

«КОРМ ОПТИМА» — ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ РЕЦЕПТОЛОГОВ*

КормоРесурс
ТЕХНОЛОГИИ ВАШЕГО УСПЕХА

И. ПАНИН, д-р техн. наук, В. ГРЕЧИШНИКОВ, А. ПАНИН, кандидаты с.-х. наук, компания «КормоРесурс»

ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ

Химический состав кормовых компонентов должен оцениваться как минимум тем же набором показателей, по которым оптимизируется рацион. При этом его оценка является наиболее сложной научно-технической проблемой. По нашим наблюдениям, отклонения химического состава готового комбикорма от рассчитанных значений не менее чем на 75% зависят от погрешности, возникающей при оценке химического состава компонентов. Есть два основных фактора, определяющих эту проблему.

Первый — когда показатели не могут быть определены прямыми аналитическими методами, а могут быть получены только в результате балансовых опытов на животных или с использованием математических моделей для их оценки (по результатам балансовых опытов). Такие показатели называются косвенными, что подчеркивает их подчиненный характер по отношению к прямым показателям.

Второй — когда в качестве прямых показателей химического состава при оптимизации рациона используют их средние значения, полученные при лабораторном анализе или взятые из таблиц питательности и химического состава компонентов, в то время как фактически они носят вероятностный характер.

К косвенным показателям относят энергетическую ценность компонентов и усвояемость питательных веществ. Эти показатели, в отличие от прямых, зависят от вида и половозрастной группы животных. В таблице 1 представлена энергетическая модель пшеницы для табличного (среднестатистического) химического состава. Для другой партии пшеницы, имеющей другой химический состав, все значения энергии должны быть пересчитаны.

Для того чтобы адекватно оценить косвенные показатели, в базе данных компьютерной программы должен присутствовать весь набор прямых показателей, желательно максимально достоверный, а также уравнения или коэффициенты для каждого вида и даже возрастной группы животных. Наибольшая ценность компьютерной программы заключается именно в ее способности так спрогнози-

ровать значения косвенных показателей, чтобы они были максимально близки к истинным значениям. К сожалению, косвенные показатели не могут быть оперативно проверены в лаборатории, поэтому подтверждением адекватности такой оценки является реакция животных: для здорового поголовья она выражается в получении запланированных при расчете показателей роста или продуктивности. Уравнения или коэффициенты, по которым из прямых показателей получают косвенные, выведены из многочисленных балансовых опытов на животных, постоянно проводимых по всему миру крупными научными центрами. Результаты исследований статистически обрабатываются и публикуются в научной литературе. Среди наиболее авторитетных исследователей необходимо отметить Национальный исследо-

Таблица 1. Энергетическая модель пшеницы

Показатель	Значение
Валовая энергия, ккал/100 г	387,3
Кормовые единицы, в 100 кг	121
ОЭ птицы, в среднем, ккал/100 г	295
ОЭ птицы WPSA, ккал/100 г	307
ОЭ несущек, ккал/100 г	299
ОЭ бройлеров, ккал/100 г	288
ПЭ свиней, в среднем, МДж/кг	14,1
ПЭ растущих свиней, МДж/кг	14,0
ПЭ свиноматок и хряков, МДж/кг	14,3
ОЭ свиней, в среднем, МДж/кг	13,8
ОЭ растущих свиней, МДж/кг	13,68
ОЭ свиноматок и хряков, МДж/кг	14,01
ЧЭ свиней, в среднем, МДж/кг	10,6
ЧЭ растущих свиней, МДж/кг	10,53
ЧЭ свиноматок и хряков, МДж/кг	10,77
ОЭ КРС, МДж/кг	12,13
ЧЭ лактации КРС, МДж/кг	7,1
ОЭ КРС (CVB), МДж/кг	11,46
VEM (CVB), ед. CVB	1031
VEVI (CVB), ед. CVB	1132
ОЭ овец, МДж/кг	11,63
ОЭ рыб, МДж/кг	13,23

Примечание. ОЭ — обменная энергия;
ПЭ — перевариваемая энергия; ЧЭ — чистая энергия.

вательский совет США (NRC), который с периодичностью 8–10 лет публикует материалы по каждому виду животных и объекту аквакультуры. Компания Evonik (Германия) вносит большой научный вклад в оценку аминокислотного состава кормовых компонентов по содержанию сырого протеина и усвояемости аминокислот в организме птицы и свиней. Универсальные по видам животных рекомендации периодически издают компании CVB (Нидерланды) и INRA (Франция). По птице и свиньям хорошо зарекомендовали себя публикации под редакцией Rostagno (Бразилия). Из отечественных научных учреждений, проводящих балансовые опыты на животных и периодически публикующих свои рекомендации, отметим в первую очередь ВНИТИП (по всем видам птицы) и ВИЖ имени Эрнста (по КРС, свиньям и другим продуктивным животным).

Следует признать, что никакая научная организация в мире не обладает полным набором формул и коэффициентов для всех видов животных, которые были бы получены в собственных исследованиях. По этой причине в научных публикациях отсутствуют единые (универсальные) формулы и единые (универсальные) коэффициенты для оценки косвенных показателей химического состава компонентов. Вследствие этого перед разработчиком компьютерных программ стоит глобальная проблема: как сформировать базу знаний для адекватной оценки косвенных показателей. Именно в содержании базы знаний и заключается главное отличие между компьютерными программами, ведь математический аппарат оптимизации одинаков во всех программах.

При формировании базы знаний в программе «Корм Оптима» мы избрали вариант постоянного мониторинга, систематизации, анализа всех мировых публикаций в области кормления и их экспертной оценки. По результатам такого анализа принимается решение об использовании в программе определенных формул или коэффициентов. Мы признательны известным российским ученым — академикам И.А. Егорову и И.Ф. Горлову; профессорам А.П. Синицину, В.С. Крюкову, Т.М. Околеловой, С.В. Кумарину; ведущим специалистам селекционно-генетических компаний, агрохолдингов, а также зарубежным специалистам (Дамир Каран, Евгений Швагер, Марио Рамирес, Хью МакКонахи), за экспертную оценку и критические замечания по содержанию базы знаний программы «Корм Оптима», что придает нам уверенность в ее достоверности. Заметим, специалисты по кормлению компании «КормРесурс» также принимают участие в проведении балансовых опытов на животных, и мы учитываем эти результаты.

Вторая проблема при оценке химического состава компонентов связана с тем, что при оптимизации методом линейного программирования в качестве показателя химического состава используется абсолютное значение этого показателя, в то время как его истинное значение всегда носит вероятностный характер, потому что существует погрешность методов их оценки. В связи с этим каждый показатель должен описываться как минимум

двумя параметрами — средним значением и стандартным отклонением. Таким образом, система ограничений для поиска оптимального варианта рациона носит нелинейный характер, поэтому и показатели произведенного комбикорма носят вероятностный характер: с равной долей вероятности значение химического показателя может быть как выше, так и ниже рассчитанного. Главная проблема в том, насколько велики могут быть эти отклонения и как их можно оценить.

Распределение случайных величин для рассматриваемых нами параметров (показатели химического состава) описывается, как правило, нормальным законом. Для характеристики конкретного i -го распределения случайной величины (например, распределение протеина, жира, минеральных и других веществ в сырье или комбикорме) используются следующие параметры: x_i — среднее значение; S_i — среднеквадратическое, или стандартное отклонение CO (мы будем рассматривать аналитическое CO , характеризующее погрешность измерения, и статистическое CO , характеризующее изменчивость показателя в сырье); $C_v = (S_i / x_i) \cdot 100$ — коэффициент вариации; $\Delta_i = 1,64 \cdot S_i$ — граница погрешности измерений, этот показатель также характеризует аналитическую погрешность.

Нами разработана методика прогнозирования отклонений показателей питательности в комбикорме в зависимости от метода оценки химического состава компонентов. Существуют три подхода к его оценке. *При первом подходе* каждый кормовой компонент проверяется в лаборатории по всем балансируемым показателям питательности. Погрешности такого подхода характеризуются аналитическим стандартным отклонением (обозначим его S_1), которое определяется через значение предела сходимости. Уравнения регрессии для оценки предела сходимости приводятся в стандартах на методы анализа. *При втором подходе* в матрице используются показатели химического состава, которые приводятся в качественном удостоверении поставщика. Погрешности такого подхода характеризуются аналитическим CO (обозначим его S_2), определяемым через значение предела воспроизводимости, которое также приводится в стандартах на методы анализа. *При третьем подходе* в матрице используются среднестатистические значения показателей из таблиц питательности. Погрешности такого подхода характеризуются статистическим CO (обозначим его S_3). При этом очевидно, что для каждого показателя химического состава конкретного кормового компонента выполняется условие:

$$S_3 > S_2 > S_1.$$

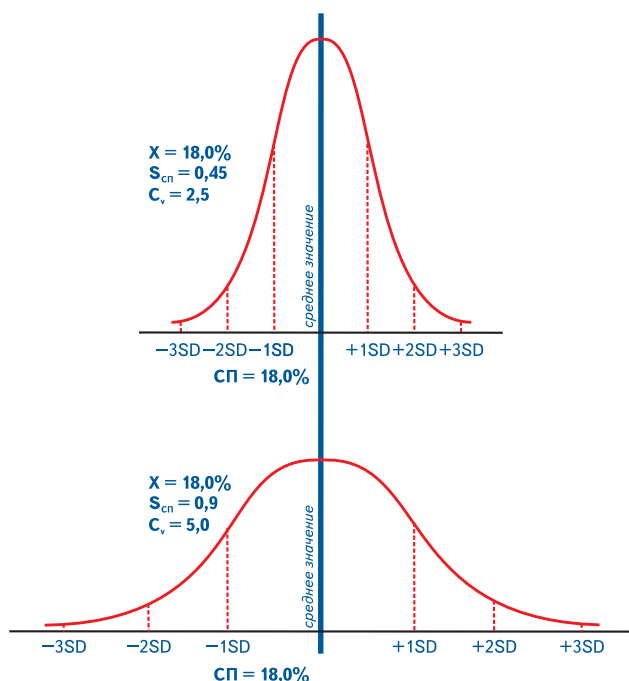
В таблице 2 в качестве иллюстрации приведены сведения о стандартных отклонениях при различных подходах к оценке содержания сырого протеина в компонентах. Как видим, неопределенность оценки, или величина CO , тем больше, чем она дальше от данных прямого химического

Таблица 2. Стандартные отклонения содержания сырого протеина в компонентах при различных способах оценки

Компонент	Среднее значение	Стандартное отклонение		
		Данные лаборатории	Удостоверение качества	Табличное значение
Пшеница	11,5	0,17	0,41	1,57
Горох	24,0	0,31	0,64	1,66
Шрот подсолнечный	36,0	0,44	0,85	4,03
Шрот соевый	48,0	0,57	1,07	4,02
Мука мясокостная	36,0	0,44	0,85	8,2
Мука рыбная	63,0	0,73	1,34	6,47

анализа. Наибольшая неопределенность будет при использовании табличных значений. Понятно, что и в комбикорме характер отклонений определяется степенью неопределенности, которая использовалась при расчете.

На рисунке приведен пример распределения содержания сырого протеина в комбикорме при заявленном его значении 18,0% и при различных подходах к оценке его содержания в компонентах. Верхний график отображает случай, когда содержание сырого протеина в каждом компоненте определялось в лаборатории, нижний график — когда его значения брали из таблиц питательности. В первом случае $S_{\text{СП}} = 0,45\%$, $C_v = 2,5\%$, во втором случае — соответственно 0,9 и 5%. В соответствии со свойствами нормального закона распределения значения сырого протеина с вероятностью 95% будут сосредоточены в диапазоне $\pm 2S_{\text{СП}}$, то есть для верхнего варианта — в диапазоне от 17,1 до 18,9%, для нижнего — в диапазоне от 16,2 до 19,8%.



Распределение содержания сырого протеина в комбикорме в зависимости от методов его определения в сырье

Согласно правилам метрологии заявленное в качественном удостоверении значение химического показателя признается верным, если результат его измерения в контрольной лаборатории не выходит за границы допустимой погрешности измерений. Эти границы для каждого химического показателя определены соответствующими стандартизованными методиками в виде пределов сходимости и воспроизводимости двух параллельных измерений.

Для заявленных в удостоверении качества показателей химического состава комбикорма x_i (протеин, жир, минеральные вещества и др.) на основании стандартизованных методов анализа для каждого показателя определяют СО и допустимые границы погрешности измерений Δ_i . В таблице 3 приведены коэффициенты для расчета аналитических СО, или S_i , которые получены нами из стандартизованных методик с использованием уравнений для пределов сходимости или воспроизводимости.

Таблица 3. Коэффициенты уравнений регрессии для оценки аналитического стандартного отклонения

Показатель	k_1	k_2
Сырой протеин	0,2	0,018
Сырая клетчатка	0,47	0,025
Сырой жир	0,22	0,032
Лизин	—	0,09
Метионин	0,002	0,032
Кальций	0,021	0,05
Фосфор	0,004	0,1
Натрий	0,018	0,031

Знание СО позволяет рассчитать границу погрешности измерений S_i :

$$S_i = k_1 + k_2 \cdot x_i; \Delta_i = 1,64 \cdot S_i.$$

Например, при заявленном значении кальция в комбикорме 3,6% аналитическое СО будет равно:

$$S_{\text{Ca}} = 0,021 + 0,05 \cdot 3,6 = 0,201\%.$$

Граница погрешности измерений:

$$\Delta_{\text{Ca}} = 1,64 \cdot 0,201 = 0,33\%.$$



Таблица 4. Вероятность попадания содержания сырого протеина комбикорма в допустимый интервал

Компонент	Ввод, %	Содержание сырого протеина, %		СО содержания сырого протеина в комбикорме		
		В компоненте	В рецепте	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
Ячмень шелушенный	35,31	13,1	4,625	0,0967	0,2848	0,4731
Пшеница	28,50	11,9	3,392	0,0834	0,2626	0,4475
Жмых подсолнечный	15,71	36,1	5,671	0,1080	0,3065	0,5769
Мука мясокостная	3,00	41,6	1,248	0,0602	0,2251	0,2460
Дрожжи кормовые	3,00	40,3	1,209	0,0483	0,2233	0,2506
Мука рыбная	2,50	63,4	1,585	0,0639	0,2301	0,2617
Лизин монохлоргидрат	0,15	94,4	0,142	0,0023	0,2042	0,2042
DL-метионин	0,14	58,1	0,081	0,0022	0,2030	0,2030
Премикс	1,00	11,0	0,11	0,0479	0,2036	0,2134
Остальные компоненты	10,69	—	—	—	—	—
Вероятность попадания в диапазон, %				99,0	86,0	57,0

Содержание кальция в комбикорме с вероятностью $P = 95\%$ будет признано соответствующим заявленному, если результат измерения в контрольной лаборатории будет находиться в диапазоне: $Ca = 3,6 \pm 0,33\%$. При декларировании содержания сырого протеина в комбикорме $18,0\%$ аналитическое стандартное отклонение $S_{СП} = 0,52\%$, граница погрешности измерения $\Delta_{СП} = 0,86\%$ и значение сырого протеина в контрольной лаборатории должно укладываться в диапазон: $СП = 18,0 \pm 0,86\%$.

Как видно из данных рисунка, при производстве комбикорма с вариацией содержания сырого протеина $2,5\%$ вероятность попадания в допустимый диапазон $18,0 \pm 0,86\%$ намного больше, чем при вариации 5% . Для того чтобы гарантировать попадание в заданный интервал, необходимо при оптимизации установить новое ограничение по анализируемому показателю (в данном случае — по сырому протеину), так называемый резерв надежности (δ). Эмпирически установлено, что этот резерв составляет примерно половину стандартного отклонения. Для верхнего графика это дополнительно: $\delta = 0,225\%$ (то есть $0,45:2$), для нижнего: $\delta = 0,45\%$ (то есть $0,9:2$). При оптимизации необходимо изменить требования к содержанию сырого протеина: в первом случае его минимум должен быть не 18% , а $18,225\%$; во втором случае — $18,45\%$. При нелинейной оптимизации эти величины устанавливаются в процессе решения, они незначительно могут отличаться от эмпирических значений. В любом случае введение «резерва надежности» увеличивает цену комбикорма и, скорее всего, приведет к его частичной разбалансированности (погрешности могут быть разные у различных показателей, поэтому и относительная величина резерва будет отличаться). Такая цена гарантий надежности вне зависимости от метода оптимизации — линейного или нелинейного.

Однако есть оптимистический выход из этой ситуации. В таблице 4 для рецепта ПК-1 (куры-несушки) приведен сравнительный анализ вероятности попадания значений сырого протеина комбикорма (рассчитанное и заявленное значение в рецепте $СП = 18,0\%$) в заданный интервал

$СП = 18,0 \pm 0,86\%$, определяемый границей погрешности измерения, в зависимости от подходов к оценке сырого протеина в сырье.

В 1-м варианте количество сырого протеина во всех компонентах определяли в лаборатории, во 2-м варианте значения брали из удостоверений поставщика, в 3-м — из таблиц питательности и химического состава. На основании данных о СО во всех вариантах рассчитывали вклад каждого компонента в суммарное СО с учетом процента его ввода в комбикорм. Для 3-го варианта значение сырого протеина в выработанном комбикорме почти с равной вероятностью будет или выше, или ниже граничных точек допустимого интервала. Из данных таблицы 4 можно сделать важный вывод: для того чтобы не вводить в расчеты «резерв надежности», не использовать методы нелинейного программирования и не удорожать комбикорм, необходимо иметь точные данные о химическом составе сырья, и тогда при верификации комбикорма по показателям питательности с вероятностью 99% попадаем в допустимый интервал.

Конечно, в практике комбикормового производства на каждом предприятии действует смешанный подход к оценке химического состава компонентов: важные показатели определяются для каждой партии сырья, другие берутся из качественного удостоверения, некоторые — из таблиц. По разработанной нами методике можно прогнозировать вариации заданного показателя в комбикорме, оценивать вероятность его попадания в допустимый интервал и рассчитывать, если это необходимо, точное значение минимального запаса прочности для обеспечения попадания в заданный интервал с вероятностью 95% .

В заключение отметим, что программа «Корм Оптима» работает более чем на двух тысячах предприятий в РФ и за рубежом. Она является эффективным инструментом рецептологов. Подтверждением актуальности и достоверности подходов программы «Корм Оптима» к оптимизации, а также базы знаний служат высокие показатели продуктивности животных, которые с ее помощью получают животноводческие предприятия. ■