

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ, ОБЗОРЫ

УДК 636.4.084:636.4.087.7

DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2026.2.5-31

«ИДЕАЛЬНЫЙ ПРОТЕИН» И НИЗКОПРОТЕИНОВЫЕ РАЦИОНЫ КАК ОСНОВА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО КОРМЛЕНИЯ СВИНЕЙ НА ОТКОРМЕ: ВЛИЯНИЕ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ, КАЧЕСТВО МЯСА И ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ (обзор)

Ниязов Н.С.-А., Панюшкин Д.Е.

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

В обзоре обобщены современные подходы к формированию ресурсосберегающих низкопротеиновых (НП) рационов для свиней на откорме на базе концепции «идеального протеина» и стандартизованной идеальной переваримости (SID). Проанализированы методики оценки потребностей и обоснована роль лизина как референтной аминокислоты при выражении остальных незаменимых АК через соотношения к лизину. На основе мета-анализов и экспериментальных данных показано, что при корректной SID-балансировке и добавлении синтетических аминокислот снижение уровня сырого протеина на 2-4% обычно сохраняет или улучшает продуктивность (приросты, конверсия), снижает экскрецию азота (до ≈20-30%) и повышает экономическую эффективность. Обсуждаются противоречия в научных данных, обусловленные факторами генотипа, фазы откорма и методологии. Намечены перспективы включающие, прецизионное кормление с ИИ, новые формы аминокислот и интеграцию в системы устойчивого свиноводства. Обзор подчёркивает стратегическое значение НП-рационов для интенсификации отрасли при минимизации экологического воздействия.

Ключевые слова: низкопротеиновые рационы, откорм свиней, продуктивность, качество мяса, экология, экономическая эффективность

Проблемы биологии продуктивных животных. 2026. 2:5-31

Введение

Возросший мировой спрос на продовольствие, обусловленный демографическим ростом, повышением продолжительности жизни и улучшением её качества, формирует серьёзные вызовы для устойчивости агропромышленных систем. Согласно прогнозам, к 2050 году потребность в пищевой продукции возрастёт на 50% (van Dijk et al., 2021), что создаёт значительное давление на сельское хозяйство, требующее роста производительности при одновременном снижении экологической нагрузки (Vastolo et al., 2024). Данная ситуация усугубляется такими факторами, как изменение климата, урбанизация и трансформация землепользования, ведущие к сокращению доступности природных ресурсов (Praveen, Sharma, 2019). Как растениеводство, так и животноводство подвергаются критическому анализу в связи с конкуренцией за земельные, водные и энергетические ресурсы, а также вследствие их вклада в загрязнение окружающей среды (de Vries, de Boer, 2010).

Производство свинины занимает значимое место в обеспечении глобальной продовольственной безопасности, составляя около трети мирового потребления мяса (FAO, 2024). Свинина служит ключевым источником высококачественного белка и необходимых микронутриентов, особенно в развивающихся странах (Pereira, Vicente, 2013). Однако современное свиноводство сталкивается с комплексом экономических, экологических и технологических проблем, включая высокую стоимость кормов и энергии, дефицит ресурсов и

значительные объёмы отходов. Несмотря на достижения в области генетического отбора, позволившие улучшить конверсию корма и снизить углеродный след отрасли (Dekkers, 2025), кормовая составляющая остаётся основным фактором как производственных затрат (до 60-70 %) (Rauw et al., 2025), так и воздействия на окружающую среду (Gislason et al., 2023). В этой связи оптимизация состава рационов и повышение эффективности усвоения питательных веществ являются критически важными задачами для повышения экономической рентабельности и минимизации экологического ущерба от свиноводства.

Одним из перспективных направлений «ресурсосберегающего» кормления свиней является принцип «идеального протеина», при котором аминокислоты в рационе сбалансированы в соответствии с реальной потребностью организма. Избыток любой из незаменимых аминокислот ведёт к расщеплению её излишка с формированием мочевины и выделения азота в окружающую среду (van Milgen, Dourmad, 2015). При этом избыточное включение белка не повышает продуктивность животных, но вызывает неоправданные экономические и экологические потери. Несвоевременное удаление излишнего азота из рационов приводит к его накоплению в навозе, эмиссии аммиака и оксидов азота, что может вызывать эвтрофикацию почв и водоёмов, а также закисление почвы (Cappelaere et al., 2024). Таким образом, современные исследования подчёркивают необходимость перехода к кормлению, при котором количество сырого протеина (СП) в рационе свиней строго сбалансировано по ключевым аминокислотам – согласно концепции «идеального протеина» (Mulvenna et al., 2025).

При комплексной корректировке рациона достигается и «ресурсосберегающее» использование кормов. Фаза откорма характеризуется наибольшей экологической нагрузкой, и оптимизация кормления в этот период является ключевым фактором снижения углеродного следа продукции (Dekkers, 2025). Кормовые стратегии (понижение СП, оптимизация энергоёмкости рациона, добавки и заменители) являются действенными механизмами минимизации отходов (Wang et al., 2018; Maher et al., 2025). Например, снижение СП даёт снижение использования соевого шрота, а следовательно, уменьшает выбросы парниковых газов при его производстве и логистике (Ball et al., 2022).

Переход на ресурсосберегающие технологии кормления, основанные на концепции идеального протеина и использование НП-рационов, представляет собой стратегическое направление для интенсифицированного свиноводства. Данный подход позволяет синергически решать задачи повышения экономической эффективности, снижения экологической нагрузки и сохранения высокого качества продукции. Дальнейшие исследования должны быть сфокусированы на тонкой индивидуальной адаптации рационов с учётом генетического потенциала животных, физиологической стадии и конкретных условий содержания. Применение НП-рационов, сбалансированных синтетическими аминокислотами, подтверждает свою эффективность как высокоточный инструмент управления метаболизмом, продуктивностью и экологическим воздействием отрасли.

Теоретические основы концепции «идеального протеина» при откорме свиней.

Определение и принципы концепции «идеального протеина».

Концепция «идеального протеина», являющаяся фундаментальным принципом питания свиней, направлена на оптимизацию аминокислотного состава рациона для максимизации эффективности использования белка. Её сущность заключается в обеспечении идеального соответствия профиля незаменимых аминокислот метаболическим потребностям животного, при котором они становятся равнолимитирующими факторами продуктивности, что исключает их дефицит или наоборот, повышенный катаболизм (van Milgen, Dourmad, 2015). Предложенная более полувека назад, данная концепция определяет белок, аминокислотный состав которого точно удовлетворяет потребности организма, минимизируя экскрецию азота (Fuller, 1994).

Таблица 1. Значение незаменимых аминокислот при балансировании низкобелковых рационов для свиней на откорме

Аминокислота	Метаболическая роль	Значение для фазы откорма
Лизин (Лиз)	Участвует в синтезе белков, особенно карнитина и коллагена; является предшественником для метаболитов, влияющих на метаболизм жиров и белков. Поддерживает микробиоту кишечника.	Основная референтная аминокислота для баланса. Позволяет снижать СП на 2-4%, минимизируя избыток азота, поддерживая синтез белков и рост мышц. Предотвращает дефицит в низкобелковых рационах на основе кукурузы-сои.
Метионин (Мет)	Источник серы для синтеза цистеина, таурина и глутатиона; участвует в метилировании ДНК и белков, синтезе полиаминов для пролиферации клеток. Поддерживает антиоксидантные системы, детоксифицируя реактивные формы кислорода.	Необходим для роста, иммунной функции и здоровья кишечника; улучшает морфологию двенадцатиперстной кишки. Дефицит ограничивает синтез белка и антиоксидантную защиту, снижая прирост и стрессоустойчивость. В низкобелковых рационах компенсирует дефицит для оптимального белкового синтеза и снижения экскреции N.
Треонин (Тре)	Ключевой компонент муцинов (40% в гликопротеинах слизи); участвует в синтезе белков, поддерживает барьерную функцию кишечника через производство муцина и IgG. Улучшает экспрессию генов, связанных с иммунитетом.	Важен для поддержания целостности кишечника, снижения воспалений и повышения иммунитета; дефицит увеличивает риск диареи. При откорме способствует оптимальному приросту массы тела и здоровью ЖКТ.
Триптофан (Трп)	Предшественник серотонина, мелатонина и ниацина; модулирует микробиоту, усиливает барьерную функцию. Действует как метаболизированный антиоксидант.	Поддерживает иммунитет, снижает стресс; улучшает использование тканей для роста. При откорме важен для регуляции пищеварения, антистрессовой защиты и синтеза белков.
Валин (Вал)	Субстрат для синтеза глутамина, стимулирует анаболические эффекты через mTOR-путь. Улучшает морфологию кишечника и экспрессию IGF-1 в печени.	Способствует синтезу белков, росту мышц и здоровью кишечника; в комбинации с другими ВСАА повышает прирост, снижает жировые отложения. Дефицит ограничивает мышечный рост.
Изолейцин (Иле)	Участвует в синтезе глутамина, регулирует метаболизм энергии и белков. Поддерживает развитие кишечника, повышая ширину и глубину ворсинок.	Способствует мышечному приросту. Важен для баланса ВСАА в низкобелковых рационах. Добавляется для дальнейшего снижения СП (до 6%).
Лейцин (Лей)	Активирует mTOR-путь для синтеза белков, регулирует аппетит и метаболизм. Стимулирует рост мышц и развитие кишечника.	Ключевой метаболит для мышечного роста и снижения жировых отложений; улучшает прирост и качество мяса. В откорме регулирует потребление корма и синтез белка.
Гистидин (Гис)	Предшественник гистамина; участвует в формировании крови, синтезе белков и ферментов.	Необходим для нормального образования крови; дефицит замедляет прирост. При откорме обычно достаточен, но в рационах с низким СП компенсирует снижения прироста.
Фенилаланин (Фен)	Предшественник тирозина, катехоламинов и меланина; участвует в синтезе белков. Может частично замещаться тирозином.	Важен для роста мышц и гормонального метаболизма; дефицит влияет на пигментацию и рост. В НП-рационах добавляется для баланса при глубоком снижении СП.

Практическая реализация концепции базируется на нормировании аминокислот относительно лизина, принимаемого за 100%, поскольку именно лизин чаще всего является первой лимитирующей аминокислотой в рационах на основе зерновых культур и соевого шрота (van Milgen, Dourmad, 2015; Boisen et al., 2000). Ключевыми принципами концепции являются:

1. Использование лизина в качестве референтной аминокислоты;

2. Баланс рационов на основе стандартизированной илеальной переваримости (Standardized Peal Digestibility, SID) для учёта реальной биодоступности аминокислот (АК);
3. Учёт факториальных компонентов потребности – на поддержание жизнедеятельности, рост и иные функции (Stein et al., 2007; NRC, 2012).

Использование показателя стандартизированной илеальной переваримости позволяет более точно балансировать рацион по аминокислотам по сравнению с нормированием по общему содержанию сырого протеина и гибко изменять потребность в лизине для каждой фазы роста, нормируя остальные аминокислоты по адаптивным соотношениям (Stein et al., 2007; van Milgen, Doumad, 2015). Этот подход служит методологической основой для разработки ресурсосберегающих низкопротеиновых рационов. Так, при откорме свиней с акцентом на интенсивный прирост мышечной массы уровень сырого протеина в рационе можно снизить на 2–6% без ущерба продуктивности за счёт добавления критических синтетических аминокислот, что ведёт к снижению экологической нагрузки производства (Wang et al., 2018; Gloaguen et al., 2014; Rocha et al., 2022).

Метаболическая роль ключевых незаменимых аминокислот и их значение для оптимизации низкобелковых рационов для свиней на откорме представлена в таблице 1. Понимание полифункциональных ролей АК приобретает критическое значение при балансировании низкопротеиновых рационов, поскольку дефицит той или иной аминокислоты способен инициировать каскад метаболических нарушений, не сводящихся лишь к замедлению скорости роста. Именно эта физиологическая специфичность лежит в основе иерархии лимитирования аминокислот при последовательном снижении уровня сырого протеина в рационе (Wang et al., 2018; Duarte et al., 2024).

Методологии оценки потребности в аминокислотах.

Определение точных потребностей животных в аминокислотах является сложной задачей, решаемой с помощью нескольких взаимодополняющих методологических подходов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения.

1. *Факторный (механистический) метод.* Этот подход рассчитывает суточную потребность как сумму затрат на различные физиологические функции: поддержание жизнедеятельности (например, 0,3-0,5 г SID-лизина на кг метаболической массы тела в сутки), рост белка (около 12 г лизина на 100 г прироста протеина) и иные специфические потребности (иммунные реакции, репродукция) (Van Milgen et al., 2008; NRC, 2012). Он позволяет интегрировать модели роста и выражать потребности в абсолютных величинах (г/сут), обеспечивая теоретическую основу для нормирования рационов. Однако его точность зависит от корректности используемых коэффициентов эффективности утилизации аминокислот.

2. *Дозозависимые (dose-response) исследования.* Это классический эмпирический подход, при котором животным скармливают серию рационов с градиентом содержания изучаемой аминокислоты. Для определения точки потребности («точки насыщения») используются различные регрессионные модели: линейное-плато (broken-line), криволинейно-плато или квадратичные функции. Выбор модели существенно влияет на итоговую оценку потребности (Robbins et al., 2006; Kerkaert et al., 2021). Мета-анализ таких исследований позволяет агрегировать данные и выявлять влияние модифицирующих факторов, таких как живая масса и состав рациона (Chae et al., 2024; van Milgen et al., 2012).

3. *Системы прецизионного (точного) кормления.* Наиболее прогрессивный подход, предполагающий динамическую адаптацию рациона к потребностям отдельного животного или однородной группы в реальном времени. Такие системы используют данные о текущей живой массе, потреблении корма и прогнозируемом приросте белка для ежедневного расчёта оптимального аминокислотного состава рациона. Это позволяет снизить вариабельность и

избыточность кормления на 20-30% по сравнению с традиционным фазовым кормлением (Remus et al., 2021).

4. *Метод окисления индикаторной аминокислоты (IAAO)*. Высокочувствительный экспериментальный метод, основанный на измерении скорости окисления меченой «индикаторной» аминокислоты (обычно фенилаланина) при варьировании уровня изучаемой аминокислоты. Метод IAAO позволяет очень точно оценивать потребности, особенно в поддержании и у молодых животных (Elango et al., 2008).

Аминокислотный профиль для свиней на откорме: рекомендуемые соотношения.

Практическое применение концепции «идеального протеина» выражается в поддержании определённых соотношений стандартизовано илеально переваримых (SID) аминокислот к SID-лизину (100%). Для свиней на откорме, с учётом различных фаз роста и современных генетических линий, установлены диапазоны, подтверждённые многочисленными исследованиями и системами кормления (табл. 2).

Таблица 2. Базовое соотношение незаменимых аминокислот в НП-рационы (концепция «идеального протеина» по SID) (Адаптировано по: NRC 2012, Wang et al., 2018; Rocha et al., 2022; Duarte et al., 2024; Hannas et al., 2024).

Аминокислота	SID, % рациона	SID к Лизину
Дорашивание. ж.м.: 30–50 кг		
Лизин	0,95–1,05	100
Метионин +Цистин	0,55–0,60	58–60
Треонин	0,60–0,67	63–65
Триптофан	0,18–0,22	18–21
Валин	0,65–0,75	68–72
Изолейцин	0,52–0,60	54–58
Лейцин	1,05–1,20	105–115
Гистидин	0,32–0,36	33–35
Фенилаланин +Тирозин	0,95–1,05	95–100
1-я фаза откорма. ж.м.: 50–80 кг		
Лизин	0,80–0,90	100
Метионин +Цистин	0,46–0,52	57–59
Треонин	0,50–0,58	62–65
Триптофан	0,15–0,18	18–20
Валин	0,55–0,63	68–70
Изолейцин	0,45–0,52	54–58
Лейцин	0,95–1,10	110
Гистидин	0,26–0,30	33–35
Фенилаланин +Тирозин	0,75–0,85	95–100
2-я фаза откорма. ж.м.: 80–120 кг		
Лизин	0,60–0,70	100
Метионин +Цистин	0,34–0,40	57–60
Треонин	0,38–0,44	63–65
Триптофан	0,11–0,14	18–20
Валин	0,42–0,48	68–70
Изолейцин	0,34–0,40	54–58
Лейцин	0,75–0,85	110
Гистидин	0,20–0,23	33–35
Фенилаланин +Тирозин	0,55–0,65	95–100

Риск дефицита отдельных аминокислот и метаболический дисбаланс.

Наиболее полно изучены риски дефицита лизина, метионина (вместе с цистином), треонина и триптофана. При их недостаточном содержании в НП-рационе быстро ухудшаются скорость роста, конверсия корма и качество мяса (Van Milgen, Dourmad, 2015).

При снижении уровня СП более чем на 4% растёт значение аминокислот второго порядка (валин, изолейцин, гистидин, аргинин, глицин). Их дефицит сводит на нет все преимущества НП-рационов: нарушается синтез белка, а недостаток незаменимых аминокислот с разветвлённой цепью (ВСАА) приводит к серьёзным потерям продуктивности (Li et al., 2017; Jiang et al., 2023). При очень глубоком снижении уровня протеина (ниже 12-13% в зависимости от стадии откорма) может возникать не дефицит конкретных незаменимых аминокислот, а общий дефицит азота, необходимого для синтеза заменимых аминокислот в организме. Это может лимитировать общий синтез белка и соответственно, продуктивность (Wu et al., 2018). Решением может быть добавление предшественников заменимых АК, таких как глицин или глутаминовая кислота. Исследования показывают, что добавление глицина к низкопротеиновым рационам, сбалансированным по синтетическим АК, может улучшить рост, здоровье кишечника и качество мяса (Jiang et al., 2023). ФАО подчёркивает необходимость постоянного мониторинга полного аминокислотного профиля корма (FAO, 2020).

Несмотря ряд исследований, при балансировании низкобелковых рационов у свиней на откорме соотношение аргинина к лизину обычно не учитывают, поскольку аргинин относится к условно-незаменимым аминокислотам, и в стандартных рационах (с умеренным снижением СП на 2-4%) он не является лимитирующим. В типичных кукурузно-соевых рационах аргинин присутствует в избытке за счёт высокого содержания в соевом шроте и может синтезироваться из предшественников (глутамин или пролин) в достаточных количествах. Однако при снижении СП более чем на 4–6% аргинин может стать лимитирующей аминокислотой из-за недостатка азотистых оснований для его эндогенного синтеза, что приводит к снижению прироста и ухудшению состояния кишечника и азотного баланса (Wu et al., 2014; Wang et al., 2018). в таких случаях его дополнительное введение является оправданным.

Даже при оптимальном профиле аминокислот, недостаточная энергетическая составляющая рациона (обменной энергии) приводит к метаболическому дисбалансу. Энергия в таком случае направляется преимущественно на липогенез вместо мышечной ткани. Поэтому НП-стратегия требует совместной и точной оптимизации уровней ОЭ и SID аминокислот, особенно соотношения лизин/энергия (Le Belle et al., 2001).

Роль синтетических аминокислот в корректировке низкопротеиновых рационов.

Применение синтетических аминокислот позволяет разорвать прямую зависимость между обеспеченностью аминокислотами и общим уровнем сырого протеина в рационе (Gloaguen et al., 2014; Wang et al., 2018). С их помощью становится возможным снижение уровня сырого протеина (СП) – на 3-6% – без ущерба для продуктивности, путём замещения дорогостоящих традиционных белковых кормов (соевого шрота, рыбной муки) (Wang et al., 2018; Esteves et al., 2021; Ниязов, 2021). Это приводит к прямой экономии на стоимости кормосмеси и значительному снижению экскреции азота с навозом (Han et al., 2023).

Успешное применение синтетических аминокислот требует чёткого понимания того, какие именно аминокислоты становятся лимитирующими при снижении уровня протеина. При любых сокращениях протеина необходимо добавлять четыре основных аминокислоты: лизин, метионин, треонин и триптофан (Wang et al., 2018). При снижении содержания СП ниже ≈14% к ним добавляются валин и изолейцин, а ниже ≈13% – гистидин и фенилаланин для предотвращения их дефицита и сохранения продуктивности (Wang et al., 2018; Duarte et al., 2024).

На практике синтетические аминокислоты (L-лизин HCl, DL-метионин, L-треонин, L-триптофан, L-валин, L-изолейцин) вводят в комбикорм через премиксы для обеспечения гомогенного распределения (обычно по 0,1-0,5% каждой). Стандартная схема составления

низкопротеинового рациона включает базовые ингредиенты (зерновые – 80-85% рациона, основные белковые корма – 10-15%), которые создают энергетическую и белковую основу, а синтетические аминокислоты (в сумме 0,5-1,0% рациона) служат высокоточным корректирующим элементом для достижения целевого («идеального») аминокислотного профиля (Gloaguen et al., 2014). Для автоматизации расчётов применяют специализированные программные комплексы (например, InraPorc), учитывающие полный спектр влияющих факторов (Remus et al., 2021).

Оптимальный уровень сырого протеина в рационах для свиней на откорме и границы его снижения.

Определение оптимального уровня сырого протеина в рационах для свиней на откорме является основой ресурсосберегающего кормления. Традиционные комбикорма для откармливаемых свиней часто содержат 16-18% СП, что приводит к избыточному поступлению и выведению азота (NRC, 2012). Современные исследования подтверждают, что уровень СП можно снижать без ущерба продуктивности при условии сбалансированности рациона по незаменимым аминокислотам за счёт синтетических добавок (Zhu et al., 2022). Эта парадигма основана на концептуальном разделении «белкового» и «аминокислотного» питания (Stein et al., 2007; van Milgen, Dourmad, 2015).

Снижение СП на 2-3% (например, с 16% до 13-14%) обычно эффективно достигается при добавлении в рацион первой лимитирующей четвёрки синтетических аминокислот: лизина, метионина, треонина и триптофана (Wang et al., 2018; Wu et al., 2018).

Более глубокое сокращение уровня СП на 4-5% (до примерно 12-13%) требует расширенного набора синтетических аминокислот, включая валин и изолейцин, а также контроля баланса заменимых аминокислот (Gloaguen et al., 2014; Esteves et al., 2021).

Рекомендуемые уровни СП дифференцируются в зависимости от фазы откорма и генотипа животных. Так, для ранней фазы откорма (живая масса 45-60 кг) оптимальным считается уровень СП 14-16%, тогда как в поздней фазе (60-120 кг) его можно безопасно снизить до 12-14% (Remus et al., 2020a). Для современных высокопродуктивных генотипов (например, PIC, DanBred), характеризующихся интенсивным мышечным ростом, нижняя безопасная граница СП обычно составляет 13% (Rocha et al., 2022). Однако снижение СП ниже $\approx 11\%$ сопряжено с риском дефицита азота для синтеза заменимых аминокислот, что может приводить к снижению среднесуточных приростов на 5-10% (Wu, Li, 2022).

Расчёт и практические рекомендации по составлению НП-рационов.

Основные этапы расчёта рационов по концепции стандартизированной илеальной переваримости включают последовательную реализацию следующих шагов.

Первым этапом является определение потребности в лизине как референтной аминокислоте: рассчитывается ежедневная потребность в SID-лизине с учётом живой массы, возраста, генотипа и целевого прироста. Для свиней на откорме она обычно составляет около 0,9–1,0% от рациона и может быть оценена как сумма затрат на поддержание и на рост с учётом коэффициентов переваримости (NRC, 2012; van Milgen, Dourmad, 2015).

Вторым этапом осуществляется формирование идеального аминокислотного профиля, где потребности в остальных незаменимых аминокислотах устанавливаются через их оптимальные соотношения к лизину.

Третий этап – балансирование по показателям SID, при котором формулирование рационов проводится исключительно на основе стандартизовано-илеальных аминокислот, что обеспечивает высокую точность и нивелирует различия в переваримости ингредиентов по сравнению с балансировкой по валовому содержанию протеина (Stein et al., 2007; Головкин, 2009).

Четвёртый этап предполагает интеграцию фазового и прецизионного кормления (precision-feeding), позволяющего динамически адаптировать уровень и профиль аминокислот к

меняющимся потребностям технологических групп, повышая эффективность использования корма (Remus et al., 2020a).

На основе синтеза экспериментальных данных и производственного опыта можно сформулировать следующие рекомендации для применения на практике:

1. Фазовая стратегия снижения СП (step-down strategy). С технологической и экономической точек зрения оптимальным является поэтапное снижение уровня сырого протеина в соответствии с возрастными периодами откорма. Уровень СП последовательно снижается по мере роста животных (например, с 16% до 14%, затем до 12-13%) (Wang et al., 2018; Рядчиков, 2022; Liu et al., 2024). Каждой фазе (старт, рост, финиш) должен соответствовать оптимизированный по СП и аминокислотам рацион с установленными контрольными точками по продуктивности. Такой подход позволяет экономить на корме за счёт замены части дорогих белковых компонентов (соевого шрота) на зерновые корма и синтетические аминокислоты, сокращая стоимость корма на 5-10% (Kerr et al., 2003; Омаров и др., 2019).

2. Приоритет аминокислотного балансирования. Обязательным условием является использование синтетических аминокислот (L-лизин, DL-метионин, L-треонин, L-триптофан, L-валин, L-изолейцин). Формулировку рационов необходимо проводить по показателям стандартизированной илеальной переваримости с использованием современных нормативов и программных комплексов (Gloaguen et al., 2014; Chae et al., 2024).

3. Контроль обеспеченности заменимыми аминокислотами. При глубоком снижении СП ($\leq 13\%$) следует учитывать возможный дефицит заменимых (условно-незаменимых) аминокислот, таких как глицин, серин, пролин. Их эндогенный синтез может не покрывать потребности, необходимые для максимальной продуктивности. В таких случаях целесообразно включать в рецептуру дополнительные источники этих аминокислот (кристаллические формы или корма, богатые ими) (Wu, 2014; Jiang et al., 2023).

4. Учёт сырьевой базы. При использовании альтернативных белковых компонентов (DDGS, жмыхи подсолнечника, рапса и др.) требуется особая коррекция аминокислотного профиля. Такие ингредиенты часто имеют дисбаланс аминокислот (например, высокое содержание лейцина), что может усиливать антагонизм среди ВСАА и нарушать соотношение валина и изолейцина (Kerkaert et al., 2021; Rocha et al., 2022).

5. Регулярный производственный мониторинг. Внедрение технологии должно сопровождаться системой контроля, включающей оценку потребления корма, динамики живой массы, конверсии корма и, по возможности, параметров азотного баланса (Fuller, 1994). Это позволяет своевременно корректировать рецептуры при отклонениях от целевых параметров продуктивности.

6. Интеграция экологических и экономических целей. Низкопротеиновые рационы следует рассматривать как часть экологической стратегии предприятия. Они способствуют выполнению нормативов по снижению выбросов азота и углеродного следа. При экономической оценке рационов важно учитывать не только стоимость кормовых компонентов, но и потенциальную экономию за счёт снижения затрат на утилизацию навоза (Kerr et al., 2003; Esteves et al., 2021).

Современные исследования выявили ограничения традиционной интерпретации концепции «идеального протеина», демонстрируя, что он не является статичным, а варьирует в зависимости от соотношения затрат на рост и поддержание, физиологического состояния и генетического потенциала животных (van Milgen, Dourmad, 2015; Chae et al., 2024). Конкретные значения внутри данных диапазонов зависят от методологии исследований, выбранных критериев оценки продуктивности и состава рациона. Современные высокопродуктивные

генотипы с повышенной скоростью мышечной аккреции (например, кроссы Дюрок × Ландрас × Йоркшир или коммерческие линии PIC) требуют более высоких абсолютных уровней лизина и пересмотра традиционных соотношений аминокислот, особенно для незаменимых аминокислот с разветвлённой цепью (Rocha et al., 2022; Кнар, 2025). Кроме того, классическая модель может не в полной мере учитывать роль условно-незаменимых аминокислот (глутамин, глицин), дефицит которых в условиях низкобелкового кормления негативно сказывается на здоровье кишечника и иммунной системы (Wu, Li, 2022). Таким образом, аминокислотный профиль «идеального протеина» представляет собой адаптивную систему, требующую интеграции с более комплексными моделями питания и постоянной корректировки для минимизации потерь азота и максимизации продуктивности в конкретных производственных условиях (Remus et al., 2020a; Remus et al., 2021).

Влияние низкопротеиновых рационов на продуктивность свиней на откорме.

Влияние на физиологические показатели свиней.

Оптимально сбалансированные низкопротеиновые рационы оказывают комплексное положительное влияние на физиологию животных, выходящее за рамки простого поддержания продуктивности. К основным эффектам относятся:

Пищеварение и усвояемость питательных веществ. Снижение сырого протеина при адекватном аминокислотном балансе не ухудшает, а в ряде случаев улучшает усвояемость сухого вещества и энергии на 2-5% (Zhou et al., 2016). Это связано с тем, что при снижении СП сокращается количество нерасщеплённого протеина, поступающего в тонкий кишечник, что снижает протеолитическую ферментацию и выработку токсичных метаболитов в толстом кишечнике (аммиака, биогенных аминов, фенолов). В результате подавляется рост потенциально патогенных микроорганизмов и стабилизируется микробиота кишечника (Orareju et al., 2009; Клименко, 2019). Использование синтетических аминокислот с высокой степенью доступности (SID ≈ 90-95%) также повышает общую эффективность ассимиляции азота (Wu et al., 2018; Zhu et al., 2022). Важную роль здесь играют треонин и глицин – ключевые компоненты кишечной слизи, поддерживающие барьерную функцию желудочно-кишечного тракта (Remus et al., 2020a; McAuley et al., 2022; Jiang et al., 2023). Однако чрезмерное снижение СП (ниже 12%) без учёта обеспеченности незаменимыми аминокислотами может негативно сказаться на процессах пищеварения (Nyachoti et al., 2006).

Интересно, что введение специализированных кормовых добавок, например лактобактерий для ферментации низкопротеиновых рационов, позволяет ещё больше понизить содержание протеина (на 3-5%) за счёт положительного влияния на микробиоту кишечника (Liu et al., 2024).

Метаболизм азота и нагрузка на выделительную систему. Снижение уровня СП на 3% обычно приводит к уменьшению выведения азота с мочой и фекалиями (Wang et al., 2018). Это снижает нагрузку на печень (синтез мочевины) и почки (выведение мочевины), минимизируя риск метаболических нарушений (Dougmad et al., 1999). Вторично это приводит к снижению концентрации аммиака и других летучих соединений в навозе и воздухе помещений, что улучшает санитарно-гигиенические условия содержания (Wu et al., 2018).

Физиологические эффекты правильно сбалансированных низкопротеиновых рационов носят комплексный позитивный характер: они не только сохраняют продуктивность животных, но и укрепляют их метаболический и иммунный статус.

Динамика живой массы и среднесуточные приросты.

Динамика живой массы и среднесуточный прирост (ССП) являются ключевыми показателями эффективности откорма. В ранней стадии откорма (30-50 кг), потребности в аминокислотах на единицу прироста на 10–15% выше из-за интенсивного синтеза белка, тогда

как в финишной фазе (75-135 кг), акцент смещается в сторону контроля качества туши и минимизации затрат (Remus et al., 2020b; Ma et al., 2020). Совокупные данные экспериментов и мета-анализов показывают, что при адекватном балансе по лимитирующим незаменимым аминокислотам (лизин, метионин, треонин, триптофан) низкопротеиновые рационы (12-14% СП) не снижают продуктивность (NRC, 2012; Pomar et al., 2021; Ниязов, Пьянкова, 2024). Умеренное снижение содержания протеина на 2-4% (15-25 г/кг) с коррекцией аминокислотного профиля обычно не приводит к статистически значимому снижению ССП: прирост свиней в фазе 60-120 кг остаётся на уровне 800-1000 г/сут, сопоставимом с контролем (Wang et al., 2018; Remus et al., 2020a; Nan et al., 2023). Например, у гибридов Йоркшир × Ландрас × Дюрок, рацион с 13% СП обеспечивал ССП около 950 г/сут при отсутствии достоверных различий с контрольной группой на 16% СП (Zhao et al., 2019).

Реакция на низкое содержание протеина зависит от фазы откорма и генотипа. В ранней фазе (60 кг) снижение СП ниже 14% может временно замедлить среднесуточный прирост на 5-10% из-за адаптации обмена веществ (Gloaguen et al., 2014). Экстремальная редукция СП (более чем на 4-5% или ниже 11-12%) без полного компенсирования незаменимых аминокислот, приводит к дефициту субстратов для синтеза белка, что снижает ССП на 8-15% (Zhao et al., 2019; Rocha et al., 2022). В поздней фазе откорма (90-120 кг) негативный эффект обычно нивелируется за счёт повышенной эффективности использования азота, и темпы роста стабилизируются. При этом часто наблюдается компенсаторный рост: замедление на раннем этапе компенсируется в дальнейшем, в итоге обеспечивая сопоставимую конечную живую массу (Wang et al., 2019). Практика фазового кормления – когда СП выше в начале откорма и постепенно снижается к финишу – позволяет минимизировать риски, связанные с адаптацией (Remus et al., 2019).

Генетические особенности животных также играют существенную роль. У быстрорастущих коммерческих гибридов (например, PIC) снижение ССП при сбалансированных аминокислотах обычно не отражается на динамике массы, тогда как у некоторых местных пород может наблюдаться небольшое отставание (Ma et al., 2020).

Таким образом, при условии соблюдения «идеального» аминокислотного профиля на всех этапах откорма и учёта генотипа животных допускается снижение СП без ущерба для роста (Chae et al., 2024; Pomar et al., 2021).

Конверсия корма и эффективность использования питательных веществ.

Конверсия корма (КК) и эффективность использования питательных веществ являются ключевыми факторами экономической рентабельности откорма. Правильно сбалансированные низкопротеиновые рационы позволяют улучшать КК на 5-8%, снижая её до 2,5-3,0 кг корма на 1 кг прироста по сравнению с традиционными рационами (Kerr et al., 2003; Pomar et al., 2021). Основной механизм такого улучшения связан с повышенной эффективностью использования азота: уменьшение избытка протеина снижает энергозатраты на дезаминирование аминокислот и синтез мочевины, увеличивая долю АК, идущих на синтез мышечной ткани (Stein et al., 2016; Wu et al., 2018). Экспериментальные данные демонстрируют, что снижение СП на 20 г/кг с добавлением синтетических АК улучшает конверсию корма (Song et al., 2023; de Almeida et al., 2024). Так, у финишных свиней рацион с 13% СП обеспечил КК около 2,8, тогда как при 16% СП она составляла 3,1 кг/кг, без ухудшения потребления корма (Nan et al., 2023).

Рационы с 12% СП и синтетическими АК повышают усвояемость сухого вещества и энергии примерно на 3-5% за счёт уменьшения ферментации непереваренного протеина в кишечнике (Zhou et al., 2016; Neo et al., 2009). Дополнительное включение в состав рационов таких компонентов, как глицин, может улучшать метаболизм и повышать общую эффективность использования питательных веществ на 4-6% (Jiang et al., 2023).

Негативное влияние на конверсию корма возможно в двух основных случаях: при несбалансированности рациона по ключевым аминокислотам (особенно лизину), что нарушает метаболические процессы; при чрезмерном снижении СП (ниже 11%), приводящем к дефициту

даже неэссенциальных аминокислот, либо при непреднамеренном понижении энергетической составляющей рациона (Wu, Li, 2022; Niyonsaba et al., 2023). Поэтому критически важно контролировать не только аминокислотный баланс, но и поддерживать оптимальное соотношение стандартизированного илеального переваримого лизина (SID Лиз) к чистой энергии (ЧЭ).

Убойные показатели: убойный выход, состав и качество туши.

Влияние низкопротеиновых рационов на убойные и мясные качества изучено достаточно широко. Общая тенденция свидетельствует, что при умеренном снижении СП и корректном аминокислотном балансе ключевые убойные показатели остаются сопоставимыми с контролем.

Убойный выход (УВ) статистически значимо не изменяется, сохраняясь на уровне 72–76%, аналогично традиционным рационам (Stein et al., 2016; Wang et al., 2018; Prandini et al., 2013).

Масса туши и выход отрубов остаётся стабильным. При живой массе около 120 кг масса туши составляет порядка 85-90 кг без достоверных различий между низкопротеиновым и стандартным рационом (Opapeju et al., 2009; Song et al., 2023). В некоторых исследованиях отмечается небольшое увеличение выхода основных отрубов (окорок, лопатка, вырезка) на 1-3%, что связывают с оптимизацией состава туши и добавлением аминокислот с разветвлённой цепью (Zhu et al., 2022; Spring et al., 2020).

Состав туши (соотношение мышечной и жировой ткани) является наиболее важным показателем. При значительной редукции СП без полной компенсации аминокислотного профиля наблюдается тенденция к увеличению отложения подкожного и межмышечного жира. Это может выражаться в увеличении толщины шпика на 5-10% и росте массовой доли жира в туше на 0,5-3%, что снижает выход постного мяса (Wood et al., 2004; Gallo et al., 2016; Zhao et al., 2019; Rocha et al., 2022). Эффект более выражен у генотипов с предрасположенностью к жиरोотложению (Martínez-Miró et al., 2021).

При точном расчёте аминокислотного профиля НП-рационы демонстрируют эффективность по основным показателям (ССП, КК, УВ), сопоставимую с традиционными рационами (Remus et al., 2021; Pomar et al., 2021). В высокопротеиновых рационах ССП может быть на 2-5% выше в ранней фазе откорма, однако конверсия корма часто хуже на 5-10% из-за больших потерь выделяемого азота (Portejoie et al., 2004). Преимущество ВП-рационов по приросту проявляется главным образом при неправильном балансировании НП-вариантов, особенно для высокопроизводительных генотипов свиней (Rocha et al., 2022).

Качество мяса при использовании низкопротеиновых рационов.

Химический состав свинины: содержание белка, жира, влаги.

Низкопротеиновые рационы часто вызывают перераспределение энергии в организме свиней, что отражается на химическом составе мяса. При умеренном снижении содержания СП на 1,5-2,5% ($\approx 15-25$ г/кг) и адекватной компенсации незаменимых АК большинство исследований отмечает незначительные или статистически недостоверные изменения в содержании мышечного белка и влаги (Wang et al., 2018; Song et al., 2023; Kerr et al., 2003). Так, при рационе с 12% протеина, содержание белка в мышцах не отличалось от такового при 16% СП в контроле (Tous et al., 2014). Конкретные различия обычно не превышают 0,2-0,8% и в большинстве случаев не являются статистически значимыми при корректной аминокислотной компенсации (Zhu et al., 2022; Liu et al., 2023).

Увеличение внутримышечного жира (ВМЖ) является частым явлением при НП-рационах. Снижение СП ведёт к перенаправлению избыточной энергии на липогенез (Wood et al., 2004; Ruusunen et al., 2007). Увеличение ВМЖ в длиннейшей мышце спины составляет от 0,3-0,5 до 1-2%, по сравнению с контролем (Pires et al., 2016; Madeira et al., 2017; Yin et al., 2017).

Например, при рационе с 12% протеина ВМЖ вырос на 1,2% по сравнению с 16%-ным контролем (Tous et al., 2014). Этот эффект связывают со смещением метаболизма в сторону окислительного пути, усилением липогенеза, модуляцией экспрессии генов липидного обмена (FAS, PPAR γ , ACC и др.) и опосредованным влиянием через изменение микробиоты кишечника (Zhu et al., 2022; Liu et al., 2023). Отмечается увеличение мраморности мяса, что улучшает сочность продукта, а также благоприятное изменение жирнокислотного состава в сторону увеличения доли мононенасыщенных жирных кислот.

Содержание влаги в мясе при НП-рационах обычно меняется незначительно. В некоторых работах отмечается снижение влажности, коррелирующее с ростом жировой ткани (Madeira et al., 2013). Так, у свиней на рационе с 13% СП содержание влаги в мышцах уменьшилось на 2-3% ($P < 0,05$) (Suárez-Belloch et al., 2016). Однако другие исследования не выявляют значимых изменений влажности: например, при добавлении глицина к рациону с 12% СП, её содержание оставалось стабильным (Jiang et al., 2023). В целом существенных различий обычно не фиксируется; иногда отмечается небольшая тенденция к повышению влагоудерживающей способности при увеличении ВМЖ (Gallo et al., 2016; Tejada et al., 2020).

Таким образом, химический состав мяса свиней при НП-рационах характеризуется тенденцией к повышению доли жира (на 1-2%) при сохранении уровня белка и влаги, при условии правильного баланса аминокислот (Kerr et al., 2003; Wang et al., 2018; Rocha et al., 2022). Это может улучшать вкусовые и сенсорные свойства продукта, однако требует контроля, чтобы не допустить избыточного ожирения туши (Teje et al., 2006).

Морфологические характеристики туши.

Морфологические показатели туши, такие как площадь «мышечного глазка», толщина шпика и соотношение мышечной и жировой тканей, часто изменяются под влиянием низкопротеиновых рационов, отражая перераспределение питательных веществ в организме.

Площадь «мышечного глазка» (ПМГ). Площадь мышечного глазка в «longissimus dorsi» при дефиците аминокислот обычно снижается. В исследовании с рационом 12-14% СП она снизилась на 5-10% ($P < 0,05$) по сравнению с 16%-м контролем (Gallo et al., 2016). Однако при умеренном снижении СП с адекватной балансировкой незаменимых аминокислот, значимых изменений ПМГ в длиннейшей мышце спины, не обнаружено (Prandini et al., 2013; de Almeida et al., 2024). Существенное уменьшение ПМГ отмечается в основном при экстремальном сокращении протеина и/или дефиците лизина (Yin et al., 2017; Li et al., 2016). Балансировка рациона аминокислотами с разветвлённой цепью (добавление лейцина) позволяет сохранить ПМГ на уровне контроля (Li et al., 2017). В других работах НП-рацион (11–13%) не влиял на ПМГ, если достаточном обеспечении энергией (Madrid et al., 2013).

Толщина шпика (backfat thickness). этот показатель часто растёт при НП-рационах из-за перенаправления избытка энергии на жировые отложения. Снижение СП на 3-4% ведёт к увеличению толщины шпика примерно на 2-4 мм (D'Souza et al., 1998; Wood et al., 2013). Так, у свиней на 12%-м НП рационе толщина подкожного жира выросла на 15% (Liu et al., 2015). Прирост шпика обычно находится в пределах 1-3 мм и более выражен при длительном кормлении рационами со снижением СП на 15-25% (Gallo et al., 2016; Madeira et al., 2017; Tejada et al., 2020). В некоторых случаях, при правильной балансировке рациона по энергетической составляющей, этот эффект не проявляется, особенно у современных генотипов со склонностью к меньшему жиरोотложению (Suárez-Belloch et al., 2016).

Соотношение мышечной и жировой тканей. В НП-рационах соотношение обычно снижается из-за увеличения доли жира. В экспериментах с 12%-м СП отношение мышечной ткани к жировой уменьшилось на 5-8% ($P < 0,05$) за счёт роста ВМЖ и толщины шпика (Madeira et al., 2013; Li et al., 2018). Часто наблюдается сдвиг в сторону большего процента жировой ткани (Madeira et al., 2017; Pires et al., 2016). Однако при точном балансе аминокислот и контроле энергии в рационе, соотношение мышц и жира может оставаться приемлемым для

коммерческого производства (Song et al., 2023; Ниязов, Панюшкин, 2023; de Almeida et al., 2024). Дополнительное введение в рацион таких компонентов, как глицин, помогает стабилизировать это соотношение, сохраняя мышечную массу (Jiang et al., 2023). Реакция соотношения мышц и жира сильно зависит от генотипа: у мясных пород негативный эффект проявляется слабее, чем у сальных (Madeira et al., 2017).

В итоге низкопротеиновые рационы часто приводят к ухудшению морфологических характеристик туши (увеличению жирности), но этот эффект можно минимизировать правильной балансировкой аминокислот и энергии рациона (Ruiz-Ascacibar et al., 2017).

Технологические и органолептические свойства мяса.

Технологические свойства мяса (водосвязывающая способность, потеря при варке, нежность) и органолептические (вкус, сочность, аромат, цвет) часто изменяются при низкопротеиновых рационах, в значительной степени благодаря росту ВМЖ.

Цвет. При НП-рационах нередко наблюдается повышенная краснота и снижение светлоты мяса, особенно при умеренном снижении СП и повышенном ВМЖ (Zhu et al., 2022; Yin et al., 2017).

pH и водоудерживающая способность (ВУС). При правильно сбалансированных НП-рационах параметры pH не меняются по сравнению с традиционными рационами (Zhu et al., 2022; Liu et al., 2023). Водоудерживающая способность может снижаться, но более высокое содержание ВМЖ оказывает компенсирующее действие, улучшая нежность продукта (Teje et al., 2006; Suárez-Belloch et al., 2016). В ряде работ повышение ВМЖ сопровождалось снижением потерь воды (улучшением ВУС) (Yin et al., 2017), хотя другие исследования сообщают об отсутствии значимых различий (Zhu et al., 2022; Song et al., 2023).

Нежность. Увеличение ВМЖ обычно коррелирует с увеличением нежности (менее жёсткое мясо). В ряде исследований было показано снижение жёсткости на 10-15% при повышении ВМЖ (Teje et al., 2006; Suárez-Belloch et al., 2016). Однако эффект нежности сильно зависит от возраста животных и технологии созревания мяса (Yin et al., 2017; He et al., 2025).

Вкусовые качества и аромат. Рост ВМЖ и доли мононенасыщенных жирных кислот (например, олеиновой) обычно повышает сенсорные оценки вкуса и аромата (Minussi et al., 2023). В исследовании с НП рационом (12% СП), мясо свиней получило на 0,5-0,6 балла больше по показателям сочности и вкуса ($P < 0,01$) (Wood et al., 2004). Аромат улучшается за счёт роста доли ненасыщенных жирных кислот (Madeira et al., 2013). Однако в некоторых случаях возросшее окисление липидов может ухудшать вкусовые свойства мяса (Liu et al., 2015), что указывает на возможную необходимость применения антиоксидантов (Jiang et al., 2023).

Технологическая пригодность. Умеренное повышение ВМЖ облегчает переработку мяса, улучшая текстуру и снижая потери сока. В то же время увеличение толщины шпика может потребовать корректировки процессов обвалки и разделки туш (Gallo et al., 2016; Tejada et al., 2020).

При условии правильного аминокислотного баланса низкопротеиновые рационы, как правило, улучшают органолептические свойства мяса (нежность, сочность, вкус, цвет) за счёт повышения ВМЖ и изменения его жирнокислотного состава. При этом важно учитывать возможные изменения морфологических показателей туши, которые могут повлиять на технологические аспекты переработки.

Противоречивость научных данных: многофакторные детерминанты variability результатов.

Многочисленные исследования влияния НП-рационов на свиней часто приводят к противоречивым выводам, что создаёт сложности для их обобщения и технологической интерпретации для производства. В ряде работ при снижении сырого протеина на 2-4% при

адекватной компенсации незаменимых аминокислот, отмечали сохранение или улучшение продуктивности (Tous et al., 2014; Jiang et al., 2023), тогда как другие сообщают о снижении среднесуточного прироста и ухудшении конверсии корма (Suárez-Belloch et al., 2016; Gallo et al., 2016). Аналогичные расхождения наблюдаются в оценках состава туши, качества мяса и влияния на экологию (Wang et al., 2018; Rocha, 2022; Song et al., 2023).

Основные детерминанты этой вариабельности включают:

Величину и методологию снижения СП (термин «низкопротеиновый» в разных работах соответствует разным величинам редукиции; умеренное снижение $\approx 1,5-3\%$ при полной аминокислотной компенсации обычно безопасно, тогда как глубокая редукиция $>4\%$ без компенсации часто снижает продуктивность и увеличивает жиротложение) (Part et al., 2003; Li et al., 2018; Zhao et al., 2019; Jiang et al., 2023). Также критически важна точность аминокислотного балансирования, в частности учёт SID и вторичных лимитирующих аминокислот (валин, изолейцин, гистидин, аргинин, глицин) (Part et al., 2003; van Milgen, Dourmad, 2015; Li et al., 2017).

Генетическая вариабельность. Разные породы и генетические линии по-разному реагируют на НП-рационы. Современные высокопродуктивные гибриды мясного направления (Дюрок, Пьетрен и др.) чувствительнее к дефициту аминокислот и при их некорректном балансе теряют мышечную массу (Madrid et al., 2013; Li et al., 2017). Традиционные породы мясo-сального типа при использовании НП-рационов, часто демонстрируют улучшение качества мяса за счёт увеличения внутримышечного жира, но при этом могут чрезмерно увеличивать толщину шпика (Wood et al., 2013; Madeira et al., 2017; Tejada et al., 2020). Генетические различия могут объяснять до 20-30% изменения состава туши (Ruiz-Ascacibar et al., 2017). Смешение генотипов в эксперименте резко увеличивает разброс результатов.

Фаза откорма и адаптационный период. Эффективность НП-рационов существенно зависит от производственной фазы. На ранних стадиях откорма, НП без адекватной нутритивной поддержки может замедлять рост, негативно влиять на развитие желудочно-кишечного тракта и иммунный статус животных (Heo et al., 2008; Fan et al., 2015). Напротив, применение НП-рационов в финишный период чаще показывает положительные технологические и экологические эффекты без ущерба продуктивности (Song et al., 2023; Liu et al., 2024). Также важна продолжительность экспериментов: краткосрочные (4-6 недель) исследования могут не выявлять долгосрочных изменений, тогда как длительные показывают тенденцию к накоплению жира (Teje et al., 2006; Ruusunen et al., 2007).

Энергетический состав рациона. Замещение протеина углеводными источниками без корректировки уровня чистой энергии и соотношения SID Лиз/ЧЭ, может непреднамеренно изменить состав туши в сторону увеличения жира (Le Bellego et al., 2001; Stein et al., 2016). В данном случае баланс рациона по энергии важен для сохранения продуктивности и качества мяса (Madrid et al., 2013).

Условия содержания такие как, параметры микроклимата (температура, влажность, вентиляция) и плотность посадки существенно модифицируют влияние НП-рационов. В оптимальных контролируемых условиях низкопротеиновые рационы могут не показывать отрицательного влияния (Liu et al., 2015). Однако в коммерческих условиях со стресс-факторами (тепловой стресс, высокая плотность, инфекции) НП-рационы могут усугублять стресс животных, снижается аппетит, угнетается иммунитет и повышается восприимчивость к кишечным заболеваниям. (Fan et al., 2015; Ruiz-Ascacibar et al., 2017).

Методологические различия и качество аналитики (разные протоколы измерений ВМЖ, рН, потерь сока, методы оценки эмиссии аммиака, вариабельность питательной ценности ингредиентов) приводят к несовместимости результатов и требуют стандартизации методов (Le Bellego et al., 2001; Prandini et al., 2013; Sajeev et al., 2018; Cappelaere et al., 2024).

К этому добавляются экономические и региональные факторы (конъюнктура цен на синтетические аминокислоты и сырьё) (Wang et al., 2020; Duarte et al., 2024),

Учитывая множественность и взаимодействие перечисленных факторов, некорректно делать категоричные выводы о «эффективности» или «неэффективности» НП-рационов. Интерпретация имеющихся данных должна опираться на стандартизированные методики, фазовую и SID-ориентированную формулировку рационов, длительные и многофакторные исследования с контролем генотипа, условий содержания и экономического контекста для выработки практических рекомендаций производителям (Pires et al., 2016; Ruiz-Ascacibar et al., 2017).

Эколого-экономические аспекты применения низкопротеиновых рационов.

Снижение экологической нагрузки.

Низкопротеиновые рационы в свиноводстве позволяют существенно уменьшить экологическую нагрузку отрасли, что рассматривается как важный фактор устойчивого развития производственной системы.

1. Уменьшение экскреции азота с навозом.

Снижение уровня сырого протеина в рационе при сохранении баланса незаменимых аминокислот ведёт к уменьшению потребления азота и, соответственно, сокращению его экскреции с навозом. Это объясняется тем, что избыточный азот, не используемый для синтеза белка, выводится из организма. Мета-анализ и экспериментальные исследования показывают: при снижении СП на 1-4% (при правильном балансе аминокислот) экскреция азота уменьшается примерно на 20-30% (Wang et al., 2018). Снижение СП с 18% до 15-16% при компенсации лимитирующими аминокислотами снижает экскрецию азота на 15-30% (Wang et al., 2020; Niyonsaba et al., 2023). Более детальные оценки указывают, что уменьшение СП на 1% в среднем снижает общий вывод азота на $\approx 8-11\%$ (Cappelaere et al., 2024; Sajeev et al., 2018). Величина эффекта зависит от фазы откорма, исходного уровня СП и точности балансировки. При этом эффективность использования азота возрастает: коэффициент его удержания может достигать 50-60%. Балансировка ключевых аминокислот (лизина, метионина, треонина и др.) минимизирует потери азота за счёт снижения катаболизма избытка аминокислот (Gallo et al., 2016). Как отмечает ФАО, применение таких рационов способствует снижению загрязнения почв и водных экосистем нитратами (FAO, 2017).

2. Снижение эмиссии аммиака и парниковых газов.

Уменьшение экскреции азота, особенно в аммонийной форме, напрямую снижает эмиссию аммиака (NH_3) при хранении и переработке навоза. Многочисленные исследования демонстрируют: эмиссия NH_3 сокращается примерно на 10-15% на каждый процент снижения СП в рационе (Philippe et al., 2007; Sajeev et al., 2018; Cappelaere et al., 2024). К примеру, при переходе на рационы с 12-14% СП наблюдалось уменьшение эмиссии аммиака на 20-30% (Leek et al., 2007). Мета-анализ отмечает снижение выбросов NH_3 в среднем на $11 \pm 6\%$ на каждый 1% снижения СП (Sajeev et al. 2018).

Влияние низкопротеиновых рационов на эмиссию закиси азота (N_2O) и метана (CH_4) менее однозначно. Для N_2O обычно фиксируется умеренное снижение (около 5-10%) вследствие уменьшения содержания общего азота в навозе (Velthof et al., 2005). Однако в ряде исследований отмечали отсутствие значимого эффекта или даже небольшое повышение коэффициента эмиссии N_2O при НП-рационах, что связывают с изменением состава навоза и микробиологических процессах при его хранении (Cappelaere et al., 2024; Hou et al., 2015).

Данные по метану также противоречивы: в большинстве работ снижение СП приводит к уменьшению выбросов CH_4 в расчёте на единицу продукции (Cappelaere et al., 2024), однако в некоторых случаях низкопротеиновый рацион может усиливать продукцию метана из-за изменений в процессах ферментации в ЖКТ (Jarret et al., 2011). В целом комплексное применение

НП-рационов рассматривается как мера, способствующая сокращению вклада животноводства в глобальное потепление на 5-15%.

3. Косвенные экологические эффекты и оценка жизненного цикла.

Помимо прямого влияния на экскрецию азота и эмиссию аммиака, низкопротеиновые рационы оказывают косвенное положительное влияние на эти процессы, через изменение структуры кормовой базы. Снижение доли импортируемых белковых компонентов (в первую очередь соевого шрота) уменьшает нагрузку на природные экосистемы, связанную с расширением пахотных площадей и вырубкой лесов. По оценкам методологии жизненного цикла, производство кормов даёт наибольший вклад в углеродный след производства свинины. Замещение части растительного белка синтетическими аминокислотами позволяет сократить выбросы парниковых газов и риски, связанные с изменением землепользования, по всей цепочке «корм–животное–продукт» (Wang et al., 2020; Copley et al., 2023; Gislason, et al., 2023).

Экономическая эффективность.

Основной экономический эффект от применения низкопротеиновых рационов достигается за счёт сокращения использования дорогостоящих белковых компонентов (например, соевого шрота) и их замещения более дешёвыми зерновыми компонентами в комбинации с синтетическими аминокислотами (L-лизин, DL-метионин, L-треонин и др.).

Снижение уровня СП на 2-4% позволяет уменьшить долю соевого шрота на 10-20%, что, в свою очередь, сокращает стоимость тонны комбикорма примерно на 5-10% (Tous et al., 2014; Kerr et al., 2003). Мета-анализы показывают, что умеренное снижение СП может обеспечить экономию от нескольких центов до приблизительно 10-20 долларов США на одну голову за весь цикл откорма (Wang et al., 2020; Duarte, 2024). В качестве примера: переход на рацион с 13% СП может сэкономить 15-20 евро на свинью за весь цикл откорма и позволит заменить 50-100 кг соевого шрота на тонну комбикорма (Ruiz-Ascacibar et al., 2017).

Экономическая целесообразность включения в рацион синтетических аминокислот определяется их рентабельностью (Return on Investment, ROI), которая достигает 1,5-2,5 за счёт экономии на дорогом белковом сырьё, таком как соевый шрот (Jiang et al., 2023). Например, при цене лизина 1,5 USD/кг его применение оправдано, если позволяет сэкономить 20-30 кг соевого шрота на тонну комбикорма (Wang et al., 2020; Duarte, 2024). Окупаемость применения более дорогих аминокислот (L-валин, L-изолейцин) требует более тщательного анализа и обычно зависит от пороговых цен на соевый шрот (Pope, 2023; Rocha, 2022). В долгосрочной перспективе ужесточение экологических норм и возможные штрафы за выбросы азота повышают окупаемость низкопротеиновой стратегии, ROI которой может составлять 10-20% за счёт экономии на кормах и снижения экологических платежей (Ruiz-Ascacibar et al., 2017). В ЕС, с учётом директив по ограничению выбросов азота, такие рационы повышают прибыльность производства на 5-10% (FAO, 2017).

Для оценки рентабельности в условиях определённого хозяйства рекомендуется следующий алгоритм:

1. Сбор исходных данных: текущие цены на шрот (в основном соевый) и синтетические аминокислоты, показатели продуктивности поголовья, состав существующих рационов.
2. Моделирование сценариев: расчёт изменения стоимости рациона и потенциальной экономии при снижении СП на 1-3% с учётом добавления необходимых аминокислот.
3. Учёт изменений продуктивности: на основе данных локальных экспериментов или региональных мета-анализов, корректировка прогнозов изменения прироста и конверсии корма.
4. Расчёт чистой приведённой стоимости и срока окупаемости: при высоких ценах на соевый шрот срок окупаемости дополнительных затрат на аминокислоты и адаптацию производства обычно не превышает одного производственного цикла (Wang et al., 2020; Duarte, 2024).

При условии сохранения продуктивности животных (среднесуточных приростов и конверсии корма), сокращение затрат на корма напрямую приводят к снижению себестоимости единицы продукции. Моделирование и практические исследования показывают, что НП-рационы могут снижать себестоимость производства свинины на 3-7% (Madrid et al., 2013; Gallo et al., 2016). Более консервативные оценки с учётом региональных особенностей и волатильности цен указывают на снижение себестоимости на 1-4% (Wang et al., 2020; Copley et al., 2023). Ключевым условием является умеренность снижения СП, т.к. чрезмерная редукция (ниже 12% без полноценной компенсации аминокислот) может ухудшить продуктивность, нивелируя экономию на кормах и даже повышая себестоимость продукции (Suárez-Belloch et al., 2016; Niyonsaba et al., 2023; Duarte, 2024).

Ключевыми факторами, определяющими экономическую целесообразность, являются: высокая и волатильная стоимость соевого шрота; доступность и стабильность поставок синтетических аминокислот; наличие технической компетенции для точной балансировки рационов; регуляторная среда, поощряющая снижение экологической нагрузки (снижение налогового бремени).

Перспективные направления развития технологии низкопротеинового кормления.

Разработка и внедрение адаптивных моделей прецизионного кормления с использованием ИИ.

Для раскрытия потенциала низкопротеиновых рационов требуются интегрированные инновации, включающие как технологические, так и организационно-квалификационные компоненты. Развитие сенсорики и платформ IoT (автоматические весовые станции, интеллектуальные кормораздатчики, датчики микроклимата и поведения) обеспечивает коррекцию рациона в реальном времени с учётом массы, скорости роста и условий содержания (Jones et al., 2022; Pomar et al., 2021). Алгоритмы машинного обучения позволяют оптимизировать рецептуры, анализируя данные о продуктивности, составе кормов, ценах и средовых параметрах, что снижает себестоимость при сохранении продуктивности и учитывает сложные взаимодействия «генотип–рацион–среда». На практике такие системы могут безопасно обеспечить снижение уровня сырого протеина на 15-20% с экономической выгодой и ранним выявлением дисбалансов по изменению паттернов потребления корма (Jones et al., 2022). Однако эффективное применение данных технологий невозможно без высокой квалификации специалистов, владеющих методами расчёта и принципами фазового и прецизионного кормления.

Создание новых форм синтетических аминокислот и их комплексов.

Для повышения эффективности и стабильности низкопротеиновых рационов разрабатываются новые формы синтетических аминокислот – микрокапсулированные, полимерные и пролонгированного действия, которые обеспечивают контролируемое высвобождение в ЖКТ, повышенную стабильность при хранении и смешивании и снижают потери в пищеварении, улучшая биодоступность и предсказуемость их действия (Prandini et al., 2013; Jiang et al., 2023). Также перспективно создание комплексных функциональных премиксов, объединяющих аминокислоты с пробиотиками, пребиотиками, ферментами (фитаза, протеаза), органическими кислотами, антиоксидантами и хелатными микроэлементами для улучшения здоровья кишечника, перевариваемости и иммунного статуса при пониженном уровне протеина (Duarte et al., 2024; Liu et al., 2024). Снижение себестоимости за счёт масштабирования, биотехнологий (ферментации), локализации производства и применения концепции био-рафинации из возобновляемого сырья и отходов усилит доступность и привлекательность НП-стратегий (Copley et al., 2023).

Интеграция в комплексные системы устойчивого (зеленого) свиноводства.

Внедрение НП-рационов следует рассматривать как часть комплексной стратегии снижения экологического воздействия на среду обитания. Максимальный эффект достигается при синергии применения НП-рационов с другими технологиями: эффективным хранением и переработкой навоза (биогаз), точным внесением органических удобрений, адаптивными севооборотами, использованием альтернативных источников белка (насекомые, водоросли, одноклеточный белок). Такой системный подход может снизить эмиссию парниковых газов и аммиака, а также существенно уменьшить углеродный след продукции (Copley et al., 2023; FAO, 2020).

Ужесточение экологического законодательства, в частности нормативов по выбросам аммиака (директивы ЕС, национальные стандарты), а также внедрение экономических стимулов (субсидии, зеленые кредиты, сертификация продукции) для сельхозпроизводителей, являются мощными внешними драйверами для ускоренного распространения НП-схем и сопутствующих технологий (Cappelleaere et al., 2024; Ball et al., 2022).

НП-стратегия снижает зависимость регионов и стран от импорта дорогих белковых кормов (особенно сои), повышая тем самым устойчивость и самообеспеченность агропродовольственных систем. Это делает производство свинины менее уязвимым к глобальным рыночным колебаниям, что соответствует целям социальной устойчивости и продовольственной безопасности (Wang et al., 2020; Rocha, 2022).

Заключение

Корректно спланированное поэтапное снижение уровня сырого протеина на 2-5% при обязательном балансировании аминокислотного профиля на основе показателей стандартизированной илеальной переваримости и использовании синтетических аминокислот позволяет не только сохранять и улучшать продуктивность животных, но и способствует оптимизации их физиологического состояния. Одновременно достигается значимый природосберегающий эффект за счёт сокращения экскреции азота и снижения эмиссии аммиака. Успешная реализация данной стратегии требует применения подходов прецизионного питания: точного проектирования рационов с учётом доступных SID-аминокислот, внедрения фазового кормления и организации постоянного мониторинга продуктивности и состояния животных с адаптацией к производственным особенностям конкретного хозяйства.

Концепция «идеального протеина» продолжает эволюционировать, интегрируя современные достижения генетики, физиологии и цифровых технологий, что открывает новые возможности для оптимизации откорма свиней в направлении повышения экономической эффективности, улучшения качества продукции и обеспечения экологической устойчивости современного свиноводства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, проект № 124020200032-4. на 2023–2026 гг.

Список литературы

1. Головки Е.Н. Биодоступность аминокислот у свиней (обзор). // Проблемы биологии продуктивных животных. 2009. № 2. С. 27-43.
2. Клименко Т.В. Низкопротеиновые рационы - верный способ избежать диареи. // Свиноводство. 2019. № 3. С. 20-21.
3. Ниязов Н.С.А. Комбикорма для растущих свиней с разными уровнями сырого протеина и истинной доступности аминокислот для всасывания в кишечнике. // Проблемы биологии

- продуктивных животных. 2021. № 3. С. 69-81. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2021.3.69-81
4. Ниязов Н.С.А., Панюшкин Д.Е. Показатели качества свинины при использовании низкопротеиновых рационов с добавками аминокислот для создания заданных уровней и соотношений незаменимых аминокислот в корме. // Проблемы биологии продуктивных животных. 2023. № 1. С. 74-85. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2023.1.74-85
 5. Ниязов Н.С.А., Пьянкова Е.В. Комбикорма для свиней мясного типа на основе доступности аминокислот. // Свиноводство. 2024. № 5. С. 18-20. doi: 10.37925/0039-713X-2024-5-18-20
 6. Омаров М.О., Слесарева О.А., Костомахин Н.М. Учёт доступности аминокислот в белковых кормах как критерий эффективности использования рациона. // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2019. № 12. С. 33-39.
 7. Рядчиков В.Г. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных. // Краснодар. 2022. 636 с. ISBN 978-5-507-45304-7
 8. Ball M.E.E., Smyth S., Beattie V.E., McCracken K.J., McCormack U., Muns R., et al. The environmental impact of lowering dietary crude protein in finishing pig diets – The effect on ammonia, odour and slurry production. // Sustainability. 2022. Vol. 14 . nr 19. P. 12016 . doi: 10.3390/su141912016
 9. Barea R., Brossard L., Le Floc'h N., Primot Y., Melchior D., van Milgen J. The standardized ileal digestible valine-to-lysine requirement ratio is at least seventy percent in postweaned piglets. // J Anim. Sci. 2009a. Vol. 87. nr 3. P. 935–947. doi: 10.2527/jas.2008-1006
 10. Barea R., Brossard L., Le Floc'h N., Primot Y., van Milgen J. The standardized ileal digestible isoleucine-to-lysine requirement ratio may be less than fifty percent in eleven- to twenty-three-kilogram piglets. // J Anim. Sci. 2009b. Vol. 87. nr 12. P. 4022–4031. doi: 10.2527/jas.2009-1964
 11. Boisen S., Hvelplund T., Weisbjerg M.R. Ideal amino acid profiles as a basis for feed protein evaluation. // Livest. Prod. Sci. 2000. Vol. 64. nr 2–3. P. 239–251. doi: 10.1016/S0301-6226(99)00146-3
 12. Cappelaere L., Garcia-Launay F., Larios D., Simongiovanni A., Godbout S., Letourneau-Montminy M.-P. Environmental benefits of crude protein reduction in growing pig diets: is it worth going further? // J. Anim. Sci. 2024. Vol. 102. skae317. doi:10.1093/jas/skae317
 13. Chae B., Poaty Ditengou J. I. C., Lee A.-L., Tak J., Cheon I., Choi N.-J. An estimation of the requirements of the standardized ileal digestible tryptophan, valine, isoleucine and methionine on young pigs' (up to 50 kg) feed efficiency: A meta-regression analysis. // Animals. 2024. Vol. 14. nr 19. P. 2884. . doi: 10.3390/ani14192884
 14. Copley M.A., McGahan E.J., McCormack K., Wiedemann S.G. Life cycle assessment for the pork industry (Final Report APL Project 2021/0014). // 2023. <https://australianpork.com.au>
 15. de Almeida A.M., Latorre M.A., Ripoll G., Verdú M., Álvarez-Rodríguez J. Reducing dietary protein levels with amino acid supplementation in Duroc sire line finishing pigs. // Animals (Basel). 2024. Vol. 14. P. 3572. doi: 10.3390/ani14243572
 16. de Vries M., de Boer I.J.M. Comparing environmental impacts for livestock products: a review of life cycle assessments. // Livest. Sci. 2010. Vol. 128. nr 1-3. P. 1–11. . doi
 17. : 10.1016/j.livsci.2009.11.007
 18. Dekkers J.C.M. Opportunities to improve environmental sustainability of pork production through genetics. // J. Anim. Sci. 2025. Vol. 103. skaf042. doi:10.1093/jas/skaf042
 19. Dourmad J.Y., Søve B., Latimer P., Boisen S., Fernández J., van der Peet-Schwering C., Jongbloed A. W. Nitrogen consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands,

- and Denmark. // *Liv. Prod. Sci.* 1999. Vol.58. nr 3. P. 261–264. doi: 10.1016/S0301-6226(99)00015-9
20. D'Souza D.N., Pethick D.W., Dunshea F.R., Pluske J.R., Mullan B.P. Nutritional manipulation increases intramuscular fat levels in the Longissimus muscle of female finisher pigs. // *Australian J Agric. Res.* 1998. Vol. 54. nr 8. P. 745-749. doi: 10.1071/AR03009
 21. Duarte M.E., Parnsen W., Zhang S., Abreu M.L.T., Kim S.W. Low crude protein formulation with supplemental amino acids for its impacts on intestinal health and growth performance of growing-finishing pigs. // *J Anim. Sci. Biotechnol.* 2024. Vol. 15. Art N. 55. doi: 10.1186/s40104-024-01015-6
 22. Elango R., Ball R. O., Pencharz P. B. Indicator amino acid oxidation: concept and application. // *J Nutr.* 2008. Vol. 138. nr 2. P. 243–246. doi: 10.1093/jn/138.2.243
 23. Esteves L.A.C., Monteiro A.N.T.R., Sitanaka N.Y., Oliveira P.C., Castilha L.D., Paula V.R.C., Pozza P.C. The reduction of crude protein with the supplementation of amino acids in the diet reduces the environmental impact of growing pigs production evaluated through life cycle assessment. // *Sustainability.* 2021. Vol. 13. nr 9. P. 4815. doi: 10.3390/su13094815
 24. Fan P., Li L., Rezaei A., Eslamfam S., Che D., Ma X. Metabolites of dietary protein and peptides by intestinal microbes and their impacts on gut. // *Curr. Protein Pept. Sci.* 2015. Vol. 16. nr 7. P. 646-654. doi: 10.2174/1389203716666150630133657
 25. FAO. Meat Market Review. Emerging trends and outlook in 2024. // FAO. Rome. 2024. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd3502en>
 26. FAO. The future of food and agriculture – Trends and challenges. // FAO. Rome. 2017. <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>
 27. FAO. The State of Food and Agriculture 2020. // FAO. Rome. 2020. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb1447en>
 28. Fu H., Yang T., Ni H., Li J., Liu F., Liu J., Yin Y. A low-protein soybean-free diet improves carcass traits and meat quality and modulates the colonic microbiota in Daweizi pigs. // *Front. Vet. Sci.* 2025. Vol. 11. Epub. 1516198. doi: 10.3389/fvets.2024.1516198
 29. Fuller M.F. Amino acid requirements for maintenance, body protein accretion and reproduction in pigs. // In: *Amino acids in farm animal nutrition* (Ed. D'Mello J.P.F.). CAB International, Wallingford. 1994. P. 155-184.
 30. Gallo L., Bona M.D., Carraro L., Cecchinato A., Carnier P., Schiavon S. Effect of progressive reduction in crude protein and lysine of heavy pigs diets on some technological properties of green hams destined for PDO dry-cured ham production. // *Meat Sci.* 2016. Vol. 121. P. 135–140. doi: 10.1016/j.meatsci.2016.06.005
 31. Gislason S., Birkved M., Maresca A. A systematic literature review of life cycle assessments on primary pig production: Impacts, comparisons, and mitigation areas. // *Sustainable Production and Consumption.* 2023. Vol. 42. nr 2. P. 44-62 doi:10.1016/j.spc.2023.09.005
 32. Gloaguen M., Le Floc'h N., Corrent E., Primot Y., van Milgen J. The use of free amino acids allows formulating very low crude protein diets for piglets. // *J. Anim. Sci.* 2014. Vol. 92. nr 2. P. 637-644. doi: 10.2527/jas.2013-6514
 33. Hahn J.D., Baker D.H. Optimum ratio to lysine of threonine, tryptophan, and sulfur amino acids for finishing swine. // *J Anim. Sci.* 1995. Vol. 73. nr 2. P. 482–489. doi: 10.2527/1995.732482x
 34. Han Y.G., Lee G.I., Do S.H., Jang J.C., Kim Y.Y. The effect of reduced crude protein on growth performance, nutrient digestibility, and meat quality in weaning to finishing pigs. // *Animals* (Basel). 2023. Vol. 13. nr 12. P. 1938. doi: 10.3390/ani13121938

35. Hannas M.I., Rostagno H.S., Schultz E.B. Nutritional requirements of growing swine // In: Brazilian tables for poultry and swine - Composition of Feedstuffs and Nutritional Requirements (5th Edition). (Ed. Rostagno H.S., Albino L.F.T.). Federal University of Viçosa. Dep. Anim. Sci. Brazil. 2024. P. 375-432. doi: 10.26626/978-85-8179-212-5.2024.C005.p.375-432
36. He T., Ye Z., Zhou C., Jiang S., Yang L., Liu Y., Liu S., Zhao J., Long S., Chen Z. Moderate reduction in dietary protein improves muscle composition and modulates gut microbiota and serum metabolome without compromising growth in finishing pigs. // *Animals*. 2025. Vol. 15. nr 22. P. 3234. doi: 10.3390/ani15223234
37. Heo J.M., Kim J.C., Hansen C.F., Mullan B.P., Hampson D.J., Pluske J.R. Feeding a diet with decreased protein content reduces indices of protein fermentation and the incidence of postweaning diarrhea in weaned pigs challenged with an enterotoxigenic strain of *Escherichia coli*. // *J Anim. Sci.*, 2009. Vol. 87. nr 9. P. 2833-2843. doi: 10.2527/jas.2008-1274
38. Heo J.M., Kim J.C., Hansen C.F., Mullan B.P., Hampson D.J., Pluske J.R. Effects of feeding low protein diets to piglets on plasma urea nitrogen, faecal ammonia nitrogen, the incidence of diarrhoea and performance after weaning. // *Archives of Animal Nutrition*. 2008. Vol. 62. nr 5. P. 343-358. doi: 10.1080/17450390802327811
39. Hlatini V., Ncobela C., Chimonyo M. Influence of reduced dietary protein level on quality of pork carcasses in Windsnyer pigs. // *South African J Anim. Sci.* 2023. Vol. 52. nr 6. P. 731–742. doi: 10.4314/sajas.v52i6.01
40. Hou Y., Velthof G.L., Oenema O. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from manure management chains: a meta-analysis and integrated assessment. // *Global Change Biology*. 2015. Vol. 21. nr 3. P. 1293-1312. doi: 10.1111/gcb.12767
41. Jarret G., Cozannet P., Martinez J., Dourmad J. Y. Effect of different quality wheat dried distiller's grain solubles (DDGS) in pig diets on composition of excreta and methane production from faeces and slurry. // *Liv. Sci.* 2011. Vol. 140. nr 1-3. P. 275-282. doi: 10.1016/j.livsci.2011.04.006
42. Jiang S., Quan W., Luo J., Lou A., Zhou X., Li F., Shen Q.W. Low-protein diets supplemented with glycine improves pig growth performance and meat quality: An untargeted metabolomic analysis. // *Front. Vet. Sci.* 2023. Vol. 10. Art N. 1170573. doi: 10.3389/fvets.2023.1170573
43. Kerkaert H. R., Cemin H.S., Woodworth J.C., DeRouchey J.M., Dritz S.S., Tokach M.D., et al. Improving performance of finishing pigs with added valine, isoleucine, and tryptophan: validating a meta-analysis model. // *J Anim Sci.* 2021. Vol. 99. nr 1. skab006. doi: 10.1093/jas/skab006
44. Kerr B.J., Southern L.L., Bidner T.D., Friesen K.G., Easter R.A. Influence of dietary protein level, amino acid supplementation, and dietary energy levels on growing-finishing pig performance and carcass composition. // *J. Anim. Sci.* 2003. Vol. 81. nr 12. P. 3075–3087. doi: 10.2527/2003.81123075x
45. Knap P. W. Estimated genetic trends in the lysine requirements of growing-finishing pigs and reproductive sows due to genetic trends in production traits. // *Front. Anim. Sci.* 2025. Vol. 5. 1401514. doi: 10.3389/fanim.2024.1401514
46. Le Bellego L., van Milgen J., Dubois S., Noblet J. Energy utilization of low-protein diets in growing pigs. // *J Anim. Sci.* 2001. Vol. 79. nr 5. P. 1259–1271. doi: 10.2527/2001.7951259x
47. Leek A.B.G., Hayes E.T., Curran T.P., Callan J.J., Beattie V.E., Dodd V.A., O'Doherty J.V. The influence of manure composition on emissions of odour and ammonia from finishing pigs fed different concentrations of dietary crude protein. // *Bioresource Technology*. 2007. Vol. 98. nr 18. P. 3431-3439. doi: 10.1016/j.biortech.2006.11.003

48. Li Y., Li F., Duan Y., Guo Q., Wen C., Wang W., et al. Low-protein diet improves meat quality of growing and finishing pigs through changing lipid metabolism, fiber characteristics, and free amino acid profile of the muscle. // *J Anim. Sci.* 2018. Vol. 96. nr 8. P. 3221-3232. doi: 10.1093/jas/sky116
49. Li Y., Li F., Wu L., Wei H., Liu Y., Li T., et al. Effects of dietary protein restriction on muscle fiber characteristics and mTORC1 pathway in the skeletal muscle of growing-finishing pigs. // *J Anim. Sci. Biotechnol.* 2016. Vol. 7. nr 1. P. 47. doi: 10.1186/s40104-016-0106-8
50. Li Y.J., Gao T., Li J.L., Zhang L.a, Gao F., Zhou G.H. Effects of dietary starch types on early postmortem muscle energy metabolism in finishing pigs. // *Meat Sci.* 2017. Vol. 133. P. 204-209. doi: 10.1016/j.meatsci.2017.07.008
51. Liu H., Wang S., Chen M., Ji H., Zhang D. Effects of Lactobacillus-fermented low-protein diets on the growth performance, nitrogen excretion, fecal microbiota and metabolomic profiles of finishing pigs. // *Scientific Reports.* 2024. Vol. 14. nr 1. P. 8612. doi: 10.1038/s41598-024-58832-y
52. Liu S., Xie J., Fan Z., Ma X., Yin Y. Effects of low protein diet with a balanced amino acid pattern on growth performance, meat quality and cecal microflora of finishing pigs. // *J Sci. Food Agric.* 2023. Vol. 103. nr 2. P. 957-967. doi: 10.1002/jsfa.12245
53. Liu Y., Kong X., Jiang G., Tan B., Deng J., Yang X., et al. Effects of dietary protein/energy ratio on growth performance, carcass trait, meat quality, and plasma metabolites in pigs of different genotypes. // *J Anim. Sci. Biotechnol.* 2015. Vol. 6. nr 1. P. 36. doi: 10.1186/s40104-015-0036-x
54. Ma, X., Yu, M., Liu, Z., Deng, D., Cui, Y., Tian, Z., Wang, G. Effect of amino acids and their derivatives on meat quality of finishing pigs. // *J Food. Sci. Technol.* 2020. Vol. 57. nr 2. P. 404-412. doi: 10.1007/s13197-019-04077-x
55. Madeira M.S., Lopes P.A., Costa P., Coelho D., Alfaia C.M., Prates J.A.M. Reduced protein diets increase intramuscular fat of psoas major, a red muscle, in lean and fatty pig genotypes. // *Animal.* 2017. Vol. 11. nr 11. P. 2094–2102. doi: 10.1017/S1751731117000921
56. Madeira M.S., Pires V.M.R., Alfaia C.M., Costa A.S.H., Luxton R., Doran O., et al. Differential effects of reduced protein diets on fatty acid composition and gene expression in muscle and subcutaneous adipose tissue of Alentejana purebred and Large White × Landrace × Pietrain crossbred pigs. // *Br. J Nutr.* 2013. Vol. 110. nr 2. P. 216 – 229 doi: 10.1017/S0007114512004916
57. Madrid J., Martínez S., López C., Orengo J., López M.J., Hernández F. Effects of low protein diets on growth performance, carcass traits and ammonia emission of barrows and gilts. // *Anim. Prod. Sci.* 2013. Vol. 53. nr 2. P. 146–153. doi: 10.1071/AN12067
58. Maher S., Sweeney T., O’Doherty J.V. Optimising nutrition for sustainable pig production: strategies to quantify and mitigate environmental impact. // *Animals (Basel).* 2025. Vol. 15. nr 10. P. 1403. doi: 10.3390/ani15101403
59. McAuley M., Buijs S., Muns R., Gordon A., Palmer M., Meek K., O’Connell N. Effect of reduced dietary protein level on finishing pigs’ harmful social behaviour before and after an abrupt dietary change. // *Applied Animal Behaviour Sci.* 2022. Vol. 256 Epub. 105762. doi: 10.1016/j.applanim.2022.105762
60. Minussi I., Gerrits W.J.J., Jansman A.J.M., Gerritsen R., Lambert W., Zonderland J.J., Bolhuis J.E. Amino acid supplementation counteracts negative effects of low protein diets on tail biting in pigs more than extra environmental enrichment. // *Scientific Reports.* 2023. Vol. 13. nr 1. Art N. 19268. doi: 10.1038/s41598-023-45704-0
61. Mulvenna C., McCormack U., McCracken K.J., Smyth S., Gordon F.J., Beattie V.E., et al. Optimizing diets for finishing pigs: balancing ideal protein to enhance growth performance and reduce environmental impacts. // *Transl. Anim. Sci.* 2025. Vol. 9. txaf141. doi: 10.1093/tas/txaf141

62. National Research Council. 2012. Nutrient Requirements of Swine: Eleventh Revised Edition. // Washington, DC: The National Academies Press. 2012. doi: 10.17226/13298
63. Niyonsaba A., Jin X.H., Kim Y.Y. Effect of reducing dietary crude protein level on growth performance, blood profiles, nutrient digestibility, carcass traits, and odor emissions in growing-finishing pigs. // *Anim. Biosci.* 2023. Vol. 36. nr 10. P. 1584–1595. doi: 10.5713/ab.23.0155
64. Nyachoti C.M., Omogbenigun F.O., Rademacher M., Blank G. Performance responses and indicators of gastrointestinal health in early-weaned pigs fed low-protein amino acid-supplemented diets. // *J. Anim. Sci.* 2006. Vol. 84. nr 1. P. 125-134. doi: 10.2527/2006.841125x
65. Opapeju F. O., Krause D. O., Payne R. L., Rademache, M., Nyachoti C. M. Effect of dietary protein level on growth performance, indicators of enteric health, and gastrointestinal microbial ecology of weaned pigs induced with postweaning colibacillosis. // *J Anim. Sci.* 2009. Vol. 87. nr 8. P. 2635-2643. doi: 10.2527/jas.2008-1310
66. Parr T.M., Kerr B.J., Baker D.H. Isoleucine requirement of growing (25 to 45 kg) pigs. // *J Anim. Sci.* 2003. Vol. 81. nr 3. P. 745-752. doi: 10.2527/2003.813745x
67. Pereira P.M.D.C.C., Vicente A.F.D.R.B. Meat nutritional composition and nutritive role in the human diet. // *Meat Sci.* 2013. Vol. 93. nr 3. P. 586–592. doi: 10.1016/j.meatsci.2012.09.018
68. Philippe F. X., Laitat M., Canart B., Vandenheede M., Nicks B. Comparison of ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs, kept either on fully slatted floor or on deep litter. // *Livest. Sci.* 2007. Vol. 111. nr 1-2. P. 144-152. doi: 10.1016/j.livsci.2006.12.012
69. Pires V.M.R., Madeira M.S., Dowle A.A., Thomas J., Almeida A.M., Prates J.A.M. Increased intramuscular fat induced by reduced dietary protein in finishing pigs: effects on the longissimus lumborum muscle proteome. // *Mol. Biosyst.* 2016. Vol. 12. nr 8. P. 2447–2457. doi: 10.1039/C6MB00213G
70. Pomar C., Andretta I., Remus A. Feeding strategies to reduce nutrient losses and improve the sustainability of growing pigs. // *Front. Vet. Sci.* 2021 . Vol. 8. Art N. 742220. doi: 10.3389/fvets.2021.742220
71. Pope M., Borg B., Boyd R.D., Holzgraefe D., Rush C., Sifri M. Quantifying the value of soybean meal in poultry and swine diets. // *J App. Poultry Res.* 2023. Vo. 32. nr 2. Art N. 100337. doi: 10.1016/j.japr.2023.100337
72. Prandini A., Sigolo S., Morlacchini M., Grilli E., Fiorentini L. Microencapsulated lysine and low-protein diets: effects on performance, carcass characteristics and nitrogen excretion in heavy growing-finishing pigs. // *J Anim. Sci.* 2013 . Vol. 91. nr 9. P. 4226-3424. doi: 10.2527/jas.2013-6412
73. Praveen B., Sharma P. A review of literature on climate change and its impacts on agriculture productivity. // *J. Public Aff.* 2019. Vol. 19. e1960. doi: 10.1002/pa.1960
74. Rauw W.M., Baumgard L.H., Dekkers J.C.M. Review: Feed efficiency and metabolic flexibility in livestock. // *Animal.* 2025. Vol. 19. nr 1. Epub.101376. doi: 10.1016/j.animal.2024.101376
75. Remus A., del Castillo J. R. E., Pomar C. Improving the estimation of amino acid requirements to maximize nitrogen retention in precision feeding for growing-finishing pigs. // *Animal.* 2020b. Vol. 14. nr 10. P. 2032-2041. doi: 10.1017/S1751731120000798
76. Remus A., Hauschild L., Corrent E., Létourneau-Montminy M. P., Pomar C. Pigs receiving daily tailored diets using precision-feeding techniques have different threonine requirements than pigs fed in conventional phase-feeding systems. // *J Anim. Sci. Biotech.* 2019. Vol. 10. P. 16. doi: 10.1186/s40104-019-0328-7

77. Remus A., Hauschild L., Létourneau-Montminy M.-P., Corrent E., Pomar C. The ideal protein profile for late-finishing pigs in precision feeding systems: Threonine. // *Anim Feed Sci. Technol.* 2020a. Vol. 265. Art N. 114500. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114500
78. Remus A., Hauschild L., Létourneau-Montminy M.-P., Pomar C. Estimating amino acid requirements in real-time for precision-fed pigs: The challenge of variability among individuals. // *Animals.* 2021. Vol. 11. nr 12. P. 3354. doi: 10.3390/ani11123354
79. Robbins K. R., Saxton A. M., Southern L. L. Estimation of nutrient requirements using broken-line regression analysis. // *J Anim. Sci.* 2006. Vol. 84. nr Suppl 13. P. E155-165. doi: 10.2527/2006.8413_supple155x
80. Rocha G.C., Duarte M.E., Kim S.W. Advances, implications, and limitations of low-crude-protein diets in pig production. // *Animals (Basel).* 2022. Vol. 12. nr 24. P. 3478. doi: 10.3390/ani12243478
81. Ruiz-Ascacibar I., Stoll P., Kreuzer M., Boillat V., Spring P., Bee G. Impact of amino acid and CP restriction from 20 to 140 kg BW on performance and dynamics in empty body protein and lipid deposition of entire male, castrated and female pigs. // *Animal.* 2017. Vol. 11. nr 3. P. 394-404. doi: 10.1017/S1751731116001634
82. Ruusunen M., Partanen K., Pösö R., Puolanne E. The effect of dietary protein supply on carcass composition, size of organs, muscle properties and meat quality of pigs. // *Liv. Sci.* 2007. Vol. 107. nr 2-3. P. 170-181. doi: 10.1016/j.livsci.2006.09.021
83. Sajeev E.P.M., Amon B., Ammon C., Zollitsch W., Winiwarter W. Evaluating the potential of dietary crude protein manipulation in reducing ammonia emissions from cattle and pig manure: A meta-analysis. // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2018. Vol. 110. P. 161–175. doi: 10.1007/s10705-017-9893-3
84. Siebert D., Khan D. R., Torrallardona D. The optimal valine to lysine ratio for performance parameters in weaned piglets. // *Animals (Basel).* 2021. Vol. 11. nr 5. P. 1255. doi: 10.3390/ani11051255
85. Song W., Wu, Z., Li, W., Li, Y. Multiple amino acid supplementations to reduce dietary protein for pigs during early and late finisher periods under commercial conditions. // *J Sci. Food Agric.* 2023. Vol. 103. nr 6. P. 3205-3209. doi: 10.1002/jsfa.12438
86. Spring S., Premathilake H., Bradway C., Shili C., DeSilva U., Carter S., Pezeshki A. Effect of very low-protein diets supplemented with branched-chain amino acids on energy balance, plasma metabolomics and fecal microbiome of pigs. // *Scientific Reports.* 2020. Vol. 10. nr 1. P. 15859. doi: 10.1038/s41598-020-72816-8
87. Stein H.H., Lagos L.V., Casas G.A. Nutritional value of feed ingredients of plant origin fed to pigs. // *Anim. Feed Sci. Technol.* 2016. Vol. 218. P. 33-69. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2016.05.003
88. Stein H.H., Seve B., Fuller M.F., Moughan P.J., de Lange C.F.M. Invited review: Amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: terminology and application. // *J Anim. Sci.* 2007. Vol. 85. nr 1. P. 172–180. doi: 10.2527/jas.2005-742
89. Suárez-Belloch J., Latorre M.A., Guada J.A. The effect of protein restriction during the growing period on carcass, meat and fat quality of heavy barrows and gilts. // *Meat. Sci.* 2016. Vol. 112. P. 16-23. doi: 10.1016/j.meatsci.2015.10.006
90. Susenbeth A. Optimum tryptophan: lysine ratio in diets for growing pigs: analysis of literature data. // *Livest Sci.* 2006. Vol. 101. nr 1–3. P. 32–45. doi: 10.1016/j.livprodsci.2005.09.008
91. Tejada J.F., Hernández-Matamoros A., Paniagua M., González E. Effect of free-range and low-protein concentrated diets on growth performance, carcass traits, and meat composition of Iberian pig. // *Animals (Basel).* 2020. Vol. 10. nr 2. P. 273. doi: 10.3390/ani10020273

92. Teye G.A., Sheard P.R., Whittington F.M., Nute G.R., Stewart A., Wood J.D. Influence of dietary oils and protein level on pork quality. 1. Effects on muscle fatty acid composition, carcass, meat and eating quality. // *Meat Science*. 2006. Vol. 73. nr 1. P. 157-165. doi: 10.1016/j.meatsci.2005.11.010
93. Tous N., Lizardo R., Vilà B., Gispert, M., Font-i-Furnols M., Esteve-Garcia E. Effect of reducing dietary protein and lysine on growth performance, carcass characteristics, intramuscular fat, and fatty acid profile of finishing barrows. // *J Anim. Sci*. 2014. Vol. 92. nr 1. P. 129-140. doi: 10.2527/jas.2012-6222
94. van Dijk M., Morley T., Rau M.L., Saghai Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. // *Nat. Food*. 2021. nr 2. P. 494–501. doi: 10.1038/s43016-021-00322-9
95. van Milgen J., Dourmad J-Y. Concept and application of ideal protein for pigs. // *J. Anim. Sci. Biotechnol*. 2015. Vol. 6. nr 1. P. 15. doi: 10.1186/s40104-015-0016-1
96. van Milgen J., Gloaguen M., Le Floc'h N., Brossard L., Primot Y., Corrent E. Meta-analysis of the response of growing pigs to the isoleucine concentration in the diet. // *Animal*. 2012. Vol. 6. nr 10. P. 1601–1608. doi: 10.1017/S1751731112000420
97. van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J.-Y., Sève B., Noblet J. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. // *Anim. Feed Sci. Technol*. 2008. Vol. 143. nr 1–4. P. 387-405 doi: 10.1016/j.anifeedsci.2007.05.020
98. Vastolo A., Serrapica F., Cavallini D., Fusaro I., Atzori A.S., Todaro M. Editorial: alternative and novel livestock feed: reducing environmental impact. // *Front. Vet. Sci*. 2024. nr 11. Art N. 1441905. doi: 10.3389/fvets.2024.1441905
99. Velthof G.L., Nelemans J.A., Oenema O., Kuikman P.J. Gaseous nitrogen and carbon losses from pig manure derived from different diets. // *J Environmental Quality*. 2005 . Vol. 34 . nr 2 . P. 698-706. doi: 10.2134/jeq2005.0698
100. Wang H., Long W., Chadwick D., Velthof G., Oenema O., Ma W., et al. Can dietary manipulations improve the productivity of pigs with lower environmental and economic cost? A global meta-analysis. // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2020 . Vol. 289. Art N. 106748 doi: 10.1016/j.agee.2019.106748
101. Wang Y., Zhou J., Wang G., Cai S., Zeng X., Qiao S. Advances in low-protein diets for swine. // *J. Anim. Sci. Biotechnol*. 2018. Vol. 9. P. 60. doi: 10.1186/s40104-018-0276-7
102. Wang Y.M., Yu H.T., Zhou J.Y., Zeng X.F., Wang G., Cai S., et al. Effects of feeding growing-finishing pigs with low crude protein diets in different areas of China. // *Animal Feed Sci. Tech*. 2019. Vol. 256. Art N. 114256. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2019.114256
103. Wood J.D., Lambe N.R., Walling G.A. Whitney H., Jagger S., Fullarton P.J., et al. Effects of low protein diets on pigs with a lean genotype. 1. Carcass composition measured by dissection and muscle fatty acid composition. // *Meat Sci*. 2013. Vol. 95. nr 1. P. 123-128. doi: 10.1016/j.meatsci.2013.03.001
104. Wood J.D., Richardson R.I., Nute G.R., Fisher A.V., Campo M.M., Kasapidou E., et al. Effects of fatty acids on meat quality: a review. // *Meat Sci*. 2004. Vol. 66. nr 1. P. 21-32. doi: 10.1016/S0309-1740(03)00022-6
105. Wu G. Dietary requirements of synthesizable amino acids by animals: a paradigm shift in protein nutrition. // *J Anim. Sci. Biotechnol*. 2014. Vol. 5 . nr 1. P. 34. doi: 10.1186/2049-1891-5-34
106. Wu G., Li P. The “ideal protein” concept is not ideal in animal nutrition. // *Experimental Biology and Medicine*. 2022 . Vol. 247 . P. 1191–1201. DOI:10.1177/15353702221082658

107. Wu L., Zhang X., Tang Z., Li Y., Li T., Xu Q., et al. Low-protein diets decrease porcine nitrogen excretion but with restrictive effects on amino acid utilization. // *J. Agric. Food Chem.* 2018 . Vol. 66. nr 31. P. 8262–8271. doi: 10.1021/acs.jafc.8b03299
108. Yin J., Li Y., Zhu X., Han H., Ren W., Chen S. et al. Effects of long-term protein restriction on meat quality, muscle amino acids, and amino acid transporters in pigs. // *J. Agric. Food Chem.* 2017. Vol. 65. nr 42. P. 9297–9304. doi: 10.1021/acs.jafc.7b02746
109. Zhao Y., Tian G., Chen D., Zheng P., Yu J., He J., et al. Effect of different dietary protein levels and amino acids supplementation patterns on growth performance, carcass characteristics and nitrogen excretion in growing-finishing pigs. // *J Anim. Sci. Biotechnol.* 2019. Vol. 10, artic. eColl. 75. doi: 10.1186/s40104-019-0381-2
110. Zhou L., Fang L., Sun Y., Su Y., Zhu W. Effects of the dietary protein level on the microbial composition and metabolomic profile in the hindgut of the pig. // *Anaerobe.* 2016. Vol. 38. P. 61-69. doi: 10.1016/j.anaerobe.2015.12.009
111. Zhu C., Yang J., Wu Q., Chen J., Yang X., Wang L., Jiang Z. Low protein diet improves meat quality and modulates the composition of gut microbiota in finishing pigs. // *Front. Vet. Sci.* 2022. Vol. 9. Art N. 843957. doi:10.3389/fvets.2022.843957

References (for publications in Russian)

1. Golovko E.N. [Bioavailability of amino acids in pigs (review)]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive animal biology)*. 2009. 2: 27-43.
2. Klimenko T.V. [Low-protein diets are a surefire way to avoid diarrhea]. *Svinovodstvo (Pig breeding)*. 2019. 3: 20-21.
3. Niyazov N.S.-A. [Compound feed for growing pigs with different levels of crude protein and true availability of amino acids for intestinal absorption]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive animal biology)*. 2021. 3: 69-81. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2021.3.69-81
4. Niyazov N.S.A.. Panyushkin D.E. [Pork quality indicators when using low-protein diets with amino acid supplements to create preset levels and ratios of essential amino acids in the feed]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive animal biology)*. 2023. 1: 74-85. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2023.1.74-85
5. Niyazov N.S.A.. Piankova E.V. [Compound feed for meat-type pigs based on the availability of amino acids]. *Svinovodstvo (Pig breeding)*. 2024. 5: 18-20. doi: 10.37925/0039-713X-2024-5-18-20
6. Omarov M.O.. Slesareva O.A.. Kostomakhin N.M. [Taking into account the availability of amino acids in protein feeds as a criterion for the effectiveness of the diet]. *Kormleniye selskokhozyaystvennykh zhivotnykh i kormoproizvodstvo (Feed. Farm Anim. Feed Prod.)*. 2019. 12: 33-39.
7. Ryadchikov V.G. [Fundamentals of nutrition and feeding of farm animals]. Krasnodar. 2022. 636 p. ISBN 978-5-507-45304-7

UDC 636.4.084:636.4.087.7

"Ideal protein" and low-protein diets as the basis for resource-saving pig fattening: impact on productivity, meat quality, and environmental and economic factors: a review

Niyazov N.S.-A., Panyushkin D.E.

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

ABSTRACT. The review summarizes modern approaches to the formation of resource-saving low-protein (NP) diets for fattening pigs based on the concept of "ideal protein" and standardized ileal digestibility (SID). The methods of needs assessment are analyzed and the role of lysine as a reference amino acid in the expression of other essential amino acids through ratios to lysine is substantiated. Based on meta-analyses and experimental data, it has been shown that with correct SID balancing and the addition of synthetic amino acids, a decrease in crude protein levels by 2-4% usually preserves or improves productivity (gains, conversion), reduces nitrogen excretion (up to \approx 20-30%) and increases economic efficiency. Contradictions in scientific data caused by factors of genotype, fattening phase and methodology are discussed. Prospects are outlined, including precision feeding with AI, new forms of amino acids and integration into sustainable pig farming systems. The review highlights the strategic importance of NP-rations for industry intensification while minimizing environmental impacts.

Keywords: low-protein diets, pig fattening, productivity, meat quality, ecology, economic efficiency

Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology). 2026. 2:5-31

Поступило в редакцию: 02.04.2026

Получено после доработки: 03.06.2026

Сведения об авторах:

Ниязов Нияз Саид – Алиевич, д.б.н., г.н.с.

Панюшкин Дмитрий Евгеньевич, к.б.н, м.н.с., panyshkin@yandex.ru.