацилглицеролы преимущественно содержат насыщенные жирные кислоты с 8 и 10 атомами углерода. После быстрого расщепления этих кислот липазами они становятся хорошо растворимыми в воде и легко всасываются в клетки слизистой оболочки даже при наличии небольшого количества желчных солей и липаз поджелудочной железы, необходимых для образования хиломикронов. Затем эти среднецепочечные ЖК связываются с альбумином и транспортируются по портальной системе в печень и с помощью карнитин-независимого транспорта поступает в митохондрии для последующего окисления (Babayán, 1987; Mu, Ноу, 2004; Kerr et al., 2015).

#### **Питательная ценность жиров и масел в рационе свиней.**

Для повышения энергетической ценности рациона в корма обычно включают в качестве добавки жиры и масла; они могут уменьшать образование пыли, обеспечивать поступление жирорастворимых витаминов и незаменимых жирных кислот, а также улучшать вкусовые качества рациона (Kerr et al., 2015; Wang et al., 2022). Состав липидов, используемых в рационе свиней, может сильно различаться. Липиды, используемые в кормах для животных, значительно различаются по цвету, жирнокислотному составу, содержанию свободных жирных кислот, степени ненасыщенности или насыщенности (йодное число, титр), значению омыления и содержанию примесей, включая влагу, нерастворимые вещества и неомыляемые компоненты (Kerr et al., 2015). Доступны не только «новые» липиды (например, кукурузное масло дистилляторов), но и побочные продукты переработки растительного масла и производства биодизеля, которые можно смешивать с обычно используемыми жирами и маслами, получая множество смесей животного и растительного происхождения.

Кормовые жиры и масла обеспечивают значительное количество энергии в рационе свиней, но их состав, качество, кормовая ценность и цена сильно различаются в зависимости от источника. Энергия является самым дорогим компонентом в рационе свиней, и рекордно высокие затраты на корм в последние годы заставили специалистов сосредоточиться на оптимизации энергетической ценности кормовых ингредиентов, используемых в кормах (Shurson et al., 2015; Рошин, 2022).

Учитывая высокие цены на пищевые масла, для обеспечения полноценного питания необходимо точно оценивать питательную ценность различных источников масел. Источники жиров, используемые в рационах животных, различаются по составу жирных кислот, что может влиять на переваривание, всасывание и метаболическое использование пищевых жиров (Mendoza, van Heugten, 2014; Walleans et al., 2021). В последние годы из-за роста цен на корм наблюдается устойчивый интерес к максимальному использованию дополнительных жиров в рационе, поскольку специалисты стремятся повысить энергетическую ценность рациона, чтобы удовлетворить потребности современных высокопродуктивных свиней (Walleans et al., 2021). Выбор масла для использования в

заданных коммерческих условиях во многом определяется его стоимостью. Сочетание масел с разной степенью насыщенности способствует повышению эффективности использования смешанных масел и может снизить стоимость добавляемого масла (Ravindran et al., 2016). Кроме того, добавление в рацион масла с соответствующей степенью насыщенности может улучшить качество свинины (Tattrakoon et al., 2016; Позднякова, Лушников, 2022).

Степень насыщенности, длина углеродной цепи и позиционное распределение жирных кислот, а также содержание свободных жирных кислот в значительной степени влияют на способность к образованию мицелл, воздействуя на концентрацию смешанных липидных мицелл в просвете кишечника (Walleans et al., 2021). Количество исследований, посвященных изучению влияния отдельных жирных кислот на усвояемость пищевых жиров, немногочисленны.

### **Жирные кислоты в питании свиней.**

Жирнокислотный состав различных источников масла сильно различается, и использование одного источника масла обычно не может удовлетворить потребности животных в жирных кислотах. Например, жирнокислотный состав соевого масла относительно прост: в основном это полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) n-6 и недостаток ПНЖК n-3, среднецепочечных жирных кислот (СЦЖК) и других функционально значимых жирных кислот (Ivanov et al., 2010; Zhang et al., 2024).

Свиноматки часто не получают достаточного количества энергии из корма, и им приходится мобилизовать резервы организма, чтобы поддерживать выработку молока и рост приплода (Holen et al., 2023). Пищевые масла помогают повысить энергетическую ценность рациона для лактирующих свиноматок, увеличить общее потребление энергии, лучше удовлетворить энергетические потребности при синтезе молока для потомства, а также свести к минимуму катаболическое истощение резервов свиноматки (Zhe et al., 2023). Исследование показало, что добавление в рацион свиноматок 3,8-3,9% масла может улучшить их репродуктивную функцию и повысить уровень молочного жира и иммуноглобулинов в молоке (Jin et al., 2017). ПНЖК n-3 ассоциированы с качеством фолликулов яичников, выживаемостью эмбрионов и последующим размером помёта (Roszkos et al., 2020). СЦЖК, рассматриваемые в качестве заменителей антибиотиков, обладают значительной антибактериальной активностью в отношении грамположительных кокков и кишечной палочки (Hanczakowska et al., 2016). В соевом масле может не хватать некоторых эссенциальных жирных кислот, поэтому добавки n-3 ПНЖК и СЦЖК полезны для свиноматок. Сбалансированный состав жирных кислот рациона, в основном, включает в себя незаменимые и заменимые, насыщенные и ненасыщенные, n-3 и n-6 полиненасыщенные, а также короткоцепочечные и мононенасыщенные жирные кислоты (Кьюба, Муруот, 2011; Росеро et al., 2015; Хатибджоу et al., 2017). Показано, что оптимальное соотношение n-6 и n-3 полиненасыщенных жирных кислот в рационе свиноматок может улучшить суточный прирост массы тела и иммунную функцию поросят-сосунов (Уао et al., 2012). На поздних сроках беременности и в период лактации добавление в рацион свиноматок СЦЖК сокращало интервал между отъёмом поросят и началом половой охоты (Чен et al., 2019). Добавление в рацион n-3 ПНЖК увеличивало содержание жира и белка в молозиве. Внесение в рацион свиноматок бутирата натрия способствовало улучшению состояния кишечника и снижению смертности поросят-сосунов до отъёма. Обогащение рациона бутиратом натрия, СЦЖК или n-3 ПНЖК способствовало улучшению состояния кишечной микробиоты.

На усвояемость энергии и питательных веществ может влиять множество факторов, таких как химический состав и обработка корма, живая масса, пол, генотип (Вида et al., 2019). Смеси органических и жирных кислот могут улучшить усвояемость питательных веществ у

лактирующих свиноматок (Devi et al., 2016). Добавка альфа-лаурат-моноглицерола может повысить усвояемость некоторых питательных веществ. Добавление в рацион масла, сбалансированного по содержанию жирных кислот, улучшало усвояемость сухого вещества, протеина и жира у свиноматок (Li et al., 2023). Повышение усвояемости питательных веществ могло быть связано с тем, что масляная кислота способствует поддержанию здоровья кишечника (Chen et al., 2019). Результаты показали, что по сравнению с соевым маслом, масло с оптимальным соотношением жирных кислот способствует перевариванию и усвоению питательных веществ у лактирующих свиноматок.

Кишечная микробиота – важный фактор, влияющий на усвоение энергии и её накопление в организме хозяина. Исследования мышей с генетически модифицированным кишечником и обычных мышей показали, что микробиота способствует всасыванию моносахаридов из просвета кишечника, что приводит к индукции *de novo* липогенеза в печени (Bäckhed et al., 2004). Метагеномное секвенирование показало, что у свиней с высоким содержанием жира в организме было больше видов архей, участвующих в метаногенезе, что приводило к более эффективному отложению жира, в то время как у свиней с низким содержанием жира было больше видов бактерий, вырабатывающих бутират, что улучшало образование короткоцепочечных жирных кислот, особенно бутирата, и тем самым препятствовало отложению жира у свиней (Zhao et al., 2022). У поросят-отъемышей добавки с бутиратом улучшали иммунный гомеостаз, вызывали благоприятные изменения в микробных сообществах, улучшали энергетический метаболизм энтероцитов и предотвращали апоптоз, защищая кишечник от повреждений, вызванных липополисахаридами (Han et al., 2022).

Окислительный стресс, связанный с повышенным потреблением жиров, может изменять состав бактерий и экспрессию липогенных генов. Активность глутатионпероксидазы была значительно ниже у свиней с высоким содержанием жира, которые более подвержены окислительному стрессу, чем у свиней с низким содержанием жира, и, следовательно, более склонным к ожирению (Boyer-Diaz et al., 2020). У поросят, получавших корм, содержащий структурированные липиды, наблюдалось лучшее усвоение корма, большее количество бокаловидных клеток в двенадцатиперстной кишке и большая площадь всасывания в тощей кишке (Pinheiro et al., 2024).

Жирные кислоты с короткой цепью (ЖККЦ) являются важными регуляторами энергетического обмена. Состав пищевых жирных кислот влияет на пищеварение, всасывание и метаболизм питательных веществ (Tang et al., 2023). Жирные кислоты с разветвлённой цепью (ЖКРЦ) – это, в основном, насыщенные жирные кислоты с одной или несколькими метильными группами в углеродной цепи, которые входят в состав обычных пищевых жиров (Ran-Ressler et al., 2011a). Добавка ЖКРЦ снижала частоту некротического энтероколита и повышала уровень противовоспалительного цитокина IL-10 в кишечнике, а также изменяла микробиологическую среду желудочно-кишечного тракта у новорожденных крыс (Ran-Ressler et al., 2011b). Изомасляная кислота – один из продуктов микробного расщепления неперевариваемых углеводов (Macfarlane, Macfarlane, 2003). Экзогенная добавка с масляной кислотой или бутиратом улучшает барьерную функцию кишечника и способствует поддержанию его здоровья у поросят-отъемышей (Grilli et al., 2016). Добавление продуктов из смеси жирных кислот в рацион свиноматок улучшает продуктивность потомства (Huang et al., 2017a). Показано, что содержание короткоцепочечных жирных кислот повышается у людей с ожирением и снижается после снижения массы тела (Meyer et al., 2022). Это свидетельствует о том, что повышенный уровень короткоцепочечных жирных кислот увеличивает количество энергии, получаемой из корма (Wang et al., 2025).

Жирные кислоты с неразветвлённой цепью влияют на состав микробиоты кишечника и, как считается, влияют на его здоровье. Однако о влиянии короткоцепочечных жирных кислот на барьерную функцию слизистой оболочки кишечника и отложение внутримышечного жира у поросят-отъёмышей известно очень мало. Хотя изомаляная кислота использовалась в качестве кормовой добавки для жвачных животных (Wang et al., 2017), её применение у поросят-отъёмышей ограничено, а её влияние на барьерную функцию слизистой оболочки кишечника и микробиоту кишечника у поросят-отъёмышей ещё недостаточно изучено.

В недавно проведенных исследованиях показано, что добавление в рацион 0,5% изомаляной кислоты улучшает барьерную функцию слизистой оболочки кишечника и антиоксидантные свойства, вероятно, за счёт изменения состава микробиоты слепой кишки. Изомаляная кислота может также увеличивать отложение межмышечного жира за счёт влияния на состав микробиоты слепой кишки и, как следствие, – регулирования метаболического статуса, что влияет на отложение жира в тонком кишечнике. Таким образом, изомаляная кислота может стать эффективным дополнением к рациону поросят для улучшения барьерной функции слизистой оболочки тонкого кишечника. В то же время изомаляная кислота способствует улучшению качества мяса и повышению питательной ценности свинины в период откорма (Wang et al., 2025).

Свиньи, получавшие рацион с высоким соотношением n-6/n-3, показали более низкую усвояемость энергии и темпы прироста массы тела, что могло быть связано со снижением уровня воспалительных процессов и изменениями в метаболизме (Zou et al., 2025). Показано, что рацион с соотношением омега-6/омега-3, равным 5:1, увеличивает массу тела, среднесуточный прирост живой массы и усвояемость энергии, а также снижает концентрацию липопротеинов низкой плотности в крови. Изменение соотношения омега-6 и омега-3 жирных кислот в рационе растущих свиней не повлияло на количество фекальных кишечных палочек и лактобактерий, а также на выделение фекальных газов (Милушев и др., 2018; Nguyen et al., 2019; Милушев и др., 2019).

Добавление пищевых жиров в рацион свиней – это практичный способ повысить скорость роста и эффективность кормления. Показано, что добавление 5 или 10% жира в рацион свиней на откорме повышает эффективность кормления, но в некоторых случаях снижает постность туши (Liu et al., 2018). Исследователи могут использовать различные источники жиров, которые имеют совершенно разный химический состав, влияющий на их усвояемость и энергетическую ценность. Обычно считается, что жиры животного происхождения хуже усваиваются и, следовательно, имеют более низкую энергетическую ценность, чем жиры растительного происхождения. Более низкая усвояемость объясняется тем, что в животных жирах больше насыщенных жирных кислот, которые хуже усваиваются в подвздошной кишке, чем ненасыщенные жирные кислоты (Liu et al., 2018; Jørgensen, Fernández, 2000). Сообщалось о повышении содержания энергии в свином жире, состоящем, в основном, из топленого свиного жира, по сравнению с соевым маслом (Kil et al., 2011). Различный состав жирных кислот в источниках жира может влиять на состав туши свиней на откорме (Liu et al., 2018). Показано, что включение в рацион на основе кукурузно-соевого шрота для поросят-отъёмышей кукурузного и соевого масел вместо говяжьего и высококачественного белого жира приводило к повышению эффективности использования корма во время первой фазы кормления. Однако свиньи могут оправиться от снижения эффективности кормления, вызванного включением в рацион говяжьего и высококачественного белого жиров вместо говяжьего и высококачественного белого жира после 1-й фазы выращивания. Пищевые источники липидов оказывают ограниченное влияние на микробный состав толстой кишки (Hong et al., 2021).

Добавление 6% жиров в рацион повысило эффективность откорма свиней, при этом разные жиры дали разные практические результаты, что может быть связано с их разной энергетической ценностью. Результаты, полученные на начальном этапе выращивания свиней, показывают, что жиры с относительно высоким содержанием насыщенных жирных кислот могут давать больше энергии, чем жиры с относительно высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот (Liu et al., 2018).

Увеличение содержания в рационе жира с 0 до 3%, независимо от его источника, приводило к различным изменениям в среднесуточных приростах живой массы, но неизменно улучшало соотношение массы туши к количеству жира. Увеличение содержания жира повышало убойный выход, выход туши и толщину шпика, но кормление рационами, содержащими кукурузное масло, увеличивало йодного числа жира в туше. С учётом цен на ингредиенты, улучшение показателей роста в большинстве случаев не оправдывало дополнительных затрат при увеличении содержания жира с 0 до 3% (Bromm et al., 2023).

### **Влияние уровня окисленности жиров и масел на их усвоение.**

По мере окисления жиров и масел они становятся более насыщенными (Wealleans et al., 2021), и это может быть одним из факторов, влияющих на эффективность утилизации жира при кормлении свиней перекисными жирами. Выявлено снижение усвояемости питательных веществ при кормлении окисленным отборным белым жиром и рыбьим жиром (DeRouchey et al., 2004; Yuan et al., 2007). Однако в исследовании Liu et al. (2014) не наблюдали влияния окисленных продуктов на утилизацию питательных веществ в кукурузном масле, рапсовом масле, птичьем жире или сале. По результатам проведенного метаанализа (Hung et al., 2017b) не выявлено существенного влияния на среднесуточное потребление корма в 48 из 65 исследований, как на птице, так и на растущих свиньях. Хотя во всём наборе данных перекисные диеты привели к 3%-ному снижению среднесуточного потребления корма. Аналогичным образом, суммируя данные 16 отдельных исследований продуктивности свиней, при сравнении рационов с перекисными и неперекисными липидами, отмечали снижение на 11,4, 8,8 и 3,4% среднесуточного прироста живой массы, потребления корма и соотношения прирост ЖМ/корм, соответственно (Hanson et al., 2014). В другом исследовании было показано, что добавление в рацион перекисидных липидов негативно сказалось на показателях роста и антиоксидантной способности поросят-отъёмшей. Добавление витамина Е и полифенолов улучшило общую антиоксидантную способность, особенно у поросят, получавших контрольный рацион, но не восстановило показатели роста (Chang et al., 2019; Silva-Guillen et al., 2020). Также было показано, что добавление в рацион свиней пероксирированного соевого масла, прошедшего термическую обработку и содержащего высокие концентрации альдегидов, привело к изменениям в уровне маркеров окислительного стресса, но значительно снизило концентрацию витамина Е в плазме крови (Wilson, Kerr, 2025).

Исследователи предположили, что снижение продуктивности было в значительной степени обусловлено снижением вкусовых качеств окисленных липидов (DeRouchey et al., 2004; Boler et al., 2012), вызванным присутствием альдегидных соединений (Halliwell, Chirico, 1993; Wealleans et al., 2021). Альдегиды обладают интенсивным прогорклым запахом, что вызывает снижение вкусовых качеств и потребления корма (Wealleans et al., 2021). Присутствие альдегидов также было связано с ухудшением показателей, наблюдаемых у растущих и откормочных свиней, которым давали высокопероксирированные соевые и кукурузные масла (Lindblom et al., 2018; Overholt et al., 2018), хотя ни в одном исследовании не было выявлено значительного снижения среднесуточного потребления корма.

### Заключение

Жиры и масла являются основным источником энергии в рационе свиней, и в связи с ростом цен, появлением высокопродуктивных генетических линий и отказом от высококачественных липидов в кормах для животных свиноводы проявляют повышенный интерес к максимальному использованию кормовых добавок жиров. Переваривание и усвоение жиров – это сложный процесс, включающий в себя эмульгирование, гидролиз, образование смешанных мицелл и их усвоение. Результаты изучения физиологических механизмов этих процессов и роли факторов, влияющих на усвоение энергии жировых добавок, позволяют разработать способы повышения эффективности использования липидов. Существенное значение при этом имеют структурные особенности липидных комплексов (длина углеродных цепей жирных кислот, их расположение в триглицеролах, степень насыщенности, уровень окисленности и др.), а также содержание свободных жирных кислот и общих липидов в жировых добавках. Эти факторы по-разному влияют на разных этапах жизненного цикла свиньи. В целом, для разработки эффективных жировых добавок и их применения в свиноводстве необходимо проведение дальнейших исследований по изучению физико-химических свойств липидных комплексов и физиологических эффектов их действия в просвете кишечника, в процессах всасывания и метаболизма липидов.

### Список литературы

1. Милушев Р.К., Шулаев Г.М., Энговатов В. Ф. Особенности липидного обмена у молодняка свиней, получавшего комбикорм с жировой добавкой из масличных культур. // Главный зоотехник. 2019. № 10. С. 11-18.
2. Милушев Р.К., Шулаев Г.М., Энговатов В.Ф., Бетин А.Н. Влияние комбикорма с жировой добавкой из масличных культур на липидный обмен у свиней. // Эффективное животноводство. 2018. № 8. С.59-61.
3. Позднякова Н., Лушников Н. Масла в рационе свиней: какие и сколько? // Животноводство России. 2022. № 2. С. 32-34. doi:10.25701/ZZR.2022.02.02.004.
4. Рощин В.А. Энерго-аминокислотное питание молодняка свиней. Жодино: Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, 2022. 190 с.
5. Akhtar N., Jafarikia M., Sullivan B.P., Li J. An efficient method for saliva collection from mature pigs to determine their enzymatic and electrolytic profiles. *J. Vet. Med. Sci.* 2018. 80: 147-151.
6. Armand, M. Lipases and lipolysis in the human digestive tract: where do we stand? *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care.* 2007. 10: 156-164.
7. Bedford M.A., Schulze H. Exogenous enzymes for pigs and poultry. *Nutr. Res. Rev.* 1998. 11: 91-114.
8. Boyer-Diaz Z., Morata P., Aristu-Zabalza P., Gibert-Ramos A., Bosch J., Gracia-Sancho J. Oxidative stress in chronic liver disease and portal hypertension: potential of DHA as nutraceutical. *Nutrients.* 2020. 12: 1-13. doi: 10.3390/nu12092627
9. Bracco U. Effect of triglyceride structure on fat absorption. *Am. J. Clin. Nutr.* 1994. 60: 1002-1009. doi: 10.1093/ajcn/60.6.1002S.
10. Borgstrom B., Erlanson C. Pancreatic lipase and colipase interactions and effects of bile salts and other detergents. *Eur. J. Biochem.* 1973. 37: 60-68. doi: 10.1111/j.1432-1033.1973.tb02957.x
11. Babayan V.K. Medium chain triglycerides and structured lipids. *Lipids.* 1987. 22: 417-420. doi: 10.1007/BF02537271
12. Bromm J.J., Tokach M.D., Woodworth J.C. et al. Effects of fat source and level on growth performance and carcass characteristics of commercial finishing pigs. *Transl. Anim. Sci.* 2023. 7(1): 1-12. doi: 10.1093/tas/txad018
13. Borgstrom B. Importance of phospholipids, pancreatic phospholipase A2, and fatty acid for the digestion of dietary fat: in vivo experiments with porcine enzymes. *Gastroenterology.* 1980. 78: 954-962.

14. Bäckhed F., Ding H., Wang T., Hooper L.V., Koh G.Y., Nagy A., Semenkovich C.F., Gordon J.I. The gut microbiota as an environmental factor that regulates fat storage. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2004. 101(44): 15718-15723. doi: 10.1073/pnas.0407076101
15. Barakat G.M., Ramadan W., Assi G., El Khoury N.B. Satiety: a gut–brain–relationship. *J. Physiol. Sci.* 2024. 74(11): 1-7. doi.org/10.1186/s12576-024-00904-9
16. Boler D.D., Fernandez-Due D.M., Kutzler L.W., Zhao J., Harrell R.J., Campion D.R., McKeith F.K., Killefer J., Dilger A.C. Effects of oxidized corn oil and a synthetic antioxidant blend on performance, oxidative status of tissues, and fresh meat quality in finishing barrows. *J. Anim. Sci.* 2012. 90: 5159-5169.
17. Chang P.L., Boyd R.D., Zier-Rush C., Rosero D.S., van Heugten E. Lipid peroxidation impairs growth and viability of nursery pigs reared under commercial conditions. *J. Anim. Sci.* 2019. 97(8): 3379-3389. doi: 10.1093/jas/skz183
18. Chow S.L., Hollander D. A dual, concentration-dependent absorption mechanism of linoleic acid by rat jejunum in vitro. *J. Lipid Res.* 1979. 20: 349-356.
19. Devi S.M., Lee K.Y., Kim I.H. Analysis of the effect of dietary protected organic acid blend on lactating sows and their piglets. *Rev Bras Zootec.* 2016. 45: 39-47. doi: 10.1590/S1806-92902016000200001
20. DeRouche J.M., Hancock J.D., Hines R.H., Maloney C.A., Lee D.J., Cao H., Dean D.W., Park J.S. Effects of rancidity and free fatty acids in choice white grease on growth performance and nutrient digestibility in weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 2004. 82: 2937-2944.
21. Das U.N. Essential fatty acids: biochemistry, physiology and pathology. *Biotechnol J.* 2006. 1: 420-439. doi: 10.1002/biot.200600012
22. Dicklin M.E., Robinson J.L., Lin X., Odle J. Ontogeny and chain-length specificity of gastrointestinal lipases affect medium-chain triacylglycerol utilization by newborn pigs. *J. Anim. Sci.* 2006. 84: 818-825.
23. Gogus U., Smith C. n-3 Omega fatty acids: a review of current knowledge. *Int. J. Food Sci. Tech.* 2010. 45: 417-436.
24. Grilli E., Tugnoli B., Foerster C.J., Piva A. Butyrate modulates inflammatory cytokines and tight junctions components along the gut of weaned pigs. *J. Anim. Sci.* 2016. 94: 433-436. doi:10.2527/jas.2015-9787
25. Huang Y., Gao S., Chen J., Albrecht E., Zhao R., Yang, X. Maternal butyrate supplementation induces insulin resistance associated with enhanced intramuscular fat deposition in the offspring. *Oncotarget.* 2017(a). 8: 13073-13084. doi: 10.18632/oncotarget.14375.
26. Hung Y.T., Hanson A.R., Shurson G.C., Urriola P.E. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: a meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Tech.* 2017(b). 231: 47-58.
27. Hong J., Ndou S.P., Adams S., Scaria J., Woyengo T.A. Growth performance, visceral organ weights, and gut health of weaned pigs fed diets with different dietary fiber solubility and lipid sources. *J. Anim. Sci.* 2021. 99(11) skab292: 1-12. doi: 10.1093/jas/skab292
28. Hanczakowska E., Świątkiewicz M., Natonek-Wiśniewska M., Okoń K. Medium chain fatty acids (MCFA) and/or probiotic *Enterococcus faecium* as a feed supplement for piglets. *Livest Sci.* 2016. 192: 1-7. doi: 10.1016/j.livsci.2016.08.002
29. Han Y., Tang C., Zhao Q., Fan S., Yang P., Zhang J. Butyrate mitigates lipopolysaccharide-induced intestinal morphological changes in weanling piglets by regulating the microbiota and energy metabolism, and alleviating inflammation and apoptosis. *Microorganisms.* 2022. 10(10): 1-20. doi: 10.3390/microorganisms10102001
30. Hamosh M. Lingual and gastric lipases. *Nutrition.* 1990. 6: 421-428.
31. Holen J.P., Woodworth J.C., Tokach M.D., Goodband R.D., DeRouche J.M., Gebhardt J.T. Evaluation of supplemental fat sources and pre-farrow essential fatty acid intake on lactating sow performance and essential fatty acid composition of colostrum, milk, and adipose tissue. *J. Anim. Sci.* 2023. 101. skac394: 1-12. doi: 10.1093/jas/skac394
32. Hanson A.R., Urriola P.E., Shurson G.C. Peroxide value (PV) and thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) as indicators of dietary lipid peroxidation, reduced growth performance, and metabolic oxidation status when feeding peroxidized lipids to pigs and broilers. *J. Anim. Sci.* 2014. 91: 144-154.
33. Halliwell B., Chirico S. Lipid peroxidation: its mechanism, measurement, and significance. *Am. J. Clin. Nutr.* 1993. 57: 715-725.

34. Ivanov D.S., Lević J.D., Sredanović S.A. Fatty acid composition of various soybean products. *Food Feed Res.* 2010. 37: 65-70.
35. Jones P.J.H., Rideout T. Lipids, sterols, and their metabolites. In: Ross A.C., Caballero B., Cousins R.J., Tucker K.L., Ziegler T.R. (Eds.). *Modern Nutrition in Health and Disease.* 2012. pp. 65-87.
36. Jin C., Fang Z., Lin Y., Che L., Wu C., Xu S., Feng B., Li J., Wu D. Influence of dietary fat source on sow and litter performance, colostrum and milk fatty acid profile in late gestation and lactation. *Anim. Sci. J.* 2017. 88(11): 1768-1778. doi: 10.1111/asj.12836
37. Jørgensen H., Fernández J.A. Chemical composition and energy value of different fat sources for growing pigs. *Acta Agric. Scand. Sect. A Anim. Sci.* 2000. 50: 129-136.
38. Kouba M., Mourot J. A review of nutritional effects on fat composition of animal products with special emphasis on n-3 polyunsaturated fatty acids. *Biochimie.* 2011. 93: 13-17. doi: 10.1016/j.biochi.2010.02.027
39. Kil D.Y., Ji F., Stewart L.L., Hinson R.B., Beaulieu A.D., Allee G.L., Patience J.F., Pettigrew J.E., Stein H.H. Net energy of soybean oil and choice white grease in diets fed to growing and finishing pigs. *J Anim Sci.* 2011. 89: 448-459. doi: 10.2527/jas.2010-3233
40. Khatibjoo A., Mahmoodi M., Fattahnia F., Akbari-Gharaei M., Shokri A.N., Soltani S. Effects of dietary short- and medium-chain fatty acids on performance, carcass traits, jejunum morphology, and serum parameters of broiler chickens. *J. Appl. Anim. Res.* 2017. 6: 492-498. doi: 10.1080/09712119.2017.1345741
41. Kindel T., Lee D.M., Tso P. The mechanism of the formation and secretion of chylomicrons. *Atheroscler. Suppl.* 2010. 11: 11-16. doi: 10.1016/j.atherosclerosissup.2010.03.003
42. Kerr B.J., Kellner T.A., Shurson G.C. Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. *J. Anim. ci. Biotechnol.* 2015. 6(1): 1-23. doi:10.1186/s40104-015-0028-x
43. Kim B.G., Lindemann M.D., Cromwell G.L., Balfagon A., Agudelo J.H. The correlation between passage rate of digesta and dry matter digestibility in various stages of swine. *Livest. Sci.* 2007. 109: 81-84.
44. Lindblom S.C., Gabler N.K., Kerr B.J. Influence of feeding thermally peroxidized soybean oil on growth performance, digestibility, and gut integrity in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 2018. 96: 558-569.
45. Liu P., Kerr B.J., Chen C., Weber T.E., Johnston L.J., Shurson G.C. Influence of thermally oxidized vegetable oils and animal fats on energy and nutrient digestibility in young pigs. *J. Anim. Sci.* 2014. 92: 2980-2986.
46. Liu Y., Kil D.Y., Perez-Mendoza V.G., Song M., Pettigrew J.E. Supplementation of different fat sources affects growth performance and carcass composition of finishing pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2018. 9: 1-8. doi: 10.1186/s40104-018-0274-9
47. Li, S., Sauer, W.C. The effect of dietary fat content on amino acid digestibility in young pigs. *J. Anim. Sci.* 1994. 72: 1737-1743.
48. Li L., Wang H., Dong S., Ma Y. Supplementation with alpha-glycerol monolaurate during late gestation and lactation enhances sow performance, ameliorates milk composition, and improves growth of suckling piglets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2023. 14: 1-12. doi: 10.1186/s40104-023-00848-x
49. Lairon D. Digestion and absorption of lipids. *Designing Functional Foods.* 2009. P. 68-93. doi:10.1533/9781845696603.1.66
50. Lairon D., Nalbone G., Lafont H., Leonardi J., Vigne J.L., Chabert C., Hauton J.C., Verger R. Effect of bile lipids on the adsorption and activity of pancreatic lipase on triacylglycerol emulsions. *Biochim. Biophys. Acta.* 1980. 618: 119-128.
51. Little T.J., Russo A., Meyer J.H., Horowitz M., Smyth D.R., Bellon M., Wishart J.M., Jones K.L., Feinle-Bisset C. 2007. Free fatty acids have more potent effects on gastric emptying, gut hormones, and appetite than triacylglycerides. *Gastroenterol.* 2007. 133: 1124-1131.
52. Langlois A., Corring T., Levenez F., Cuber J.C., Chayvialle J.A. Effects of pancreatic polypeptide on biliary flow and bile acid secretion stimulated by secretin and cholecystokinin in the conscious pig. *Regul. Pept.* 1990. 27: 139-147. doi: 10.1016/0167-0115(90)90212-f

53. Mendoza S.M., van Heugten E. Effects of dietary lipid sources on performance and apparent total tract digestibility of lipids and energy when fed to nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 2014. 92(2): 627-636. doi: 10.2527/jas.2013-6488
54. Macfarlane S., Macfarlane G.T. Regulation of short-chain fatty acid production. *Proc. Nutr. Soc.* 2003. 62: 67-72. doi: 10.1079/PNS2002207
55. Meyer R.K., Lane A.I., Weninger S.N., Martinez T.M., Kangath A., Laubitz D., Duca F.A. Oligofructose restores postprandial short-chain fatty acid levels during high-fat feeding. *Obesity (Silver Spring)*. 2022. 30(7): 1442-1452. doi: 10.1002/oby.23456
56. Mu H., Hoy C.E. The digestion of dietary triacylglycerols. *Prog. Lipid Res.* 2004. 43: 105-133. doi: 10.1016/s0163-7827(03)00050-x
57. Martinez-Augustin O., Sanchez de Medina F. Intestinal bile acid physiology and pathophysiology. *World J. Gastroenterol.* 2008. 14: 5630-5640. doi: 10.3748/wjg.14.5630
58. Moreau H., Gargouri Y., Lecat D., Junien J.L., Verger R. Screening of preduodenal lipases in several mammals. *Biochim. Biophys. Acta.* 1988. 959: 247-252.
59. Nur Mahendra M.Y., Kamaludeen J., Pertiwi H. Omega-6: its pharmacology, effect on the broiler production, and health. *Vet. Med. Int.* 2023. 1: 3220-3244. doi: 10.1155/2023/3220344
60. Nguyen D.H., Yun H.M., Kim A.I.H. Evaluating impacts of different omega-6 to omega-3 fatty acid ratios in corn-soybean meal-based diet on growth performance, nutrient digestibility, blood profiles, fecal microbial, and gas emission in growing pigs. *Animals (Basel)*. 2019. 10(1): 1-10. doi: 10.3390/ani10010042.
61. Overholt M.F., Dilger A.C., Boler D.D., Kerr B.J. Influence of feeding thermally peroxidized soybean oil on growth performance, digestibility, and gut integrity in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 2018. 96: 2789-2803.
62. Palmquist D.L., Jenkins T.C. Challenges with fats and fatty acid methods. *J. Anim. Sci.* 2003. 81: 3250-3254. doi: 10.2527/2003.81123250x
63. Pinheiro R.R.S., Watanabe P.H., Araújo L.R.S., Mendonça I.B., Sales J.J.M., Santos M.E.C., Pascoal L.A.F., Guerra R.R., Almeida J.M.D.S., Freitas E.R. Structured lipids from fish viscera and coconut oils improve weight gain and intestinal morphology of piglets at nursery phase. *Trop. Anim. Health Prod.* 2024. 56(9): 1-11. doi: 10.1007/s11250-024-04235-0
64. Roszkos R., Tóth T., Mézes M. Review: practical use of n-3 fatty acids to improve reproduction parameters in the context of modern sow nutrition. *Animals*. 2020. 10: 1-13. doi: 10.3390/ani10071141
65. Ran-Ressler R.R., Sim D., O'Donnell-Megaró A.M., Bauman D.E., Barbano D.M., Brenna J.T. Branched chain fatty acid content of United States retail Cow's Milk and implications for dietary intake. *Lipids*. 2011 (a). 46: 569-576. doi: 10.1007/s11745-011-3530-8
66. Ran-Ressler R.R., Khailova L., Arganbright K.M. et al. Branched chain fatty acids reduce the incidence of necrotizing enterocolitis and alter gastrointestinal microbial ecology in a neonatal rat model. *PLoS One*. 2011 (b). 6(12) e29032: 1-10. doi: 10.1371/journal.pone.0029032
67. Rosero D.S., Odle J., Mendoza S.M., Boyd R.D., Fellner V., van Heugten E. Impact of dietary lipids on sow milk composition and balance of essential fatty acids during lactation in prolific sows. *J. Anim. Sci.* 2015. 93: 2935-2947. doi: 10.2527/jas.2014-8529
68. Ravindran V., Tancharoenrat P., Zaefarian F., Ravindran G. Fats in poultry nutrition: Digestive physiology and factors influencing their utilisation. *Animal Feed Science and Technology*. 2016. 213: 1-21. doi:10.1016/j.anifeedsci.2016.01.012
69. Silva-Guillen Y.V., Arellano C., Boyd R.D., Martinez G., van Heugten E. Growth performance, oxidative stress and immune status of newly weaned pigs fed peroxidized lipids with or without supplemental vitamin E or polyphenols. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2020. 11(22): 1-11. doi: 10.1186/s40104-020-0431-9
70. Stremmel W., Pohl L., Ring A., Hermann T. A new concept of cellular uptake and intracellular trafficking of long-chain fatty acids. *Lipids*. 2001. 36: 981-989. doi: 10.1007/s11745-001-0809-2
71. Siriwardhana N., Klaupahana N.S., Moustaid-Moussa N. Health benefits of n-3 polyunsaturated fatty acids: eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid. *Adv. Food Nutr. Res.* 2012. 65: 211-222. doi: 10.1016/B978-0-12-416003-3.00013-5

72. Shibabaw T. Omega-3 polyunsaturated fatty acids: anti-inflammatory and anti-hypertriglyceridemia mechanisms in cardiovascular disease. *Mol. Cell. Biochem.* 2021. 476: 993-1003. doi.org/10.1007/s11010-020-03965-7
73. Shurson G.C., Kerr B.J., Hanson A.R. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotech.* 2015. 6: 1-11. doi: 10.1186/s40104-015-0005-4
74. Shiau Y.F., Mechanisms of intestinal fat absorption. *Am. J. Physiol.* 1981. 240: 1-9. doi: 10.1152/ajpgi.1981.240.1.G1
75. Sabesin S.M., Frase S. Electron microscopic studies of the assembly, intracellular transport and secretion of chylomicrons by rat intestine. *J. Lipid Res.* 1977. 18: 496-511.
76. Thng A., Ting J. X., Tay H. R., Soh C. Y., Ong H. C., Tey D. The use of predicted apparent metabolizable energy values to understand the oil and fat variability in broilers. *Online Journal of Animal and Feed Research.* 2020. 10(4): 150-157.
77. Tecles F., Contreras-Aguilar M.D., Martínez-Miro ´ S., Tvarijonaviciute A., Martínez-Subiela S., Escribano D., Ceron ´ J.J. Total esterase measurement in saliva of pigs: validation of an automated assay, characterization and changes in stress and disease conditions. *Res. Vet. Sci.* 2017. 114: 170-176.
78. Tang Q., Li W., Ren Z., Ding Q., Peng X., Tang Z., Pang J., Xu Y., Sun Z. Different fatty acid supplementation in low-protein diets regulate nutrient utilization and lipid and amino acid metabolism in weaned pigs model. *Int. J. Mol. Sci.* 2023. 24(10): 8501-8512. doi: 10.3390/ijms24108501
79. Tartrakoon W., Tartrakoon T., Kitsupe N. Effects of the ratio of unsaturated fatty acid to saturated fatty acid on the growth performance, carcass and meat quality of finishing pigs. *Anim. Nutr.* 2016. 2: 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.03.004>
80. Urriola P. E., Cervantes-Pahm S. K., Stein, H. H. Fiber in Swine Nutrition. In: *Sustainable Swine Nutrition*. Blackwell Publishing Ltd. 2012. P. 255-276. doi.org/10.1002/9781118491454.ch11
81. Vandermeers A., Vandermeers-Piret M.C., Rathe J., Christophe J. On human pancreatic triacylglycerol lipase: isolation and some properties. *Biochim. Biophys. Acta.* 1974. 370: 257-268. doi: 10.1016/0005-2744(74)90050-3
82. Varona E., Tres A., Rafecas M., Vichi S., Barroeta A.C., Guardiola F. Composition and nutritional value of acid oils and fatty acid distillates used in animal feeding. *Animals* 2021. 11: 1-20. doi.org/10.3390/ani11010196
83. Vida O., Fábían J., Bazar G., Egri B., Tóth T. The effect of dietary glycerol supplementation on milk production and composition, blood parameters and performance of lactating sows. *Livest. Sci.* 2019. 230: 234-241. 103859. doi: 10.1016/j.livsci.2019.103859
84. Wealleans A. L., Bierinckx K., Di Benedetto M. Fats and oils in pig nutrition: Factors affecting digestion and utilization. *Animal Feed Sci, Technol.* 2021. 277: 1-20. 114950. doi:10.1016/j.anifeeds.2021.114950
85. Wang H., Eckel R.H. Lipoprotein lipase: from gene to obesity. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab. A review.* 2009. 297: 271-288. doi: 10.1152/ajpendo.90920.2008
86. Wang L., Gao W., Zhou J., Shi H., Wang T., Lai C. Effects of dietary oil sources and fat extraction methods on apparent and standardized ileal digestibility of fat and fatty acids in growing pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2022. 13: 1-11. doi.org/10.1186/s40104-022-00798-w
87. Wang L., Chen Y., Yang Y., Xiao N., Lai C. Oils with different degree of saturation: effects on ileal digestibility of fat and corresponding additivity and bacterial community in growing pigs. *J Anim. Sci. Biotechnol.* 2024. 15(21): 1-12. doi.org/10.1186/s40104-023-00990-6
88. Westergaard H., Dietsch J.M. The mechanism whereby bile acid micelles increase the rate of fatty acid and cholesterol uptake into the intestinal mucosal cell. *J. Clin. Invest.* 1976. 58: 97-108. doi: 10.1172/JCI108465.
89. Wang C., Liu Q., Zhang Y.L., Pei C.X., Zhang S.L., Guo G., Huo W.J., Yang W.Z., Wang H. Effects of isobutyrate supplementation in pre- and post-weaned dairy calves diet on growth performance, rumen development, blood metabolites and hormone secretion. *Animal.* 2017. 11(5): 794-801. doi: 10.1017/S1751731116002093

90. Wilfart A., Montagné L., Simmins H., Noblet J., van Milgen J. Effect of fibre content in the diet on the mean retention time in different segments of the digestive tract in growing pigs. *Livest. Sci.* 2007. 109: 27-29.
91. Wang B., Hou J., Cao Y., Wei H. et al. Dietary isobutyric acid supplementation improves intestinal mucosal barrier function and meat quality by regulating cecal microbiota and serum metabolites in weaned piglets. *Front. Vet. Sci.* 2025. 12: 1-16. 1565216. doi: 10.3389/fvets.2025.1565216
92. Wilson V.C., Kerr B.J. Feeding nursery pigs diets containing peroxidized soybean oil has minimal effects on oxidative status but dramatically reduces serum vitamin E concentrations. *J. Anim. Sci.* 2025. 103 skaf016: 1-15. doi: 10.1093/jas/skaf016
93. Yuan S.B., Chen D.W., Zhang K.Y., Yu B. Effects of oxidative stress on growth performance, nutrient digestibilities and activities of antioxidative enzymes of weanling pigs. *Asian-Austral. J. Anim. Sci.* 2007. 20: 1600-1605.
94. Yan L., Zhang B., Shen Z., 2014. Dietary modulation of the expression of genes involved in short-chain fatty acid absorption in the rumen epithelium is related to short-chain fatty acid concentration and pH in the rumen of goats. *J. Dairy Sci.* 2014. 97: 5668–5675.
95. Yao W., Li J., Wang J.J., Zhou W., Wang Q., Zhu R., Wang F., Thacker P. Effects of dietary ratio of n-6 to n-3 polyunsaturated fatty acids on immunoglobulins, cytokines, fatty acid composition, and performance of lactating sows and suckling piglets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2012. 3(1): 1-8. doi: 10.1186/2049-1891-3-43
96. Zou B., Zhao D., Zhou S., Kang J.X., Wang B. Insight into the effects of Omega-3 fatty acids on gut microbiota: impact of a balanced tissue Omega-6/Omega-3 ratio. *Front. Nutr.* 2025. 12: 1-9. 1575323. doi: 10.3389/fnut.2025.1575323
97. Zhe L., Krogh U., Lauridsen C., Nielsen M.O., Fang Z., Theil Pet P.K. Impact of dietary fat levels and fatty acid composition on milk fat synthesis in sows at peak lactation. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2023. 14: 1-16. doi: 10.1186/s40104-022-00815-y
98. Zhao G., Xiang Y., Wang X., Dai B., Zhang X., Ma L. Exploring the possible link between the gut microbiome and fat deposition in pigs. *Oxidative Med. Cell. Longev.* 2022. 20: 1-13. doi: 10.1155/2022/1098892
99. Zhang Y., Peng S., Dong S., Wang J., Cao Y., Ma Y., Wang C. Fatty acid-balanced oil improved nutrient digestibility, altered milk composition in lactating sows and fecal microbial composition in piglets. *Anim. Biosci.* 2024. 37(5): 883-895. doi: 10.5713/ab.23.0359

#### References (for publications in Russian)

1. Milushev R.K., Shulaev G.M., Engovatov V.F. [Features of lipid metabolism in young pigs fed compound feed with a fat additive from oilseeds]. *Glavnyi zootekhnik* (Chief livestock specialist). 2019. 10: 11-18.
2. Milushev R.K., Shulaev G.M., Engovatov V.F., Betin A.N. [Effect of compound feed with a fat additive from oilseeds on lipid metabolism in pigs]. *Effektivnoe zhivotnovodstvo* (Effective animal husbandry). 2018. 8: 59-61.
3. Pozdnyakova N., Lushnikov N. [Oils in the diet of pigs: which and how much?] *Zhivotnovodstvo Rossii* (Animal Husbandry of Russia). 2022. 2: 32-34. doi:10.25701/ZZR.2022.02.02.004
4. Roshchin V.A. *Energo-aminokislotoe pitanie molodnyaka svinei* (Energy-amino acid nutrition of young pigs). Zhodino, Scientific and Practical Center for Animal Husbandry of the National Academy of Sciences of Belarus. 2022. 190 pp.

UDC 636.4.082.265:612.12.128

**Structure–functional characteristics  
and nutritional value of fat supplements for pigs:  
research and developments: a review**

Rodionova O.N.

*Institute of Animal Physiology, Biochemistry and Nutrition, branch, of the Federal  
Research Center of Animal Husbandry, Ernst VIZh, Borovsk, Kaluga oblast*

**ABSTRACT.** The problem of developing effective fat additives for young animals of modern highly productive breeds and lines of pigs is complicated by the difficulties of studying the mechanisms of physicochemical transformations of lipid complexes that occur in the intestinal lumen and during their absorption. The solution to the problem is complicated by the presence of a wide range of differences in composition and quality in the sources of fat additives for pig breeding. and. In this regard, there is a need for a more in-depth study of the effect of the chemical composition of lipids on their digestion and metabolism. The results of studying the physiological mechanisms of these processes and the role of factors influencing the absorption of energy from fat additives make it possible to develop methods for increasing the efficiency of lipid use. The main sections of the review are: general classification of lipids; digestion and absorption of lipids; nutritional value of fats and oils in pig diets; fatty acids in pig nutrition; the effect of the oxidation level of fats and oils on their absorption. A more thorough assessment of the factors influencing the physiological effects of lipid additives in pig diets is required in connection with modern achievements in the field of studying the processes of lipid digestion, their metabolism after absorption, cell division processes, immune function and metabolic stress in productive animals. In general, to develop effective fat additives and their use in pig breeding, it is necessary to conduct further studies on the physicochemical properties of lipid complexes and the physiological effects of their action in the intestinal lumen, in the processes of lipid absorption and metabolism.

*Key words: pigs, lipids, fatty acids, nutritional value, digestion, absorption, metabolism.*

*Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology). 2025. 3: 5-22.*

Поступило в редакцию: 20.06.2025

Получено после доработки: 20.09.2025

Сведения об авторах:

**Родионова Ольга Николаевна**, к.б.н., м.н.с., rod.o.n.1984@bk.ru

УДК 628.381:574.635

DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2025.3.23-33

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ  
СТОКОВ РЫБОВОДНЫХ ХОЗЯЙСТВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ (обзор)**

Липпо И.Е.

*Всероссийский научно-исследовательский институт интегрированного  
рыбоводства – филиал ФИЦ животноводства – ВИЖ им. Л.К. Эрнста, Подольск-  
Дубровицы, Московская область, Российская Федерация*

По мере роста объёмов производства, развитие аквакультуры сталкивается с серьёзными экологическими проблемами, связанными с накоплением отходов. Однако эти отходы могут стать ценным ресурсом при использовании современных биотехнологий. Основные разделы обзора: предпосылки создания сбалансированных экосистем на основе концепции интегрированной аквакультуры; использование пресноводных микроводорослей для очистки сточных вод; комбинированное использование водорослей и бактерий; совместное содержание рыб и ракообразных; системы биофлока и интегрированной мультитрофной аквакультуры. Современные подходы к переработке отходов рыбоводства позволяют трансформировать отходы в ценные ресурсы. Необходимым условием для успешного функционирования таких систем является строгое соблюдение баланса между количеством корма, плотностью посадки рыбы и способностью растений усваивать питательные вещества. Переход к циркулярным методам ведения аквакультуры, основанным на биологических и технологических решениях, позволяет снизить экологическую нагрузку и повысить экономическую эффективность производства. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию этих систем, особенно в условиях интенсивного рыбоводства и ограниченных ресурсов, чтобы обеспечить устойчивое развитие отрасли в долгосрочной перспективе в условиях растущего спроса на рыбную продукцию и ужесточения экологических требований.

*Ключевые слова: аквакультура, очистка сточных вод, биоремедиация, микроводоросли, нитрифицирующие бактерии, эвтрофикация, аквапоника, поликультура.*

*Проблемы биологии продуктивных животных. 2025. 3: 23-33.*

### **Введение**

Очистка сточных вод представляет собой сложную проблему для многих государств, поскольку темпы развития инфраструктуры и регулирующих мер отстают от стремительного роста населения и процессов урбанизации. Одновременно с этим городские жители стали более осознанно подходить к удовлетворению своих потребностей, особенно в продовольствии и воде, стремясь изменить условия жизни и среду обитания в сторону большей гигиеничности и улучшения стандартов произведенных продуктов питания, используя легкодоступные ресурсы, в том числе в рамках аквакультуры (Roan et al., 2019).

Мировая деятельность в области аквакультуры продолжает активно развиваться, что подтверждается растущим спросом на рыбную продукцию, включая продукцию аквакультуры. Согласно данным ФАО за 2022 год, среднемировое потребление рыбы на