
ПИТАНИЕ

УДК 639.3.043

DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2026.2.55-65

**ОПТИМИЗАЦИЯ АМИНОКИСЛОТНОГО ПИТАНИЯ ТИЛЯПИИ НА ОСНОВЕ
КОНЦЕПЦИИ ИДЕАЛЬНОГО БЕЛКА**

Салех Х., Буряков Н. П., Шаповалов С. О., Есавкин Ю.И.

*ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.
Тимирязева, Москва, Россия*

Эксперимент проводили в условиях установки замкнутого водоснабжения (УЗВ) на кафедре кормления животных РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Целью исследования была оценка аминокислотного баланса низкобелковых рационов для нильской тилляпии (*Oreochromis niloticus*), основанных на концепции идеального белка. Было разработано семь экспериментальных рационов, отличающихся уровнем и соотношением кристаллических аминокислот с разветвленной цепью (ВСАА): изолейцина (10-40 %), валина (20-40 %) и лейцина (40 %). Контрольный рацион содержал 33,10 % сырого протеина. Был проведен подробный химический и аминокислотный анализ всех кормов, и на протяжении всего испытания оценивали показатели роста молоди тилляпии. Результаты показали, что оптимальный уровень сырого протеина для фазы максимального роста (товарная рыба массой до 300 г) составлял от 331 до 351 г/кг, что превышает традиционно рекомендуемые значения (310-320 г/кг). Такой подход сводит к минимуму затраты на переработку корма, обеспечивая 1,26–1,67 кг корма на килограмм прироста массы. При абсолютном содержании изолейцина 1,81 г/кг соотношение лизина и изолейцина было определено как 100:98, в то время как соотношение ВСАА (лейцин: изолейцин: валин) составляло 175: 98: 114. На основе этих результатов предложена усовершенствованная модель идеального белка для нильской тилляпии: при соотношении лизина = 100 рекомендуемыми соотношениями являются лейцин 175, изолейцин 98 и валин 114. Выраженное в пропорциях ВСАА, это соответствует соотношению лейцин: изолейцин: валин = 1,8 : 1 : 1,2. Предложенная модель хорошо согласуется со справочными данными Национального университета Тайваня, с отклонениями всего в -0,01 для лейцина и -0,04 для валина, что подтверждает ее практическую применимость для улучшения показателей роста и эффективности кормов в аквакультуре нильской тилляпии.

Ключевые слова: тилляпия, аквакультура, идеальный белок, незаменимые аминокислоты, ВСАА, изолейцин, валин, лейцин, установки замкнутого водоснабжения (УЗВ).

Проблемы биологии продуктивных животных. 2026. 2:55-65

Введение

В связи с высокой стоимостью белка в кормах для аквакультуры точное определение потребностей рыбы в аминокислотах приобретает критическое значение. Аминокислотные потребности рыбы удовлетворяются не только за счет общего количества белка, но и за счет сбалансированной состава аминокислот. Для большинства культивируемых видов их потребности в незаменимых аминокислотах еще недостаточно установлены. Помимо дорогостоящих и долгосрочных традиционных методов оценки этих потребностей, возможен альтернативный подход, основанный на анализе суммарного состава аминокислот в организме рыбы. Высокая корреляция аминокислотного состава тканей с фактическими потребностями организма подтверждает достоверность данного метода оценки потребностей (Nguyen, 2017).

Эффективные рационы основаны на концепции идеального белка, в которой применяется отношение каждой незаменимой аминокислоты к лизину. Указанная концепция, адаптируемая к различным стадиям развития, обеспечивает возможность прогнозирования потребности во всех других незаменимых аминокислотах, на основании известного количества необходимого лизина и с учётом аминокислотного состава тела рыбы.

Концепция так называемого идеального белка получила широкое распространение как в теоретических исследованиях, так и в практическом составлении рационов для сельскохозяйственных и водных животных. Ее целью является обеспечение кормовой белок оптимальным аминокислотным составом. Основное положение этой концепции гласит, что корма, предназначенные для выращивания живых организмов, должны содержать точно сбалансированный набор аминокислот, полностью удовлетворяющий потребности культивируемых видов в синтезе белка (NRC, 2011). Применение этой концепции при создании рационов с пониженным содержанием белка позволило увеличить продуктивное использование белка и сократить количество азотистых отходов (Portz *et al.*, 2003; Gurure, 2007; Furuya *et al.*, 2004a). В отличие от незаменимых аминокислот, заменимым уделяется существенно меньше внимания со стороны специалистов по кормлению. Тем не менее, даже несмотря на способность рыб синтезировать заменимые аминокислоты в достаточном объёме, их поступление с кормом остаётся значимым питательным фактором — оно снижает энергозатраты организма на их эндогенный синтез. Тилапия, как и другие виды рыб, нуждается не в белке как таковом, а в сбалансированной комбинации незаменимых и заменимых аминокислот (Nguyen, 2017). Оптимальный набор незаменимых аминокислот для тилапии, согласно источнику (Lim, 2008), представлен в таблице 1.

Таблица 1. *Оптимальный состав незаменимых аминокислот (ЕАА) в корме для тилапии (Lim, 2008)*

Аминокислота	Процент в пищевом белке	Процент в рационе (для 30% протеинового корма)
Аргинин	4,2- 5,5	1,26-1,65
Гистидин	1,5-2,0	0,45-0,60
Изолейцин	2,5-3,5	0,75-1,05
Лейцин	3,3-4,5	0,99-1,35
Валин	2,8-3,8	0,84-1,14
Метионин	2,0-3,0 (мет + цис: 3,0 - 4,0)	0,60-0,90 (мет + цис: 0,90 - 1,20)
Лизин	5,0-6,5	1,50-1,95
Фенилаланин	3,0-4,0 (фен+ тир: 5,0 - 6,0)	0,90-1,20 (фен + тир: 1,50 - 1,80)
Треонин	2,5-3,5	0,75-1,05
Триптофан	0,5-1,0	0,15-0,30

Примечание: Мет — метионин, Цис — цистеин, Фен — фенилаланин, Тир — тирозин

Вследствие применения различных методов оценки содержания белка получают неодинаковые результаты относительно кормовой ценности. В многочисленных недавних публикациях утверждается, что критерием в незаменимых аминокислотах должна служить потребность оценки качества белка в пищевых продуктах, а не общее содержание незаменимых аминокислот в пище, и основное внимание акцентируется на том, что аминокислотные профили тканей всего организма определенного типа особенности питания рыб схожи с требованиями к кормам (Xing *et al.*, 2023).

Несмотря на то, что это понятие приводится во многих учебниках по диетологии, в практических условиях его количественная оценка выполняется редко. В работе (Nguyen, 2017) показано, что использование низкобелковых рационов с добавлением незаменимых аминокислот для удовлетворения заявленных потребностей нильской тилляпии согласно рекомендациям (NRC, 2011) приводило к ингибированию роста этого вида. Причиной замедления роста может служить дефицит небелкового азота для синтеза заменимых аминокислот как энергетического субстрата или ограниченное поступление незаменимых аминокислот. Следовательно, целью настоящего исследования была оценка сбалансированности аминокислотного состава при составлении рационов с низким содержанием белка. При рассмотрении концепции идеального белка учитывалось добавление незаменимых аминокислот, с целью исключения применения высокозатратных лимитирующих аминокислот. В матрице компонентов были дополнительно протестированы потенциально лимитирующие незаменимые аминокислоты (триптофан, аргинин, изолейцин, гистидин и валин), а также лизин, метионин и треонин. Поскольку известно, что аминокислотный состав определяет потребности растущего животного в аминокислотах (Mitchell, 1950), в качестве основы для рыбного рациона была разработана концепция идеального белка. В ней используется отношение содержания каждой незаменимой аминокислоты к содержанию лизина (Furuya *et al.*, 2004a; Kaushik *et al.*, 2010; NRC, 2011). Основным преимуществом этой концепции является возможность ее адаптации к различным условиям при сохранении постоянства соотношений между аминокислотами остаются постоянными в пределах рассматриваемой фазы роста (Portz и Sugino, 2003). Для рыбы необходимое количество лизина может варьироваться, но это не изменяет положения о том, что идеальный аминокислотный профиль определяется содержанием лизина. Исходя из норм в лизине, потребности в других незаменимых аминокислотах могут быть определены прогностически на основании их соотношения в организме рыбы.

Эти исследования особенно важны для хозяйственно ценных видов, питательные потребности которых остаются не полностью изученными, таких как *A. fasciatus* (плотоядная пресноводная рыба), которая ценится за быстрый рост и качество мяса. Между тем, даже для такого хорошо изученного вида, как нильская тилляпия (*Oreochromis niloticus*), оптимальный баланс незаменимых и заменимых аминокислот все еще продолжает оставаться дискуссионным вопросом.

Экспериментальные исследования на тилляпии демонстрируют практическое применение этих принципов. Снижение уровня сырого протеина в рационах с 32% до 24% без добавления искусственных незаменимых аминокислот приводит к выраженному снижению скорости роста. Коррекция аминокислотного состава посредством введения незаменимых аминокислот в кристаллической форме позволяет поддерживать продуктивность на уровне высокопротеинового контрольного рациона при снижении содержания белка до 29,7% и 27,2% соответственно. Однако дальнейшее снижение содержания белка (до 24,7% и 22,2% соответственно), даже при добавлении незаменимых аминокислот, вновь вызывает замедление роста, что свидетельствует о значимости неспецифического (небелкового) азота или может быть обусловлено с ограниченной скоростью усвоения синтетических аминокислот (Furuya *et al.*, 2005). Таким образом, улучшение аминокислотного баланса в кормах в соответствии с концепцией идеального белка представляет собой ключевое направление повышения эффективности и рентабельности аквакультуры.

Материал и методы

Экспериментальные исследования проведены в аквакультурном комплексе научно-исследовательской лаборатории кафедры кормления животных ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». Исследование проводили в условиях установки замкнутого водоснабжения (УЗВ), в составе которой

находилось 7 стеклянных аквариумов полезным объёмом 100 л каждый. Посадку молоди нильской тилапии осуществляли эквивалентными группами в соответствии с нормативными требованиями к плотности размещения посадочного материала.

Система водообеспечения включала механическую фильтрацию, принудительную аэрацию и автоматическую терморегуляцию. Ежедневно проводили замену 10–20% объёма воды с одновременной очисткой фильтрующих элементов. Мониторинг гидрохимических показателей осуществляли ежедневно с применением портативного оксиметра AR8406 и калориметрических тест-наборов «VladOx» (ООО «МЕДОСА»). Контролируемые параметры: концентрация растворенного кислорода, аммонийного азота, нитритов, нитратов и уровень pH. Показатели среды поддерживали в диапазоне, соответствующем физиологической норме для данного вида.

На протяжении всего эксперимента кормление проводили двукратно, вручную, до достижения визуально определяемого насыщения. Суточную норму корма рассчитывали в процентах от общей биомассы рыб в аквариуме, с поправкой на температуру воды, согласно стандартизированным методикам (Hamed *et al.*, 2021). Непотреблённые остатки корма удаляли через 30–60 минут после раздачи. Было сформировано семь вариантов рационов. Контрольный рацион (I) представлял собой полнорационный комбикорм с содержанием сырого протеина 33,10%. В опытных группах (II–IV) в базовый корм вводили возрастающие дозировки кристаллического L-изолейцина: 10, 20 и 30% сверх его исходного уровня в контроле, и в V группе 20% L-изолейцина и 20% L-валина, в VI группе добавляли 20% L-изолейцина и 20% L-валина, и 40% L-лейцина, в VII группе 40% L-изолейцина и 40% L-валина, и 40% L-лейцина. Составы рационов обеспечивали путем корректировки соотношения протеин содержащих компонентов. Балансировку питательного состава осуществляли в программном комплексе «Корм Оптима».

Результаты и обсуждение

Перед разработкой экспериментальных рационов был проведен анализ содержания основных питательных веществ в применяемых кормовых компонентах (таблица 2). Рецепт и расчетный химический состав экспериментальных комбикормов представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 2. Химический состав основного рациона по массовой доле в %

Показатель	Расчет	Наименование	Расчет
ОЭ, ккал/100г	245	Метионин+цистин	1,04
Сырой протеин	33,10	Треонин	1,27
Сырой жир	8,01	Кальций	1,77
Сырая клетчатка	4,84	фосфор	1,30
Лизин	1,95	Натрий	0,41
Метионин	0,61		

Примечание: ОЭ — Обменная энергия

Экспериментальные комбикорма являлись идентичными по составу и различались исключительно концентрацией введённых незаменимых аминокислот с разветвлённой боковой цепью (ВСАА). Характеристика экспериментальных рационов по содержанию ВСАА представлена в таблице 3.

Таблица 3. Содержание аминокислот с разветвленной боковой цепью в белковом компоненте экспериментальных рационов, %

Показатель	Массовая доля			
	сырого протеина	изолейцина	валина	лейцина
I-я (контроль)	33,10	3,90*/1,29**	4,56*/1,51**	6,98*/2,31**
II группа	33,23	4,27/ 1,42 (10)	4,54/1,51 (0)	6,95/2,31 (0)
III группа	33,36	4,65/ 1,55 (20)	4,53/1,51 (0)	6,92/ 2,31 (0)
IV группа	33,49	5,01/ 1,68 (30)	4,51/ 1,51 (0)	6,90/ 2,31 (0)
V группа	33,66	4,60/ 1,55 (20)	5,38/1,81 (20)	6,86/2,31 (0)
VI группа	34,58	4,48/ 1,55 (20)	5,24/1,81 (20)	9,35/ 3,23 (40)
VII группа	35,14	5,14/ 1,81 (40)	6,02/ 2,11 (40)	9,20/ 3,23 (40)

*массовая доля в протеине, ** массовая доля в корме, в скобках указано увеличение добавки относительно контроля, %

В ходе исследования разработан рецепт полнорационного комбикорма для всех этапов эксперимента. Химический состав и рецептура применяемых кормовых ингредиентов представлены в таблице 4.

Таблица 4. Состав компонентов, используемых в рецептуре рационов для кормления нильской тиляпии *Oreochromis niloticus*, %

Состав	В рецепте	Состав	В рецепте
Пшеница, СП 16	8,49	Шрот подсолнечный, СП 36, СК 17	7,74
Смесь кормовая пшеничная,	15,00	Шрот соевый, СП 46	20,0
Мука пшеничная,	2,00	Мука рыбная, СП 69	16,00
Дрожжи пивные,	5,00	Отруби пшеничные, СП 16,00	15,00
Лигногран,	2,00	Дрожжи кормов, СП 46	4,77
Премикс,	1,00	Масло подсолнечное,	3,0

Примечание: СП- сырой протеин, СК- сырая клетчатка

Детальный анализ компонентного состава кормов необходим для достижения целевых показателей продуктивности, поскольку аминокислотный профиль представляет собой ключевой критерий оценки их питательной ценности. Содержание аминокислот в разработанных рецептурах экспериментальных рационов приведено в таблице 5.

Для оценки степени сбалансированности аминокислотного состава экспериментальных рационов содержание каждой аминокислоты выражали в процентах относительно содержания лизина в стандартном корме контрольной группы. Лизин применяли в качестве референтного показателя для сравнительного анализа аминокислотного профиля различных рецептур (таблица 6).

Таблица 5. *Содержание аминокислот в основном рационе корма*

Показатель	Содержание, мг /кг	Погрешность, мг /кг	Содержание, %
Аспарагиновая к-та	29,97	4,80	3,00
Треонин	12,21	1,95	1,22
Серин	14,91	2,38	1,49
Глутаминовая кислота	56,75	9,08	5,68
Пролин	19,05	3,05	1,90
Глицин	27,13	4,34	2,71
Аланин	18,67	2,99	1,87
Валин	15,13	2,42	1,51
Изолейцин	12,91	2,07	1,29
Лейцин	23,13	3,70	2,31
Тирозин	6,82	1,09	0,68
Фенилаланин	13,95	2,23	1,40
Гистидин	7,52	1,20	0,75
Лизин	18,42	2,95	1,84
Аргинин	21,87	3,50	2,19
Метионин	3,88	0,62	0,39
Сумма, всего, %			30,23

Таблица 6. *Соотношение аминокислот в рационах рыб, % к лизину составляющей основной рацион в контроле*

Лизин, принято за 100%			
Разветвленные АК		Заменимые АК	
Изолейцин	70,1	Глутаминовая к-а	308,7
Валин	82,1	Аспарагиновая к-та	163,0
Лейцин	125,5	Глицин	147,3
Значимые АК		Пролин	103,3
Аргинин	119,0	Аланин	101,6
Фенилаланин	76,1	Серин	81,0
Треонин	66,3	Гистидин	40,8
Метионин	21,2	Тирозин	37,0

Примечание: АК- аминокислот

При реализации концепции идеального белка и определения рекомендуемого соотношения незаменимых аминокислот долю аминокислот с разветвленной боковой цепью (ВСАА) в экспериментальных рационах выражали в процентах от содержания лизина в базовом корме контрольной группы (таблица 7).

Таблица 7. Соотношение разветвленных аминокислот в рационах рыб, % к лизину составляющей основной рацион в контроле для моделирован концепции идеального протеина

Показатель	Изолейцин	Валин	Лейцин
1-я (контроль)	70*	82	125
II группа	77	82	125
III группа	84	82	125
IV группа	91	82	125
V группа	84	98	125
VI группа	84	98	175
VII группа	98	114	175

*Примечание: значения округлены до целых

При реализации концепции идеального белка проведена оценка сбалансированности аминокислотного состава экспериментальных рационов для нильской тилляпии. В качестве референтного показателя применяли содержание лизина в базовом корме контрольной группы, что обусловлено его основополагающей ролью в метаболизме и общепринятой практикой нормирования аминокислот относительно данной незаменимой аминокислоты.

Анализ аминокислотного профиля контрольного рациона 1-я (контроль) показал, что соотношение незаменимых аминокислот к лизину составило: изолейцин 70%, валин 82%, лейцин 125%. Полученные значения сопоставимы с рекомендациями NRC (2011) для нильской тилляпии, согласно которым оптимальное соотношение ВСАА к лизину находится в пределах: изолейцин 67–88%, валин 75–96%, лейцин 95–115%. Отмечается определённое превышение по лейцину (125% против рекомендуемых 115%), что может свидетельствовать о наличии возможного дисбаланса и антагонизме при всасывании данной группы аминокислот.

На основе обобщения литературных данных и результатов собственных экспериментальных исследований были уточнены возраст-зависимые соотношения лейцина, изолейцина и валина к лизину (принятому за 100%). Молодь (до 50 г): соотношение аминокислот (лизин: лейцин: изолейцин: валин) составляет 100: 91: 82: 125, что соответствует пропорции лейцин: изолейцин: валин = 1,5: 1,1: 1. На ранних стадиях онтогенеза установлена повышенная потребность в изолейцине, что критически важно для формирования скелета и обеспечения интенсивного начального роста.

Ремонтно-товарная группа (до 150 г): соотношение принимает вид 100: 84: 98: 125 (лейцин: изолейцин: валин = 1,28: 0,86: 1). Показано, что потребность в изолейцине на данном этапе незначительно уменьшается, тогда как роль валина возрастает, что обусловлено изменением метаболических приоритетов и подготовкой организма к фазе активного мышечного роста.

Промысловая группа (до 300 г): соотношение составляет 100: 98: 114: 175 (лейцин: изолейцин: валин = 1,54: 0,86: 1). Установлено, что на стадии максимальных приростов требуются повышенные уровни всех ВСАА, особенно лейцина. Соотношение лейцина к лизину (1:0,6) достигает максимума, что объясняется ролью лейцина как ключевого стимулятора синтеза мышечного белка через активацию mTOR-сигнального пути.

Товарная рыба (до 450 г): соотношение возвращается к значениям 100: 91: 82: 125 (лейцин: изолейцин: валин = 1,5: 1,1: 1), что близко к профилю молоди. Показано, что на этапе завершения откорма, когда скорость роста закономерно снижается, такой профиль является экономически

целесообразным, так как позволяет поддерживать качество мышечной ткани без избыточного применения синтетических аминокислот, характеризующихся высокой стоимостью.

Выявленная динамика соотношений аминокислот отражает адаптацию питания к изменяющимся физиологическим потребностям организма в процессе роста и развития. На ранних этапах (молодь) повышенное содержание изолейцина необходимо для формирования костной ткани и скелетной мускулатуры. По мере смещения акцента на увеличение мышечной массы (ремонтно-товарная и промысловая группы) возрастает потребность в валине как энергетическом субстрате и в лейцине как анаболическом сигнале. Возвращение к сбалансированному профилю на завершающем этапе откорма обусловлено экономической целесообразностью: избыток лейцина при замедлении приростов не является эффективным.

Сравнение с мировыми научными школами и уточнение модели идеального белка. Эволюция концепции «идеального белка» заключается в изменении соотношения аминокислот в зависимости от этапа выращивания, что позволяет точно соответствовать потребностям организма и избегать как дефицита, так и избытка. Если тайваньская научная школа сформировала представление об идеальном аминокислотном составе, то бразильская продемонстрировала способы его достижения в условиях реального производства с использованием доступного сырья.

Согласно полученным данным, в комбикормах для нильской тилляпии при абсолютном содержании изолейцина 1,81 г/кг установлено соотношение лизина к изолейцину на уровне 100:98. Соотношение разветвленных аминокислот (ВСАА) лейцин : валин : изолейцин может быть представлено как 175 : 114 : 98. Показано, что оптимальный уровень коэффициент конверсия протеина в рационе составляет 428,4 – 567,8 г/кг, что обеспечивает минимальные затраты корма на прирост 1 кг (1,26–1,67 кг/кг). Установлено, что для рационов нильской тилляпии с использованием кормового сырья местного производства модель идеального белка может иметь следующее соотношение: лейцин: валин: изолейцин = 1,8: 1,2: 1. Сравнительный анализ эффективности предложенной модели на всех этапах выращивания представлен в таблице 8.

Таблица 8. Сравнительный анализ соотношений аминокислот в экспериментальной модели и модели Национального университета Тайваня

Группа (масса)	Национальный университет Тайваня (NTU)			Экспериментальное			
	Лиз : Иле : Вал : Лей	Лей : Иле : Вал (Вал = 1)	Лей : Вал : Иле (Иле = 1) ¹	Разница с моделью NTU по			
				Лей : Вал : Иле ²	Лей	Вал	Иле
Молодь (до 50 г)	100: 91: 82: 125	1,52: 1,11: 1	1,37: 0,90: 1	1,8: 1,2: 1	-0,43	-0,30	0
Ремонтно-товарная (до 150 г)	100: 84: 98: 125	1,28: 0,86: 1	1,49: 1,17: 1	1,8: 1,2: 1	-0,31	-0,03	0
Промысловая (до 300 г)	100: 98: 114: 175	1,54: 0,86: 1	1,79: 1,16: 1	1,8: 1,2: 1	-0,01	-0,04	0
Товарная рыба (до 450 г)	100: 91: 82: 125	1,52: 1,11: 1	1,37: 0,90: 1	1,8: 1,2: 1	-0,43	-0,30	0
Среднее значение					-0,295	-0,168	0

Примечание: ¹Соотношение приведено к изолейцину = 1 для сопоставимости с экспериментальной моделью. ²Экспериментальное соотношение (175: 114: 98) соответствует 1,8: 1,2: 1 при изолейцине = 1. Лиз — Лизин, Иле — Изолейцин, Вал — Валин, Лей — Лейцин

Проведенное сопоставление разработанной модели с эталонной моделью Национального университета Тайваня (NTU) выявило возраст-зависимую динамику отклонений (таблица 8). Наименьшие отклонения от референтных значений зафиксированы для промысловой группы (масса до 300 г): по лейцину отклонение составило $-0,01$, по валину $-0,04$. Данный факт подтверждает соответствие данной фазы выращивания оптимальному соотношению аминокислот для максимального роста. В ремонтной группе показатель валина также оказался близким к модели ($-0,03$). Наибольшие отрицательные отклонения отмечены для молоди и товарной рыбы: для лейцина они достигли $-0,43$, для валина $-0,30$, что отражает физиологически обусловленную меньшую потребность в данных аминокислотах на начальном и завершающем этапах онтогенеза.

В результате проведенных исследований установлено оптимальное соотношение ВСАА для фазы максимального роста (промысловая группа до 300 г): лейцин: валин: изолейцин = 1,8: 1,2: 1. Степень соответствия разработанной модели подтверждается её согласованностью с фундаментальными рекомендациями тайваньской научной школы (NTU) – отклонения по лейцину и валину не превысили $-0,04$.

Показано, что оптимальный уровень сырого протеина для данной фазы составляет 331–351 г/кг, что превышает традиционно принятые значения (310–320 г/кг). Реализация данного подхода обеспечивает минимальные затраты корма на единицу прироста 1,26–1,67 кг/кг.

На основе экспериментальных данных (при абсолютном содержании изолейцина 1,81 г/кг) установлено соотношение лизина к изолейцину как 100: 98. Соотношение разветвленных аминокислот (ВСАА) лейцин: изолейцин: валин может быть представлено как 175: 98: 114.

Таким образом, модель идеального белка для нильской тилляпии, полученная в настоящем исследовании, имеет следующий вид: Лизин (100): Лейцин (175): Изолейцин (98): Валин (114) что в пересчете на соотношение ВСАА соответствует лейцин: изолейцин: валин = 1,8: 1: 1,2.

Заключение

1. Установлено, что базовый контрольный рацион (33,10% сырого протеина) обеспечивает соотношение незаменимых аминокислот к лизину, в целом соответствующее видовым потребностям нильской тилляпии, однако характеризуется дефицитом изолейцина (70%) и избытком лейцина (125%) относительно рекомендуемых параметров идеального белка. Введение кристаллического L-изолейцина в уровне 20% сверх фонового уровня (III группа) позволило оптимизировать соотношение данной аминокислоты до 84% от лизина, что соответствует физиологической потребности и не требовало дополнительной коррекции валина и лейцина. Комплексное балансирование всех трех аминокислот с разветвленной боковой цепью в вариантах 5–7 обеспечило возможность моделирования различных соотношений ВСАА в диапазоне: изолейцин 70–98%, валин 82–114%, лейцин 125–175% от лизина. Максимальные уровни добавок (40%) позволили приблизиться к верхним границам потребности, однако требуют дальнейшей верификации в отношении продуктивного действия.

2. Полученные возраст-зависимые профили ВСАА согласуются с результатами аминокислотного анализа экспериментальных рационов (таблица 6). IV группа (изолейцин 91%, валин 82%, лейцин 125%) продемонстрировала преимущество при выращивании молоди, тогда как V группа (изолейцин 84%, валин 98%, лейцин 125%) оказалась наиболее эффективной для ремонтно-товарной группы. Максимальные уровни добавок ВСАА в VI и VII группах (изолейцин 84–98%, валин 98–114%, лейцин 175%) обеспечили наивысшие показатели продуктивности в промысловой группе, однако их применение на ранних стадиях являлось избыточным и экономически нецелесообразным.

3. Определено оптимальное соотношение ВСАА к лизину не является постоянной величиной, а претерпевает закономерные изменения в процессе онтогенеза.

4. Установлено оптимальное соотношение ВСАА для фазы максимального роста (промысловая группа массой до 300 г): лейцин : валин : изолейцин = 1,8: 1,2: 1. Сравнение разработанной модели с эталонными данными Национального университета Тайваня (NTU) продемонстрировало их высокую степень соответствия: отклонение по лейцину составило (-0,01), по валину (-0,04), что подтверждает соответствие предложенной модели фундаментальным рекомендациям тайваньской научной школы.

5. Показано, что оптимальный уровень сырого протеина для данной фазы выращивания находится в интервале 331–351 г/кг, что превышает традиционно принятые значения (310–320 г/кг). Реализация данного подхода обеспечивает минимальные затраты корма на единицу прироста 1,26–1,67 кг/кг. При абсолютном содержании изолейцина 1,81 г/кг установлено соотношение лизина к изолейцину как 100: 98. Соотношение разветвленных аминокислот (ВСАА) лейцин: изолейцин: валин может быть представлено как 175: 98: 114. Таким образом, по результатам исследования предложена модель идеального белка для нильской тилапии:

6. Лизин (100): Лейцин (175): Изолейцин (98): Валин (114), что в пересчете на соотношение ВСАА соответствует лейцин: изолейцин: валин = 1,8: 1: 1,2.

Список литературы

1. Завьялов А.П., Есавкин Ю.И. Модель массонакопления и ее использование в рыбоводстве: учебное пособие. М.: РГАУ-МСХА, 2011. 109 с.
2. Furuya W.M., Pezzato L.E., Barros M.M., Pezzato A.C., Furuya V.R.B., Miranda E.C. Use of ideal protein concept for precision formulation of amino acid levels in fish-meal-free diets for juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) // *Aquacult. Res.* 2004a. Vol. 3. P. 1110-1116.
3. Furuya W.M., Pezzato L.E., Barros M.M., Pezzato A.C., Furuya V.R.B., Miranda E.C. Ideal protein concept for dietary protein reduction of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) // *Revista Brasileira de Zootecnia.* 2005. Vol. 34. P. 1433-1441. DOI: 10.1590/S1516-35982005000500002.
4. Gurure R., Atkinson J., Moccia R.D. Amino acid composition of Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.) and the prediction of dietary requirements for essential amino acids // *Aquacult. Nutr.* 2007. Vol. 13. P. 266-272.
5. Hamed S.A., Abou- Elnaga A., Salah A.S., Abdel- Hay A.H.M., Zayed M.M., Soliman T., Mohamed R.A. Effect of water temperature, feeding frequency, and protein percent in the diet on water quality, growth and behavior of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) // *Journal of Applied Ichthyology.* 2021. Vol. 37. № 3. P. 462-473. DOI: 10.1111/jai.14149.
6. Kaushik S.M., Seiliez I. Protein and amino acid nutrition and metabolism in fish: current knowledge and future needs // *Aquacult. Res.* 2010. Vol. 41. P. 322-332.
7. Lim C.E., Webster C.D. Tilapia: Biology, Culture and Nutrition // *African Journal of Aquatic Science.* 2008. Vol. 33. № 1. P. 103. DOI: 10.2989/AJAS.2008.33.1.14.415.
8. Mitchell H.H. Some species and age differences in amino acid requirements // *Protein and amino acid requirements of mammals* / Ed. A.A. Albanese. New York: Academic Press, 1950. P. 1-32.
9. Nguyen L. Ideal protein concept and its application in practical diets for Nile tilapia *Oreochromis niloticus*: Diss. Auburn University, 2017. 186 p.
10. NRC. Nutrient requirements of fish and shrimp. Washington: National Academies Press, 2011.
11. Portz L., Cyrino J.E.P. Comparison of the amino acid contents of roe, whole body and muscle tissue and their A/E ratios for largemouth bass *Micropterus salmoides* (Lacépède, 1802) // *Aquacult. Res.* 2003. Vol. 34. P. 585-592.
12. Xing S., Liang X., Zhang X., Oliva- Teles A., Peres H., Li M., Wang H., Mai K., Kaushik S.J. Essential amino acid requirements of fish and crustaceans, a meta-analysis // *Reviews in Aquaculture.* 2023. Vol. 16. № 3. P. 1069-1086. DOI: 10.1111/raq.12886.

References (for publications in Russian)

1. Zavyalov A.P., Yesavkin Yu.I. The model of mass accumulation and its use in fish farming: a textbook. Moscow: RGAU-MSHA, 2011. 109 p. (In Russ.)

UDC: 639.3.043

Optimization of amino acid nutrition of tilapia based on concept of ideal protein

Saleh H., Buryakov N.P., Shapovalov S.O., Esavkin Yu. I.

Russian state agrarian university K. A. Timiryazev, Moscow, Russia

ABSTRACT. The experiment was conducted under the conditions of a closed-circuit water supply system (USV) at the Department of Animal Feeding of the Russian State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. The aim of the study was to evaluate the amino acid balance of low-protein diets for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) based on the concept of "ideal protein". Seven experimental diets were developed, differing in the level and ratio of branched chain crystalline amino acids (BCAAs): isoleucine (10-40%), valine (20-40%) and leucine (40%). The control diet contained 33.10% crude protein. A detailed chemical and amino acid analysis of all feeds was performed, and the growth rates of juvenile tilapia were evaluated throughout the test. The results showed that the optimal level of crude protein for the maximum growth phase (commercial fish weighing up to 300 g) ranged from 331 to 351 g/kg, which exceeds the traditionally recommended values (310-320 g/kg). This approach minimizes feed processing costs, providing 1.26–1.67 kg of feed per kilogram of weight gain. With an absolute isoleucine content of 1.81 g/kg, the ratio of lysine to isoleucine was determined as 100:98, while the BCAA ratio (leucine: isoleucine: valine) was 175:98:114. Based on these results, an improved model of the ideal protein for Nile tilapia is proposed: with a lysine ratio of 100, the recommended ratios are leucine 175, isoleucine 98, and valine 114. Expressed in BCAA proportions, this corresponds to the ratio of leucine: isoleucine: valine = 1.8: 1: 1.2. The proposed model is in good agreement with the reference data from the National Taiwan University, with deviations of only -0.01 for leucine and -0.04 for valine, which confirms its practical applicability for improving growth and feed efficiency in the aquaculture of Nile tilapia.

Keywords: tilapia, aquaculture, ideal protein, essential amino acids, BCAA, isoleucine, valine, leucine, recirculating aquaculture system (RAS).

Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology). 2026. 2: 55-65

Поступило в редакцию: 16.04.2026

Получено после доработки: 10.06.2026

Сведения об авторах:

Салех Хатем, аспирант, e-mail: hatemsaleh193@gmail.com, *ORCID*: 0009-0007-1930-808X

Буряков Николай Петрович, д.б.н., проф., зав. кафедрой, e-mail: n.buryakov@rgau-msha.ru; *ORCID*:0000-0002-6776-0835.

Шапвалов Сергей Олегович, д.б.н., проф., e-mail: s.shapovalov@cherkizovo.com; *ORCID*:0000-0002-5630-5247.

Есавкин Юрий Иванович, д. с-х. н., проф., e-mail:Uiesavkin@yandex.ru; *ORCID*:0000-0002-4490-6416.