



Научная статья

Воздействие холина хлорида, меди сульфата и цинка оксида на долгосрочную стабилизацию микрокапсулированных витаминов в составе премиксов, предназначенных для поросят-отъёмышей

Пань Ян, Хуакай Ван, Мин Чжу и Юнси Ма*

Главная государственная лаборатория по вопросам питания животных, Колледж зоотехнии и технологий, Китайский сельскохозяйственный университет, Пекин, Китай, 100193 уран23@163.com (Пань Ян); huakaiwhk@cau.edu.cn (Хуакай Ван); s20173040486@cau.edu.cn (Мин Чжу)

* Адрес электронной почты для переписки с авторами: mayongxi@cau.edu.cn; тел.: +86-1381-139-8538

Статья получена в редакции: 06.11.2019; принята к печати: 12.12.2019; опубликована: 16.12.2019.



Для ознакомления с самой последней версией статьи (на английском языке) [перейдите по ссылке](#).

Краткое изложение доступным языком

Витамины необходимы для здоровья животных и должны поступать с пищей. В результате быстрого развития витаминной промышленности премиксные заводы теперь могут использовать микрокапсулированные витамины в качестве сырья для производства премиксов. Однако могут возникать сложности в связи с тем, что витамины являются лабильными питательными веществами, чувствительными к химическим и физическим факторам, которые снижают их стабильность. На сегодня опубликовано ограниченное количество научных статей по стабильности витаминов в составе витаминных и витаминно-минеральных премиксов. Самые последние рекомендации по обогащению премиксов для преодоления уменьшения содержания витаминов во время хранения представлены в техническом бюллетене компании BASF (Badische Anilin-und-Soda-Fabrik). Эта работа служила основой для рекомендаций BASF на протяжении почти 20 лет; однако со времени публикации этого бюллетеня премиксы изменились, и выводы, сделанные на основе предыдущих исследований, могут больше не соответствовать действительности из-за изменений в процессах производства витаминов (например, из-за внедрения микрокапсулирования) и содержания питательных веществ (например, холина хлорида, а также меди [Cu] и цинка [Zn] в высоких концентрациях в премиксах для поросят-отъёмышей). Таким образом, целью нашего исследования было определение показателя сохранности витаминов в витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксах, характеристика воздействия холина хлорида, а также Cu и Zn в высоких концентрациях на стабильность витаминов; также было запланировано оценить стабильность витаминов в составе витаминных и витаминно-минеральных премиксов в процессе хранения.

Резюме

Два эксперимента *in vitro* были проведены для изучения воздействия холина хлорида, меди сульфата (CuSO_4) и цинка оксида (ZnO) на стабильность витамина А (ВА), витамина D_3 (BD_3), витамина Е (ВЕ), витамина K_3 (BK_3), витамина B_1 (BB_1), витамина B_2 (BB_2), витамина B_6 (BB_6), ниацина и пантотеновой кислоты в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов для поросят-отъёмышей после 0, 1, 2, 3, 6 и 12 месяцев хранения. Мы вывели уравнения прогноза для оценки удержания витаминов в премиксах в процессе хранения. Чтобы установить стабильность витаминных премиксов в процессе хранения, были произведены два витаминных премикса (содержащий холин и без него), хранившиеся при температуре $+25^\circ\text{C}$ и относительной влажности 60 %. Кроме того, четыре ВМ премикса были использованы для оценки воздействия холина хлорида (0 мг/кг против 40 000 мг/кг) и микроэлементов (низкий уровень $\text{CuSO}_4 + \text{ZnO}$ против высокого уровня $\text{CuSO}_4 + \text{ZnO}$) на стабильность витаминов в составе ВМ премиксов, хранящихся при комнатной температуре ($+22^\circ\text{C}$). В целом по мере увеличения продолжительности хранения премиксов остаточная активность витаминов снижалась ($p < 0,05$). Результаты исследования подтвердили, что BD_3 , ВЕ, BB_2 , BB_6 , ниацин и пантотеновая кислота были высокостабильными в процессе хранения, в то время как на удержание ВА, BK_3 и BB_1 значительно влияли продолжительность хранения и присутствие в премиксе холина, а также Cu и Zn в высоких концентрациях. После одного года хранения удержание ВЕ, BB_2 , BB_6 , ниацина и пантотеновой кислоты в витаминных и ВМ премиксах составило более 90 %. После одного года хранения удержание BD_3 составило более 90 % в витаминных премиксах и более 80 % в ВМ премиксах. Мы пришли к выводу, что, как

представляется, современные методы микрокапсулирования витаминных премиксов являются ненадлежащими, чтобы гарантировать поддержание стабильных концентраций ВА, ВК₃ и ВВ₁ в ВМ премиксах.

Ключевые слова: холина хлорид; меди сульфат; премиксы; стабильность; микрокапсулированные витамины; цинка оксид.

1. Введение

Холин служит донором метильной группы и предшественником фосфатидилхолина, играющего важную роль в метаболизме липидов у животных [1]. Он является важным питательным веществом для всех животных, а для некоторых видов (например, домашней птицы и свиней) — необходимой пищевой добавкой [1]. Холина хлорид обычно получают методом химического синтеза и используют в промышленности по производству кормов. Медь (Cu) и цинк (Zn) — это микроэлементы, исключительно важные для животноводства [2]. Традиционно в рационах свиней Cu и Zn присутствовали в избыточных уровнях — для увеличения показателей роста, потребления корма и эффективности использования корма у поросят-отъемышей [2, 4, 5]. Таким образом, в рационы поросят часто добавлялись фармакологические уровни Cu (125–250 мг/кг) и Zn (2000–3000 мг/кг). Наиболее распространенной формой Cu, используемой в кормах для стимуляции роста свиней, является меди сульфат (CuSO₄ · 5H₂O), а наиболее распространенной формой Zn, используемой в кормах для борьбы с диареей [2, 6] у свиней, является цинка оксид (ZnO). Входящие в состав премиксов витамины — это лабильные питательные вещества, чувствительные к нескольким факторам, которые влияют на их стабильность [7–9]; а холина хлорид, Cu и Zn — стрессовые факторы, влияющие на стабильность витаминов в составе кормов. Однако эти факторы (холина хлорид, Cu и Zn в высоких концентрациях) в составе премиксов были изучены в ограниченном количестве исследований, и неясно, какие витамины в витаминных или витаминно-минеральных премиксах уязвимы в присутствии холина, CuSO₄ и ZnO. Уменьшение активности витаминов в составе витаминных или витаминно-минеральных премиксов в процессе хранения может быть причиной скрытого замедления роста, уменьшения эффективности питания и снижения устойчивости к болезням животных из-за субклинической недостаточности витаминов. В настоящее время в качестве витаминного сырья для производства премиксов доступны микрокапсулированные витамины, химическая структура которых защищена микрокапсулой, а питательные вещества высвобождаются при поступлении в пищеварительный тракт. [10]. Считается, что микрокапсулированные витамины менее реакционноспособны и менее подвержены разрушению. Таким образом, цели этого исследования состояли в том, чтобы:

- 1) определить показатели уменьшения содержания синтетических витаминов в составе витаминных или ВМ премиксов;
- 2) охарактеризовать воздействие продолжительности хранения премиксов, содержащих холина хлорид, CuSO₄ и ZnO, на стабильность витаминов;
- 3) оценить стабильность витаминов в составе смесей и премиксов в процессе хранения.

2. Материалы и методы

Это исследование было проведено в Главной государственной лаборатории по вопросам питания животных Китайского сельскохозяйственного университета (Пекин, Китай) и в Центре оценки эффективности и безопасности кормов Министерства сельского хозяйства и сельских дел (Пекин, Китай). Поскольку в этом эксперименте не использовались животные, для его проведения не требовалось получение одобрения Комитета по уходу за животными и использованию их в исследованиях.

2.1. Состав витаминных премиксов и опыты

Два витаминных премикса (не содержащих микроэлементов) были произведены из микрокапсулированных витаминов (приобретенных у Wellroad Animal Health Co. Ltd., Taiyuan, Китай). Витаминные премиксы были разработаны для добавления в корм животных в количестве 0,25 % от их рациона. Уровни витаминов были выбраны таким образом, чтобы удовлетворить или превысить потребности в витаминах поросят-отъемышей. От первоначальных поставщиков витаминов была получена информация по датам производства всех витаминов, чтобы гарантировать, что с момента выпуска продуктов прошло меньше 6 месяцев и что рекомендуемый срок годности не истек. Только один витаминный премикс содержал 160 000 мг/кг холина хлорида (табл. 1). Концентрация витаминов в премиксах основана на Рекомендациях по добавкам витаминов DSM (компании) 2016 года и на Рекомендациях по витаминам компании Trouw Nutrition China (2018) [11].

2.2. Состав витаминно-минеральных премиксов и опыты

Четыре витаминно-минеральных премикса были произведены так, чтобы концентрация витаминов в них была одинаковой. Микрокапсулированные витамины, являвшиеся сырьем для производства премиксов, были

поставлены компанией Wellroad Animal Health Co. Ltd., Китай.

Витаминно-минеральные премиксы были разработаны для добавления в корм животных в количестве 1 % от их рациона. Уровни витаминов соответствовали или превышали потребности поросят-отъемышей в питательных веществах (Национальный научно-исследовательский совет США (NRC), 2012) [13] и были выбраны для представления «типичных» отраслевых уровней в соответствии с неофициальными исследованиями уровней витаминов в коммерческих премиксах китайского рынка кормов. Количество витаминов и минералов, использованных для производства каждого премикса, показано в табл. 2. Витаминно-минеральные премиксы 2 и 4 содержали 40 000 мг/кг холина хлорида. Витаминно-минеральные премиксы 1–4 были произведены таким образом, чтобы соответствовать или превосходить требования NRC касательно поросят-отъемышей (2012) [13] в отношении содержания меди, йода, железа, марганца, селена и цинка. Витаминно-минеральные премиксы 3 и 4 содержали 20 000 мг/кг меди (Cu), добавленной в виде CuSO₄, и 225 000 мг/кг цинка (Zn), добавленного в виде ZnO. Эти уровни были выбраны потому, что премиксы для поросят-отъемышей содержат Cu и Zn в высоких концентрациях — для улучшения показателей роста и предотвращения диареи [2, 5, 14].

Таблица 1. Состав витаминных премиксов в процессе хранения¹

Вещество	Витаминный премикс 1	Витаминный премикс 2
Витамин ² (ед/кг)		
Витамин А (МЕ)	5 400 000	5 400 000
Витамин D ₃ (МЕ)	1 200 000	1 200 000
Витамин Е (МЕ)	12 000	12 000
Витамин К ₃ (мг)	1200	1200
Витамин В ₁ (мг)	1200	1200
Витамин В ₂ (мг)	2400	2400
Витамин В ₆ (мг)	1200	1200
Ниацин (мг)	12 000	12 000
Пантотеновая кислота (мг)	7200	7200
Фолиевая кислота (мг)	48	48
Биотин (мг)	12	12
Витамин В ₁₂ (мг)	9,6	9,6
Холин (мг)	–	160 000

¹Витаминные премиксы были разработаны для добавления в корм поросят-отъемышей в количестве 0,25 % от их рациона. ² Источники витаминов: витамин А — ретинолацетат, витамин D₃ — холекальциферол, витамин Е — dl-α-токоферола ацетат, витамин К₃ — менадиона натрия бисульфит, витамин В₁ — тиамин мононитрат, витамин В₂ — рибофлавин, витамин В₆ — пиридоксина гидрохлорид, ниацин — никотиновая кислота, пантотеновая кислота — D-кальция пантотенат, витамин В₇ — биотин, витамин В₉ — фолиевая кислота, витамин В₁₂ — цианокобаламин и холин — холина хлорид.

Таблица 2. Состав витаминных/витаминно-минеральных премиксов в процессе их хранения¹

Вещество	ВМ премикс 1	ВМ премикс 2	ВМ премикс 3	ВМ премикс 4
Витамин ² (ед/кг)				
Витамин А (МЕ)	1 350 000	1 350 000	1 350 000	1 350 000
Витамин D ₃ (МЕ)	300 000	300 000	300 000	300 000
Витамин Е (МЕ)	3000	3000	3000	3000
Витамин К ₃ (мг)	300	300	300	300
Витамин В ₁ (мг)	300	300	300	300
Витамин В ₂ (мг)	600	600	600	600
Витамин В ₆ (мг)	300	300	300	300
Ниацин (мг)	3000	3000	3000	3000
Пантотеновая кислота (мг)	1800	1800	1800	1800
Фолиевая кислота (мг)	12	12	12	12
Биотин (мг)	3	3	3	3
Витамин В ₁₂ (мг)	2,4	2,4	2,4	2,4
Холин (мг)	–	40 000	–	40 000
Микроэлементы (мкг/кг)				
Cu (CuSO ₄)	500	500	20 000	20 000
I [Ca(IO ₃) ₂]	14	14	14	14
Fe (FeSO ₄)	10 000	10 000	10 000	10 000
Mn (MnO)	300	300	300	300
Se (NaSeO ₂)	25	25	25	25
Zn (ZnO)	8000	8000	225 000	225 000

¹ ВМ премиксы были разработаны для добавления в пищу поросят-отъемышей в количестве 1 % от их рациона. ² Источники витаминов: витамин А — ретинолацетат, витамин D₃ — холекальциферол, витамин Е — dl-α-токоферола ацетат, витамин К₃ — менадиона натрия бисульфит, витамин В₁ — тиамин мононитрат, витамин В₂ — рибофлавин, витамин В₆ — пиридоксина гидрохлорид, ниацин — никотиновая кислота, пантотеновая кислота — D-кальция пантотенат, витамин В₇ — биотин, витамин В₉ — фолиевая кислота, витамин В₁₂ — цианокобаламин и холин — холина хлорид.

2.3. Производство, отбор образцов и хранение премиксов

Премиксы были произведены на заводе по производству синтетических витаминных премиксов (Wellroad Animal Health Co. Ltd., Тайюань, Китай). Источниками витаминов в нашем исследовании были ретинилацетат, холекальциферол, *d*- α -токоферола ацетат, менадиона натрия бисульфит (МНБ), тиамин мононитрат, рибофлавин, пиридоксина гидрохлорид, никотиновая кислота, *d*-кальция пантотенат, биотин, фолиевая кислота, цианокобаламин и холина хлорид. По одинаковой методике были произведены шесть отдельных серий (7,2 кг на серию) каждого из двух витаминных премиксов (премикса, содержащего холин, и премикса, не содержащего холин). Каждая серия минеральных премиксов представляла собой идентичное вещество и была упакована в шесть толстых полиэтиленовых мешков массой 1,2 кг каждый, закрытых с помощью пластиковых стяжек. Также по одинаковой методике были произведены шесть отдельных серий (18 кг на серию) каждого из четырёх витаминно-минеральных премиксов (ВМ премикс 1 являлся нормальной формой выпуска касательно содержания витаминов и микроэлементов; ВМ премикс 2 содержал холина хлорид и *Cu* и *Zn* в низких концентрациях; ВМ премикс 3 содержал *Cu* и *Zn* в высоких концентрациях, но не содержал холина; ВМ премикс 4 содержал холина хлорид, а также *Cu* и *Zn* в высоких концентрациях). Каждая серия витаминно-минеральных премиксов представляла собой идентичное вещество и была упакована в шесть толстых полиэтиленовых мешков массой 3,0 кг каждый, закрытых с помощью пластиковых стяжек. Витаминные премиксы хранили в камере с контролируемой средой, установленной на температуру +25 °С и относительную влажность 60 %. ВМ премиксы хранили в складском помещении (+22 °С). Через 0, 1, 2, 3, 6 и 12 месяцев из камеры и складского помещения были отобраны средние образцы каждого витаминного и ВМ премикса. Образцы были немедленно отправлены для анализов на содержание витаминов в Центр оценки эффективности и безопасности кормов Министерства сельского хозяйства и по делам сельских регионов. Было определено удержание витаминов А, D₃, Е, К₃, В₁, В₂, В₆, а также ниацина и пантотеновой кислоты в витаминных и ВМ премиксах в процессе хранения. В настоящей статье стабильность витаминов указана как остаточная активность витаминов (% от начальной) в каждой точке отбора образцов.

2.4. Экстракция и количественное определение витаминов

В качестве стандартных образцов для количественного определения витаминов были использованы ретиниловые эфиры, холекальциферол, α -токоферола ацетат, менадион, тиамин, рибофлавин, пиридоксин, ниацин и пантотеновая кислота (Fluka, Sigma-Aldrich, Steinheim, Германия).

Содержание витаминов А (ВА) и Е (ВЕ) было определено методом Ассоциации химиков-аналитиков, состоящих на государственной службе (АОАС) [15]. Вкратце, образец (2 г) смешивали с раствором папаина до диспергирования, после чего помещали в водяную баню при температуре +37 °С \pm 2 °С и экстрагировали метанолом. Этот экстракт получали методом ВЭЖХ (Agilent 1200 Series; Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, США). Витамин D₃ (BD₃) был экстрагирован из образцов с использованием метода 992.26 (АОАС 2012). Вкратце, образец массой 5 г переносили в центрифужную пробирку, в которую добавляли безводный этанол, аскорбиновую кислоту и калия гидроксид. Пробирку помещали в водяную баню при температуре +75 °С. Анализ средних образцов проводили разделением с помощью ВЭЖХ с последующим УФ-детектированием при длине волны 254 нм. Содержание витамина К₃ (BK₃) в образце определяли экстракцией трихлорметаном. Экстракт фильтровали и вводили в систему ВЭЖХ; УФ-детектирование проводили при длине волны 251 нм [16]. Водорастворимые витамины (тиамин, рибофлавин, пиридоксин, ниацин и пантотеновую кислоту) экстрагировали из рациона с использованием методики, описанной Чен и соавт., с некоторыми изменениями [17]. Взвешивали 5 г образца, после чего экстрагировали его фосфатным буфером (фосфатно-солевой буферный раствор [ФСБР]), нагревали на водяной бане и обрабатывали ультразвуком. На протяжении времени, предшествующего анализу, надосадочную жидкость экстрагированных образцов хранили при температуре –20 °С. Эти экстрагированные образцы анализировали с использованием колонки Eclipse Plus C18 размером 250 \times 4,5 мм, 5 мкм (Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, США) на жидкостном хроматографе производства Agilent.

2.5. Статистический анализ

Нормальность данных была проверена с использованием процедуры UNIVARIATE SAS (SAS Institute, Cary, NC, США). Для проверки выбросов была применена процедура BOXPLOT, разработанная компанией SAS. При наличии выбросов их проверяли. Выбросы исключали, если они возникли не из-за ошибок измерения или ввода данных. Если причиной выброса были перечисленные выше ошибки, их устраняли. Данные были проанализированы с использованием процедуры MIXED, разработанной компанией SAS. Данные о хранении витаминных премиксов были проанализированы с помощью *t*-критерия для сравнения средних значений.

Данные для витаминных/витаминно-минеральных премиксов были проанализированы с использованием полностью рандомизированного дизайна с разбиением на подгруппы для факториального анализа по премиксам по схеме 2 \times 2. Основными эффектами были холина хлорид (0 против 40 000 мг/кг) и микроэлементы (низкий уровень *CuSO*₄ + *ZnO* против высокого уровня *CuSO*₄ + *ZnO*). Фиксированными эффектами были холина хлорид, микроэлементы (*CuSO*₄ и *ZnO*) и их взаимодействие. Для результатов без значительных взаимодействий обсуждаются только основные эффекты. Для оценки воздействия продолжительности хранения на удержание витаминов в составе премиксов был проведён дисперсионный анализ (ДА). Для расчёта средних значений по премиксам было использовано утверждение LSMEANS (средние значения, полученные методом наименьших квадратов); средние значения были разделены с помощью критерия Тьюки. Результаты считались достоверными при *p* < 0,05. Общий ход или тенденцию данных определяли с помощью программы Excel 2016 (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, DC, США); в свою очередь, с полученных данных были выведены уравнения прогноза, при этом использовались процедуры PROC REG и PROC NLIN, разработанные компанией SAS. Для определения наиболее подходящих уравнений были использованы коэффициент детерминации (*R*²) и среднеквадратичная ошибка прогноза (RMSEP).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Валидация метода извлечения витаминов и испытания стабильности в процессе хранения

Методы анализов для определения концентрации витаминов в образцах были валидированы на предмет повторяемости, межсуточной прецизионности, долгосрочной прецизионности, пределов количественного определения и линейности (данные не показаны) сотрудниками Центра оценки эффективности и безопасности кормов Министерства сельского хозяйства и сельских дел (Пекин, Китай). Начальные значения (табл. 3) находились в пределах 10 % от предварительно заданных целевых показателей, что согласуется с допустимыми аналитическими отклонениями и извлечением других витаминов, ранее описанными Американской ассоциацией работников государственных органов ветеринарно-санитарного контроля за качеством кормов (AAFCO) [18]. При разработке протокола эксперимента мы приняли во внимание рекомендуемый срок хранения витаминов и обозначили пять временных точек для испытаний стабильности витаминов. Такие временные рамки также подходили для сравнения с предыдущими исследованиями и для выведения уравнений прогноза с целью оценки сохранения витаминов в составе премиксов.

Таблица 3. Полученные по результатам анализов значения содержания витаминов в витаминных/витаминно-минеральных (ВМ) премиксах ¹

Вещество	Витаминный премикс 1	Витаминный премикс 2	ВМ премикс 1	ВМ премикс 2	ВМ премикс 3	ВМ премикс 4
Витамин ² (ед/кг)						
Витамин А (МЕ)	5 423 890,96	5 423 890,96	1 313 201,26	1 331 795,34	1 336 480,19	1 342 884,50
Витамин D ₃ (МЕ)	1 230 463,12	1 181 637,43	296 688,97	300 443,01	297 259,89	301 900,95
Витамин Е (МЕ)	11 884,10	12 087,20	2938,45	2931,97	2978,32	3018,27
Витамин К ₃ (мг)	1178,10	1183,14	305,85	295,95	298,61	302,94
Витамин В ₁ (мг)	1165,00	1186,21	298,79	297,99	298,03	297,10
Витамин В ₂ (мг)	2330,58	2348,85	596,55	589,76	590,07	606,20
Витамин В ₆ (мг)	1184,88	1162,39	312,83	291,20	299,53	301,60
Ниацин (мг)	11 986,84	12 037,98	3007,11	2959,04	2979,74	2936,19
Пантотеновая кислота (мг)	7166,46	7137,66	1840,95	1799,86	1836,04	1731,48

¹ Витаминные премиксы были разработаны для добавления в корм поросят-отъемышей в количестве 0,25 % от их рациона; ВМ премиксы были разработаны для добавления в корм поросят-отъемышей в количестве 1 % от их рациона. ² Значения представляют собой средние шести повторных образцов, каждый из которых был проанализирован в двух повторностях (для анализа ВА и ВЕ был использован метод 2012.10; для анализа ВD₃ — АОАС 2012, метод 992.26; для анализа ВК₃ — АОАС 2012, GB/T 18872-2017; Национальный стандарт 2017, метод анализа водорастворимых витаминов; Чэн и соавт. 2009, Центр оценки эффективности и безопасности кормов Министерства сельского хозяйства и сельских дел (Пекин, Китай).

3.2. Воздействие продолжительности хранения на стабильность витаминов в составе витаминных и ВМ премиксов

Не наблюдалось значительного влияния продолжительности хранения на активность ВА, ВD₃, ВЕ, ВВ₆, ниацина и пантотеновой кислоты в витаминных премиксах, не содержащих холина хлорид, или на активность ВD₃, ВЕ, ниацина и пантотеновой кислоты в витаминных премиксах с холина хлоридом (табл. 4–9). Однако продолжительность хранения была значимым фактором, влиявшим на удержание активности ВА в составе витаминных премиксов, содержащих холина хлорид, активность ВК₃ в двух формах выпуска витаминных премиксов (табл. 4 и 10) и активность ВВ₁ и ВВ₂ в составе витаминных премиксов с холина хлоридом или без него, а также в четырех испытанных ВМ премиксах (табл. 11 и 12).

Таблица 4. Удержание (%) активности витамина А в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов в различные периоды хранения¹

Вещество	Холин	Cu и Zn	Продолжительность хранения					Стандартная ошибка среднего (SEM)	p-значение для продолжительности хранения
			1	2	3	6	12		
Витаминный премикс 1	–	–	99,61	98,98	99,30	98,96	97,75	1,04	0,767
Витаминный премикс 2	+	–	99,77 ^a	99,72 ^a	99,10 ^a	97,47 ^a	90,19 ^b	1,22	< 0,01
		Стандартная	0,87	1,22	1,36	1,14	1,02		
		p-значение для холина	0,900	0,677	0,918	0,376	< 0,01		
ВМ премикс 1	–	Низкий	99,21 ^a	95,11 ^{A, B, b}	93,39 ^{A, b}	90,52 ^{A, c}	86,96 ^{A, d}	0,54	< 0,01
ВМ премикс 2	+	Низкий	99,41 ^a	96,02 ^{A, b}	90,44 ^{B, c}	85,80 ^{B, d}	83,38 ^{B, e}	0,53	< 0,01
ВМ премикс 3	–	Высокий	99,72 ^a	93,57 ^{B, c, b}	89,27 ^{C, c}	83,25 ^{C, d}	77,02 ^{C, e}	0,46	< 0,01
ВМ премикс 4	+	Высокий	99,30 ^a	92,51 ^{C, b}	85,74 ^{D, c}	80,21 ^{D, d}	74,42 ^{D, e}	0,66	< 0,01
		Стандартная	0,18	0,51	0,56	0,51	0,63		
		Основные эффекты							
		Холин							
		–	99,46	94,34	91,33	86,89	81,99		
		+	99,35	94,26	88,09	83,00	78,90		
		Cu и Zn							
		Низкий	99,51	95,56	91,91	88,16	85,17		
		Высокий	99,31	93,04	87,51	81,73	75,72		
		p-значение							
		Холин	0,544	0,884	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
		Cu и Zn	0,271	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
		Холин + Cu и Zn	0,099	0,067	0,606	0,115	0,446		

¹ Витаминный премикс 1 не содержал холина хлорида, тогда как витаминный премикс 2 содержал 160 000 мг/кг холина хлорида. ВМ премикс 1 содержал 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO, тогда как ВМ премикс 2 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 3 содержал 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 4 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ^{A, B, C, D} Средние значения в столбце с различными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$). ^{a, b, c, d, e} Значения в строке с разными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$).

Таблица 5. Удержание (%) активности витамина D₃ в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов в различные периоды хранения¹

Вещество	Холин	Cu и Zn	Продолжительность хранения					Стандартная ошибка среднего (SEM)	p-значение для продолжительности хранения
			1	2	3	6	12		
Витаминный премикс 1	–	–	96,67	94,65	91,20	91,30	93,14	1,50	0,077
Витаминный премикс 2	+	–	97,80	96,31	93,55	95,57	94,45	1,25	0,150
		Стандартная ошибка	1,20	1,32	1,19	2,00	0,95		
		p-значение для холина	0,518	0,393	0,192	0,164	0,353		
ВМ премикс 1	–	Низкий	98,83 ^a	97,33 ^a	95,39 ^a	91,60 ^b	86,04 ^c	0,86	< 0,01
ВМ премикс 2	+	Низкий	99,15 ^a	97,50 ^a	96,43 ^a	92,73 ^b	85,24 ^c	0,83	< 0,01
ВМ премикс 3	–	Высокий	98,79 ^a	97,33 ^a	95,17 ^{a, b}	91,53 ^b	84,49 ^c	1,08	< 0,01
ВМ премикс 4	+	Высокий	98,83 ^a	95,76 ^a	96,14 ^a	89,83 ^b	84,87 ^c	1,04	< 0,01
		Стандартная ошибка	0,47	1,21	1,15	1,03	0,70		
		Основные эффекты							
	Холин	–	98,81	97,33	95,28	91,57	85,27		
		+	98,99	96,30	96,29	91,28	85,06		
	Cu и Zn	Низкий	98,98	97,41	95,91	92,16	85,64		
		Высокий	98,81	96,23	95,66	90,68	84,68		
		p-значение							
	Холин		0,713	0,410	0,394	0,784	0,768		
	Cu и Zn		0,710	0,339	0,826	0,166	0,191		
	Холин + Cu и Zn		0,762	0,338	0,974	0,186	0,412		

¹ Витаминный премикс 1 не содержал холина хлорида, тогда как витаминный премикс 2 содержал 160 000 мг/кг холина хлорида. ВМ премикс 1 содержал 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO, тогда как ВМ премикс 2 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 3 содержал 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 4 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ^{a, b, c} Средние значения в столбце с различными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$).

Таблица 6. Удержание (%) активности витамина Е в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов в различные периоды хранения¹

Вещество	Холин	Cu и Zn	Продолжительность хранения					Стандартная ошибка среднего (SEM)	p-значение для продолжительности хранения
			1	2	3	6	12		
Витаминный премикс 1	–	–	99,01	97,57	96,98	95,49	95,96	1,76	0,685
Витаминный премикс 2	+	–	97,38	97,24	96,77	99,48	95,70	1,08	0,185
		Стандартная ошибка	0,87	1,17	0,55	2,68	1,06		
		p-значение для холина	0,197	0,851	0,797	0,318	0,870		
ВМ премикс 1	–	Низкий	98,70 ^a	97,04 ^{a, b}	96,94 ^{a, b}	97,74 ^{a, b}	93,93 ^b	0,97	< 0,01
ВМ премикс 2	+	Низкий	99,61 ^a	96,57 ^{a, b}	96,70 ^{a, b}	97,44 ^{a, b}	93,32 ^b	1,25	0,028
ВМ премикс 3	–	Высокий	99,18 ^a	96,99 ^{a, b}	96,60 ^{a, b}	96,52 ^{a, b}	94,08 ^b	0,76	< 0,01
ВМ премикс 4	+	Высокий	99,29 ^a	98,20 ^{a, b}	96,38 ^{b, c}	97,55 ^{a, b}	93,82 ^c	0,63	< 0,01
		Стандартная ошибка	0,32	0,65	1,02	1,63	0,57		
Основные эффекты									
	Холин	–	98,94	97,01	96,29	97,13	94,00		
		+	99,45	97,38	96,54	97,50	93,57		
	Cu и Zn	Низкий	99,16	96,80	96,34	97,59	93,63		
		Высокий	99,23	97,59	96,49	97,03	93,95		
		p-значение							
	Холин		0,130	0,582	0,748	0,835	0,455		
	Cu и Zn		0,822	0,241	0,851	0,750	0,577		
	Холин + Cu и Zn		0,229	0,214	0,556	0,705	0,760		

¹ Витаминный премикс 1 не содержал холина хлорида, тогда как витаминный премикс 2 содержал 160 000 мг/кг холина хлорида. ВМ премикс 1 содержал 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO, тогда как ВМ премикс 2 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 3 содержал 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 4 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ^{a, b, c} Средние значения в столбце с различными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$).

Таблица 7. Удержание (%) активности витамина В₆ в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов в различные периоды хранения¹

Вещество	Холин	Cu и Zn	Продолжительность хранения					Стандартная ошибка среднего (SEM)	p-значение для продолжительности хранения
			1	2	3	6	12		
Витаминный премикс 1	–	–	98,66	97,82	96,79	95,78	95,33	1,17	0,221
Витаминный премикс 2	+	–	97,26 ^a	96,73 ^a	95,40 ^a	97,30 ^a	92,17 ^b	0,69	< 0,01
		Стандартная ошибка	0,88	0,56	0,86	0,99	1,53		
		p-значение для холина	0,288	0,176	0,057	0,304	0,018		
ВМ премикс 1	–	Низкий	99,01 ^a	98,00 ^{a, b}	97,13 ^{a, b}	93,68 ^{b, c}	90,86 ^c	1,18	< 0,01
ВМ премикс 2	+	Низкий	98,96 ^a	97,21 ^{a, b}	97,77 ^a	94,96 ^a	90,26 ^b	1,06	< 0,01
ВМ премикс 3	–	Высокий	98,86 ^a	98,36 ^a	96,79 ^{a, b}	93,69 ^{a, b}	91,01 ^b	1,47	< 0,01
ВМ премикс 4	+	Высокий	98,84 ^a	98,24 ^a	97,82 ^{a, b}	93,31 ^{b, c}	91,38 ^c	1,15	< 0,01
		Стандартная ошибка	0,36	1,67	1,80	1,08	0,43		
		Основные эффекты							
	Холин	–	98,93	98,18	96,96	93,68	90,94		
		+	98,90	97,72	97,79	94,14	90,82		
	Cu и Zn	Низкий	98,98	97,60	97,45	94,32	90,56		
		Высокий	98,85	98,30	97,31	93,50	91,19		
		p-значение							
	Холин		0,928	0,787	0,649	0,679	0,789		
	Cu и Zn		0,714	0,682	0,938	0,458	0,157		
	Холин + Cu и Zn		0,971	0,844	0,916	0,451	0,273		

¹ Витаминный премикс 1 не содержал холина хлорида, тогда как витаминный премикс 2 содержал 160 000 мг/кг холина хлорида. ВМ премикс 1 содержал 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO, тогда как ВМ премикс 2 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 3 содержал 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 4 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ^{a, b, c} Средние значения в столбце с различными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$).

Таблица 8. Удержание (%) активности ниацина в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов в различные периоды хранения¹

Вещество	Холин	Cu и Zn	Продолжительность хранения					Стандартная ошибка среднего (SEM)	p-значение для продолжительности хранения
			1	2	3	6	12		
Витаминный премикс 1	–	–	99,67	97,89	99,76	98,90	98,54	0,56	0,130
Витаминный премикс 2	+	–	98,60	99,35	98,87	98,54	98,43	0,90	0,954
		Стандартная ошибка	1,18	0,89	0,37	0,66	0,34		
		p-значение для холина	0,557	0,501	0,843	0,149	0,472		
ВМ премикс 1	–	Низкий	99,58 ^a	97,46 ^{a, b}	97,05 ^{a, b}	95,43 ^{b, c}	93,66 ^c	0,69	< 0,01
ВМ премикс 2	+	Низкий	99,08 ^a	98,14 ^a	97,91 ^a	95,28 ^b	93,28 ^b	0,89	< 0,01
ВМ премикс 3	–	Высокий	99,38 ^a	97,33 ^a	97,78 ^a	94,89 ^b	93,94 ^b	0,55	< 0,01
ВМ премикс 4	+	Высокий	98,36 ^a	97,37 ^{a, b}	96,77 ^{a, b, c}	94,53 ^{b, c}	93,32 ^c	0,93	< 0,01
		Стандартная ошибка	0,38	1,07	0,94	1,39	0,49		
		Основные эффекты							
	Холин	–	99,48	97,39	97,41	95,16	93,80		
		+	98,72	97,76	97,34	94,91	93,30		
	Cu и Zn	Низкий	99,33	97,80	97,48	95,36	93,47		
		Высокий	98,87	97,35	97,27	94,71	93,63		
		p-значение							
	Холин		0,059	0,737	0,940	0,859	0,314		
	Cu и Zn		0,239	0,679	0,827	0,648	0,745		
	Холин + Cu и Zn		0,492	0,767	0,331	0,943	0,807		

¹ Витаминный премикс 1 не содержал холина хлорида, тогда как витаминный премикс 2 содержал 160 000 мг/кг холина хлорида. ВМ премикс 1 содержал 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO, тогда как ВМ премикс 2 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 3 содержал 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 4 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ^{a, b, c} Средние значения в столбце с различными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$).

Таблица 9. Удержание (%) активности пантотеновой кислоты в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов в различные периоды хранения¹

Вещество	Холин	Cu и Zn	Продолжительность хранения					Стандартная ошибка среднего (SEM)	p-значение для продолжительности хранения
			1	2	3	6	12		
Витаминный премикс 1	–	–	99,25	96,30	96,05	96,60	96,97	0,83	0,054
Витаминный премикс 2	+	–	98,10	95,22	95,17	95,14	96,54	1,68	0,671
		Стандартная ошибка	0,44	0,90	1,09	1,36	1,90		
		p-значение для холина	0,079	0,413	0,481	0,135	0,877		
ВМ премикс 1	–	Низкий	99,58 ^a	98,22 ^a	96,84 ^{a, b}	95,62 ^{a, b}	93,79 ^b	1,03	< 0,01
ВМ премикс 2	+	Низкий	99,41 ^a	98,32 ^a	96,38 ^{a, b}	97,69 ^{a, b}	93,63 ^b	1,10	0,013
ВМ премикс 3	–	Высокий	99,72 ^a	98,68 ^a	96,48 ^{a, b}	96,02 ^{a, b}	93,17 ^b	1,12	< 0,01
ВМ премикс 4	+	Высокий	99,72 ^a	98,38 ^{a, b}	96,57 ^{a, b}	96,71 ^{a, b}	93,83 ^b	0,99	0,029
		Стандартная ошибка	0,91	0,78	1,54	1,11	0,83		
		Основные эффекты							
	Холин	–	99,65	98,45	96,66	95,81	93,48		
		+	99,06	98,36	96,48	97,20	93,73		
	Cu и Zn	Низкий	99,49	98,28	96,61	96,65	93,71		
		Высокий	99,22	98,54	96,53	96,36	93,50		
		p-значение							
	Холин		0,528	0,902	0,907	0,270	0,768		
	Cu и Zn		0,766	0,744	0,955	0,815	0,806		
	Холин + Cu и Zn		0,654	0,807	0,860	0,576	0,627		

¹ Витаминный премикс 1 не содержал холина хлорида, тогда как витаминный премикс 2 содержал 160 000 мг/кг холина хлорида. ВМ премикс 1 содержал 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO, тогда как ВМ премикс 2 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 3 содержал 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 4 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ^{a, b} Средние значения в столбце с различными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$).

Таблица 10. Удержание (%) активности витамина К₃ в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов в различные периоды хранения¹

Вещество	Холин	Cu и Zn	Продолжительность хранения					Стандартная ошибка среднего (SEM)	p-значение для продолжительности хранения
			1	2	3	6	12		
Витаминный премикс 1	–	–	97,43 ^a	94,32 ^a	85,76 ^b	79,09 ^c	64,62 ^d	1,60	< 0,01
Витаминный премикс 2	+	–	96,68 ^a	94,05 ^a	85,03 ^b	74,61 ^c	60,06 ^d	1,78	< 0,01
		Стандартная ошибка	0,78	0,77	1,17	1,85	2,89		
		p-значение для холина	0,513	0,807	0,669	0,119	0,291		
ВМ премикс 1	–	Низкий	98,32 ^a	93,26 ^b	92,51 ^b	70,80 ^c	53,39 ^d	0,62	< 0,01
ВМ премикс 2	+	Низкий	96,96 ^a	93,14 ^b	91,25 ^b	70,61 ^c	52,29 ^d	0,75	< 0,01
ВМ премикс 3	–	Высокий	98,27 ^a	93,35 ^b	92,37 ^b	69,95 ^c	53,35 ^d	0,73	< 0,01
ВМ премикс 4	+	Высокий	98,87 ^a	92,95 ^b	92,60 ^b	71,34 ^c	52,79 ^d	0,79	< 0,01
		Стандартная ошибка	0,74	0,55	0,79	0,80	0,71		
		Основные эффекты							
	Холин	–	98,30	93,31	92,44	70,38	53,37		
		+	97,91	93,04	91,92	70,97	52,54		
	Cu и Zn	Низкий	97,64	93,20	91,88	70,71	52,84		
		Высокий	98,57	93,15	92,48	70,64	53,07		
		p-значение							
	Холин		0,610	0,639	0,517	0,463	0,257		
	Cu и Zn		0,221	0,931	0,452	0,936	0,753		
	Холин + Cu и Zn		0,199	0,807	0,358	0,335	0,708		

¹ Витаминный премикс 1 не содержал холина хлорида, тогда как витаминный премикс 2 содержал 160 000 мг/кг холина хлорида. ВМ премикс 1 содержал 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO, тогда как ВМ премикс 2 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 3 содержал 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 4 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ^{a, b, c} Средние значения в столбце с различными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$).

Таблица 11. Удержание (%) активности витамина В₁ в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов в различные периоды хранения¹

Вещество	Холин	Cu и Zn	Продолжительность хранения					Стандартная ошибка среднего (SEM)	p-значение для продолжительности хранения
			1	2	3	6	12		
Витаминный премикс 1	–	–	97,82 ^a	98,34 ^a	97,02 ^a	94,07 ^{a, b}	91,18 ^b	1,11	< 0,01
Витаминный премикс 2	+	–	98,28 ^a	99,02 ^a	98,30 ^a	97,07 ^a	91,90 ^b	0,97	< 0,01
		Стандартная ошибка	0,62	0,80	0,68	1,80	0,84		
		p-значение для холина	0,612	0,549	0,211	0,269	0,560		
ВМ премикс 1	–	Низкий	98,49 ^a	96,62 ^{A, a}	91,53 ^{A, b}	91,74 ^{A, b}	88,55 ^{A, c}	0,66	< 0,01
ВМ премикс 2	+	Низкий	99,46 ^a	85,57 ^{B, b}	83,45 ^{B, b}	76,14 ^{B, c}	70,98 ^{B, d}	1,02	< 0,01
ВМ премикс 3	–	Высокий	99,07 ^a	81,07 ^{C, b}	63,30 ^{C, c}	49,63 ^{C, d}	34,80 ^{C, e}	0,79	< 0,01
ВМ премикс 4	+	Высокий	99,24 ^a	79,91 ^{C, b}	60,20 ^{C, c}	46,80 ^{D, d}	34,11 ^{C, e}	0,86	< 0,01
		Стандартная ошибка	0,39	0,48	1,19	0,59	1,18		
	Основные эффекты								
	Холин	–	98,78	88,84	77,41	70,68	61,67		
		+	99,35	82,74	71,82	61,47	52,55		
	Cu и Zn	Низкий	98,98	91,09	87,49	83,94	79,77		
		Высокий	99,15	80,49	61,75	48,21	34,45		
	p-значение								
	Холин		0,164	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
	Cu и Zn		0,661	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
	Холин + Cu и Zn		0,327	< 0,01	0,05	< 0,01	< 0,01		

¹ Витаминный премикс 1 не содержал холина хлорида, тогда как витаминный премикс 2 содержал 160 000 мг/кг холина хлорида. ВМ премикс 1 содержал 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO, тогда как ВМ премикс 2 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 3 содержал 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 4 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ^{A, B, C, D} Средние значения в столбце с различными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$). ^{a, b, c, d, e} Значения в строке с разными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$).

Таблица 12. Удержание (%) активности витамина В₂ в составе витаминных и витаминно-минеральных (ВМ) премиксов в различные периоды хранения¹

Вещество	Холин	Cu и Zn	Продолжительность хранения					Стандартная ошибка среднего (SEM)	p-значение для продолжитель- ности хранения
			1	2	3	6	12		
Витаминный премикс 1	–	–	99,05 ^a	96,29 ^{a, b}	95,08 ^{a, b}	95,16 ^{a, b}	91,40 ^b	1,27	< 0,01
Витаминный премикс 2	+	–	98,69 ^a	94,76 ^{a, b}	93,89 ^{a, b}	93,52 ^b	94,52 ^b	0,96	0,012
		Стандартная	0,55	0,78	1,11	1,54	1,33		
		p-значение для холина	0,635	0,195	0,464	0,470	0,128		
ВМ премикс 1	–	Низкий	99,41 ^a	97,95 ^{a, b}	96,08 ^{a, b}	94,22 ^{a, b}	92,14 ^b	1,43	0,011
ВМ премикс 2	+	Низкий	98,67 ^a	98,09 ^{a, b}	96,42 ^{a, b}	98,22 ^a	94,05 ^b	1,12	0,02
ВМ премикс 3	–	Высокий	98,51 ^a	98,71 ^a	96,01 ^{a, b}	94,27 ^b	92,82 ^b	0,97	< 0,01
ВМ премикс 4	+	Высокий	99,04 ^a	98,48 ^a	96,03 ^{a, b}	94,78 ^b	92,86 ^b	0,89	< 0,01
		Стандартная	0,55	0,50	0,35	2,26	0,70		
		Основные эффекты							
	Холин	–	98,96	98,33	96,04	94,24	92,48		
			98,86	98,29	96,22	96,50	93,45		
	Cu и Zn	Низкий	99,04	98,02	96,25	96,22	93,10		
		Высокий	98,78	98,60	96,02	94,52	92,84		
		p-значение							
		Холин	0,857	0,938	0,614	0,330	0,181		
		Cu и Zn	0,639	0,265	0,511	0,463	0,716		
		Холин + Cu и Zn	0,264	0,713	0,651	0,450	0,199		

¹ Витаминный премикс 1 не содержал холина хлорида, тогда как витаминный премикс 2 содержал 160 000 мг/кг холина хлорида. ВМ премикс 1 содержал 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO, тогда как ВМ премикс 2 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 500 мг/кг CuSO₄ и 8000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 3 содержал 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ВМ премикс 4 содержал 40 000 мг/кг холина хлорида, 20 000 мг/кг CuSO₄ и 225 000 мг/кг ZnO. ^{a, b} Средние значения в столбце с различными надстрочными индексами различаются со статистической значимостью ($p < 0,05$).

Исследователи Чжуге и Клопфенштейн провели эксперименты по хранению витаминов при комнатной температуре, по результатам которого после одного месяца хранения разложению подвергались 56–57 % ВА, а после 27 недель хранения разложению подвергались 50–54 % ВВ₂ [19]; по сравнению с результатами нашего исследования это показатели большого уменьшения содержания витаминов. Отмеченное в предыдущем исследовании существенное уменьшение содержания витаминов можно легко объяснить усовершенствованием производственных процессов сегодня по сравнению с тремя десятилетиями назад, когда были проведены эксперименты. В эксперименте Чжуге и Клопфенштейна [19] в качестве источников витаминов были использованы покрытые желатином ВА и ВВ₂ (содержащие 50 % рибофлавина). Желатин как материал оболочки недостаточно защищал ВА, в то время как несущие среды ВВ₂ (чистота 50 %) были важным фактором его стабильности. В нашем исследовании после одного года хранения удержание ниацина в составе премиксов составляло более 90 % (табл. 8), что согласуется с данными Чжуге и Клопфенштейна [19], в исследовании которых этот показатель составил 91–96 %. Это неудивительно для нас, потому что ниацин, как сообщается, является наиболее стабильным из витаминов группы В при добавлении в корм или премиксы [20] благодаря стабильной молекулярной структуре, снижающей его окисление в процессе хранения. Хугэберт [21] определил стабильность различных форм выпуска витамина К в составе поливитаминов в процессе хранения. Через четыре месяца МНБ сохранил 33 % своей первоначальной активности. В нашем исследовании удержание ВК₃ в витаминном премиксе было выше, чем у Хугэберта [21], но это согласуется с нашим выводом о нестабильности продуктов ВК₃ в процессе хранения. ВК₃ (менадион) — синтетическое хиноновое производное нафталина, являющееся нестабильным. Согласно данным компании BASF (BASF 1994, цитата по Уайтхеду), при увеличении продолжительности хранения концентрация витаминов в составе ВМ премиксов уменьшается. По данным BASF, удержание ВА, ВD₃, ВЕ, ВК₃, ВВ₁, ВВ₂, ВВ₆, ниацина и пантотеновой кислоты в составе премиксов после одного месяца хранения составило соответственно 85, 91, 95, 64, 70, 95, 92, 95 и 95 % [22], а после шести месяцев хранения — соответственно 58, 65, 82, 0, 27, 56, 56, 58 и 58 % [22]. Напротив, в нашем исследовании мы наблюдали, что ВD₃, ВЕ, ВВ₂, ВВ₆, ниацин и пантотеновая кислота были относительно стабильными, а уменьшение содержания ВА, ВК₃ и ВВ₁ не превышало 50 %. Такое расхождение между результатами легко понять, если учесть, что витамины в нашем исследовании были микрокапсулированы, что улучшает их стабильность в процессе хранения. Микрокапсулирование — это процесс, при котором молекулы покрываются сплошной плёнкой из полимерного материала [10]. С помощью микрокапсулирования можно стабилизировать вещества, чувствительные к воздействию кислорода, влаги или света; эксперименты, проведенные в последнее время, показали, что при микрокапсулировании повышается стабильность витаминов в стресс-условиях. В одном исследовании удержание ВВ₁ в нормальном премиксе составило 83–87 % через шесть месяцев хранения при температуре +20 °С [23], что сходно с полученными нами результатами. В исследовании Шарсон и соавт. активность витаминов в витаминных и ВМ премиксах снижалась при увеличении продолжительности хранения. Они отметили, что удержание ВА, ВD₃, ВЕ, ВК₃, ВВ₁, ВВ₂, ВВ₆ и ниацина в составе витаминных премиксов составило соответственно 86, 87,92, 93,56, 75,96, 89,44, 86,68, 76,52 и 84,24 %. В том же исследовании было установлено, что удержание ВА, ВD₃, ВЕ, ВК₃, ВВ₁, ВВ₂, ВВ₆ и ниацина в ВМ премиксах равнялось соответственно 64,12, 82,08, 95,52, 95,36, 68,4, 89,04, 65,44 и 87,04 % [25]. При сравнении удержания витаминов в исследовании Шарсон и соавт. с указанным в техническом бюллетене BASF (BASF 1994, цитата по Уайтхеду), видно, что в период с 1994 по 2011 год стабильность витаминов повысилась. В исследовании Шарсон и соавт. стабильность ВD₃, ВЕ, ВВ₂, ниацина и пантотеновой кислоты была выше, чем у других витаминов, что согласуется с нашим наблюдением [25].

Муни и Олдрич провели исследование срока годности витаминных премиксов при нормальных условиях хранения (+20 °С и относительная влажность 50 %) [26]. Они пришли к выводу, что продолжительность хранения влияет на содержание витаминов, поскольку после шести месяцев хранения в условиях окружающей среды удержание ВА и ВВ₁ в составе витаминного премикса составило соответственно 76 и 40 %. Считается, что хранение витаминов в течение длительного времени оказывает отрицательное воздействие на активность витаминов в витаминных или ВМ премиксах. Однако результаты нашего исследования показывают, что продолжительность хранения незначительно повлияла на стабильность витаминных премиксов. Микрокапсулирование защищает витамины, находящиеся в сердцевине премикса, от реакций с окружающей средой, тем самым увеличивая срок его хранения. В составе ВМ премиксов ВЕ, ниацин, пантотеновая кислота и ВВ₂ были более стабильными, чем другие витамины (табл. 6, 8, 9 и 12). Эти результаты подтверждают вывод Коэлье о том, что широко представленные на рынке формы выпуска ВЕ, ВВ₂, ниацина и пантотеновой кислоты устойчивы к воздействию повышенной температуры и воздуха [27]. Кроме того, микрокапсулирование ограничено в большей степени охватом ВЕ, ВВ₂, ниацина и пантотеновой кислоты для улучшения характеристик продукта и увеличения срока его хранения.

3.3. Воздействие холина хлорида на стабильность витаминов

В нашем исследовании холина хлорид не оказывал существенного воздействия на удержание VD_3 , VE , ниацина, пантотеновой кислоты, VK_3 , VB_1 и VB_2 в составе витаминных премиксов (табл. 5, 6, 8 и 10–12). В течение первых шести месяцев исследования концентрации VA и VB_6 в витаминных премиксах, содержащих холина хлорид и без него, значительно не различались (табл. 4 и 7). После одного года хранения стало очевидно, что VA и VB_6 более стабильны в составе витаминного премикса без холина хлорида, чем в образце, содержащем холина хлорид ($p < 0,05$). Касательно VM премиксов не наблюдалось отрицательного воздействия холина хлорида на удержание VD_3 , VE , VB_6 , ниацина, пантотеновой кислоты, VK_3 и VB_2 после 12 месяцев хранения (табл. 5–10 и 12). При добавлении в VM премиксы холина хлорида концентрация VA значительно уменьшилась через 3, 6 и 12 месяцев хранения (табл. 4). Через два месяца хранения концентрации VB_1 в VM премиксах, не содержащих холина хлорид, были ниже, чем в начале исследования ($p < 0,05$) (табл. 11). По мере увеличения продолжительности хранения до 3, 6 и 12 месяцев содержание VB_1 в VM премиксах (премиксе, содержащем витамины, холина хлорид, а также Cu и Zn в высоких концентрациях) постепенно уменьшалось (табл. 11).

Сообщается, что холина хлорид значительно влияет на активность витаминов. Холин считается стрессовым фактором, влияющим на витамины, легко растворимые в воде, поскольку он гигроскопичен и может притягивать влагу к витаминным или VM премиксам. Концентрация холина хлорида в корме обычно выше, чем уровень микроэлементов, и при добавлении холина к витаминным премиксам или VM премиксам можно ожидать проблем, связанных как с их физическими, так и с химическими свойствами [27]. В техническом бюллетене BASF, составителем которого является Коэльо (2002), указано, что стабильность витаминов в составе премикса зависит от присутствия холина хлорида. После шести месяцев хранения извлечение VA , VD_3 , VE , VK_3 , VB_1 , VB_2 , VB_6 , ниацина и пантотеновой кислоты в витаминном премиксе, не содержащем холина хлорид, составило соответственно 95, 96, 98, 99, 99, 99, 99, 99 и 99 % [9], а в премиксе с холина хлоридом — соответственно 90, 93, 98, 68, 73, 85, 83, 85 и 86 % [9]. Кроме того, отрицательное воздействие холина хлорида на витамины в VM премиксе были более значительными. После шести месяцев хранения извлечение VA , VD_3 , VE , VK_3 , VB_1 , VB_2 , VB_6 , ниацина и пантотеновой кислоты в VM премиксе, не содержащем холина хлорид, составило соответственно 80, 84, 84, 70, 80, 83, 81, 83 и 88 % [9]. Однако в VM премиксе с холина хлоридом извлечение этих витаминов через шесть месяцев составило соответственно 70, 73, 77, 50, 48, 71, 68, 70 и 67 % [9]. В нашем исследовании удержание VA , VD_3 , VE , VB_1 , VB_2 , VB_6 , ниацина и пантотеновой кислоты в витаминном премиксе, не содержащем холина хлорид, было сходным с результатами Коэльо, но удержание водорастворимых витаминов (VB_1 , VB_2 , VB_6 , ниацин и пантотеновая кислота) в витаминных премиксах с холина хлоридом было выше, чем результаты, полученные Коэльо. Независимо от того, содержали ли VM премиксы холина хлорид, удержание исследуемых витаминов было выше, чем указано Коэльо. Причина может заключаться в том, что представленные на рынке витамины высокостабильны. Водорастворимые витамины легко разрушаются в премиксах, содержащих холина хлорид. Однако полимерный материал, используемый для микрокапсулирования витаминов, устойчив к влаге, что снижает реакционную способность и взаимодействие витаминов с окружающей средой и повышает их стабильность в процессе хранения. На самом деле микрокапсулирование не является новой технологией. Микрокапсулы определяются как маленькие твердые, жидкие или газовые частицы, покрытые или заключённые в непрерывную плёнку из полимерного материала [10, 28]. В нашем исследовании микрокапсулированные витамины стабильны, поскольку материалы оболочки эффективно защищают материал сердцевинки от окружающей среды.

По химической структуре VA , использованный в этом исследовании — это представленный в продаже ретиноловый эфир. Путём этерификации ретинола уксусной кислотой получают ретинолацетат; хотя он имеет защищенную гидроксигруппу, у него всё ещё есть пять двойных связей, подверженных окислению. Кроме того, холина хлорид поглощает или выделяет свободную воду, которая смягчает оболочку VA и обеспечивает доступ к кислороду и другим соединениям, тем самым разрушая VA за счёт усиления химических реакций. В нашем исследовании после 12 месяцев хранения VA был заметно более стабильным в составе витаминных премиксов, не содержащих холина хлорид, чем в витаминных премиксах с холина хлоридом, что согласуется с предыдущим исследованием [29]. Однако результаты наших экспериментов показывают, что удержание активности витаминов составило примерно 90 %.

Через год в витаминных премиксах с холина хлоридом или без него это удержание выше, чем результат, полученный в исследовании Тавчар-Кальхер и Венгушт, в котором содержание VA в премиксах с холином и без него уменьшилось на соответственно 61 и 47 % [29]. Причина высокого удержания VA в нашем исследовании может быть связана с тем, что микрокапсулирование VA улучшило его стабильность, что было подтверждено в исследовании Гонсалвес и соавт. [10].

Менадион (VK_3) нестабилен. На заводах по производству премиксов в чистом виде его не используют — вместо этого применяют натрия бисульфит и его производные. Наиболее распространённым соединением менадиона, применяемым в промышленности, является менадиона натрия бисульфит (МНБ), водорастворимая соль. Витамин K_3 высокочувствителен к влаге и микроэлементам, а холин хлорид особенно разрушителен для VK_3 [9]. Хлорид холина увеличивает выщелачивание VK_3 в составе премиксов и продлевает окислительно-восстановительные реакции. В предыдущем исследовании стабильность добавок VK_3 в премиксы и рацион животных ухудшалась из-за влажности, а также присутствия в составе премиксов холина хлорида и

микроэлементов. Витамин К₃ потерял почти 80 % своей биоактивности при хранении в течение трёх месяцев в составе ВМ премикса, содержащего холин, но уменьшение содержания было намного меньшим, когда этот витамин входил в состав подобного премикса без холина [30]. Хугэберт изучил стабильность ВК₃ в составе витаминных премиксов, содержащих холина хлорид и микроэлементы, при комнатной температуре. Через четыре месяца хранения содержание ВК₃ уменьшилось на более чем 70 % [21]. По данным о стабильности, опубликованным компанией BASF (1994, цитата по Уайтхеду), через один месяц хранения удержание ВК₃ в премиксах, содержащих холина хлорид и микроэлементы, равнялось 64 %, а через шесть месяцев хранения — 0 % [22]. В исследовании Тавчар-Кальхер и Венгушт [29] ВК₃ был более стабильным в составе витаминных премиксов, не содержащих холина хлорида, чем в витаминных премиксах с холина хлоридом; потеря ВК₃ составила почти 100 % в витаминных премиксах, содержащих холин, после 12 месяцев хранения. Исторически холин был важным стрессовым фактором для хранения ВК₃. Мы заметили, что стабильность ВК₃ была низкой во всех тестируемых витаминных и ВМ премиксах, а холин и высокие уровни Cu и Zn не влияли на сохранность ВК₃ ($p > 0,05$) (табл. 10). Причина того, что на ВК₃ не влияет холин, может заключаться в том, что наличие оболочки снижает возможность химической реакции между ВК₃ и холином, но состав витаминных премиксов, источник ВК₃ и процесс микрокапсулирования также могли способствовать уменьшению содержания ВК₃ в нашем исследовании. Как упоминалось выше, микрокапсулированный ВК₃ относительно стабилен в премиксах, содержащих большое количество холина хлорида, но следует учитывать и обращать внимание на продолжительность хранения, если витаминные или ВМ премиксы хранятся в течение длительного периода.

Тиамин (ВВ₁) — незаменимый витамин для животных. В исследовании Фриас и соавт. ВВ₁ был стабилен в кислых условиях, но быстро разлагался при pH выше 7,0 даже при комнатной температуре [31]. Двумя основными дополнительными формами тиамина, добавляемыми в корм, являются тиамин гидрохлорид и тиамин мононитрат. В кормах чаще используется тиамин мононитрат из-за его более высокой стабильности по сравнению с тиамин гидрохлоридом [9]. Структура тиамина помогает объяснить его нестабильность в процессе хранения. Метиленовый мостик, соединяющий пиримидиновый и тиазольный фрагменты, легко разрушается [32], а тиазольный фрагмент менее стабилен, чем пиримидиновая структура, и легко расщепляется при гидролизе. Включение холина хлорида в витаминный премикс способствует нестабильности ВВ₁ в процессе хранения. По данным о стабильности, опубликованным BASF (1994, цитата по Уайтхеду), после одного месяца хранения удержание ВВ₁ в составе премиксов, содержащих холина хлорид и микроэлементы, составило 70 %, а после четырех месяцев хранения — 27 % [22]. ВВ₁ скорее всего, растворим в воде, потому что атомы водорода связаны с гидроксильными группами и третичными структурами аминов. Следовательно, ВВ₁ подвержен разложению в процессе хранения из-за его способности растворяться в воде. Стабильность витаминов можно повысить, исключив из витаминно-минерального премикса холина хлорид.

3.4. Воздействие Cu и Zn в высоких концентрациях на стабильность витаминов

Наличие в составе ВМ премиксов Cu и Zn в высоких концентрациях не оказывало воздействия на сохранность ВД₃, ВЕ, ВВ₆, ниацина, пантотеновой кислоты, ВК₃ и ВВ₂ (табл. 5–10 и 12). Напротив, при добавлении Cu и Zn в высоких концентрациях значительно снижалась концентрация ВА и ВВ₁ в ВМ премиксах после 2, 3, 6 и 12 месяцев хранения (табл. 4 и 11).

Диарея поросят после отъёма от свиноматки является одной из наиболее распространённых причин заболеланий и смерти поросят-отъёмышей и, следовательно, значительно снижает показатели их роста [2, 4, 5].

В коммерческих условиях кормление поросят продуктами, содержащими Zn и Cu в высоких концентрациях, стимулирует их среднесуточный прирост массы, снижает коэффициент конверсии корма, улучшает усвояемость питательных веществ корма и показатели роста, а также снижает частоту диареи [2, 6]. Однако Zn и Cu — это тяжёлые металлы, имеющие тенденцию накапливаться в почве, что приводит к серьёзному загрязнению окружающей почвы и водопродонной воды. Более того, присутствие в корме цинка в высоких концентрациях (2000–3000 мг/кг корма) может повлиять на развитие устойчивости поросят к противомикробным препаратам. В нашем исследовании высокие уровни CuSO₄ (более 20 000 мг/кг Cu в премиксе для стимулирования роста) и ZnO (более 225 000 мг/кг Zn в премиксе для снижения частоты диареи) в составе витаминных/микроминеральных премиксов приводили к разложению витаминов. Стабильность витаминов снижается в присутствии некоторых микроэлементов [19, 25, 33]. В нашем исследовании при смешивании витаминов с микроэлементами для производства витаминных/витаминно-минеральных премиксов при длительных периодах хранения активность витаминов уменьшалась более стремительно (табл. 4–12). Микроэлементы приводят к окислительно-восстановительным реакциям, являющимся причиной окисления витаминов. Микроэлементы различаются по своему окислительно-восстановительному потенциалу: медь, железо и цинк — наиболее реакционноспособны, а селен, йод и марганец — менее химически активные минералы [9]. Реакционноспособные микроэлементы снижают активность витаминов, окисляя их. Во-первых, металлоподобная природа микроэлементов уменьшает кристаллы витаминов до более мелких частиц, разрушая их защитную оболочку. Более мелкие частицы увеличивают площадь поверхности витаминов, на которой могут проходить реакции между частицами витаминов и частицами микроэлементов. В исследовании Дав и Эван [34] также было установлено, что при высоких концентрациях Cu (250 мг/кг корма) или Zn (1000 мг/кг корма) содержание витаминов уменьшается более стремительно. Лу и соавт. обнаружили, что высокая концентрация

Сульфата способствовала нежелательному окислению ВЕ в составе кормов [35]. При производстве представленных на рынке ВЕ гидроксильная группа ВЕ защищена образованием сложного эфира, как в α -токоферола ацетате. Полученный токоферола ацетат устойчив к кислороду, так как в нём отсутствуют двойные связи и свободные гидроксильные группы [36]. Кроме того, Дав и Эван [34] обнаружили, что α -токоферола ацетат был относительно стабильным в рационах свиней, но, когда Су присутствовал в корме в количестве 250 ppm (ч/млн), снижалась стабильность α -токоферола ацетата. Интересно, что мы не обнаружили существенного снижения содержания ВЕ в четырех ВМ премиксах, вероятно, из-за технологии микрокапсулирования, используемой для защиты ВЕ. Микрокапсулирование может снизить реакционную способность и взаимодействие соединений с внешней средой, тем самым повышая их стабильность в условиях, включающих, среди прочих стрессовых факторов, воздействие высоких температур, света, влаги и кислорода, а также уменьшая потерю активности витаминов в процессе хранения.

Коэбль [9] обнаружил, что на стабильность покрытого оболочкой ВК₃ в составе премиксов влияет присутствие микроэлементов. Наши данные показывают, что холин, а также Су и Zn в высоких концентрациях не оказывали воздействия на стабильность микрокапсулированного ВК₃ в витаминных или ВМ премиксах. Причина может заключаться в том, что процесс микрокапсулирования ВК₃ обеспечивает лучшую защиту от потенциальных повреждений. В процессе хранения в составе витаминных премиксов уменьшение содержания ВВ₆ было относительно низким, но в присутствии микроэлементов ВВ₆ быстро разлагался, поскольку на стабильность ВВ₆ оказывает значительное воздействие присутствие микроэлементов [1]. ВВ₆ обычно устойчив к содержащемуся в воздухе кислороду и воздействию высоких температур, но быстро разлагается в присутствии ионов металлов. Кроме того, ВВ₆ чувствителен к свету, особенно в нейтральных и щелочных растворах [9]. В составе ВМ премиксов ВВ₆ может терять биоактивность, особенно если присутствуют минералы в форме карбонатов или оксидов [20]. Кроме того, Шарсон и соавт. сообщали о более высоких потерях активности этого витамина в ВМ премиксах с неорганическими микроэлементами по сравнению с витаминным премиксом, хранящимся в течение 120 дней [25]. В витаминно-минеральном премиксе они наблюдали, что активность ВА, ВК₃, ВВ₁ и ВВ₆ уменьшилась на соответственно 8,97; 10,16; 7,90 и 8,64 % в месяц [25]. В витаминном же премиксе активность ВА, ВК₃, ВВ₁ и ВВ₆ уменьшилась на соответственно 3,50; 6,01; 2,64 и 5,87 % в месяц [25]. Напротив, в нашем исследовании микрокапсулирование эффективно повышало стабильность витаминов в присутствии Су и Zn в высоких концентрациях по сравнению с предыдущими исследованиями. При микрокапсулировании витаминов одним из благоприятных факторов является использование липидной основы, потому что она может продлить жизнеспособность витаминов в процессе хранения, блокируя воздействие на них стрессовых факторов (холина, а также Су и Zn в высоких концентрациях).

3.5. Уравнения прогноза удержания витаминов в составе премиксов в течение периода хранения

Уравнения прогноза широко используются для оценки значений с помощью регрессионного анализа и глубокого обучения. Использование таких уравнений потенциально снижает потребность в длительных и дорогостоящих экспериментах и повышает точность при оценке значений. В нашем исследовании регрессионный анализ был использован для выведения уравнений прогноза содержания витаминов в премиксах на основе продолжительности хранения. R^2 и RMSEP были применены для сравнения точности прогнозов, а уравнения с наибольшим R^2 и наименьшим RMSEP были выбраны в качестве модели наиболее точного соответствия [37]. Уравнения и связанные с ними значения R^2 и RMSEP представлены в табл. 13. Для ВМ премикса 1 (форма выпуска премикса с нормальным составом витаминов и микроэлементов) уравнения прогноза удержания ВА, ВД₃, ВК₃, ВВ₂, ВВ₆, ниацина и пантотеновой кислоты объяснило выше чем 95 % вариативность удержания витаминов. Уравнения прогноза удержания ВД₃, ВК₃, ВВ₆ и ниацина в составе ВМ премикса 2 (премикс, содержащий холина хлорид и Су и Zn в низких концентрациях) давали высокие значения R^2 по сравнению с уравнениями для ВА, ВЕ, ВВ₁, ВВ₂ и пантотеновой кислоты. Для ВМ премикса 3 (премикс, содержащий Су и Zn в высоких концентрациях, но не холин) уравнения прогноза удержания ВД₃, ВК₃, ВВ₁, ВВ₆ и пантотеновой кислоты давали высокие значения R^2 и более точно подобранную кривую, чем уравнения прогноза удержания ВА, ВВ₂, ВЕ и ниацина. Для ВМ премикса 4 (премикс, содержащий холина хлорид, а также Су и Zn в высоких концентрациях) уравнения прогноза давали более высокие значения R^2 для прогнозирования удержания ВД₃, ВК₃, ВВ₂, ВВ₆ и ниацина, чем уравнения прогноза удержания в процессе хранения ВА, ВЕ, ВВ₁ и пантотеновой кислоты. Очевидно, что разложение витаминов в течение месяца не следовало линейному тренду. Было показано, что продолжительность хранения является важным показателем прогнозирования удержания витаминов [27]. Таким образом, продолжительность была признана самым лучшим предиктором в нашем исследовании. Кроме того, мы использовали процедуры SAS (SAS Institute, Cary, NC, США) для проверки критерия сходимости и подбора кривой с моделью экспоненциальной функции. Полученный нами результат согласуется с результатом исследования Джаннакуру и соавт., сообщивших об экспоненциальном подборе кривой для измерения уменьшения содержания витаминов; разработанные ими модели были валидированы с переменной продолжительностью хранения [38]. С другой стороны, срок годности продукта определяется стабильностью его наиболее нестабильного ингредиента [11, 12]. Наши результаты показывают, что ВА, ВК₃ и ВВ₁ являются ингредиентами, ограничивающими срок хранения ВМ премиксов. Насколько нам известно, наше исследование является первым, в котором были выведены уравнения прогноза удержания

различных витаминов в составе витаминных и ВМ премиксов в процессе хранения. Поэтому для прогнозирования удержания витаминов легче применять уравнение, полученное в этом исследовании, чем табличные значения, представленные в предыдущих исследованиях.

Таблица 13. Уравнения прогноза для удержания витаминов (%) в различных витаминных/витаминно-минеральных (ВМ) премиксах в течение времени

№ п/п	Типы ¹	Источники витаминов	Уравнения прогноза *	R ²	Средне-квадратическая ошибка прогноза	p-значение
1	ВМ премикс 1	Витамин А	$y = 97,777e^{-0,011x}$	0,884	0,02	0,017
2	ВМ премикс 1	Витамин D ₃	$y = -1,147x + 99,343$	0,984	0,752	0,001
3	ВМ премикс 1	Витамин Е	$y = -0,351x + 98,556$	0,761	1,01	0,054
4	ВМ премикс 1	Витамин К ₃	$y = -4,212x + 101,873$	0,966	4,045	0,003
5	ВМ премикс 1	Витамин В ₁	$y = -0,786x + 97,157$	0,736	2,41	0,063
6	ВМ премикс 1	Витамин В ₂	$y = -0,651x + 98,914$	0,891	1,104	0,016
7	ВМ премикс 1	Витамин В ₆	$y = -0,747x + 99,322$	0,96	0,779	0,003
8	ВМ премикс 1	Ниацин	$y = 98,913e^{-0,005x}$	0,888	0,009	0,016
9	ВМ премикс 1	Пантотеновая кислота	$y = -0,478x + 99,106$	0,893	0,849	0,015
10	ВМ премикс 2	Витамин А	$y = -1,347x + 97,474$	0,788	3,581	0,044
11	ВМ премикс 2	Витамин D ₃	$y = -1,248x + 100,2$	0,999	0,165	< 0,001
12	ВМ премикс 2	Витамин Е	$y = -0,433x + 98,808$	0,723	1,374	0,068
13	ВМ премикс 2	Витамин К ₃	$y = -4,217x + 101,09$	0,973	3,569	0,002
14	ВМ премикс 2	Витамин В ₁	$y = 93,34e^{-0,026x}$	0,785	0,068	0,045
15	ВМ премикс 2	Витамин В ₂	$y = 98,821e^{-0,004x}$	0,697	0,013	0,078
16	ВМ премикс 2	Витамин В ₆	$y = -0,766x + 99,511$	0,98	0,564	0,001
17	ВМ премикс 2	Ниацин	$y = -0,528x + 99,271$	0,958	0,567	0,004
18	ВМ премикс 2	Пантотеновая кислота	$y = 99,252e^{-0,005x}$	0,799	0,012	0,041
19	ВМ премикс 3	Витамин А	$y = -1,868x + 97,531$	0,882	3,495	0,018

Таблица 13. Продолжение

№ п/п	Типы ¹	Источники витаминов	Уравнения прогноза *	R ²	Средне-квадратическая ошибка прогноза	p-значение
20	ВМ премикс 3	Витамин D ₃	$y = -1,283x + 99,618$	0,993	0,538	< 0,001
21	ВМ премикс 3	Витамин E	$y = -0,37x + 98,449$	0,82	0,888	0,034
22	ВМ премикс 3	Витамин K ₃	$y = -4,226x + 101,743$	0,96	4,409	0,003
23	ВМ премикс 3	Витамин B ₁	$y = 94,133e^{-0,089x}$	0,92	0,134	0,01
24	ВМ премикс 3	Витамин B ₂	$y = -0,534x + 98,629$	0,842	1,186	0,028
25	ВМ премикс 3	Витамин B ₆	$y = 99,305e^{-0,008x}$	0,955	0,009	0,004
26	ВМ премикс 3	Ниацин	$y = -0,456x + 98,853$	0,835	1,04	0,03
27	ВМ премикс 3	Пантотеновая кислота	$y = 99,451e^{-0,006x}$	0,904	0,009	0,013
28	ВМ премикс 4	Витамин A	$y = -2,013x + 96,098$	0,827	4,715	0,032
29	ВМ премикс 4	Витамин D ₃	$y = -1,242x + 99,048$	0,953	1,415	0,004
30	ВМ премикс 4	Витамин E	$y = -0,421x + 99,069$	0,8	1,08	0,041
31	ВМ премикс 4	Витамин K ₃	$y = -4,276x + 102,235$	0,971	3,764	0,002
32	ВМ премикс 4	Витамин B ₁	$y = 92,009e^{-0,09x}$	0,89	0,162	0,016
33	ВМ премикс 4	Витамин B ₂	$y = -0,541x + 98,834$	0,871	1,065	0,02
34	ВМ премикс 4	Витамин B ₆	$y = -0,721x + 99,38$	0,912	1,148	0,011
35	ВМ премикс 4	Ниацин	$y = -0,447x + 98,217$	0,908	0,728	0,012
36	ВМ премикс 4	Пантотеновая кислота	$y = 99,29e^{-0,005x}$	0,872	0,009	0,02

¹ RMSEP — среднеквадратичная ошибка прогноза. ВМ премикс 1 содержал Cu и Zn в низких концентрациях и не содержал холина. ВМ премикс 2 содержал холин и Cu и Zn в низких концентрациях. ВМ премикс 3 содержал Cu и Zn в высоких концентрациях и не содержал холина. ВМ премикс 4 содержал холин и Cu и Zn в высоких концентрациях. * y (%) — удержание витамина, x (месяцы) — продолжительность хранения.

4. Выводы

Большинство исследованных витаминов в составе витаминных премиксов были более стабильными, чем BA, BK₃ и BB₁, а BK₃ — был крайне нестабильным. Холина хлорид, а также Cu и Zn в высоких концентрациях значительно снижают стабильность BA и BB₁. Как представляется, современные методы микрокапсулирования, применяемые при производстве витаминных премиксов, являются ненадлежащими, чтобы гарантировать концентрации BA, BK₃ и BB₁ в составе ВМ премиксов. Содержание витаминов с течением времени хранения можно использовать как надежный показатель, отражающий состояние витаминных и ВМ премиксов. Кинетические модели содержания витаминов в составе витаминных и ВМ премиксов могут использоваться для оценки, контроля и надлежащего управления цепочкой премиксов. Для прогнозирования удержания витаминов при различной продолжительности хранения мы предлагаем использовать разные методы. Мы также рекомендуем сократить время между производством витаминного премикса и кормлением животных, чтобы свести к минимуму уменьшение содержания витаминов в кормовых добавках (особенно витаминов A, K₃ и B₁). Кроме того, мы не рекомендуем поставщикам кормов производить премиксы, содержащие и микроэлементы, и витамины.

Вклад авторов

Концептуализация статьи — Пань Ян и Юнси Ма; методология — Пань Ян и Мин Чжу; валидация — Юнси Ма; формальный анализ — Пань Ян; опытная часть исследования — Пань Ян; обеспечение ресурсов — Пань Ян и Хуакай Ван; курирование данных — Пань Ян и Хуакай Ван; написание статьи, подготовка оригинального проекта рукописи — Пань Ян; написание статьи, рецензирование и редактирование — Юнси Ма; руководство реализацией проекта — Юнси Ма; привлечение финансирования — Юнси Ма.

Финансирование

Это исследование было выполнено при финансовой поддержке Исследовательского фонда Китайского сельскохозяйственного университета (201705510410056) и Министерства сельского хозяйства и по делам сельских регионов (21178259).

Выражение благодарности Авторы выражают признательность сотрудникам Центра оценки эффективности и безопасности кормов Министерства сельского хозяйства и сельских дел КНР (Пекин, Китай) за проведение анализов премиксов на содержание витаминов. Мы благодарим Ли Дж. Джонстона из Университета Миннесоты за рецензирование этой статьи и за критические комментарии.

Конфликты интересов

Авторы заявили, что конфликтные интересы отсутствуют.

Список использованной литературы

1. Макдауэлл; Л. Р. Витамины в питании животных и человека, 2-е изд.; Издательство Wiley-Blackwell: Хобокен, штат Нью-Джерси, США. — 2000. — С. 793.

2. Сэйлс; Дж. Воздействие фармакологических концентраций цинка оксида в рационе питания на рост свиней после отъёма от свиноматки: Метаанализ. Журнал «Биологические исследования микроэлементов». — 2013. — Вып. 152. С. 343–349. [[перекрёстная ссылка](#)] [[PubMed](#)]
3. Мерц; В. Микроэлементы в питании человека и животных, 5-е изд.; Издательство CABI Publishing: Кембридж, штат Массачусетс, США. — 2012. — С. 499.
4. Хилл; Г. М. Минералы и их применений у свиней. Опубликовано в работе «Устойчивое питание свиней»; Чибя Л. И. (ред.); Издательство Wiley-Blackwell: Хобокен, Нью-Джерси, США. — 2013. — С. 173–195.
5. Ма, Й. Л.; Зэнтон, Г. И.; Чжао, Дж.; Уэдэжайд, К.; Эскобар, Дж.; Васкес-Аньон, М. Многопрофильный анализ воздействия уровня и источника меди на продуктивность поросят. Журнал «Ветеринария». — 2015. — Вып. 93. — С. 606–614. [[перекрёстная ссылка](#)] [[PubMed](#)]
6. Вон, К.; Чжан, Л.; Ин, З.; Хэ, Дж.; Чжоу, Л.; Чжан, Л.; Чжун, Х.; Ван, Т. Воздействие наночастиц цинка оксида, вводимого в составе пищевых добавок, на рост, частоту диареи, отложение минералов, морфологию кишечника и кишечный барьер поросят-отъёмшей. Журнал «Биологические исследования микроэлементов». — 2018. — Вып. 185. — С. 364–374. [[перекрёстная ссылка](#)] [[PubMed](#)]
7. Аболлахи, М. Р.; Равиндран, В.; Свихус, Б. Гранулирование рационов бройлеров: Обзор литературы с акцентом на качество и пищевую ценность гранул. Журнал «Наука и технология кормов для животных». — 2013. — Вып. 179. — С. 1–23. [[перекрёстная ссылка](#)]
8. Макдауэлл, Л. Витамины в питании животных: Сравнение с питанием человека; Издательство Academic Press Inc.: Сан-Диего, штат Калифорния, США. — 1989.
9. Коэлю, М. Стабильность витаминов в составе премиксов и кормов: практический подход к рациону жвачных животных. Представлено на 13-м ежегодном симпозиуме по питанию жвачных животных во Флориде, Гейнсвилл, Флорида, США, 10–11 января 2002. — С. 127–145.
10. Гонсалес, А.; Эгевиньо, Б. Н.; Роча, Ф. Микрокапсулирование витамина А: Обзор литературы. Журнал «Тенденции в пищевой науке и технологиях». — 2016. — Вып. 51. — С. 76–87. [[перекрёстная ссылка](#)]
11. Руководство DSM по восполняющему введению витаминов в составе рациона питания животных, 2016. Доступно онлайн: https://www.dsm.com/markets/anh/en_US/generic/download-registration-vitamin-supplementation-guidelines-in-animal-nutrition-2016.html?assetPath=/content/dam/dsm/anh/en_US/documents/Vitamin_Supp_Guidelines.pdf (по состоянию на 28.11.2019).
12. Рекомендации по витаминам компании Trouw Nutrition China. Доступно онлайн: https://www.trouwnutrition.com.cn/Products_overview/Service-Overview/Technical-article/Recommendation/ (по состоянию на 28.11.2019).
13. Национальный научно-исследовательский совет США. Потребности свиней в питательных веществах, 11-е изд.; Национальный научно-исследовательский совет национальных академий США: Вашингтон, округ Колумбия, США. — 2012.
14. Уайлдман, Р. Э. К.; Медейрос, Д. М.; Хэмлин, Р. Л.; Стиллз, Х.; Энни Джонс, Д.; Бонагура, Дж. Д. Аспекты кардиомиопатии у свиней с дефицитом меди. Журнал «Биологические исследования микроэлементов». — 1996. — Вып. 55. — С. 55–70. [[перекрёстная ссылка](#)]
15. АОАС. Официальные методы анализа АОАС International, 18-е изд.; АОАС: Гейтерсберг, штат Мэриленд, США. — 2012.
16. Национальный стандарт определения витамина К₃ в кормах — высокоэффективная жидкостная хроматография; Главное управление по надзору за качеством, инспекциям и карантину Китайской Народной Республики. Пекин, Китай. — 2017.
17. Чэн, П.; Аткинсон, Р.; Вольф, У. Р. Выполненная в одной лаборатории валидация высокоэффективного жидкостного хроматографического диодного детектора — флуоресцентного детектора / метода масс-спектрометрии для одновременного определения водорастворимых витаминов в поливитаминных таблетках, являющихся пищевыми добавками. Журнал АОАС. — 2009. — Вып. 92. — С. 680–687.
18. ААFCO (Американская ассоциация работников государственных органов ветеринарно-санитарного контроля за качеством кормов); Официальная публикация: Уэст-Лафайет, штат Индиана, США. — 2018.
19. Чжуге, К.; Клопфенштейн, К. Ф. Факторы, влияющие на стабильность при хранении витамина А, рибофлавина и ниацина в составе премикса, являющегося кормовой добавкой. Журнал «Птицеводство» — 1986. — Вып. 65. — С. 987–994. [[перекрёстная ссылка](#)]
20. Бэйкер, Д. Х.; Штейн Х. Биодоступность минералов и витаминов в кормах. Опубликовано в работе «Устойчивое питание свиней»; Издательство Blackwell Publishing Ltd.: Оксфорд, Великобритания. — 2012. — С. 341–364.
21. Хугэберт, А. Стабильность витамина К₃ в минеральном премиксе. Журнал «Мир птицеводства Misset». — 1991. — Вып. 7. — С. 71–73.
22. Уайтхед К. К. Витамины в составе кормов. Опубликовано в работе «Поставка, состав и пищевая ценность кормов для птицы»; Издательство CABI Publishing: Уоллингфорд, Великобритания. — 2002. — С. 181–190.
23. Европейское управление по безопасности пищевых продуктов (EFSA). Научное заключение о безопасности и эффективности витамина В₁ (тиамина мононитрат и тиамина гидрохлорид), применяемого в качестве кормовой добавки для всех видов животных на основе досье, представленного компанией Lohmann Animal Health. Журнал EFSA. — 2011. — Вып. 9. — С. 2411. [[перекрёстная ссылка](#)]
24. Европейское управление по безопасности пищевых продуктов (EFSA). Научное заключение о безопасности и эффективности витамина В₁ (тиамина мононитрат и тиамина гидрохлорид), применяемого в качестве кормовой добавки для всех видов животных на основе досье, представленного компанией DSM Nutritional Products. Журнал EFSA. — 2011. — Вып. 9. — С. 2413. [[перекрёстная ссылка](#)]
25. Шарсон, Г. К.; Зальцер, Т. М.; Келер, Д. Д.; Уитни, М. Воздействие металлоспецифических аминокислотных комплексов и неорганических микроэлементов на стабильность витаминов в составе премиксов. Журнал «Наука и технология кормов для животных». — 2011. — Вып. 163. — С. 200–206. [[перекрёстная ссылка](#)]
26. Муни, А.; Олдрич, К. Стабильность основных питательных веществ при производстве и хранении кормов для домашних животных. Магистерская работа. Университет штата Канзас, Манхэттен, штат Канзас, США. — 2016.

27. Коэльо, М. Стабильность витаминов, влияющая на переработку кормов. Журнал «Корма». — 1996. — Вып. 68. — С. 9–14.
28. Олив, Ли. Й.; Дуэйк-Гонсалес, В. П.; Диосады, Л. Микрокапсулирование витаминов, минералов и нутрицевтиков для пищевых продуктов. Опубликовано в работе «Микрокапсулирование в пищевой промышленности»; Гаонкар, А.; Васишт, Н.; Кхаре, А.; Собел, Р. (ред.); Издательство Academic Press: Кембридж, Массачусетс, США. — 2014. — С. 501–522.
29. Тавчар-Кальхер, Г.; Венгушт, А. Стабильность витаминов в составе премиксов. Журнал «Наука и технология кормов для животных». — 2007. — Вып. 132. — С. 148–154. [[перекрёстная ссылка](#)]
30. Бейкер, Д. Биодоступность минералов и витаминов. Опубликовано в работе «Кормление свиней»; Льюис А. Дж., Саузерн Л. Л. (ред.); Издательство CRC Press LLC: Бока-Ратон, штат Флорида, США. — 2001. — С. 357–379.
31. Фриас, Дж.; Пеньяс, Э.; Видаль-Вальверде, С. Изменения содержания витаминов в порошковых энтеральных смесях вследствие хранения. Журнал «Химия пищевых продуктов». — 2009. — Вып. 115. — С. 1411–1416. [[перекрёстная ссылка](#)]
32. Фаррер, К. Т. Х. Термическое разрушение витамина В₁ в продуктах питания. Журнал «Достижения в исследованиях пищевых продуктов». — 1955. — Вып. 6. — С. 257–311.
33. Долинска, Б.; Острузкая-Чишелик, А.; Кабан, А.; Римантас, К.; Лещинская, Л.; Рыжка, Ф. Воздействие микроэлементов на стабилизацию водных растворов аскорбиновой кислоты. Журнал «Биологические исследования микроэлементов». — 2012. — Вып. 150. — С. 509–512. [[перекрёстная ссылка](#)]
34. Дав, С. Р.; Юэн, Р. Воздействие микроэлементов на стабильность витамина Е в рационах свиней. Журнал «Ветеринария». — 1991. — Вып. 69. — С. 1994–2000. [[перекрёстная ссылка](#)]
35. Лу, Л.; Ван, Р. Л.; Чжан, З. Дж.; Стюард, Ф. А.; Луо, К.; Лю, Б. Воздействие введения с пищей меди сульфата или трехосновного меди хлорида на показатели роста, концентрацию меди в печени бройлеров, которых кормили в загонках, и стабильность витамина Е и фитазы в составе кормов. Журнал «Биологические исследования микроэлементов». — 2010. — Вып. 138. — С. 181–189. [[перекрёстная ссылка](#)]
36. Бэлей, Т.; Ламбракис, Л.; Гудгейм, С.; Прайс, А.; Керси, Дж.; Шилдс, Р. Стабильность витаминов в формировании готовой смеси и производстве влажных кормов для домашних животных. Журнал «Ветеринария». — 2018. — Вып. 96 (Приложение 3). — С. 155–156. [[перекрёстная ссылка](#)]
37. Донг, Р. Л., Чжао, Г. Й.; Чай, Л.; Бошмин, К. А. Прогноз экскреции азота с мочой и калом у мясного скота. Журнал «Ветеринария». — 2014. — Вып. 92. — С. 4669–4681. [[перекрёстная ссылка](#)] [[PubMed](#)]
38. Жаннакуру, М. К.; Таукис, П. Кинетическое моделирование уменьшения содержания витамина С в составе замороженных зеленых овощей при различных условиях хранения. Журнал «Химия пищевых продуктов». — 2003. — Вып. 83. — С. 33–41. [[перекрёстная ссылка](#)]



© 2019 Авторские права принадлежат авторам статьи. Лицензиат: MDPI, Базель, Швейцария. Настоящая статья представляет собой статью с открытым доступом, распространяемую в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).