

УДК 636.4.082.265:612.12.128

DOI 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2023.3.68-78

ВЛИЯНИЕ НИЗКОПРОТЕИНОВЫХ РАЦИОНОВ С РАЗНЫМ УРОВНЕМ И СООТНОШЕНИЕМ ЛИМИТИРУЮЩИХ АМИНОКИСЛОТ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ СКЕЛЕТНО-МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ У ПОРОСЯТ

Родионова О.Н.

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

В последние годы растёт интерес к исследованиям по оптимизации белково-аминокислотного питания свиней, в частности, в отношении роли индивидуальных аминокислот, лимитирующих процессы роста скелетно-мышечной ткани. Эксперимент проведен на трёх группах (n=16) помесных поросят (ландрас× крупная белая) с начальной живой массой 20-22 кг, получавших комбикорм на ячменно-пшеничной основе (1-я группа, контроль: 12,4 МДж обменной энергии; 120 г сырого протеина (7,7 г лизин; 4,6 метионин+цистин; 4,8 г треонин), комбикорм с повышенным уровнем обменной энергии и лимитирующих аминокислот (2-я группа: 13,0; 122; 9,4; 6,1; 6,3 соответственно) или с повышенным содержанием сырого протеина, обменной энергии и аминокислот (3-я группа, 13,6; 152; 10,8; 7,0; 7,2 соответственно). У животных 2-й и 3-й групп по сравнению с контролем концентрация и количество мышечного белка к 122-сут. возрасту были выше на 5,5 и 11 и на 27 и 39% (P<0,05), соответственно. Среднесуточные приросты живой массы, массы скелетных мышц и содержание в них фракции саркоплазматических и миофибриллярных белков во 2-й и 3-й группах были выше против контроля (P<0,05). Заключение, что в условиях проведенного эксперимента повышенная интенсивность роста и оптимальное развитие скелетно-мышечной ткани у помесных поросят в возрастной период с 65 по 122 суток обеспечались при соотношении в рационе содержания аминокислот по отношению к лизину (%): треонин 67, метионин+цистин 65, валин 63, лейцин+изолейцин 142, гистидин 33, триптофан 15, аргинин 54, фенилаланин+тирозин 96.

Ключевые слова: поросята, низкопротеиновые рационы, лимитирующие аминокислоты, рост и развитие скелетных мышц.

Проблемы биологии продуктивных животных, 2023, 3: 68-78.

Введение

С развитием новых аналитических методов и проведением биохимических исследований растёт интерес к фундаментальным и прикладным исследованиям по оптимизации белково-аминокислотного питания свиней, в частности, в отношении роли индивидуальных аминокислот, лимитирующих процессы роста скелетно-мышечной ткани. В питании животных аминокислоты традиционно классифицируются как заменимые и незаменимые. Аминокислоты, которые не синтезируются *de novo*, должны быть включены в рацион. Однако заменимые аминокислоты, более распространённые, чем незаменимые, нередко синтезируются в организме свиней в количестве, недостаточном для обеспечения максимальной продуктивности или оптимального здоровья (включая устойчивость к инфекционным заболеваниям). В этом состоит определённая ограниченность концепции исключительной важности незаменимых аминокислот в белковом питании свиней. Примечательно, что национальный исследовательский совет США (National Research Council. NRC Nutrient Requirements of Swine. 11th ed. Washington: National Academies Press, 2012) признал аргинин и глутамин условно незаменимыми аминокислотами для свиней,

улучшающими их рост, развитие, размножение и лактацию. Результаты недавно проведенных исследований также предоставили убедительные доказательства питательной ценности глутамата, глицина и пролина для молодняка свиней. Использование в рационах оптимального соотношения индивидуальных аминокислот может помочь сбалансировать протеин в рационах, снизить его уровень и защитить тонкий кишечник от окислительного стресса, одновременно улучшая показатели роста, эффективности использования корма и здоровье свиней. Таким образом, не только незаменимые, но и лимитирующие заменимые аминокислоты в определенном соотношении необходимы в рационах для удовлетворения потребностей свиней. Эта концепция не только представляет собой определенный сдвиг в теоретических основах аминокислотного питания свиней, но она также может оказать влияние на производство свинины в мире (Wang et al., 2018; Zhang et al., 2021; Vonderohe et al., 2022; Tang et al., 2023).

В последнее время значительный интерес у исследователей вызывает изучение не только протеиногенных, но и регуляторно-метаболических функций аминокислот на различных стадиях онтогенеза у свиней (Zhang et al., 2021; Wu, Li, 2022). Расширение знаний по регуляторным функциям аминокислот и механизмам регуляции биосинтетических процессов в организме позволит разработать технологические средства, обеспечивающие реализацию генетического потенциала роста и развития свиней, в том числе в плане получения высококачественной свинины с определенным соотношением белков и липидов (Черепанов, 1994; Ayuso et al., 2015; Li et al., 2018; Kim et al., 2019; Nie et al., 2019; Обвинцева и др., 2022).

Показателем роста мышц является прирост содержания белка в ткани, т.е. баланс между скоростью синтеза и деградации белка (Anthony, 2016; Zheng et al., 2017; Еримбетов и др., 2020). Накапливающиеся данные показывают, что существует положительная связь между уровнем сырого протеина в рационе и передачей сигналов mTOR* для синтеза мышечного белка у свиней (Deng et al., 2009; Hulshof et al., 2017; Eugenio et al., 2022). Сигнальный рапамициновый комплекс mTORC1 у млекопитающих играет решающую роль в контроле синтеза белка (Escobar et al., 2005; Anthony, 2016). Комплекс mTORC1 включает в себя три компонента: Raptor - адаптер для привлечения субстратов к белку mTOR; 4E-BP1 и S6 K1 - два наиболее характерных субстрата для mTORC1. Активация данного пути способствует инициации трансляции белка и увеличивает рост клеток (Wullschleger et al., 2006).

Влиянию уровня потребленного протеина на процессы деградации белка уделяется гораздо меньше внимания. Показано, что количество мРНК, регуляторных белков FOXO, MAFbx и MuRF1, входящих в убиквитин-протеасомный путь, не изменялось при снижении уровня сырого протеина с 14% до 10% у растущих свиней (Zhou et al., 2015). Убиквитин-протеасомный путь является основной внутриклеточной системой деградации белка в скелетных мышцах. Следовательно, ограничение белка в рационе не влияет на протеолиз скелетных мышц. Более того, кормовые добавки аминокислот с разветвленной углеродной цепью увеличивали мышечную массу посредством интенсификации синтеза белка, а не за счёт снижения его деградации (Zheng et al., 2017; Еримбетов и др., 2021). Следовательно, можно заключить, что обмен мышечных белков и уровень их синтеза в организме свиней в постнатальный период развития в значительной мере определяются факторами белково-аминокислотного питания и рядом других факторов.

*mTOR – мишень рапамицина млекопитающих (mammalian target of rapamycin). Рапамицин – противогрибковый антибиотик из класса макролидов, обладающий иммуносупрессорной активностью. В 1990-х г.г. были выявлены мутации генов двух белков из класса киназ, дающих резистентность к рапамицину, названных TOR1 и TOR2, объединённых под названием TOR. Рапамицин является первым фармакологическим агентом, для которого было показано, что он увеличивает продолжительность жизни мышей, по-видимому, благодаря своим антираковым свойствам, так как основной причиной смерти у мышей являются опухоли.

В настоящее время преобладающим в системе питания свиней является использование концепции «идеального протеина». Об этом свидетельствуют исследования и разработки отечественных и зарубежных авторов (Еримбетов, 2007; Родионова, Кальницкий, 2010; van Milgen, Dourmad, 2015; Wang et al., 2018; Wu, Li, 2022). Для каждого периода роста и развития свиней в рационах уровень сырого протеина должен быть достаточным для обеспечения потребности в незаменимых аминокислотах и синтеза заменимых аминокислот. Таким образом, при нормировании питания свиней, в принципе, целесообразно ориентироваться на обеспечение потребления полного набора индивидуальных аминокислот (NRC Nutrient Requirements of Swine. Washington, 2012; Millet et al., 2018). Однако в проведенных исследованиях по снижению уровня сырого протеина в рационе свиней при сохранении оптимального соотношения аминокислот пока получены неоднозначные данные по показателям роста и развития скелетных мышц и по приростам живой массы (Figuerola et al., 2003; Che et al., 2017; Limbach et al., 2021).

В настоящее время в кормлении свиней в период дорастивания и откорма обычно применяют пять кристаллических незаменимых аминокислот (лизин, метионин, треонин, триптофан и валин), что позволяет составлять рационы с низким содержанием сырого протеина (Rocha et al., 2022). Снижение содержания сырого протеина в рационе в сочетании с добавлением кристаллических аминокислот является эффективной стратегией для свиноводства по снижению затрат и загрязнения окружающей среды (Zhao et al., 2019). Хотя экономическая эффективность рационов с низким содержанием сырого протеина может варьировать в зависимости от цены ингредиентов и продуктивности свиней (Wang et al., 2020). При этом хорошо известна польза для окружающей среды благодаря более низкому выделению азота (Esteves et al., 2021).

В целом, проведенные исследования дают основание считать, что применение в свиноводстве рационов с низким содержанием сырого протеина при достаточном балансировании уровня индивидуальных аминокислот не будет иметь следствием снижение мясной продуктивности, хотя в некоторых экспериментах показано, что при добавлении аминокислот в рационы с низким содержанием сырого протеина имело место ухудшение показателей роста (Che et al., 2017; Soto et al., 2019; Batson et al., 2021).

С учётом существующих разночтений в трактовке влияния низкопротеиновых рационов, обогащенных незаменимыми аминокислотами, на рост и развитие скелетных мышц, представляется актуальным исследование формирования мясной продуктивности у помесных свиней при снижении уровня сырого протеина в рационе при сохранении оптимального соотношения аминокислот.

Цель данной работы – исследование влияния низкопротеиновых рационов с разным уровнем и соотношением аминокислот на рост и развитие скелетно-мышечной ткани у помесных поросят (♂ ландрас × ♀ крупная белая).

Материал и методы

Эксперимент проведен в условиях вивария института на помесных поросятах (♂ ландрас × ♀ крупная белая). По принципу аналогов с учётом живой массы, пола, возраста и интенсивности роста были сформированы три групп с начальной живой массой 20-22 кг (n=16). В уравнительный период поросята получали полнорационный комбикорм типа СК-5. Содержание и кормление групповое. Опыт продолжался до достижения живой массы 47-54 кг.

Животные всех групп в период с 63 по 122-сут. возраст получали комбикорм на пшенично-ячменной основе с содержанием обменной энергии и лимитирующих аминокислот по детализированным нормам (Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Справочное пособие. Ред. Калашников Н.И. и др. Москва. 2003), но животные 1-й (контрольной) группы получали комбикорм со сниженным уровнем сырого протеина (120 г/кг). У поросят 2-й группы количество сырого протеина было на уровне контрольной группы,

содержание обменной энергии было увеличено на 5% и уровень лимитирующих аминокислот – на 22-33% путём дополнительного введения в рацион синтетических аминокислот – лизина, метионина и треонина. В комбикорме для свиней 3-й группы были повышены содержание сырого протеина (до 150 г, за счёт добавки высокобелковых кормов), и уровень обменной энергии (на 10% по сравнению с контрольной группой). Количество лимитирующих аминокислот в 3-й группе были выше контроля на 40-52% (табл. 1). Рационы в опытных группах отличались по соотношению лизина к обменной энергии, а также по соотношению других незаменимых аминокислотам к лизину (табл. 2). На протяжении опыта проводили учёт потребления комбикорма и определяли расход сырого протеина и обменной энергии на единицу продукции. Для оценки интенсивности роста животных проводили взвешивание поросят в начале и в конце возрастного периода.

Для оценки интенсивности роста и развития скелетно-мышечной ткани после уравнивательного периода после 16 часовой голодной выдержки проводили убой трёх поросят с живой массой 20-21 кг с последующим препарированием мышечной, жировой и костной ткани и взятием образцов мышц для определения содержания в них белка. Интенсивность роста скелетно-мышечной ткани и отложения мышечного белка оценивали по разнице данных, полученных на поросятах 63- и 122-сут. возраста.

Для изучения усвоения азота корма и эффективности его использования в конце эксперимента был проведен 5-суточный балансовый опыт на 3-х животных из каждой группы. По окончании балансового опыта проводили контрольный убой 4 животных из каждой группы с последующим препарированием мышечной, жировой и костной ткани, взятием образцов длиннейшей мышцы спины.

Таблица 1. Состав и питательность рациона для поросят в возрастной период 63-122 суток, %

Компоненты	Группы		
	1 (контроль)	2	3
Ячмень	71,5	69,5	60,0
Пшеница	20,0	20,0	20,0
Шрот соевый	4,6	4,8	13,0
Масло растительное	0,4	2,2	3,5
Трикальцийфосфат	1,6	1,6	1,6
Соль поваренная	0,4	0,4	0,4
Мука известняковая	0,5	0,5	0,5
Премикс КС-3	1	1	1
Содержание в 1 кг рациона			
ЭЖЕ	1,24	1,30	1,36
Обменная энергия, МДж	12,4	13,02	13,64
Сырой протеин, г	120	122	152
Переваримый протеин, г	92	95	122
Лизин, г	7,7	9,4	10,8
Метионин+цистин, г	4,6	6,1	7,0
Треонин, г	4,8	6,3	7,2
Сырой жир, г	24,9	43,0	55,7
Сырая клетчатка, г	41,2	41,3	40,9
Кальций, г	8,48	8,49	8,48
Фосфор, г	6,04	6,06	6,14

Определение химического состава (сухое вещество, сырой протеин, белок) кормов, кала, мочи и мышечной ткани проводили общепринятыми методами химического анализа (Лебедев П.Т., Усович А.Т. Методы исследования кормов и тканей животных. М.: Россельхозиздат, 1976). Содержание общего азота в пробах определяли по Къельдалю на

приборе Къельтек. В пробах мышц были определены белковые фракции (саркоплазматические, миофибриллярные и стромальные белки) по (Helander, 1957). Статистическую значимость разности групповых средних оценивали с использованием U-критерия.

Таблица 2. Соотношение аминокислот в рационе поросят в возрастной период 63-122-суток

Аминокислоты	1 (контроль)	2	3
Лизин	100	100	100
Метионин+цистин	59,73	64,9	64,81
Триптофан	18,44	14,9	15,5
Аргинин	66,36	54,04	67,0
Гистидин	40,65	33,0	35,0
Лейцин+изолейцин	175,7	142,3	150,1
Тирозин+Фенилаланин	118,3	95,63	99,26
Треонин	62,33	67,02	66,6
Валин	78,18	63,3	65,46
Лизин, г/МДж ОЭ	0,62	0,72	0,79

Результаты и обсуждение

Результаты проведенного исследования показывают, что балансирование незаменимых аминокислот по их соотношению в низкопротеиновых рационах с повышенным на 5 и 10% уровнем ОЭ (2-я и 3-я группы) способствует более интенсивному росту и развитию скелетно-мышечной ткани у поросят в возрастной период 63-122-сут. (табл. 3). К 122-сут. возрасту у поросят 2-й и 3-й групп по сравнению с контролем отмечены более высокие значения массы ($P<0,05$) и прироста массы ($P<0,05$) скелетных мышц за период исследования. При этом среднесуточный прирост мышечной массы ($P<0,05$) у поросят 2-й и 3-й групп по сравнению с контролем был выше на 42 и 50 %, соответственно. У поросят опытных групп по сравнению с контролем было более высоким отношение массы скелетных мышц к «пустой» массе тела и к массе туши. Полученные данные свидетельствуют о лучшем развитии скелетной мускулатуры у поросят, выращиваемых на низкопротеиновых рационах при изученном соотношении индивидуальных аминокислот и оптимальным отношении уровня лизина к обменной энергии.

Таблица 3. Показатели роста скелетных мышц ($M\pm m$, $n=4$)

Показатели	Группы		
	1 (контроль)	2	3
	Возраст 63-суток		
Масса скелетных мышц, г	9110±170	9110±170	9110±170
	Возраст 122 суток		
Масса скелетных мышц, г	18190±560	21990±490*	22750±1100*
Прирост массы скелетных мышц за период, г	9080±200	12880±300*	13640±400*
Среднесуточный прирост мышечной массы, г/сут	146,4±0,1	207,7±0,2*	220,0±0,2*
Отношение массы скелетных мышц к («пустой» массе тела), %	61,08	63,13	64,63

Примечание: здесь и далее в таблицах: * $P<0,05$ по U-тесту при сравнении с контролем.

Рост и развитие скелетных мышц сопровождается увеличением общего фонда белка на фоне сдвигов в соотношении скорости его синтеза и деградации. Показано, что гипертрофия мышц сопровождается увеличением интенсивности обоих процессов и значительным возрастанием реутилизации предшественников синтеза белка (Laurent, 1980; Еримбетов, 2007). Хотя скорость обновления белка в скелетных мышцах ниже, чем в других тканях, абсолютные величины синтеза белка в мышечной ткани существенно превосходят таковые в других органах и тканях организма (Anthony, 2016; Zheng et al., 2017; Еримбетов и др., 2020).

В данном исследовании у животных 2-й и 3-й групп концентрация и количество мышечного белка к 122-сут. возрасту была выше соответственно на 5,5 и 11% ($P<0,05$) и на 27 и 39% ($P<0,05$), соответственно по сравнению с контролем; при этом среднесуточный прирост мышечных белков ($P<0,05$) у животных опытных групп по сравнению с контролем был выше против контроля на 54 и 76% соответственно (табл. 4). У поросят опытных групп по сравнению с контролем установлено и более высокое значение отношения интенсивности отложения белков в мышцах к их ретенции в теле (табл. 4).

Таблица 4. Интенсивность отложения белков и их содержание в скелетно-мышечной ткани у поросят разного возраста ($M\pm m$, $n=4$)

Показатели	Группы		
	1 (контроль)	2	3
Возраст 63 суток			
Содержание белка в мышцах, г/100 г	18,64±0,16	18,64±0,16	18,64±0,16
Количество белка мышц в теле, г	1698±84	1698±84	1698±84
Возраст 122 суток			
Содержание белка в мышцах, г/100 г	19,03±0,28	20,07±0,21*	21,09±0,49*
Количество белка мышц в теле, г	3462±150	4413±200*	4798±180*
Прирост белка в мышцах за период, г	1764±135	2715±150*	3100±190*
Среднесуточный прирост белков в мышцах, г/сут	29,9±2,2	46,0±2,3*	52,5±2,8*
Прирост белка в мышцах/ретенция белка в теле, %	30,7	39,2	44,7

Результаты исследования белковых фракций мышц свидетельствует об улучшении качественного состава мышц у поросят опытных групп по сравнению с контролем к 122-сут. возрасту (табл. 5). У животных 2-й и 3-й групп выше против контроля содержание фракции миофибриллярных белков на 10 и 18% ($P<0,05$) при высоком уровне саркоплазматических белков на фоне низкой концентрации стромальных. В итоге у поросят опытных групп по сравнению с контролем выше качественный показатель белков (отношение саркоплазматических+миофибриллярных к стромальным белкам) (табл. 5).

Таблица 5. Фракционный состав белков мышц у поросят 122-сут. возраста, г/100 г ($M\pm m$, $n=4$)

Показатели	Группы		
	1 (контроль)	2	3
Саркоплазматические белки	8,05 ± 0,53	8,33 ± 0,61	8,40 ± 0,43
Миофибриллярные белки	8,08± 0,47	8,92 ±0,32*	9,55 ± 0,53*
Стромальные белки	2,90 ± 0,65	2,82 ± 0,42	3,14± 0,61
Качественный показатель белков, ед.	5,56 ± 0,37	6,11 ± 0,47	5,71 ± 0,35

При выращивании поросят на низкопротеиновых рационах с добавлением незаменимых аминокислот особый приоритет приобретает оценка эффективности использования аминокислот на рост и развитие скелетно-мышечной ткани. У поросят 2-й группы по сравнению с контролем меньше требовалось сырого переваримого протеина и лизина рациона на единицу прироста скелетных мышц ($P < 0,05$). Аналогичные результаты были получены при расчёте на 1 г отложенного мышечного белка. У животных 3-й группы по сравнению с контролем был меньше расход лизина на 1 г отложенного мышечного белка ($P < 0,05$).

Таблица 6. Эффективность использования протеина и аминокислот рациона на рост и развитие скелетно-мышечной ткани у поросят 122-сут. возраста (M \pm m, n=4)

Показатели расхода протеина и лизина	Группы		
	1 (контроль)	2	3
	г/г прироста массы скелетных мышц		
Сырой протеин	1,32 \pm 0,11	0,95 \pm 0,09*	1,12 \pm 0,20
Переваримый протеин	1,02 \pm 0,09	0,74 \pm 0,07*	0,91 \pm 0,10
Лизин	0,085 \pm 0,03	0,073 \pm 0,01*	0,079 \pm 0,02
	г/г отложенного мышечного белка, г		
Сырой протеин	6,82 \pm 0,55	4,50 \pm 0,37*	4,91 \pm 0,84
Переваримый протеин	5,23 \pm 0,24	4,50 \pm 0,18*	4,91 \pm 0,17
Лизин	0,44 \pm 0,02	0,35 \pm 0,01*	0,35 \pm 0,03*

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют, что поддержание в рационе молодняка свиней сбалансированного количества и соотношения индивидуальных аминокислот (2-я группа) способствует повышению эффективности их использования на рост скелетно-мышечной ткани и отложение мышечных белков.

Заключение

Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования низкопротеиновых рационов для поросят при условии сбалансированности содержания индивидуальных лимитирующих аминокислот и обменной энергии. При снижении уровня протеина в корме до 120 г/кг в возрастной период 63-122-сут. с одновременным увеличением уровня лизина, метионина и треонина до 22-33% и обменной энергии на 5%, у поросят обеспечиваются лучшие показатели роста и развития скелетно-мышечной ткани, что позволяет снизить затраты протеина и аминокислот на производство высококачественной свинины и повысить эффективность использования зерна злаковых культур в питании молодняка свиней.

Уровень и соотношение доступных для усвоения аминокислот при соответствующем обеспечении энергией поросят в возрастной период 63-122-сут. являются факторами, лимитирующими интенсивность обменных процессов, роста и развития скелетно-мышечной ткани. Для помесных поросят (σ ландрас \times ϕ крупная белая) в этот период выращивания оптимальным является комбикорм с содержанием в 1 кг корма питательных веществ и энергии: сырой протеин 12,2%, обменная энергия 13,02 МДж, лизин 9,4 г; метионин+цистин 6,1 г; треонин 6,3 г, при содержании лизина 0,72 г на 1 МДж обменной энергии. Рекомендуемые соотношения в рационе содержания аминокислот по отношению к лизину (%): треонин 67, метионин+цистин 65, валин 63, лейцин+изолейцин 142, гистидин 33, триптофан 15, аргинин 54, фенилаланин+тирозин 96.

Список литературы

1. Еримбетов К.Т., Обвинцева О.В., Софронова О.В. Физиологическое значение и метаболические функции лейцина, изолейцина и валина у животных (обзор). // Проблемы биологии продуктивных животных. 2021. № 4. С. 40-50. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2021.4.40-50.
2. Еримбетов К.Т., Обвинцева О.В., Соловьева А.Г., Федорова А.В., Земляной Р.А. Сигнальные пути и факторы регуляции синтеза и распада белков в скелетных мышцах (обзор). // Проблемы биологии продуктивных животных. 2020. № 1. С. 24-33. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.1.24-33.
3. Еримбетов К.Т. Метаболизм белков у растущих бычков и свиней и факторы его регуляции. Автореф. дисс... д.б.н., Боровск, 2007, 46 с.
4. Обвинцева О.В., Еримбетов К.Т., Михайлов В.В. Основные физиологические факторы формирования мясной продуктивности у свиней (обзор). // Проблемы биологии продуктивных животных. 2022. № 2. С. 5-19. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2022.2.5-19.
5. Родионова О.Н., Кальницкий Б.Д. Азотистый обмен и продуктивность растущих свиней на низкопротеиновых рационах с разным уровнем обменной энергии и лимитирующих аминокислот. // Проблемы биологии продуктивных животных. 2010. № 1. С. 90-95.
6. Черепанов Г.Г. Системная морфофизиологическая теория роста животных. Боровск: ВНИИФБиП, 1994. 104 с.
7. Ayuso M., Fernández A., Núñez Y., Benítez R., Isabel B., Barragán C., Fernández A.I., Rey A.I., Medrano J.F., Cánovas Á., González-Bulnes A., López-Bote C., Ovilo C. Comparative analysis of muscle transcriptome between pig genotypes identifies genes and regulatory mechanisms associated to growth, fatness and metabolism. // PLoS One. 2015. Vol. 10. nr 12. P. 445-464. DOI: 10.1371/journal.pone.0145162.
8. Anthony T.G. Mechanisms of protein balance in skeletal muscle. // Domest. Anim. Endocr. 2016. Vol. 56(Suppl). P. 23-32. DOI: 10.1016/j.domaniend.2016.02.012.
9. Batson K.L., Calderón H.I., Tokach M.D., Woodworth J.C., Goodband R.D., Dritz S.S., DeRouchey J.M. Effects of feeding diets containing low crude protein and coarse wheat bran as alternatives to zinc oxide in nursery pig diets. // J. Anim. Sci. 2021. Vol. 99. P. 1810-1820. DOI: 10.1093/jas/skab090.
10. Che L.Q., Peng X., Hu L., Wu C., Xu Q., Fang Z.F., Lin Y., Xu S.Y., Li J., Feng B., Tian G., Zhang R.N., Sun H., Wu D., Chen D.W. The addition of protein-bound amino acids in low-protein diets improves the metabolic and immunological characteristics in fifteen- to thirty-five-kg pigs. // J. Anim. Sci. 2017. Vol. 95. P. 1277-1287. DOI: 10.2527/jas2016.0990.
11. Deng D., Yao K., Chu W., Li T., Huang R., Yin Y., Liu Z., Zhang J., Wu G. Impaired translation initiation activation and reduced protein synthesis in weaned piglets fed a low-protein diet. // J. Nutr. Biochem. 2009. Vol. 20. P. 544-552. DOI: 10.1016/j.jnutbio.2008.05.014.
12. Escobar J., Frank J.W., Suryawan A., Nguyen H.V., Kimball S.R., Jefferson L.S., Davis T.A. Physiological rise in plasma leucine stimulates muscle protein synthesis in neonatal pigs by enhancing translation initiation factor activation. // Am. J. Physiol. Endocr. Metab. 2005. Vol. 288. P. 914-921. DOI: 10.1152/ajpendo.00510.2004.
13. 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. P. 4815-4822. DOI:10.3390/su13094815.
14. Eugenio F.A., van Milgen J., Duperray J., Sergheraert R., Le Floch N. Feeding intact proteins, peptides, or free amino acids to monogastric farm animals. // Amino Acids. 2022. Vol. 54. nr 2. P. 157-168. DOI: 10.1007/s00726-021-03118-0.
15. Figueroa J.L., Lewis A.J., Miller P.S., Fischer R.L., Diedrichsen R.M. Growth, carcass traits, and plasma amino acid concentrations of gilts fed low-protein diets supplemented with amino acids including histidine, isoleucine, and valine. // J. Anim. Sci. 2003. Vol. 81. P. 1529-1537. DOI: 10.2527/2003.8161529x.
16. Hulshof T.G., van der Poel A.F.B., Hendriks W.H., Bikker P. Amino acid utilization and body composition of growing pigs fed processed soybean meal or rapeseed meal with or without amino acid supplementation. // Animal. 2017. Vol. 11. nr 7. P.1125-1135. DOI: 10.1017/S1751731116002548.
17. Helander E. On quantitative muscle protein determination sarcoplasm and myofibrile protein content of normal and atrophy skeletal muscle // Acta Physiol. Scand. 1957. Vol. 41. P. 141-147.

18. Li Y.H., Li F.N., Duan Y.H., Guo Q.P., Wen C.Y., Wang W.L., Huang X.G., Yin Y.L. 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.
19. Laurent G.J. Protein turnover during skeletal muscle hypertrophy. // *Fed. Proc.* 1980. Vol. 39. P.42-47.
20. Limbach J.R., Espinosa C.D., Perez-Calvo E., Stein H.H. Effect of dietary crude protein level on growth performance, blood characteristics, and indicators of intestinal health in weanling pigs. // *J. Anim. Sci.* 2021. Vol. 99. P. 1374-1383. DOI: 10.1093/jas/skab166.
21. Millet S., Aluwé M., De Boever J., De Witte B., Doudah L., Van den Broeke A., Leen F., De Cuyper C., Ampe B., De Campeneere S. The effect of crude protein reduction on performance and nitrogen metabolism in piglets (four to nine weeks of age) fed two dietary lysine levels. // *J. Anim. Sci.* 2018. Vol. 96. P. 3824–3836. DOI: 10.1093/jas/sky254.
22. Nie C., Xie F., Ma N., Bai Y., Zhang W., Ma X. Nutrients mediate bioavailability and turnover of proteins in mammals. // *Curr. Prot. Pept. Sci.* 2019. Vol. 20. nr 7. P. 661-665. DOI: 10.2174/1389203720666190125111235.
23. Kim S.W., Chen H., Parnsen W. Regulatory role of amino acids in pigs fed on protein-restricted diets. // *Curr. Prot. Pept. Sci.* 2019. Vol. 20. nr 2. P. 132-138. DOI: 10.2174/1389203719666180517100746.
24. 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. 478-485. DOI: 10.3390/ani12243478.
25. Soto J.A., Tokach M.D., Dritz S.S., Woodworth J.C., Derouchey J.M., Goodband R.D., Wu F. Optimal dietary standardized ileal digestible lysine and crude protein concentration for growth and carcass performance in finishing pigs weighing greater than 100 kg. // *J. Anim. Sci.* 2019. Vol. 97. P. 1701-1711. DOI: 10.1093/jas/skz052.
26. Tang Q., Li W., Ren Z., Ding Q., Peng X., Tang Z., Pang J., Xu Y., Sun Z. Different fatty acid supplementation in low-protein diets regulate nutrient utilization and lipid and amino acid metabolism in weaned pigs model. // *Int. J. Mol. Sci.* 2023. Vol. 24. nr 10. P. 8501-8512. DOI: 10.3390/ijms24108501.
27. Vonderohe C.E., Mills K.M., Liu S., Asmus M.D., Otto-Tice E.R., Richert B.T., Ni J.Q., Radcliffe J.S. The effect of reduced CP, synthetic amino acid supplemented diets on growth performance and nutrient excretion in wean to Finish swine. // *J. Anim. Sci.* 2022. Vol. 100. nr 6. P 456-465. DOI: 10.1093/jas/skac075.
28. van Milgen J., Dourmad J.-Y. Concept and application of ideal protein for pigs. // *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2015. Vol. 6. P.15-25. doi: 10.1186/s40104-015-0016-1.
29. Wullschleger S., Loewith R., Hall M.N. TOR signaling in growth and metabolism. // *Cell*. 2006. Vol.124. P. 471-484. DOI: 10.1016/j.cell.2006.01.016.
30. Wu G., Li P. The "ideal protein" concept is not ideal in animal nutrition. // *Exp. Biol. Med. (Maywood)*. 2022. Vol. 247. Nr 13. P. 1191-1201. DOI: 10.1177/15353702221082658.
31. 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. 260-269. DOI: 10.1186/s40104-018-0276-7.
32. Wang H., Long W., Chadwick D., Velthof G.L., Oenema O., Ma W., Wang J., Qin W., Hou Y., Zhang F. Can dietary manipulations improve the productivity of pigs with lower environmental and economic cost? A global meta-analysis. // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2020. Vol. 289:106748. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106748.
33. Zhou P., Zhang L., Li J., Luo Y., Zhang B., Xing S., Zhu Y., Sun H., Gao F., Zhou G. Effects of dietary crude protein levels and cysteamine supplementation on protein synthetic and degradative signaling in skeletal muscle of finishing pigs. // *PLoS One*. 2015. Vol. 10. nr 9. P. 213-222. DOI: 10.1371/journal.pone.0139393.
34. Zheng L., Wei H., He P., Zhao S., Xiang Q., Pang J., Peng J. Effects of supplementation of branched-chain amino acids to reduced-protein diet on skeletal muscle protein synthesis and degradation in the fed and fasted states in a piglet model. // *Nutrients*. 2017. Vol. 9. nr 1. P. 17-30. DOI: 10.3390/nu9010017.
35. Zhao Y., Tian G., Chen D., Zheng P., Yu J., He J., Mao X., Yu B. Effects of varying levels of dietary protein and net energy on growth performance, nitrogen balance and faecal characteristics of growing/finishing pigs. // *Rev. Bras. Zootec.* 2019. Vol. 48. P. 2018-2021:e20180021. DOI: 10.1590/rbz4820180021.
36. Zhang Q., Hou Y., Bazer F.W., He W., Posey E.A., Wu G. Amino acids in swine nutrition and production. // *Adv. Exp. Med. Biol.* 2021. Vol. 1285. P. 81-107. DOI: 10.1007/978-3-030-54462-1_6.

References (for publications in Russian)

1. Cherepanov G.G. *Sistemnaya morfofiziologicheskaya teoriya rosta zhivotnykh (System morphophysiological theory of animal growth)*. Borovsk: VNIIFBiP Publ., 1994. 104 p.
2. Erimbetov K.T., Obvintseva O.V., Sofronova O.V. [Physiological significance and metabolic functions of leucine, isoleucine and valine in animals: a review]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology)*. 2021. 4: 40-50. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2021.4.40-50
3. Erimbetov K.T. *Metabolizm belkov u rastushchikh bychkov i svinei i faktory ego regulyatsii* [Protein metabolism in growing bulls and pigs and factors of its regulation]. Extended Abstract of Diss. Dr. Biol. Sci., 2007, 46 p.
4. Erimbetov K.T., Obvintseva O.V., Solov'eva A.G., Fedorova A.V., Zemlyanoi R.A. [Signaling pathways and factors regulating the synthesis and breakdown of proteins in skeletal muscles: a review]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology)*. 2020. 1: 24-33. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.1.24-33
5. Obvintseva O.V., Erimbetov K.T., Mikhailov V.V. Obvintseva O.V., Erimbetov K.T., Mikhailov V.V. [The main physiological factors in the formation of meat productivity in pigs: a review]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology)*. 2022. 2: 5-19. DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2022.2.5-19
6. Rodionova O.N., Kal'nitskii B.D. [Nitrogen metabolism and productivity of growing pigs on low-protein diets with different levels of metabolic energy and limiting amino acids]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology)*. 2010. 1: 90-95.

UDC 636.4.082.265:612.12.128

**Effects of low-protein diets with different level and ratio of amino acids
on growth and development of skeletal muscle tissue in piglets**

Rodionova O.N.

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

ABSTRACT. In recent years, there has been growing interest in research on the optimization of protein-amino acid nutrition in pigs, in particular, in relation to the role of individual amino acids that limit the growth of skeletal muscle tissue. The experiment was carried out on three groups (n=16) of crossbred piglets (Landrace x large white) with an initial live weight of 20-22 kg, receiving feed on a barley-wheat basis (group I, control: 12.4 MJ of metabolizable energy; 120 g crude protein (7.7 g lysine; 4.6 methionine + cystine; 4.8 g threonine), feed with an increased level of metabolizable energy and limiting amino acids (group II: 13.0; 122; 9.4; 6.1; 6.3, respectively) or with an increased content of crude protein, metabolizable energy and amino acids (group III: 13.6; 152; 10.8; 7.0; 7.2, respectively). In animals of groups II and III, compared to the control, the concentration and amount of muscle protein by 122 days of age were higher by 5.5 and 11 and by 27 and 39% (P<0.05), respectively. Average daily gains in live weight, weight of skeletal muscles and the content of the fraction of sarcoplasmic and myofibrillar proteins in them in groups II and III were higher compared to the control (P<0.05). Concluded that under the conditions of the experiment, increased growth intensity and optimal development of skeletal muscle tissue in crossbred piglets in the age period from 65 to 122 days were provided with the ratio in the diet of amino acid content in relation to lysine (%): threonine 67, methionine + cystine 65, valine 63, leucine + isoleucine 142, histidine 33, tryptophan 15, arginine 54, phenylalanine+tyrosine 96.

Keywords: piglets, low protein diets, limiting amino acids, skeletal muscle, growth and development.

Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology), 2023, 3: 68-78.

Поступило в редакцию: 07.08.2023

Получено после доработки: 18.09.2023

Сведения об авторах:

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