

МОДЕЛИРОВАНИЕ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.Н. Леонов¹, д.т.н., профессор, В.О. Китиков², д.т.н., доцент,
Ли Цинчжэнь¹

¹*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

²*Национальная академия наук Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь*

Введение

Прежде чем рассматривать общую проблему моделирования и многокритериальной оптимизации технических систем в сельском хозяйстве, рассмотрим принципиальное отличие сельского хозяйства от других видов производственной деятельности человека. Сельское хозяйство единственная область производства, в котором человек играет вспомогательную роль. Основную функцию по созданию растений и животных выполняет природа, однако все закономерности того, как она это делает, до сих пор до конца еще не изучены. В основе функционирования живых систем лежит молекула ДНК, обеспечивающая хранение, передачу и реализацию генетической программы развития живых организмов из поколения в поколение. Копирование молекулы ДНК позволяет получить молекулу РНК, которая после того как покидает ядро клетки, попадает в цитоплазму, где руководствуясь полученной от ДНК информацией, обеспечивает синтез аминокислот в соответствующие белки, способные осуществлять свои строительные, гормональные и ферментные функции. И хотя человек уже научился получать простейшие искусственные молекулы ДНК, и их копии в виде молекул РНК, и все аминокислоты, тем не менее, самоорганизация материи на базе триады макромолекул ДНК→РНК→белки, приведшая 3,3 млрд. лет тому назад к возникновению жизни в океане, до сих пор не может быть воспроизведена человеком.

Один миллиард лет тому назад в результате естественной эволюции возникли первые растения, которые в настоящее время яв-

ляются *основным источником* пищи и энергии для человечества. На рисунке 1 дана схема фотосинтеза белков, жиров и углеводов в растениях, содержащих молекулы хлорофилла. С помощью фотосинтеза растение преобразует энергию света в энергию химических связей органических веществ. Растения на Земле появились задолго до появления человека (*Homo sapiens* возник на Земле всего лишь 50 тыс. лет тому назад). Благодаря растениям на Земле появился кислород, который явился мощным эволюционным стимулом возникновения и развития разнообразных форм жизни, в том числе рыб, птиц и млекопитающих. Основная масса растений (джунгли, тайга и т.п.) рождается и живет на Земле без участия человека.

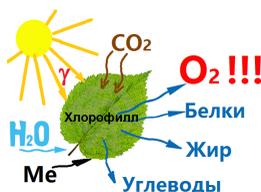


Рисунок 1. – Схема фотосинтеза в растениях



Рисунок 2. – Структура сельского хозяйства

В неживой природе в результате всех происходящих процессов внутренняя энергия вещества уменьшается, а энтропия возрастает. Например, все элементы периодической системы подвержены окислению, в результате чего внутренняя энергия оксидов меньше внутренней энергии чистых элементов (исключение составляет золото). Фотосинтез – удивительное природное явление, которое «руководствуется» прямо противоположными тенденциями, в результате которых из неорганических веществ (вода, углекислый газ и микроэлементы) создается органическое вещество, внутренняя энергия которого больше своих неорганических предшественников, а энтропия меньше!

Второй вид деятельности человека, направленный на обеспечение себя высокоэффективным белком в качестве пищи является животноводство. Животноводство – это производственная деятельность человека с целью получения животной продукции – рыбы, птицы, мяса, молока, яиц, необходимых, прежде всего для полноценного развития мозга. Следует подчеркнуть, что энергия, необ-

ходимая для реализации процессов биоконверсии – это та же энергия Солнца, законсервированная в растительных продуктах. Полезность животноводства, продукты которого отличаются от своих предшественника большей концентрацией белка, заключается еще и в том, что благодаря нему, можно даже несъедобный растительный белок (сено, трава) в результате биоконверсии преобразовать в съедобный животный белок, полезный для человека. Задача человека заключается в том, чтобы используя закономерности фотосинтеза, и биоконверсии создать эффективное производство полезных для жизнедеятельности человека растений и животных – источника полезного для человека белка. И хотя человек в силу своих способностей «помогает» природе при производстве растений и животных (сажает, поливает, убирает, кормит), все-таки, самое главное в сельском хозяйстве Солнце и природа делают самостоятельно. Сознательный вид деятельности человека, направленной на «оказание помощи природе» в производстве растений, полезных для человека, возник на Земле 27 тыс. лет тому назад (растениеводство). Животноводство как сознательный вид деятельности человека, возник на Земле 25 тыс. лет тому назад.

На рисунке 2 схематично показана структура сельского хозяйства и взаимодействие между отдельными ее элементами.

Цель настоящей работы – показать возможности повышения эффективности сельскохозяйственного производства путем моделирования и многокритериальной оптимизации технических систем в растениеводстве и животноводстве.

Основная часть

Таким образом, в производстве продуктов органического происхождения, необходимых для жизни и общественно-полезной деятельности человека, участвуют 2 стороны: природа (Солнце и неорганические элементы) и человек. Эффективность такого взаимодействия может быть описано следующим критерием

$$\gamma_0 = \frac{q_0}{q_{00}}, \quad (1)$$

где q_0 – удельная энергия продукта растительного или животного происхождения, Дж/т; q_{00} – удельная энергия, затраченная человеком, на производство продукта растительного или животного происхождения, Дж/т.

Можно возразить против энергетического подхода при сравнительной оценке эффективности продуктов растениеводства и животноводства. В конце концов, пищевая ценность продуктов определяется не только, и, даже не столько энергией, сколько конкретным содержанием белков, жиров и углеводов. Однако, на самом деле, энергетический подход учитывает не только удельную энергию полученного продукта, но и суммарное содержание белков, жиров и углеводов. Дело в том, что энергия 1 г жира несет в себе 9,0 ккал энергии (37,7 ГДж/т); 1 г белка— 4,1 ккал (17,2 ГДж/т); 1 г углеводов— 4,0 ккал (16,7 ГДж/т). И если учесть, что основная масса растений и животных (в сухом остатке) в среднем содержат $\approx 20\%$ жира (основная доля— это белки, содержание которых не менее 50%), то общая удельная энергия биомассы составляет ≈ 21 ГДж/т. Например, если удельная энергия молока составляет 2,6 ГДж/т, то это означает, что в нем $\approx 88\%$ воды.

Очевидно, чем больше коэффициент γ_0 , тем эффективнее сельскохозяйственная деятельность человека, и это притом, что фотосинтез и биоконверсия происходят без его участия. Анализ уравнения (1), показывает, что для повышения коэффициентов γ_0 необходимо повышать удельную энергию продукта растительного или животного происхождения q_0 , и снижать удельную энергию, затраченную человеком на производство продуктов растительного или животного происхождения q_{00} . Рассмотрим оба способа подробнее. Очевидно, что повысить q_0 можно за счет выведения новых сортов растений и пород животных, в которых процессы фотосинтеза и биоконверсии будут протекать более интенсивно. Это возможно либо за счет традиционной селекции и гибридизации, либо за счет генной модификации (отрицательные и положительные стороны существенного повышения урожайности растительных культур и продуктивности животных за счет ГМО, выходят за рамки этой статьи, ограничимся лишь констатацией факта, что в настоящее время производство кукурузы и сои в большом количестве связано с генетически модифицированными сортами).

При анализе проблемы повышения эффективности фотосинтеза и биоконверсии следует различать две стороны этой проблемы:

1) глубокое понимание теории 2) возможность экспериментального воздействия на эффективность на урожайность и продуктивность. Да, человечество еще далеко от точного теоретического понимания основных принципов самоорганизации и функционирования живых биологических систем. Однако можно не уметь создать из неорганических элементов даже простейший живой микроорганизм в питательном бульоне (как это сделала сама природа $\approx 3,3$ млрд. лет тому назад), но изучив закономерности естественного отбора, можно экспериментально разработать методы искусственного отбора для изменения растений и животных в нужном для человека направлении. Аналогично в XVII веке Исаак Ньютон не понимал природу всемирного тяготения, но это не помешало ему количественно описывать это явление $F = \gamma m_1 m_2 / r^2$. Можно не сомневаться, что со временем молекулярная биология разработает методы создания живых организмов, во всех смыслах полезных и безвредных для человека, но в которых процессы фотосинтеза и биоконверсии будут протекать более интенсивно.

Вторая возможность повышения эффективности сельского хозяйства, как следует из уравнения (1), связана со снижением удельных затрат человека при производстве с/х продуктов. Очевидно, что процессы и оборудование сельского хозяйства относятся к классу сложных систем. Математическое определение: сложная система – это система, в которой тезис и антитезис одинаково справедливы. Одной из особенностей описания сложных систем заключается в том, что простое решение не является оптимальным. Дело в том, что сложные технические системы описываются комплексом, частично или полностью конфликтующих между собой параметров оптимизации. Для нахождения приемлемого решения для описания сложной технической системы, наиболее перспективным, по мнению авторов, является метод моделирования с последующей многокритериальной оптимизацией: один из параметров оптимизации принимается в качестве целевой функции, а на остальные накладываются функциональные ограничения. Например, пусть функционирование технической системы описывается комплексом параметров оптимизации: $Y_i(\bar{x})$, $i = 1, \dots, n$; $\bar{x} \in X$. В качестве целевой функции принимаем 1-й параметр оптимизации $Y_1(\bar{x}) \rightarrow \min (\max)$, а на остальные параметры оптимизации на-

кладываются функциональные ограничения $Y_i(\bar{x}) \leq \varepsilon_i$ ($Y_i(\bar{x}) \geq \varepsilon_i$), $i = 2, \dots, n$. Значения $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ рассматриваются как допустимые значения для параметров оптимизации $Y_2(\bar{x}), \dots, Y_n(\bar{x})$. Поэтому для определения оптимального состояния технической системы, необходим выбор критерия, который принимается в качестве целевой функции [1, 2]. От того насколько этот критерий эффективно характеризует функционирование технической системы, зависит комплекс факторов, определяющий ее оптимальное состояние.

Однокритериальная оптимизация. В качестве целевой функции выбирается один из параметров оптимизации. Рассчитывается комплекс факторов, который обеспечивает максимальное значение целевой функции V . Однако остальные параметры оптимизации, играющие пассивную роль, могут получить значения, которые не удовлетворяют заказчика.

Например, при производстве пшеницы в качестве целевой функции выберем величину урожайности. В этом случае рассчитывается комплекс управляющих факторов, который действительно для этого сорта обеспечит максимально возможную урожайность пшеницы $V \rightarrow \max$. Пусть поиск решения даст, например, значение $V_{\max} = 53$ ц/га. Однако, другой важнейший для фермера параметр оптимизации – уровень удельных затрат, для полученного комплекса управляющих факторов, будет иметь относительно высокое значение, например, $\gamma = 205$ \$/т, при том, что рыночная цена составляет 230 \$/т. Можно в качестве целевой функции выбрать уровень удельных затрат $\gamma \rightarrow \min$. Рассчитанный в этом случае управляющий комплекс факторов действительно обеспечит при тех же условиях получение минимально возможного значения $\gamma_{\min} = 190$ \$/т, но при этом урожайность пшеницы будет иметь относительно невысокое значение, например, $V = 37$ ц/га.

Многокритериальная оптимизация «активно использует» все параметры оптимизации. Один из них играет роль целевой функции, а на другие накладываются приемлемые ограничения. В качестве целевой функции, для рассматриваемого выше примера, выберем урожайность пшеницы $V \rightarrow \max$, а на уровень удельных затрат наложим приемлемое для фермера ограничение $\gamma \leq 195$ \$/т. По-

иск оптимального решения даст максимальное значение урожайности $V_{\max} = 48$ ц/га, но уровень удельных затрат $\gamma = 195$ \$/т. Несложные подсчеты показывают, что в последнем случае прибыль фермера будет наибольшей из всех 3-х рассматриваемых случаев. Добиться того, чтобы урожайность пшеницы была максимальной, а удельные затраты минимальными одновременно, концептуально невозможно, так как эти параметры оптимизации имеют конфликтующий характер изменения. Следует обратить внимание на то, что полученные параметры при многокритериальной оптимизации меньше своих аналогичных оптимальных значений при однофакторной оптимизации. Урожайность при многокритериальной оптимизации составила 48 ц/га, и это меньше максимальной урожайности при однофакторной оптимизации $V_{\max} = 53$ ц/га. Уровень удельных затрат при многокритериальной оптимизации составил $\gamma = 195$ \$/т, и это больше минимального уровня удельных затрат при однофакторной оптимизации $\gamma_{\min} = 190$ \$/т.

Проиллюстрируем пример, когда ошибочная цель при производстве зерна чуть было, не привела к существенному ослаблению продовольственной безопасности большой страны. В таблице 1 приведены данные по производству зерна в Китае (2015 год). Из данных таблицы, с учетом того, что в Китае традиционно меньше употребляют мясомолочных продуктов (поэтому меньше зерна идет на фураж), чем в Европе видно, что по основным видам зерна продовольственная безопасность страны обеспечена (исключение составляет производство сои). В стране была поставлена цель любым путем добиться производства максимального количества зерна (на языке математики была использована однофакторная оптимизация, а в качестве целевой функции $V \rightarrow \max$).

Таблица 1 – Производство и импорт зерна Китая, млн. т

Культура	Рис	Пшеница	Кукуруза	Соя
Объем производства	200	140	220	12
Чистый импорт	3	3	5	82

Поставленная цель: валовое производство риса, пшеницы и кукурузы была достигнута. Однако, следует, сказать, что Китай явля-

ется членом ВТО, и, следовательно, его рынок открыт для других стран, в частности США, который является крупнейшим мировым экспортером зерна. В таблице 2 приведена стоимость зерна, произведенного в США и в Китае. В результате китайским потребителям зерна для производства продуктов питания в своей стране стало выгоднее покупать американское зерно, так как оно оказалось на 100 \$/т дешевле зерна китайского производства. Ситуация могла закончиться весьма драматично, так как китайское зерно осталось невостребованным, и объем его производства стал сокращаться. Отчасти ситуацию спасло то обстоятельство, что обеспечить зерном все население Китая численностью в 1.4 млрд. человек, не под силу даже такому мощному экспортеру, как США. Сейчас перед фермерами Китая поставлена математически более грамотная задача: при сохранении такого же валового объема производства зерна минимум в 2 раза снизить уровень удельных затрат.

Таблица 2 – Стоимость зерна в США и Китае, 2015 год, \$/т

Страна-производитель зерна	Кукуруза	Пшеница	Соя
Цена зерна США в США	200	200	400
Цена зерна США в Китае	300	300	500
Цена зерна Китая в Китае	400	400	650

Рассмотрим подробно суть моделирования и многокритериальной оптимизации для повышения эффективности сельскохозяйственного производства. Первое с чего следует начинать – выбор параметров оптимизации, адекватно характеризующих функционирование технической системы. Полный комплекс параметров оптимизации можно разделить на две группы; активные, которые принимает участие в многокритериальной оптимизации, и пассивные, которые позволяют получить вспомогательную количественную информацию, также характеризующую функционирование технической системы. Полный комплекс параметров оптимизации обусловлен, как правило, рынком, который в контексте данной работы аккумулирует в себе все многообразие потребительских, природных, отраслевых, производственных, экологических, социальных и политических условий. Следующий этап – выбор комплекс управляющих факторов. Управ-

ляющие факторы должны, во-первых, удовлетворять требованиям взаимонезависимости, управляемости и измеряемости, и, во-вторых, однозначно определять значения выбранных параметров оптимизации. Третий этап заключается в моделировании технических систем, или на языке математике – нахождение зависимости параметров оптимизации от управляющих факторов. Система уравнений, полученных в результате моделирования технической системы, представляет собой модель эксплуатации, которая является теоретическим вариантом натуральных испытаний. Четвертый этап – разработка критерия работоспособности состоящего из параметров оптимизации, факторных ограничений, функциональных ограничений на параметры оптимизации и целевую функцию, за которую принимается один из параметров оптимизации. На этом этапе через факторные и функциональные ограничения, а также через целевую функцию осуществляется включение требований рынка в систему наука. Полученная система математических уравнений и неравенств (критерий работоспособности) решается методами компьютерной математики, например, в MS Excel или Mathcad (поиск решений). На практике для более полного изучения функционирования технической системы полезно для одной той же целевой функции использовать различный комплекс ограничивающих значений. Кроме того, весьма полезно попробовать провести многокритериальную оптимизацию, используя для этого различные целевые функции. Приведем несколько примеров.

Растениеводство. В качестве примера рассмотрим формирование комплекса машин для производства зерновых культур (например, производство озимой пшеницы).

1-й этап – выбор параметров оптимизации:

ε – удельные затраты, Дж/т;

U – урожайность зерновой культуры, т/га;

W – производительность труда, т/ч-ч.

Выбор приведенных параметров оптимизации обусловлен тем, что они по своей природе носят конфликтующий характер, и все-сторонне описывают агротехнический процесс производства зерновой культуры.

2-й этап – выбор управляющих факторов:

x_1, x_2 – агросроки вспашки и уборки, дн;

z_1, z_2 – мощность двигателей трактора и комбайна, кВт.

Самое главное, что все управляющие факторы являются взаимозависимыми.

3-й этап – моделирование технической системы:

$\varepsilon = \varepsilon(x_1, x_2, z_1, z_2)$ – удельные затраты, Дж/т;

$U = U(x_1, x_2, z_1, z_2)$ – урожайность зерновой культуры, т/га;

$W = W(x_1, x_2, z_1, z_2)$ – производительность труда, т/ч-ч.

Кроме уравнений, отражающих зависимость активных параметров оптимизации от управляющих факторов, необходимо также получить зависимость пассивных параметров оптимизации от управляющих факторов, что позволит рассчитать, например, комплекс машин.

4-й этап – многокритериальная оптимизация.

В таблице 3 показаны примеры построения критериев работоспособности технической системы, позволяющие найти для каждого критерия свой оптимальный комплекс управляющих факторов, который позволяет рассчитать свой оптимальный комплекс активных и пассивных параметров оптимизации.

Таблица 3 – Примеры критерия работоспособности в растениеводстве.

Критерий 1	Критерий 2	Критерий 3
$\varepsilon(x_1, x_2, z_1, z_2) \rightarrow \min$ $U(x_1, x_2, z_1, z_2) \geq U_0$ $W(x_1, x_2, z_1, z_2) \geq W_0$	$\varepsilon(x_1, x_2, z_1, z_2) \leq \varepsilon_0$ $U(x_1, x_2, z_1, z_2) \rightarrow \max$ $W(x_1, x_2, z_1, z_2) \geq W_0$	$\varepsilon(x_1, x_2, z_1, z_2) \leq \varepsilon_0$ $U(x_1, x_2, z_1, z_2) \geq U_0$ $W(x_1, x_2, z_1, z_2) \rightarrow \max$
$x_{1\min} \leq x_1 \leq x_{1\max}; \quad x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max}; \quad z_{1\min} \leq z_1 \leq z_{1\max}; \quad z_{2\min} \leq z_2 \leq z_{2\max}$		

Животноводство. Аналогичный пример по моделированию и многокритериальной оптимизации приведем из области молочного животноводства. Однако, прежде чем привести данные, аналогичные данным по растениеводству, следует сказать несколько слов об особенностях молочном животноводства Беларуси в настоящее время. Начиная с 2010 года темпы роста удоев, являющихся важнейшим количественным показателем эффективности молочной отрасли, значительно снизились, и наступил период насыщения. Те мероприятия, которые в первом десятилетии XXI века позволили увеличить молочную продуктивность стада, перестали «работать». Теоретики социальной функции науки Бернал и Прайс разработали количественные критерии, позволяющие объяснить подобные закономерности, характерные для различных этапов научно-

технического прогресса. Согласно Д. Прайсу [3] поступательное развитие технологии представляет собой последовательность периодов, каждый из которых характеризуется экспоненциальным ростом, перегибом и выходом на насыщение [3]. На рисунке 3 показана характерная временная зависимость процессов, которые исчерпали свой потенциал.

Очередной экспоненциальный рост на новом витке развития возможен только при условии, что он подпитывается принципиально новыми знаниями, и, как правило, из смежных областей науки. Нисколько не умаляя значимости селекционной работы и процессов сбалансированного кормления, улучшения санитарно-гигиенических условий содержания животных в коровнике и зооветеринарной профилактики можно утверждать, что в настоящее время процесс машинного доения является самым узким местом молочного животноводства.

Самое убедительное доказательство этого утверждения – высокий уровень заболеваемости коров маститом до 30 %, недопустимо низкая жирность молочного сырья 3,4 %, относительно невысокий удой 4,7 т/гол/год. Поэтому процесс машинного доения, именно в настоящее время, играет ключевую роль в повышении молочной продуктивности, так как если процесс и доильное оборудование неэффективны, то генетический потенциал, кормление и условия преддоильного содержания коров не имеют решающего значения.

Отличительная особенность нового этапа развития молочной отрасли в Беларуси заключается в том, что новый этап в развитии молочного животноводства может быть решен только путем *инновационной модернизации*. Перспективным направлением инновационной модернизации процесса машинного доения в настоящее время является привнесение в него новейших научных знаний, выработанных в молекулярной биологии о гормональной природе молоковыведения. Необходимо, чтобы новый процесс машинного доения был «подстроен» под генетическую программу молоковыведения, созданную в процессе эволюции этого вида животных на протяжении 40 миллионов лет [4]:

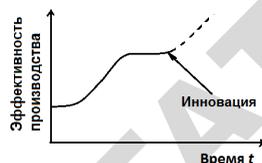


Рисунок 3. – Характерные этапы научно-технического прогресса

1) переход альвеолярного молока в цистерну вымени (это 80 % удоя), возможен *только* при наличии в крови животных гормона окситоцин, который, воздействуя на гладкую мускулатуру альвеол, «отжимает» молоко в цистерну вымени. Время действия гормона окситоцин для коров черно-пестрой породы в Беларуси составляет 4 – 5 мин;

2) стресс во время доения сопровождается выделением в кровь гормона адреналин, который блокирует действие окситоцина и, следовательно, препятствует молоковыведению;

3) первые порции альвеолярного молока содержат менее 1 % жира, последние порции молока содержат до 20 % жира;

4) полнота альвеолярного выдаивания помимо того, что обеспечивает максимальный удой и высокую жирность молока, стимулирует секрецию молокообразования, увеличивая лактационный период. В противном случае, остаточное альвеолярное молоко через обратную протеиновую связь запускает механизм, снижающий лактационную секрецию, что приводит к преждевременному самозапуску.

Очевидно, что *инновационная модернизация* процесса машинного доения не может осуществляться «вслепую». Необходим критерий, позволяющий количественно определять эффективность инновации. В качестве критерия эффективности молочной отрасли нами предложен уровень удельных затрат, равный отношению общих затрат к единице нормализованного продукта [5]

$$\gamma = \frac{\beta(1+n_0/n) \cdot E(N_k)}{\alpha W_k(1-\delta) \cdot N_k}, \quad (2)$$

где γ – уровень удельных затрат, ГДж/т; n_0 – время выращивания ремонтного молодняка, лет; n – среднее продуктивное долголетие животных, лет; $E(N_k)/N_k$ – общие затраты, ГДж/гол/год; α – коэффициент, пропорциональный жирности молока; β – коэффициент, пропорциональный концентрации соматических клеток; W_k – средний удой лактирующих коров в стаде, т/гол/год; δ – доля маститных коров, временно исключенных из технологического процесса.

Введенный критерий не зависит от рыночной конъюнктуры и потому отражает *технологический интеллект* молочной отрасли любой страны мира. Критерий отражает основной ресурс – здоровье животных (продуктивное долголетие n ; сорт молока β , определяемый содержанием соматических клеток – важнейший показатель мастита).

Следует отметить, что повышение суточного удоя, жирности и сортности молока, продуктивного долголетия коров, а также уменьшение доли животных болеющих маститом при неизменном рационе кормления, в значительной степени, зависит от совершенства процесса машинного доения. В настоящий момент уровень удельных затрат в молочном животноводстве Беларуси составляет 19 ГДж/т (для сравнения в Германии – 13 ГДж/т, Новой Зеландии – 10 ГДж/т).

Сформулируем этапы моделирования и многофакторной оптимизации для физиологически-щадящего процесса машинного доения.

1-й этап – выбор параметров оптимизации:

γ – уровень удельных затрат (см. уравнение (2)), Дж/т;

Y_1 – электропроводимость молока (параметр качества), См/м;

Y_2 – скорость доения, кг/мин;

Y_3 – суточный удой (параметр количества), кг/сут;

В данной работе процесс машинного доения характеризуется 4 параметрами оптимизации: γ – уровень удельных затрат, который в конечном итоге дает оценку эффективности инновационной модернизации процесса машинного доения; Y_1 – электропроводимость молока характеризует качество молока, так как зависит от содержания жира в молоке и концентрации соматических клеток. Чем выше жирность молока и ниже концентрация соматических клеток, тем меньше электропроводимость молока. Значение Y_1 для молока сорта «Экстра» $Y_1 \leq 0,44$ См/м (жирность $\geq 5\%$, концентрация соматических $\leq 3 \cdot 10^5$ см⁻³). При концентрации соматических клеток $\geq 7 \cdot 10^5$ см⁻³ (клинический или субклинический мастит) $Y_1 \geq 0,8$ См/м, и такое молоко в пищу не используется, Y_2 – скорость машинного доения, определяемая суточным удоем и временем действия гормона окситоцин: Y_3 – суточный удой, характеризует количество произведенного молока.

2-й этап – выбор управляющих факторов:

ΔP – вакуумное разрежение в доильном аппарате, 0,40 – 0,48 кПа;

t – время доения, 4 – 5 мин (должно совпадать со временем действия окситоцина);

τ – температура лактации, 0 – 20 °С;

3-й этап – моделирование технической системы:

$\gamma = \gamma(\Delta P, t, \tau)$ – удельные затраты, Дж/т;

$Y_1 = Y_1(\Delta P, t, \tau)$ – электропроводимость (качество молока), См/м;

$Y_2 = Y_2(\Delta P, t, \tau)$ – скорость доения, кг/мин;

$Y_3 = Y_3(\Delta P, t, \tau)$ – суточный удой (количество молока), кг/сут;

4-й этап – многокритериальная оптимизация:

В общем случае для создания эффективного процесса машинного доения было бы очень хорошо найти такой комплекс факторов, при котором $\gamma \rightarrow \min$, (высокое качество молока), $Y_2 = Y_{2\text{опт}}$, $Y_3 \rightarrow \max$ (высокий суточный удой). Но с точки зрения математики, если параметры оптимизации носят конфликтующий характер, такой вариант невозможен. В таблице 4 приведены примеры построения критериев работоспособности процесса машинного доения, позволяющие найти оптимальный комплекс управляющих факторов и оптимальный комплекс параметров оптимизации.

Таблица 4 – Пример критерия работоспособности в области животноводстве

Критерий 1	Критерий 2	Критерий 3
$\gamma = \gamma(\Delta P, t, \tau) \rightarrow \min$	$\gamma = \gamma(\Delta P, t, \tau) \leq \gamma_0$	$\gamma = \gamma(\Delta P, t, \tau) \leq \gamma_0$
$Y_1(\Delta P, t, \tau) \leq Y_{10}$	$Y_1(\Delta P, t, \tau) \rightarrow \min$	$Y_1(\Delta P, t, \tau) \leq Y_{10}$
$Y_{2\min} \leq Y_2(\Delta P, t, \tau) \leq Y_{2\max}$	$Y_{2\min} \leq Y_2(\Delta P, t, \tau) \leq Y_{2\max}$	$Y_{2\min} \leq Y_2(\Delta P, t, \tau) \leq Y_{2\max}$
$Y_3(\Delta P, t, \tau) \geq Y_{30}$	$Y_3(\Delta P, t, \tau) \geq Y_{30}$	$Y_3(\Delta P, t, \tau) \rightarrow \max$
$\Delta P_{\min} \leq \Delta P \leq \Delta P_{\max}$; $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$; $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$		

В результате многокритериальной оптимизации физиологически-щающегося процесса машинного доения был рассчитан оптимальный комплекс факторов, который для всех 3-х критериев работоспособности оказался одинаковым?! Сравним с примером по растениеводству. Это математически маловероятный случай, но это означает, что в данном случае все 4 параметра оптимизации носят непротиворечивый характер. Но, если проанализировать физиологически-щающийся процесс машинного доения, то полученный результат является вполне логичным следствием. Дело в том, полное извлечение молока из альвеол обеспечивает и максимально возможный удой $Y_3 = Y_{3\max}$, и максимально возможную жирность молока одновремен-

но $Y_1 = Y_{1\min}$ (высокое значение коэффициента α , см. уравнение (2)).

Если учесть, что выдаивание происходит только при наличии гормона окситоцин в крови животных, то есть процесс молоковыведения является щадящим, не травмирующим нежную плоть животных, и, следовательно, концентрация соматических клеток в молоке минимальна (низкое значение коэффициента β , см. уравнение (2)), что обеспечивает хорошее здоровье животных, которое выражается в снижении заболеваемости коров маститом δ и увеличении срока продуктивного долголетия n . Увеличение удоя (W_k), коэффициента α и продуктивного долголетия n , уменьшение коэффициентов β и δ позволило в 2,2 раза снизить уровень удельных затрат γ до 19 ГДж/т при тех же общих удельных затратах (см. уравнение (2)) [5]. На рисунке 4 [6] приведена количественная информация, подтверждающая выше сказанное. Тот факт, что при скорости молоковыведения 2,2 кг/мин одновременно достигаются и минимум параметра Y_1 (высокое качество молока), и максимум параметра Y_3 (высокие удои), является косвенным доказательством того, при выбранной скорости удалось обеспечить равенство времени доения и времени активного действия гормона окситоцин в организме животных. При скорости доения 2,2 кг/с и разовом удое 10 кг время доения составило 4,5 мин, что *косвенно* подтверждает тот факт, что время активного действия гормона окситоцин находится в пределах 4–5 мин [4]. Измерение времени активного действия гормона окситоцин, который является объектом исследований молекулярной биологии, впервые «измерено» технологом при анализе экспериментальных данных по физиологически-щадящему процессу машинного доения.

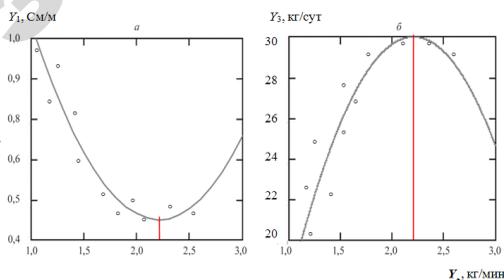


Рисунок 4. – Зависимость параметров, отражающих количество и качество молока, от скорости молоковыведения в физиологически-щадящем процессе машинного доения

Заключение

1. Моделирование и многокритериальная оптимизация является эффективным инструментом создания сложных технических систем, в том числе и в области сельского хозяйства. Созданный критерий работоспособности выполняет ключевую методологическую роль в создании технических систем, так как обеспечивает включение рыночных требований в систему прикладных научных исследований. Наиболее эффективным способом снижения уровня удельных затрат является повышение урожайности растений или продуктивности животных.

2. Создание новых технических систем эффективно только путем инновационной модернизации. Конечно, традиционная модернизация также необходима для научно-технического прогресса, так как плохое исполнение дискредитирует хорошую идею, но все-таки традиционная модернизация, это удел инженеров, а инновационная модернизация это удел ученых!

3. Можно смело утверждать, что XXI век пройдет под знаменем внедрения в различные области сельского хозяйства знаний, полученных в молекулярной биологии по самоорганизации биологических систем. Это можно сравнить с внедрением электронной теории в технологию металлов в XX веке.

Список использованных источников

1. Steuer R.E. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application. – New York: John Wiley & Sons, Inc. – ISBN 047188846X.

2. Sawaragi Y. Theory of Multiobjective Optimization (vol. 176 of Mathematics in Science and Engineering). – Orlando, FL: Academic Press Inc. – ISBN 0126203709.

3. Price, D. Little Science, Big Science. New York, 1963. (Перевод: Прайс, Д. Малая наука, большая наука / Д. Прайс // Наука о науке. – М.: Прогресс, 1966. – С. 281 – 384.

4. Грачев, И.И. Физиология лактации сельскохозяйственных животных / И.И. Грачев // М.: Колос, 1974. – 280 с.

5. Китиков, В.О. Стратегическое направление развития машинного доения коров / В.О. Китиков, А.Н. Леонов // Вес. Нац. навук. Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2013. – № 4. – С. 91 – 104.

6. Леонов А.Н. Оптимизация процесса машинного доения / А.Н. Леонов, В.О. Китиков // Вес. Нац. навук. Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2014. – № 1. – С. 93 – 100.