

УДК 636.2.084.52:612.320:612.398:636.085.25
DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2025.4.113-122

**ВЛИЯНИЕ «ЗАЩИТЫ» КОРМОВОГО ПРОТЕИНА ОТ РАСПАДА
В РУБЦЕ НА СИНТЕЗ МИКРОБНОГО БЕЛКА У ЛАКТИРУЮЩИХ КОРОВ:**

ИССЛЕДОВАНИЕ *in vivo* и *in silico*

Василевский Н.В., Черепанов Г.Г.

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

Ключевыми факторами, влияющими на эффективность использования азота корма у КРС, являются поддержание определённого диапазона в значениях распадаемости сырого протеина (СП) в рубце и сбалансированность поступления энергетического субстрата и источника неорганического азота в микробный пул рубца. В данном исследовании изучали влияние микроволнового облучения на распадаемость СП и синтез микробного белка в рубце у лактирующих коров. Обработку образцов проводили в СВЧ-печи (частота 2,45 ГГц, мощность 800 ватт) при экспозиции 15 мин. Распадаемость СП подсолнечного и рапсового шрота, зерна сои, люпина, гороха, вики в рубце определяли методом *in situ*. Наиболее выраженный эффект СВЧ-облучения по снижению распадаемости СП выявлен для подсолнечного ($p < 0,01$) и рапсового шрота ($p < 0,01$). Физиологические исследования проведены методом периодов по 21 дней каждый на коровах-первотёлках ($n = 3$) с канюлями рубца и 12-ти перстной кишки. По среднесуточным показателям азотистого обмена, СВЧ-обработка подсолнечного шрота не оказала существенного влияния на поступление азота и микробного белка в кишечник. Для учёта нестационарности уровней субстратов синтеза в первые часы после кормления разработан алгоритм прогнозирования синтеза микробного белка по динамике уровня глюкозы и аммиака в рубцовой жидкости. Проведенный анализ не выявил различий между опытом и контролем по поступлению в микробный пул глюкозы – энергетического субстрата, лимитирующего скорость синтеза микробного белка, но уровень аммиака на протяжении 6 ч после кормления был ниже, чем в контроле, что могло ограничить темп микробного синтеза. Сделано заключение о необходимости проведения опытов *in vitro* для получения дополнительной информации по кинетическим параметрам поступления аммиака в микробный пул для прогнозирования синтеза микробного белка. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования физиологических критериев адекватности питания высокопродуктивных коров.

*Ключевые слова: лактирующие коровы, рубцовое пищеварение, защищённый протеин, синтез микробного белка, прогнозирование *in silico*.*

Проблемы биологии продуктивных животных. 2025. 4: 113-122.

Введение

Проблема протеинового питания с/х животных – один из актуальных вопросов современного животноводства. Её решение сдерживается с одной стороны ограниченным производством высокобелковых кормов, а с другой низкой эффективностью их использования.

Эффективность использования азота жвачными животными по сравнению с моногастричными довольно низкая – около 25% (Charles, 2017; Yang, 2022); при этом наблюдаются высокая вариабельность этого показателя, что связано как с различными методами оценки микробного белка, так и с сильной зависимостью синтеза микробного белка от условий в рубце, в первую очередь от рН. Изменение параметров рациона вызывает сдвиги в составе рубцовой микробиоты, а повышение эффективности использования азота, как правило,

сопровождается некоторым снижением производственных показателей (Owens, 2014). Ключевыми факторами, влияющими на эффективность использования азота корма, являются поддержание определённого диапазона в значениях распадаемости белка в рубце и сбалансированность поступления энергетического субстрата и азота аммиака в микробный пул (Calsamiglia, 2010). Распадаемость белка может быть изменена путём физической и химической обработки кормов. В отдельных компаниях в РФ выполняются проекты по производству защищённого протеина с использованием методов гидротермической и термохимической обработки, СВЧ-излучения и экструзии, но промышленные технологии производства защищённого протеина в настоящее время отсутствуют (Firkins, 2007; AlZahal, 2017; Schären, 2018). Существующий уровень знаний о процессах, контролирующих поступление в микробный пул энергетических субстратов и аммиака, недостаточны для использования этих знаний для совершенствования критериев оценки адекватности питания высокопродуктивных животных.

Аммиак может служить основным источником азота для синтеза бактериального белка, и это даёт возможность использовать небелковые источники азота, такие как мочевины – недорогой дополнительный источник азота в рационах крупного рогатого скота. Бактерии, ферментирующие простые сахара (основная популяция бактерий в рационах крупного рогатого скота), получают азот преимущественно из пептидов и аминокислот, а не из аммиака (Russell et al., 1992). Рост бактерий, ферментирующих крахмал, усиливается при наличии пептидов и аминокислот (Cruz Soto et al., 1994). Поэтому роль неорганического источника азота распадаемого протеина, например, в виде мочевины, по эффективности использования его в синтезе микробного протеина может быть менее значительной, в сравнении с кормовым протеином. Аналогичные закономерности были отмечены при изучении эффективности микробного синтеза и в опытах других исследователей. Так, изонитрогенная замена азота мочевины на рапсовый шрот приводила к увеличению эффективности синтеза с 25,8 до 29,4 г/кг переваримого органического вещества (Koenig et al., 2004).

Наиболее распространённым способом оценки эффективности синтеза микробного белка является определение величины потока микробного азота в дуоденум на единицу сброженных углеводов (Bach, 2005; Kalscheur, 2006) и нормирование уровня распадаемого в рубце сырого протеина корма (Putri, 2022). В этой связи становится актуальной проблема допустимых пределов снижения содержания сырого протеина в рационе без ущерба для синтеза микробного белка в рубце (Ericson et al., 2024).

В настоящее время единственным доступным способом повышения питательной ценности кормового протеина для жвачных является обработка белковых кормов, повышающая их устойчивость к действию рубцовой микрофлоры, и не снижающая их способность переваривания в кишечнике (Elhadi, 2025). В настоящее время производство таких кормов в стране ограничено. При наличии ресурсной базы в виде высокобелковых кормовых культур, сдерживающим фактором решения данной проблемы является отсутствие простой и эффективной технологии обработки этих кормов, позволяющей получать защищённый от распада в рубце жвачных протеин. Тепловая санитарная обработка семенного материала и зерна производится с использованием источников неионизирующего электромагнитного излучения сверх высокой частоты (СВЧ-излучения) в потоковом режиме (Сыроватка и др., 2019).

Цель работы – оценка влияния микроволнового облучения высокобелковых компонентов комбикорма на распадаемость сырого протеина и синтез микробного белка в рубце у лактирующих коров

Материал и методы

Обработку белковых компонентов комбикормов (подсолнечный и рапсовый шрот, зерно люпина, гороха, вики) массой 300 г проводили в бытовой СВЧ-печи (частота 2,45 ГГц, мощность 800 ватт) при длительности обработки 15 мин. Контроль эффективности обработки опытных

образцов кормов для животных проводили путём инкубации их *in sacco* в рубце. Для определения переваримости питательных веществ в кишечнике применяли метод мобильных мешочков. Для более расширенного исследования была наработана опытная партия подсолнечного шрота и проведены опыты в конце первой трети лактации на 3-х коровах-первотёлках голштинской породы с канюлями рубца и 12-ти перстной кишки методом периодов по 21 дней каждый. В двух рационах обеспечивалось фиксированное содержание всех компонентов, кроме распадаемого сырого протеина.

Объём поступления химуса в дуоденум рассчитывали по содержанию оксида хрома в среднесуточном образце. На основании поступления питательных веществ в дуоденум оценивали их видимую переваримость в сложном желудке. Истинную переваримость сырого протеина корма рассчитывали с учётом синтеза микробного сырого протеина, оценку которого проводили по содержанию в дуоденальном химусе пуриновых оснований.

В табл. 1 приведены данные по составу рационов и их характеристике. Уровень обменной энергии в рационах определяли расчётным методом по данным переваримости питательных веществ рациона, полученным в балансовом опыте.

Таблица 1. Состав и характеристика рационов

| Показатели | Рационы | |
|---|---------|-------|
| | 1 | 2 |
| Силос кукурузный, кг | 25,0 | 25,0 |
| Сено разнотравное, кг | 1,0 | 1,0 |
| Пшеница, кг | 2,73 | 2,73 |
| Ячмень, кг | 3,0 | 3,0 |
| Подсолнечный шрот, кг | 1,5 | 0 |
| Подсолнечный шрот защищённый, кг | 0 | 1,5 |
| Мочевина кормовая, кг | 0,05 | 0,05 |
| Премикс, г | 230 | 230 |
| Дикальцийфосфат, г | 345 | 345 |
| В рационе содержится: | | |
| Обменная энергия, МДж | 138,1 | 139,7 |
| Сухое вещество, кг | 15,0 | 15,0 |
| Сырой протеин, г | 2209 | 2209 |
| Распадаемый протеин, г | 1660 | 1376 |
| Растворимый протеин (РП), г | 896 | 736 |
| Обменный белок, г | 1079 | 1276 |
| Сырой жир, г | 795 | 795 |
| НДК, г | 4340 | 4340 |
| Сырая клетчатка, г | 2304 | 2304 |
| Крахмал, г | 3576 | 3576 |
| Распадаемый крахмал, г | 3157 | 3157 |
| Сахар, г | 379 | 379 |
| Баланс азота в рубце | 0,69 | 0,8 |
| Сумма легкопереваримых углеводов (ЛПУ), г | 3536 | 3536 |
| Растворимый протеин, % | 5,9 | 4,9 |
| Распадаемый протеин (РП), % | 11,1 | 9,1 |

Результаты и обсуждение

Подсолнечный шрот в качестве объекта исследования был выбран как самый распространенный и массовый в России и как корм с наибольшим эффектом «защиты» протеина от распада в рубце после обработки. На основании ранее полученных данных при использовании подсолнечного шрота были использовали те же режимы для СВЧ обработки других белковых

кормов. Результаты показали, что эти режимы оказались недостаточно эффективными для отдельных кормов (табл. 2).

Среднесуточные показатели рубцового пищеварения в целом соответствовали характеристике рациона и были на уровне физиологических норм (табл. 3). При этом остальные показатели существенно не изменялись, что свидетельствует о однотипном протекании микробиологических процессов в рубце.

Таблица 2. Распадаемость протеина кормов при инкубации in sacco в рубце (M±m, n=3)

| Образцы | Распадаемость СП за 12 ч инкубации, % |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Подсолнечный шрот | 78,6±4,8 |
| Подсолнечный шрот «защищенный» | 32,2±2,3** |
| Рапсовый шрот | 75,2±2,9 |
| Рапсовый шрот «защищенный» | 55,4±2,7** |
| Горох | 87,5±2,3 |
| Горох «защищенный» | 75,4±2,5* |
| Зерно люпина | 88,0±3,7 |
| Зерно люпин «защищенный» | 75,6±2,8* |
| Вика бобы | 92,0±4,1 |
| Вика бобы «защищенные» | 88,8±3,3 |

Примечание: *P<0,05; **P<0,01 по t - критерию при сравнении «защищённого» и нативного образца.

Синхронизация процессов ферментации неструктурных углеводов (НСУ) и распада протеина (РП) необходима для максимизации синтеза микробного белка. У лактирующих коров удои молока, потоки бактериального азота и синтез микробного белка могут быть оптимизированы за счёт изменения источников НСУ и соотношения НСУ и РП (Nosek, 1988, 1991; Hoover, 1991; Харитонов, 2021).

Снижение распадаемости кормового протеина может не сопровождаться снижением среднесуточной концентрации аммиака в рубце и увеличением поступления микробного и общего азота из преджелудков, а на протяжении первых часов после кормления на фоне повышенной концентрации ЛЖК (индикатора уровня ферментации крахмала) временный дефицит азота аммиака может приводить к снижению синтеза микробного белка, что неизбежно по закону действующих масс (Черепанов, 2025). Поэтому для выявления периодов несбалансированного поступления азота аммиака и энергетических субстратов микробного синтеза среднесуточные показатели могут быть недостаточно информативными.

По данным табл. 3 можно сделать вывод об отсутствии статистически значимых сдвигов в среднесуточных значениях исследованных показателей, хотя по данным табл. 1 было зафиксировано существенное снижение распадаемости кормового протеина в рубце. Одной из причин этого может быть недостаточная информативность среднесуточных значений в нестационарных ситуациях, в том числе в первые часы после кормления, когда может иметь место рассогласование во времени и по уровню поступления энергетических субстратов и азота, необходимых для микробного синтеза.

Обычно считается, что у лактирующих коров удои молока, потоки бактериального азота и синтез микробного белка могут быть оптимизированы за счёт синхронизации поступления источников энергетических субстратов и источников неорганического азота (Nosek, 1988, 1991; Hoover, 1991, Харитонов, 2021).

В данном исследовании выявлено более стабильное соотношение концентраций аммиака и ЛЖК в рубцовой жидкости на рационе 2 (табл. 4). На первом рационе наблюдается более

широкое варьирование во временном диапазоне – от 0,83 до 1,63 (на втором рационе в диапазоне 0,7-0,8). Это, возможно, связано с более синхронным освобождением энергетических и пластических компонентов для микробного синтеза, а также с тем, что соотношение распадаемого протеина к легкодоступным углеводам на рационе 1 было не оптимальным.

Таблица 3. Показатели эвакуации фракций азота из преджелудков и эффективности синтеза микробного белка ($M \pm m$, $n=3$)

| Показатели | Рационы | |
|---|----------|----------|
| | 1 | 2 |
| Принято азота с кормом, г | 353±22 | 352±44 |
| Поступило азота в кишечник, г | 337±9 | 384±3 ▲ |
| В том числе: | | |
| азот аммиака, г | 7,2±1,8 | 4,1±0,2 |
| неаммонийный азот, г | 329,8±7 | 379,9±2 |
| эндогенный азот, г | 49,4 | 57,0 |
| микробный азот, г | 177±11 | 201±3,3 |
| кормовой азот, г | 104±17 | 123±6 |
| микробиальный + кормовой, г | 280 | 323 |
| Эффективность микробного синтеза: | | |
| г азота/кг ПОВ | 27,2±1,5 | 30,8±2,6 |
| Распадаемость СП рациона: | | |
| ...по балансу азота в 12-ти перстной кишке, % | 71,3±4,6 | 66,1±1,7 |
| ...по инкубации и скорости эвакуации, % | 73,5 | 63,4 |

Примечание: ▲ разница между рационами в значениях общего поступления азота в кишечник при отсутствии различий по микробному и кормовому азоту в определённой степени связана с различием методик оценки поступления общего, кормового и микробиального азота.

Таблица 4. Динамика соотношения концентраций аммиака и ЛЖК в рубце ($M \pm m$, $n=3$).

| Время, час | Рационы | | | | | |
|------------|---------------|---------------|------------|-------------|---------------|------------|
| | 1 | | | 2 | | |
| | Аммиак, мг/дл | ЛЖК, ммоль/дл | Аммиак/ЛЖК | Аммиак, мг% | ЛЖК, ммоль/дл | Аммиак/ЛЖК |
| 0 | 7,2±1,2 | 11,8±2,2 | 0,6 | 10,1±2,1 | 12,4±0,7 | 0,8 |
| 1 | 14,2±1,2 | 12,7±1,4 | 1,1 | 11,4±0,37 | 13,4±0,5 | 0,8 |
| 3 | 17,8±1,3 | 15,7±1,6 | 1,1 | 14,4±1,3 | 15,9±0,3 | 0,9 |
| 5 | 15,8±2,1 | 12,8±1,1 | 1,2 | 13,2±3,1 | 14,9±0,4 | 0,9 |
| Среднее | 13,7 | 13,3 | 1,0 | 12,1 | 14,2 | 0,9 |

При более детальном исследовании была проведена проверка этого предположения с позиций системно-кинетического анализа с использованием первичных данных по динамике уровней аммиака и ЛЖК в рубцовой жидкости (рис. 1).

Первое, что необходимо зафиксировать – это отсутствие десинхронизации уровней аммиака и ЛЖК во временном аспекте (максимум значений обоих субстратов через 3 часа после кормления). Поскольку это типичный временной паттерн для первых шести часов после кормления, проблему субстратного обеспечения микробного синтеза необходимо рассматривать в плане координации размеров поступления (потоков) субстратов в микробный пул. Для экспериментатора, обычно имеющего дело с анализом уровней (концентраций) субстратов, это

нетривиальная задача, так как потоки определяются расчётным методом; разработка кинетической модели – это многоэтапный процесс, в котором на первой итерации обычно выясняются «белые пятна» в планировании эксперимента, которые нужно учесть на последующих этапах.

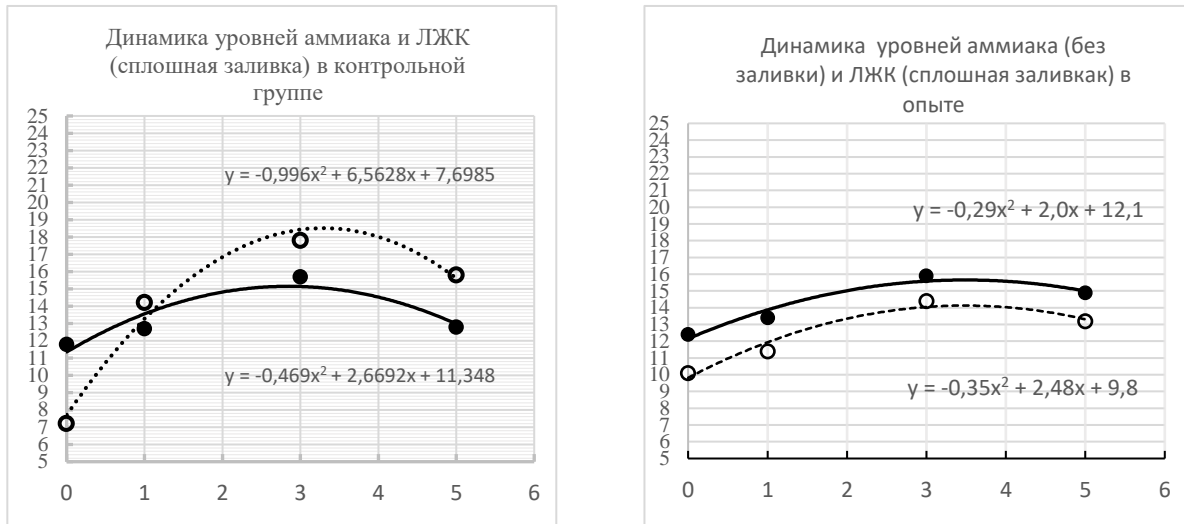


Рис. 1. Динамика концентрации аммиака (пунктир, мг/100 мл) и ЛЖК (сплошная линия, ммоль/100 мл) в рубцовой жидкости в первые 5 ч после кормления. Отсчёты по оси абсцисс сделаны по времени взятия образцов для проведения измерений.

Последовательность анализа целесообразно разбить на этапы.

1. Необходимо привести данные рис. 1 к «каноническому» виду, т.е. отсчёты по оси абсцисс должны быть равномерными (одинаковое расстояние между точками). Для этого динамика субстратов аппроксимирована линией регрессии (полином 2-го порядка) и в последующем отсчёты делаются не по четырём опытным точкам, а по семи, т.е. 5 для каждого часа, включая 0 (до кормления) и 2 (факультативно) при экстраполяции трендов по 1 часу до- и после кормления. Ширина каждого столбца – 1 час.
2. Имеет смысл подсчитать площади под кривыми для аммиака и ЛЖК. Для этого временные тренды аппроксимируются столбцами с отсчётами в середине столбца; отсчёты суммируем. Размерность значений: аммиак: мг/дл/час; ЛЖК – ммоль/дл/час

$$\begin{aligned} \text{аммиак контроль: } \Sigma &= 11 + 15,3 + 18 + 18,6 + 17,0 = 80, & \text{опыт: } \Sigma &= 11,3 + 12,8 + 13,8 + 14 + 13,8 = 63; \\ \text{ЛЖК контроль: } \Sigma &= 12,7 + 14,3 + 14,9 + 15 + 13,8 = 71, & \text{опыт: } \Sigma &= 13,1 + 14,5 + 15,4 + 15,7 + 15,3 = 74 \end{aligned}$$

Заключаем, что по динамике и уровню ЛЖК в рубцовой жидкости на протяжении первых 5 ч после кормления существенных различий между контролем и опытом нет. По аммиаку в контроле несколько выше общий уровень в сравнении с опытом и отчётливо выраженная неравномерность динамики. Правильно интерпретировать эти сдвиги невозможно на уровне общих оценок, сделанных по среднесуточным данным, в том числе по соотношению ЛЖК и аммиака.

3. Поскольку энергетическим субстратом для синтеза микробного белка является глюкоза, а не ЛЖК, для предварительного (пилотного) исследования в последующих расчётах величины синтеза микробного белка были использованы данные по динамике ЛЖК в качестве маркера таковой для глюкозы (с умножением на отношение молекулярных масс $180/55=3,3$) при средней

оценке нормальных значений уровня глюкозы в рубцовой жидкости до кормления – 2 мМ (36 мг/дл) (табл. 5, 6).

4. По данным табл. 3 была произведен прогноз потенциально возможного поступления (потока) глюкозы в микробный пул в качестве энергетического субстрата (без учёта обеспеченности синтеза источником азота) с использованием линейной зависимости $y = 5x$, где x – концентрация глюкозы, мг/дл, 5 – кинетический параметр (константа скорости), y – поток глюкозы в процессах, не сопровождающихся продукцией CO_2 (расход глюкозы для синтеза микробного белка и для продукции ЛЖК) и стехиометрического коэффициента 2,4 мг глюкозы на 1 мг синтезированного микробного белка (табл. 5, 6) (Черепанов, 2025).

Таблица 5. Прогноз синтеза микробного белка в контроле (рацион 1) без учёта обеспеченности его источником неорганического азота

| t, час | Аммиак, мг/дл | ЛЖК, ммоль/дл | Глюкоза, мг/дл, ЛЖК*3,3 | Поток глюкозы, мг/час/дл, глюкоза*5 | Синтез белка, мг/ч/дл, поток/2,4 |
|--------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 6 | 11 | 36,3 | 181 | 75,4 |
| 0,5 | 11 | 12,6 | 41,6 | 208 | 86,7 |
| 1,5 | 15,3 | 14,3 | 47,2 | 236 | 98,3 |
| 2,5 | 18 | 15 | 49,5 | 247 | 103 |
| 3,5 | 18,6 | 14,9 | 49,2 | 246 | 102 |
| 4,5 | 17 | 13,8 | 45,5 | 227 | 94,5 |
| 5,5 | 14,4 | 12,0 | 39,6 | 198 | 82,5 |

Таблица 6. Прогноз синтеза микробного белка в опыте (рацион 2) без учёта обеспеченности его источником неорганического азота

| t, час | Аммиак, мг/дл | ЛЖК, мМ/дл | Глюкоза, мг/дл, ЛЖК*3,3 | Поток глюкозы, мг/час/дл, глюкоза*5 | Синтез белка, мг/ч/дл, поток/2,4 |
|--------|---------------|------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 9,0 | 11,3 | 37,3 | 186 | 77,5 |
| 0,5 | 11 | 13,1 | 43,2 | 216 | 90 |
| 1,5 | 12,8 | 14,5 | 47,8 | 239 | 99,6 |
| 2,5 | 13,8 | 15,4 | 50,8 | 254 | 106 |
| 3,5 | 14,0 | 15,7 | 51,8 | 259 | 108 |
| 4,5 | 13,8 | 15,3 | 50,5 | 252 | 105 |
| 5,5 | 12,7 | 14,5 | 47,8 | 239 | 99,6 |

Численные значения синтеза микробного белка, полученные по среднесуточному поступлению микробного азота в кишечник (190 г, табл. 3) и по динамике уровня глюкозы в рубцовой жидкости (табл. 5-6) можно считать близкими с учётом сделанных аппроксимаций.

По поступлению в кишечник: = **82,4** мг/дл/час ($190 \cdot 6,25 \text{ г/сут} = 1187 \text{ г} = 824 \text{ мг/л/час}$ при объёме жидкой фракции 60 л)

По динамике поступления глюкозы в микробный пул среднее за 6 ч значение на рационе 1 (в контроле) = **114** мг/ч/дл: и на рационе 2 – **97** мг/ч/дл

при $t = 0$: **75** на рационе 1 и **77** на рационе 2; и

при $t = 2,5-3,5$ ч **103-102** мг/ч/дл на рационе 1 и **106-108** на рационе 2.

Таким образом, при оценке синтеза по динамике поступления в микробный пул энергетического субстрата также не выявлено большой разницы между контролем и опытом, но сниженный уровень аммиака в опыте мог привести к торможению темпа синтеза на рациионе 2.

5. Полученные значения скорости синтеза микробного белка (мг/час/дл), могут быть скорректированы, если будет найден способ количественной оценки поступления источника азота в направлении микробного пула. Во всяком случае, для этого необходимо провести опыты *in vitro* с регистрацией динамики выделяемого газа, концентрации аммиака, глюкозы и прироста белкового азота в инкубационной среде. Избыток аммиака на рациионе 1 в интервале 2-5 ч не мог повлиять на темп синтеза, поскольку он поступит в общую циркуляцию и будет сброшен в орнитиновом цикле. С другой стороны, в случае недостаточного поступления азота аммиака в микробный пул на рациионе 2 (в сравнении с величиной синтеза, оцененной по поступлению энергетического субстрата, с коэффициентом 0,16), прогнозируемый темп синтеза микробного белка будет ниже, чем в контроле (на рациионе 1).

Заключение

В условиях проведенного исследования эффект защиты протеина от распада в рубце выявлен для подсолнечного и рапсового шрота, гороха и зерна люпина; наибольшая эффективность «защиты» выявлена для подсолнечного шрота. По среднесуточным показателям азотистого обмена СВЧ-обработка подсолнечного шрота не оказала статистически значимого влияния на среднесуточные показатели поступления азота и микробного белка в кишечник. Для учёта нестационарности субстратов синтеза в первые часы после кормления разработан алгоритм прогнозирования синтеза микробного белка по динамике уровня глюкозы и аммиака в рубцовой жидкости. На 1 мг синтезированного микробного белка необходимо поступление в микробный пул 2,4 мг глюкозы. Лимитирует синтез энергетический субстрат, а дефицит аммиака снижает скорость синтеза. По аммиаку оценок кинетических параметров ещё не получено. По динамике поступления глюкозы в микробный пул не выявлено различий между контролем и опытом, но в опытном периоде был снижен уровень аммиака, что могло ограничить микробный синтез. Сделано заключение о необходимости проведения опытов *in vitro* для получения дополнительной информации по потокам аммиака для более точного прогнозирования синтеза микробного белка. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования физиологических критериев адекватности питания высокопродуктивных коров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки № 124020200032-4.

Список литературы

1. Сыроватка В.И., Жданова Н.В., Обухов А.Д. Применение энергии сверхвысоких частот (СВЧ) в производстве ингредиентов комбикормов. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019. № 2. С. 4-15.
2. Харитонов Е.Л., Лысова Е.А., Березин А.С., Василевский Н.В. Повышение протеиновой питательности кормов для жвачных животных. // Кормопроизводство. 2025. № 2. С. 46-52.
3. Харитонов Е.Л., Березин А.С., Лысова Е.А. Влияние синхронизации распада в рубце углеводов и азотистых компонентов корма на состояние метаболизма и продуктивность у лактирующих коров // Проблемы биологии продуктивных животных. 2021. № 3. С. 82-91.
4. Черепанов Г.Г., Березин А.С. Оценка *in vitro* кинетических параметров активности уреазы рубцовой микрофлоры и эффективности сорбентов аммиака / Проблемы биологии продуктивных животных 2024. № 4. С. 45-58.
5. Черепанов Г.Г., Василевский Н.В. Изучение динамики ферментации углеводов и газообразования в рубцовой жидкости *in vitro*: оценка кинетических параметров брожения с учётом размеров частиц комбикорма. // Проблемы биологии продуктивных животных. 2024. № 4. С. 29-34.
6. Черепанов Г.Г. Системно-кинетический анализ процессов ферментации крахмала и синтеза микробного белка в рубце: пилотное исследование на модели. // Проблемы биологии продуктивных животных. 2025. № 2. С. 53-69.

7. Al Zahal O., Li F., Guan L.L., Walker N.D., McBride B.W. Factors influencing ruminal bacterial community diversity and composition and microbial fibrolytic enzyme abundance in lactating dairy cows with a focus on the role of active dry yeast. // *J. Dairy Sci.* 2017. Vol. 100. nr 6. P. 4377-4393 <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11473>
8. Bach A., Calsamiglia S., Stern M.D. Nitrogen metabolism in the rumen. // *J. Dairy Sci.* 2005. Vol. 88. P. E9-E21. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73133-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73133-7)
9. Calsamiglia S., Ferret A., Reynolds C.K., Kristensen N.B., van Vuuren A.M. Strategies for optimizing nitrogen use by ruminants. // *Animal.* 2010. Vol. 4. nr 7. P. 1184-1196 <https://doi.org/10.1017/S1751731110000911>
10. Charles G. Schwab, Glen A. Broderick A. 100-Year Review: Protein and amino acid nutrition in dairy cows. // *J. Dairy Sci.* 2017. Vol. 100. nr 12. P. 10094-10112. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13320>
11. Cruz Soto R., Muhammed S.A., Newbold C.J., Stewart C.S., Wallace R.J. Influence of peptides, amino acids and urea on microbial activity in sheep receiving grass hay and on the growth of rumen bacteria in vitro. // *Anim. Feed Sci. Technol.* 1994. Vol. 49. P. 151-161.
12. Elhadi A., Calsamiglia S., Rodríguez-Prado M.E., Such X., Bahloul L., Caja G. Lactational and digestive responses of reducing dietary protein level and supplementing rumen-protected methionine in early-lactation dairy ewes. // *J. Dairy Sci.* 2025. Vol. 108. nr. 7. P. 7074-7090 <https://doi.org/10.3168/jds.2024-26124>
13. Ericson V.G., Barros T., Aguerre M.J. et al. Reducing dietary crude protein: Effects on digestibility, nitrogen balance, and blood metabolites in late-lactation Holstein cows. // *J. Dairy Sci.* 2024. Vol. 107. nr 7. P. 5434-5448. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24079>
14. Firkins J.L., Yu Z., Morrison M. Ruminal nitrogen metabolism: perspectives for integration of microbiology and nutrition for dairy cows // *J. Dairy Sci.* 2007. Vol. 90. Suppl. P. E1-E16 <https://doi.org/10.3168/jds.2006-518>
15. Hoover W.H., Stokes S.R. 1991. Balancing carbohydrates and proteins for optimum rumen microbial yield. // *J. Dairy Sci.* 74:3630-3644
16. Kalscheur K.F., Baldwin R. L., Glenn, B. P., Kohn R. A. Milk production of dairy cows fed differing concentrations of rumen-degraded protein. // *J. Dairy Sci.* 2006. Vol. nr. 1. P. 249 - 259 [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72089-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72089-6)
17. Koenig K.M., Beauchemin K.A., Rode L.M. Effect of protein source on microbial protein synthesis and nutrient digestion in beef cattle fed barley grain-based diets. // *Can. J. Anim. Sci.* 2004. Vol. 84. P. 481-490.
18. Nocek, J.E., Russell J.B. 1988. Protein and energy as an integrated system. Relationship of ruminal protein and carbohydrate availability to microbial synthesis and milk production. // *J. Dairy Sci.* 1988. V.71. P.2070-2107.
19. Nocek, J.E., Tamminga S. Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* . 1991. V74. P.3598-3629
20. Owens F.N., Qi P.S., Sapienza D.A. Applied protein nutrition of ruminants – Current status and future directions. // *The Professional Animal Scientist.* 2014 Vol. 30. P. 150–179. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30102-9](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30102-9)
21. Putri E.M., Zain M., Warly L., Hermon H. Effects of rumen-degradable-to-undegradable protein ratio in ruminant diet on in vitro digestibility, rumen fermentation, and microbial protein synthesis. // *Veter. World.* 2021. Vol. 14. nr 3. P. 640-648. DOI: 10.14202/vetworld.2021.640-648
22. Russell, J. B., O'Connor J.D, Fox D.G., Van Soest P.J., Sniffen C.J. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminal fermentation. // *J. Anim. Sci.* 1992. Vol. 70. nr 8. P. 3551-3561.
23. Schären M., Frahm J., Kersten S., Meyer U., Hummel J., Breves G., Dänicke S. Interrelations between the rumen microbiota and production, behavioral, rumen fermentation, metabolic, and immunological attributes of dairy cows. // *J. Dairy Sci.* 2018. Vol. 101. nr 5. P. 4615–4637 <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13736>
24. Yang C.T., Ferris C.P., Yan T. Effects of dietary crude protein concentration on animal performance and nitrogen utilisation efficiency at different stages of lactation in Holstein-Friesian dairy cows. // *Animal.* 2022. Vol. 16. nr 7. E1-E6. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100562>

References (for publications in Russian)

1. Syrovatka V. I., Zhdanova N. V., Obukhov A. D. [Application of microwave energy in the production of feed ingredients]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno- issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva* (Bulletin of Animal Husbandry Mechanization Institute). 2019. 2: 4-15.
2. Kharitonov E.L., Lysova E.A., Berezin A.S., Vasilevskii N.V. [Increasing the protein nutritional value of feed for ruminants]. *Kormoproduktstvo* (Forage production). 2025. 2: 46-52.

3. Kharitonov E.L., Berezin A.S., Lysova E.A. [Effect of synchronization of the breakdown of carbohydrates and nitrogenous components of feed in the rumen on the state of metabolism and productivity in lactating cows]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh* (Productive Animal Biology). 2021. 3: 82-91.
4. Cherepanov G.G., Berezin A.S. [In vitro assessment of kinetic parameters of urease activity of rumen microflora and the effectiveness of ammonia sorbents], *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh* (Productive Animal Biology). 2024. 4: 45-58
5. Cherepanov G.G., Vasilevskii N.V. [Study of the dynamics of carbohydrate fermentation and gas formation in rumen fluid in vitro: assessment of the kinetic parameters of fermentation taking into account the size of feed particles]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh* (Productive Animal Biology). 2024. 4: 29-34.
6. Cherepanov G.G. [System-kinetic analysis of starch fermentation and microbial protein synthesis processes in the rumen: pilot study on a model]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh* (Productive Animal Biology). 2025. 2: 53-69.

UDC 636.2.084.52:612.320:612.398:636.085.25

Effect of feed protein "protection" from protein breakdown in rumen on microbial protein synthesis in lactating cows: study an *in vivo* and *in silico*

Vasilevsky N.V., Cherepanov G.G.

Institute of Physiology, Biochemistry, and Nutrition – Branch of the Federal Scientific Center of Animal Husbandry – Ernst VIZh, Borovsk, Kaluga oblast, Russian Federation

ABSTRACT. Key factors influencing the efficiency of feed nitrogen utilization in cattle include maintaining a certain range of rumen protein degradation values and balancing the supply of energy substrate and inorganic nitrogen source to the rumen microbial pool. Protein degradation can be modified through physical and chemical treatment of feed. In this study, we investigated the physiological effects of microwave irradiation on protein components of compound feed to reduce crude protein degradation in the rumen of lactating cows. Samples were microwaved (2.45 GHz, 800 watts) for 15 min. Rumen crude protein degradation of sunflower and rapeseed meals, soybeans, lupines, peas, and vetch was determined using the *in situ* method. The most pronounced effect of microwave irradiation on reducing crude protein degradation was found for sunflower ($P < 0.01$) and rapeseed meals ($P < 0.01$). Physiological studies were conducted in 21-day periods on first-calf heifers ($n=3$) with rumen and duodenal cannulas. Based on average daily nitrogen metabolism parameters, microwave treatment of sunflower meal did not significantly affect the intestinal nitrogen and microbial protein uptake. To account for the non-stationarity of synthesis substrate levels in the first hours after feeding, an algorithm for predicting microbial protein synthesis based on the dynamics of glucose and ammonia levels in rumen fluid was developed. The analysis revealed no differences between the experimental and control groups in the entry of glucose into the microbial pool. However, ammonia levels were lower for 6 hours after feeding than in the control group, which could limit the rate of microbial synthesis. It was concluded that *in vitro* experiments are necessary to obtain additional information on the kinetic parameters of ammonia entry into the microbial pool for predicting microbial protein synthesis. The obtained results can be used to improve physiological criteria for nutritional adequacy in high-yielding cows.

Keywords: lactating cows, rumen digestion, protected protein, microbial protein synthesis, in silico study.

Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology). 2025. 4: 113-122.

Поступило в редакцию: 03.10.2025.

Получено после доработки: 29.11.2025

Сведения об авторах:

Василевский Николай Владимирович, к.б.н., с.н.с., vasilevskii.n@mail.ru;

Черепанов Геннадий Георгиевич, д.б.н., с.н.с.