

4. Подколызин Ю.В., Жунусбаев Б.К. К исследованию системы питания пресса брикетировщика с неподвижной матрицей // Науч. тр. ЛСХИ. – Ленинград; Пушкин, 1977. –Т. 336. – С. 23–25.
5. Цугленок Н.В., Матюшев В.В. Система питания шнековых прессов в технологии производства обезвоженных кормов / Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2004. – 110 с.
6. Пат. РФ №2147992. Шнековый пресс для обезвоживания зеленой массы растений / Антонов Н.М., Матюшев В.В., Сорокин В.И. и др. № 98123857; заявл. 31.12.984; опубл. 2000; Бюл. №12.
7. Василенко П.М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. – Киев: Изд-во УАСХН, 1960. – С. 263.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.



УДК 631.535

Н.В. Цугленок, В.В. Матюшев, Г.И. Цугленок, И.О. Богульский

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА И ЗАГОТОВКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ КОРМОВ

*Представлены результаты обоснования и прогнозирования рациональной структуры производственных процессов производства и заготовки растительных кормов. Рекомендуемая методика энергетической оценки системы заготовки кормов позволяет исключать несовершенные операции в технологической линии.*

**Ключевые слова:** растительный корм, заготовка, рациональная структура, энергетическая эффективность, математическая модель.

N.V. Tsuglenok, V.V. Matyushev, G.I. Tsuglenok, I.O. Bogulsskii

### OPERATIONAL PROCESS RATIONAL STRUCTURE FORECASTING FOR THE VEGETATIVE FORAGE PRODUCTION AND CONSERVATION

*The results of substantiation and forecasting the rational structure of production operational processes and vegetative forage conservation are given. The recommended technique of the forage conservation system power estimation allows to exclude the imperfect operations in the technological line.*

**Keywords:** vegetative forage, conservation, rational structure, power efficiency, mathematical model.

Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве связан с разработкой и внедрением новых энергосберегающих технологий, машин и оборудования. Важнейшими требованиями, предъявляемыми к технологиям, являются обеспечение комплектности и поточности выполнения всего технологического процесса в оптимальном режиме по экономическим, технологическим и энергетическим показателям, надежности их функционирования.

Технологические процессы, отвечающие этим требованиям, могут быть организованы при правильном обосновании количественного состава и основных параметров машин и оборудования, объединенных в поточные технологические комплексы. Необходимо учитывать и такую особенность машинных технологий, как технологическую связь с полеводством, в сфере которого производится сырье, идущее на приготовление кормов, и взаимодействие с биологическими объектами – животными, которыми полученные корма потребляются.

Вышеперечисленные факторы обуславливают необходимость использования при изучении, проектировании и оптимизации машинных технологий производства и заготовки кормов системного подхода. Машинная технология является центральным звеном этой системы, связывающая сырьевые ресурсы путем их трансформации в корма с животными и оказывающая на них существенное влияние, как путем непосредственного воздействия (скашивание, переработка), так и косвенного – через производимую продукцию (вид корма, его качество).

Эффективность функционирования – главное требование, которому должна удовлетворять любая система. Для достижения эффективного функционирования кормопроизводства важно не только учитывать взаимодействие всех звеньев, входящих в эту систему, но и добиваться эффективного использования каждого из них. Для решения этой задачи целесообразно саму технологию рассмотреть с позиции системного подхода, то есть представить ее в виде системы, которую можно расчленить на ряд относительно самостоятельных элементов, внутри которых имеются устойчивые связи. Это позволит, последовательно изучив природу и силы этих связей, разработать и принять наиболее рациональное решение, направленное на повышение эффективности функционирования машинных технологий [1].

В связи с вышеизложенным, рассмотрим систему организации технологического комплекса на примере процесса заготовки искусственно обезвоженных кормов, так как искусственная сушка является основной и энергоемкой операцией по переработке зеленых растений. В связи с этим необходимы детальные исследования, направленные на изыскание рациональных способов снижения энергоемкости процесса. Системный подход проектирования и оптимизации машинных технологий, приведенный в статье, может быть применим и для других технологий заготовки кормов.

Производительность поточного процесса определяется, главным образом, ее структурой и составом технических средств. Особенностью технологии производства искусственно обезвоженных кормов является то, что в роли основной технологической операции выступает сушка исходного сырья, а в качестве ведущей машины принимается сушильный агрегат, часовая производительность которого определяет такт. Все остальные технологические операции должны быть согласованы с основной по качественным показателям, ритму работы и производительности, т.е. должно быть обеспечено выполнение основного условия поточности производства.

Для правильной организации консервирования кормов чрезвычайно важна разработка сырьевых конвейеров, схемы которых должны быть увязаны с конкретными условиями хозяйства, и особенно с показателями урожайности кормовых культур, набора необходимой техники и рекомендациями научно-исследовательских учреждений этих районов [2].

В зависимости от почвенно-климатических условий и направлений хозяйства набор культур может изменяться в широких пределах. Для получения первого урожая можно высевать озимые и зимующие, для второго – теплолюбивые, для третьего – холодостойкие культуры. При выборе растений следует учитывать требования отдельных культур к почвенным и климатическим условиям, их урожайности, продолжительности вегетационного периода и другие факторы [3].

Основные источники для заготовки кормов – естественные сенокосы и сеяные травы. Для производства травяной муки и резки могут быть использованы травостой улучшенных сенокосов, избыток травы с культурных пастбищ, посевы люцерны, клевера, бобово-злаковых смесей и других многолетних и однолетних трав, а также листья капусты, ботва сахарной свеклы, моркови и других корнеплодов. Интенсификация животноводства связана с увеличением производства и расширением их качества. С этой целью, наряду с возделыванием традиционных бобовых культур, особое значение в решении белковой проблемы приобретает производство нетрадиционных для региона новых высокопродуктивных растений. К этим культурам можно отнести топинамбур. В связи с этим целесообразно включать в кормовой конвейер зеленую массу топинамбура [4, 5].

В кормовой конвейер были включены: рожь озимая; кострец безостый + люцерна; горохо-овсяная смесь; отава многолетних (кострец безостый+ люцерна); топинамбур; суданская трава.

На основании данных питательной ценности основных видов кормов можно рассчитать, проанализировать и сформировать рациональную схему сырьевого конвейера для производства искусственно обезвоженных прессованных кормов без и с использованием механического обезвоживания зеленых растений. Потребность в исходном сырье для производства искусственно обезвоженных прессованных кормов запланирована с учетом средней влажности зеленых растений. Операции по заготовке растительного сырья (скашивание, измельчение, погрузка в транспортные средства и доставка на АБМ-1,5) выполняют по технологии уборки трав на сено и сенаж с соблюдением агротехнических сроков и технологических требований.

Для организации производства травяной муки поточным методом необходимо, чтобы производительность косилок-измельчителей, транспортных средств, грануляторов была равна производительности сушильных агрегатов – главного звена в технологическом процессе. Для обеспечения запланированного объема работ в требуемые сроки с соблюдением агрозоотребований в наиболее напряженный период заготовительного сезона необходимо определить оптимальный состав технических средств. Из всех вариантов, отвечающих указанным требованиям, принимается комплекс машин и параметры оборудования, для которых прогнозируются минимальные удельные приведенные затраты на производство кормов и максимальный

биоэнергетический КПД. Система машин в структурно-логической схеме производства искусственно-обезвоженных кормов выбрана согласно рекомендациям [5].

Процесс решения моделей включает в себя анализ проблемы и разработку программного обеспечения с проведением и адаптацией результатов вычислительных экспериментов. На каждой из ступеней проводится корректировка модели. Методами математического программирования [6] построена линейная модель уборочно-транспортного комплекса (УТК) перевозки зеленой массы растений с различных участков на пункт сушки растений по базовой и новой технологиям. В модель введены длина гона (L), марки кормоуборочных машин (M), используемое транспортное средство (V) и расстояние перевозки (r) корма.

Основой для расчета оптимальных показателей УТК является производительность линии переработки сырья, которая определяется производительностью его ведущей машины – сушильного агрегата.

В модели предусмотрены ограничения на указанные показатели. Длина гона составляла  $L=150 - 1500$  м, расстояние перевозки корма –  $r=1-21$  км. В качестве критерия оптимизации взят энергетический доход. Оптимальный план формирования УТК должен быть составлен так, чтобы энергетический доход по перевозке зеленой массы на пункт сушки был максимальным.

В модели использовались марки: косилок – КУФ-1,8, Е-281, КПИ-2,4, КСК-100, КПКУ-75; транспортного средства – ГАЗ-САЗ 3502, Зил-508.10, ПСЕ-12,5, КамАЗ-55102.

В связи с этим возникает задача математического моделирования и разработки «таблиц перевозок» для хозяйств Сибири. На языке Maple составлены программы на ПЭВМ для аппроксимации экспериментальных данных.

В расчетную схему общих моделей энергетического дохода включена энергопродуктивность культур (K). Показатель K является полноценным фактором с непрерывным варьированием интервала, так как заданный энергетический доход возможно получить при подборе культур и их смесей.

С учетом энергопродуктивности культур была получена математическая модель для расчета энергетического дохода зеленого конвейера на языке Maple, которая имеет вид

$$E = b_0 + b_1 r + b_2 L + b_3 M + b_4 V + b_5 K + b_6 r^2 + b_7 L^2 + b_8 M^2 + b_9 V^2 + b_{10} K^2 + b_{11} rL + b_{12} rM + b_{13} rV + b_{14} rK + b_{15} LM + b_{16} LV + b_{17} LK + b_{18} MV + b_{19} MK. \quad (1)$$

После расчетов на ПЭВМ получены математические модели:

без предварительного механического обезвоживания зеленых растений ( $E_0$ )

$$\begin{aligned} E_0 \llbracket r, L, M, V \rrbracket = & -303438,7996 - 192,4569r + 2,3286L + \\ & + 36375,7042M + 35537,7656V - 0,0727K - 50,5738r^2 - 0,0010L^2 - \\ & - 1290,0703M^2 - 1277,4038V^2 + 0,1510K^2 - 0,0003rL - 10,0983rM - \\ & - 5,6324rV - 0,0042rK + 0,0185LM - 0,0105LV + \\ & + 0,1669LK - 742,6958MV - 0,0161MK; \end{aligned} \quad (2)$$

с предварительным механическим обезвоживанием зеленых растений ( $E_1$ )

$$\begin{aligned} E_1 \llbracket r, L, M, V \rrbracket = & -97650,4573 - 121,3916r + 4,2665L + \\ & + 13025,7056M + 16658,3928V - 0,2427K - 105,1825r^2 - 0,0019L^2 - \\ & - 513,7815M^2 - 667,0055V^2 + 0,000002K^2 + 0,0538rL - 16,0738rM - \\ & - 11,5071rV - 0,0097rK + 0,0057LM - 0,0823LV + \\ & + 0,000008LK - 109,4984MV - 0,0108MK. \end{aligned} \quad (3)$$

После расчетов на ПЭВМ получены частные математические модели энергетического дохода в зависимости от используемой культуры зеленого конвейера в виде

$$E = b_0 + b_1r + b_2L + b_3M + b_4V + b_5r^2 + b_6L^2 + b_7M^2 + b_8V^2 + b_9rL + b_{10}rM + b_{11}rV + b_{12}LM + b_{13}LV + b_{14}MV. \quad (4)$$

Проведенные расчеты на ПЭВМ позволили получить математические модели энергетического дохода УТК в зависимости от рассматриваемой культуры, длины гона, расстояния перевозки, марки косилки и автомобиля без и с предварительным механическим обезвоживанием зеленых растений. Коэффициент детерминации моделей составляет  $R^2 = 0,95$ . Особенностью частных моделей является то, что энергопродуктивность культур представлена в неявном виде.

Рассмотрим эффективность использования УТК в технологии производства и заготовки зеленой массы топинамбура, так как она имеет наибольшую энергопродуктивность, без- и с использованием механического обезвоживания растений.

Согласно разработанной модели можно вычислить энергетический доход ( $z$ ) и КЭЭ  $\left( \eta_{ЭЭ} \right)$  в зависимости от принятых исходных данных. Наибольшее влияние на показатели энергетического дохода и коэффициента энергетической эффективности, сравниваемых технологий, оказывает использование марок кормоуборочных машин и транспортных средств.

При изменении расстояния перевозки зеленых растений 1 до 21 км КЭЭ сравниваемых технологий увеличивается от 0,9908 до 0,9955 и его максимальное значение составляет при  $r=21$  км 0,99554. Коэффициент энергетической эффективности увеличивается от 0,99132 до 0,99163 при возрастании длины гона от 150 м до 888,19 м, а затем происходит его уменьшение до 0,9909 при длине гона 2000 м. КЭЭ увеличивается от 0,9914 до 1,0299 при использовании косилок массой от 5,9 (КУФ-1,8) до 12,36 т (Е-281, КПИ-2,4, КСК-100). При применении косилок массой более 12,36 т (КПКУ-75) происходит уменьшение КЭЭ. При использовании транспортных средств с объемом рабочей камеры машины от 6,7 до 12,7 м<sup>3</sup> (ГАЗ, ЗиЛ) КЭЭ уборочно-транспортного комплекса увеличивается от 0,99141 до 1,0111, а при дальнейшем увеличении объема до 15,8 м<sup>3</sup> происходит уменьшение КЭЭ (ПСЕ-12,5, КамАЗ-55102). При изменении энергопродуктивности культур КЭЭ сравниваемых технологий находится на постоянном уровне (при фиксированных значениях других факторов) и его максимальное значение составляет 0,991414. При увеличении расстояния перевозки зеленой массы растений КЭЭ уменьшается и составляет при 8 км – 0,9929, 12 – 0,99198, 14 км – 0,99169.

Результаты расчета энергетического дохода УТК при уборке культур кормового конвейера позволяют в зависимости от расстояния перевозки корма оценить рациональные значения длин гона, марок кормоуборочных машин и транспортных средств.

Модели на основе энергетических показателей ранее не разрабатывались. Существующие модели не учитывали взаимосвязь технологических параметров  $M$ ,  $V$  и взаимодействие пространственных факторов  $L$ ,  $r$ . Полученные модели УТК позволяют рассчитать энергетический доход и КЭЭ при всех значениях указанных параметров ( $M$ ,  $V$ ,  $L$ ,  $r$ ) и прогнозировать энергетические и продуктивные потоки УТК.

Использование полученных моделей для оценки эффективности работы кормоуборочных машин и транспортных средств позволяет прогнозировать структуру энергоэкономичного уборочно-транспортного комплекса.

Задачи по разработке энергосберегающих технологий требуют энергетической оценки протекающих в них процессов. Это позволяет выявить резервы экономии энергии и разработать пути повышения эффективности ее использования. Для повышения энергетического дохода необходимо добиться максимального энергосодержания готового корма и снижение совокупных затрат на его производство. К наиболее важному направлению увеличения энергетического дохода можно отнести выбор оптимального состава и структуры комплексов технических средств, использование технологии предварительного механического обезвоживания растений.

Для реализации вышеизложенного составлена матрица и разработаны математические модели производства обезвоженных кормов без и с предварительным обезвоживанием исходного сырья.

В качестве критерия оптимизации взят энергетический доход. Оптимальный план оценки эффективности работы сравниваемых технологий в зависимости от используемых культур зеленого конвейера составлен с учетом того, что энергетический доход производства гранул должен быть максимальным.

В связи с этим возникает задача математического моделирования. Программы составлены на языке Maple.

В расчетную схему моделей энергетического дохода включена энергопродуктивность культур, так как оценить эффективность работы базовой и новой технологий возможно при заготовке различного корма.

С учетом энергопродуктивности культур получена математическая модель для расчета энергетического дохода производства обезвоженных кормов, которая имеет вид

$$z = b_0 + b_1 K + b_2 Q + b_3 U, \quad (5)$$

где  $K$  – энергопродуктивность корма, МДж/га;

$Q$  – производительность сушильного агрегата по гранулам, т/ч;

$U$  – удельные совокупные затраты на производство гранул, МДж/га.

После расчетов на ПЭВМ получены математические модели расчета энергетического дохода: без предварительного механического обезвоживания зеленых растений ( $A_0$ )

$$A_0 = -3304,83 + 0,36K + 4076,18Q - 0,69U, \quad (6)$$

с предварительным механическим обезвоживанием зеленых растений ( $A_1$ )

$$A_1 = 174252,54 + 0,34K - 109621,70Q - 0,33U. \quad (7)$$

Согласно разработанной модели можно вычислить энергетический доход ( $z$ ) и КЭЭ ( $H$ ) базовой и новой технологий в зависимости от принятых исходных данных.

Формулы для расчета энергетического дохода и коэффициента энергетической эффективности имеют вид:

$$z = 177557,37 - 0,02K - 113697,88Q + 0,37U, \quad (8)$$

$$\eta_{\text{ЭЭ}} = \frac{174252,54 + 0,34K - 109621,70Q - 0,33U}{-3304,83 + 0,36K + 4076,18Q - 0,69U}. \quad (9)$$

Проведенные расчеты на ПЭВМ позволили получить математические модели энергетического дохода и определить коэффициент энергетической эффективности технологий в зависимости от энергопродуктивности исходного сырья и удельных совокупных затрат на производство гранул с единицы площади, а также производительности сушильного агрегата без и с предварительным механическим обезвоживанием зеленых растений. Коэффициент детерминации моделей составляет  $R^2 = 0,95$ .

Особенностью полученных моделей является то, что энергопродуктивность исходного сырья отражает взаимосвязь нескольких факторов: энергосодержания корма, урожайности и исходной влажности культур. При производстве обезвоженных кормов наибольшее влияние оказывает влажность поступающих на сушку зеленых растений, следовательно, применение предварительного механического обезвоживания растений целесообразно и экономически выгодно.

Расчеты на ПЭВМ показали, что на коэффициент энергетической эффективности технологий наибольшее влияние оказывают энергопродуктивность культур и производительность сушильного агрегата по готовому продукту.

Одним из основных факторов, определяющих поступление энергии в организм животных и птицы, является потребление сухого вещества рационов. Содержание сухого вещества в корме или рационе – важный показатель питательности. Следовательно, повышение содержания концентрированных кормов в рационах животных и птицы увеличивает и потребление сухого вещества. По мере увеличения концентрации обменной энергии в рационах животных переваримость питательных веществ кормов увеличивается [7].

Эффективность использования травяной муки весьма высока. Травяную муку в кормлении животных и птицы в основном используют для повышения полноценности рационов. Так при скармливании ее курам-несушкам их яйценоскость повышается на 12–17 %, удой коров – на 17–24 %, настриг шерсти у овец – на 15 %. В зависимости от продуктивности дойного стада в рацион включают 30–60 % муки от общей питательности рациона. Чем выше удои, тем больше энергии должно быть в 1 кг сухого вещества рациона. В рационы свиней травяную муку вводят до 10%, птицы – 3–5 % по общей питательности [8, 9].

Для определения эффективности скормливания обезвоженных кормов животным и птицы в составе концентратов разработаны модели расчета энергетического дохода и определения эффективности использования технологий и культур зеленого конвейера. Концентраты предусматривается скормливать молодняку с целью получения мясной свинины, белым курам-несушкам яичных кроссов (яйценоскость 80–85%), коровам живой массой 500 кг при суточном удое 24 кг в зимний период, так как они нашли широкое распространение в нашей стране [10].

В рационе животных и птицы содержится определенное количество обменной энергии. В модели при постоянных значениях обменной энергии ВТМ варьировала только ее масса. В модель также введены затраты на получение ВТМ в зависимости от культуры и применяемой технологии.

Математическая модель для расчета энергетического дохода от использования искусственно обезвоженных кормов в суточном рационе лактирующих коров имеет вид

$$z = b_0 + b_1K + b_2M + b_3O + b_4K^2 + b_5M^2 + b_6O^2 + b_7KM + b_8KO + b_9MO, \quad (10)$$

где  $K$  – содержание обменной энергии в 1 кг СВ, МДж;

$M$  – масса ВТМ в суточном рационе коров, кг;

$O$  – затраты на ВТМ рациона, МДж/кг СВ.

После расчетов на ПЭВМ получены математические модели расчета энергетического дохода:

$$z = -0,8290 + 1,0623K - 7,8071M + 0,0407O - 0,0023K^2 - 0,0871M^2 - 0,0044O^2 - 0,0134KM + 0,0035KO + 0,0081MO + 0,00004K^3, \quad (11)$$

базовой технологии

$$A_0 = 4,6951 - 1,0062O + 0,0008O^2 - 0,00004O^3; \quad (12)$$

новой технологии

$$A_1 = 3,866 + 0,057K - 7,807M + 0,041O - 0,001K^2 - 0,087M^2 - 0,004O^2 - 0,013KM + 0,003OK + 0,008MO. \quad (13)$$

Формула расчета коэффициента энергетической эффективности имеет вид

$$\eta_{\text{ээ}} = \frac{\left( 3,866 + 0,057K - 7,807M + 0,041O - 0,001K^2 - 0,087M^2 - 0,004O^2 - 0,013KM + 0,003OK + 0,008MO \right)}{4,6951 - 1,0062O + 0,0008O^2 - 0,00004O^3}. \quad (14)$$

Максимальные значения энергетического дохода ( $z=11,0$  МДж/кг СВ) и коэффициента энергетической эффективности ( $\eta_{\text{ээ}}=1,57$ ) достигаются при использовании в рационе коров ВТМ из топинамбура. Коэффициент детерминации моделей составляет  $R^2 = 0,95$ .

Наибольший энергетический доход достигается при скормлиании ВТМ топинамбура в рационе кур и использовании технологии предварительного механического обезвоживания растений перед сушкой растений.

Причем по базовой и новой технологиям энергетический доход составил соответственно -2,86 и 2,93 МДж/кг сухого вещества. Следовательно, производство искусственно обезвоженных кормов по базовой технологии экономически невыгодно и нецелесообразно.

Для прогнозирования энергетического дохода и определения области допустимых оптимальных значений параметров при оценке эффективности использования технологий и машинных комплексов целесообразно применять аппарат многочленов П.Л. Чебышева первого рода.

Эти многочлены определяются из тригонометрического тождества [11]  $T_n(\cos \varphi) = \cos(n \arccos x)$ ,  $x \in [-1, 1]$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , или рекуррентного соотношения

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x),$$

справедливого для каждого действительного значения  $x$ . Это рекуррентное соотношение позволяет последовательно найти:

$$\begin{aligned} T_0(x) &= 1, \\ T_1(x) &= x, \\ T_2(x) &= 2x^2 - 1, \\ T_3(x) &= 4x^3 - 3x, \\ T_4(x) &= 8x^4 - 8x^2 + 1, \\ T_5(x) &= 16x^5 - 20x^3 + 5x. \end{aligned} \quad (15)$$

Многочлены с единичным старшим коэффициентом определяются посредством формулы

$$\hat{T}_n(x) = \frac{1}{2^{n-1}} T_n(x). \quad (16)$$

П.Л. Чебышев доказал, что среди всех многочленов степени  $n$  с единичным старшим коэффициентом многочлен  $\hat{T}_n$  наименее уклоняется от нуля на сегменте  $[-1; 1]$  и никакой другой многочлен при той же нормировке таким свойством не обладает [11] и как следствие получаем, что многочлен  $\alpha + \hat{T}_n$  наименее уклоняется от заданной величины  $\alpha$ . Хорошо известно, что многочлены Чебышева составляют полную ортогональную систему с весовой функцией  $\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ :

$$\int_{-1}^1 \frac{T_n(x) T_m(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx = \begin{cases} 0, & n \neq m, \\ \frac{\pi}{2}, & n = m > 0, \\ \pi, & n = m = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Нормированные многочлены также ортогональны и с учетом постоянного множителя  $\frac{1}{2^{m+n-2}}$  их скалярное произведение имеет вид

$$\int_{-1}^1 \frac{\hat{T}_n(x) \hat{T}_m(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx = \frac{1}{2^{m+n-2}} \cdot \begin{cases} 0, & n \neq m, \\ \frac{\pi}{2}, & n = m > 0, \\ \pi, & n = m = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Если функция  $f(x)$  задана на отрезке  $[-1; 1]$  и интегрируема с весом  $\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ , то, определяя коэффициенты Фурье-Чебышева:

$$a_n = \int_{-1}^1 \frac{f(t) T_n(t)}{\sqrt{1-t^2}} dt,$$

этой функции поставим в соответствие ряд Фурье по многочленам Чебышева первого рода

$$f(t) \approx \sum_{n=0}^{\infty} a_n T_n(t), \quad (19)$$

или

$$f(t) \approx \sum_{n=0}^{\infty} b_n T_n(t), \quad (20)$$

где  $b_n = \frac{1}{2^{n-1}} a_n$ . Известно [12], что если  $f(t)$  непрерывна на отрезке  $[-1; 1]$  и ее модуль непрерывности

$$\omega(t, \delta) = \sup_{|\theta - \tau| < \delta} |f(\theta) - f(\tau)|$$

удовлетворяет на этом отрезке условию Дини

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \omega(t, \delta) \ln \frac{1}{\delta} = 0, \quad (21)$$

то  $f(t)$  разлагается в ряд Фурье по системе многочленов Чебышева

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n T_n(t),$$

сходящийся равномерно. Преобразование независимого переменного  $x = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \zeta$  позволяет получить наилучшее равномерное приближение функции на отрезке  $[a; b]$  отрезком ряда Фурье-Чебышева.

Следовательно, для восстановления неизвестной непрерывной функции  $f(t)$ , заданной посредством отдельных узлов экспериментальных данных, наименее отклоняющейся от заданного уровня  $\alpha$  целесообразно использовать аппарат многочленов Чебышева 1 рода для представления  $f(t)$  в виде  $m$ -го отрезка ряда Фурье-Чебышева:

$$f(t) \approx f_m(t) = \sum_{n=0}^m a_n T_n(t). \quad (22)$$

При этом последовательность частичных сумм  $f_m(t)$  равномерно сходится к  $f(t)$  при  $m \rightarrow \infty$ . Поэтому использование многочленов Чебышева улучшает параметры сходимости частичных сумм, в частности, при расчетах методом наименьших квадратов любой точности приближения можно достичь на компьютере за счет повышения уровня  $m$ .

На практике такой подход может быть реализован в системе компьютерной математики, работающей со специальными функциями, пакетом регрессии и символьными преобразованиями. В языке Maple многочлен  $T_n(t)$  обозначен через  $\text{ChebyshevT}(n, x)$ , поэтому регрессия по системе многочленов Чебышева 1 рода:

$$b_1 T_1(t) + b_2 T_2(t) + b_3 T_3(t) + b_4 T_4(t)$$

в языке Maple представлена в виде

$$b_1 * \text{ChebyshevT}(K) + b_2 * \text{ChebyshevT}(M) + b_3 * \text{ChebyshevT}(O) + b_4 * \text{ChebyshevT}(K * M) \quad (23)$$

Модель базовой и новой технологий прогнозирования энергетического дохода, энергетической эффективности (на примере суточного рациона кур-несушек) с использованием аппарата многочленов Чебышева П.Л. первого рода представлена уравнениями, которые имеют вид:

$$A_0 = -0,01591132147 \text{ChebyshevT}(K) + 0,2809772190 \text{ChebyshevT}(M) - 1,001993439 \text{ChebyshevT}(O) + 8,435613529 \text{ChebyshevT}(K * M) \quad (24)$$

$$A_1 = 0,01208470828 \text{ChebyshevT}(K) + 0,3053333564 \text{ChebyshevT}(M) - 1,016559838 \text{ChebyshevT}(O) + 7,778137169 \text{ChebyshevT}(K * M) \quad (25)$$

$$Z = 0,02799602975 \text{ChebyshevT}(K) + 0,5863105754 \text{ChebyshevT}(M) - 0,014566399 \text{ChebyshevT}(O) + 0,657476360 \text{ChebyshevT}(K * M) \quad (26)$$

$$\eta_{\text{э}} = \frac{\begin{pmatrix} 0,01208470828 \text{ChebyshevT}(K) + 0,3053333564 \text{ChebyshevT}(M) \\ -1,016559838 \text{ChebyshevT}(O) + 7,778137169 \text{ChebyshevT}(K * M) \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} -0,01591132147 \text{ChebyshevT}(K) + 0,2809772190 \text{ChebyshevT}(M) \\ -1,001993439 \text{ChebyshevT}(O) + 8,435613529 \text{ChebyshevT}(K * M) \end{pmatrix}} \quad (27)$$

При выбранных  $n$  экспериментальных точках по каждой из  $N$  факторных показателей среднее значение результатного показателя будет

$$Y_{cp} = \frac{1}{n} \sum_k Y_k. \quad (28)$$

Построчные дисперсии имеют вид

$$\begin{aligned} S^2_{Y_1} &= \frac{1}{n-1} \sum_k (Y_{k1} - Y_{cp1})^2, \dots, S^2_{Y_N} = \frac{1}{n-1} \sum_k (Y_{kN} - Y_{cpN})^2 \\ S^2_Y &= \frac{1}{N} \sum_k S^2_{Y_k} \end{aligned} \quad (29)$$

Коэффициенты  $b_i$  при многочленах Чебышева оцениваются на значимость с помощью дисперсии  $S^2_{b_i}$  коэффициентов регрессии: все коэффициенты регрессии оказались значимыми по Стьюденту, поскольку для каждого  $i$  выполняется  $|b_i| > S^2_{b_i}$ . Проверка воспроизводимости эксперимента обычно проводится по критерию Кохрена. Она сводится к проверке однородности построчных дисперсий  $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_k (Y_k - Y_{cp})^2$ , то есть дисперсий  $S^2_{Y_1}, \dots, S^2_{Y_N}$ .

Поскольку выполняется условие

$$\frac{S_{\max}^2}{\sum_k S_k^2} \leq G_{\alpha-1, N-d} \quad (30)$$

то гипотеза об однородности не отвергается. Табличное значение критерия Кохрена  $G_{\alpha-1, N-d}$  при уровне значимости 0,05 равно  $< 0,57$ , и выполнение неравенства  $0,26 < 0,57$  является основанием для вывода о воспроизводимости эксперимента, хотя воспроизводимость следует из систематической эксплуатации зеленого конвейера. Проверка адекватности модели проводится по критерию Фишера. Сначала находят дисперсию адекватности  $S_a^2 = \frac{n}{N-d} \sum_k (cp - Y_p)^2$  с учетом, что многочлен имеет  $d$  членов, а параметры  $n$  и  $N$  указаны выше. Затем находим значение

$$F_a = \frac{N \cdot S_a^2}{\sum_k S_k^2} \quad (31)$$

и значение  $F_{\alpha-1, N-d} = 9,55$ . Уравнение регрессии не отвергается, если  $F_a < F_{\alpha-1, N-d}$ . Имеет место неравенство  $0,26 < 9,55$  при уровне значимости 0,05, поэтому адекватность не отвергается. Коэффициент детерминации моделей составляет  $R^2 = 0,95$ , т.е. за счет выбора вида регрессии связь факторных и результатного показателей объясняется на 95 %, а неучтенные факторы составляют всего лишь 5 %.

Расчеты на ПЭВМ показали, что с увеличением концентрации обменной энергии и снижением затрат на производство ВТМ ( $M=0,61$  кг) в суточном рационе кур-несушек энергетический доход технологий возрастает. Независимо от содержания обменной энергии при увеличении массы ВТМ при фиксированных значениях затрат на ее производство ( $O=5,11$  МДж/кг СВ) коэффициент энергетической эффективности технологий возрастает. С увеличением массы ВТМ топиамбура в суточном рационе кур-несушек и уменьшением затрат на ее производство энергетический доход и коэффициент энергетической эффективности возрастают.

Полученные результаты позволяют осуществлять исчерпывающую оценку эффективности работы комплексов машин в целом и сформировать условия для последующего решения задач оптимизации таких параметров, как состав комплексов машин и технологических линий, обоснования и прогнозирования рациональной структуры производственных процессов.

### Литература

1. Эксплуатация технологического оборудования животноводческих ферм и комплексов / П.М. Рощин [и др.]. – М.: Колос, 1980. – 287 с.
2. Бандаренко Ю., Руснак Г. Анализ программы на урожай кукурузы // С.х. Молдавии. – 1987. – №9. – С. 28–29.
3. Цугленок Н.В., Матюшев В.В. Энергосберегающая технология и технические средства производства растительных экологически безопасных кормов в условиях Красноярского края / Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2005. – 146 с.
4. Цугленок Н.В., Матюшев В.В. Технология и технические средства производства экологически безопасных кормов / Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2005. – 126 с.
5. Цугленок Н.В. Энерготехнологическое прогнозирование структуры АПК // Вестн. КрасГАУ. – Красноярск, 2000. – №5. – С. 1–8.
6. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высш. шк., 1986. – 250 с.
7. Гаганов А.П. Влияние разного содержания концентратов в рационах на эффективность использования бычками обменной энергии // Прогрессивные технологии заготовки и использования кормов: сб. науч. тр. ВНИИ кормов. – М.: 1987. – №37. – С. 107–113.
8. Менькин В.К. Кормление животных. – М.: КолосС, 2003. – 360 с.
9. Хохрин С.Н. Кормление сельскохозяйственных животных. – М.: КолосС, 2004. – 692 с.

10. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. пособие / А.П. Калашников [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1986. – 352 с.
11. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены. – М.: Наука, 1976. – 328 с.
12. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения): учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. дом ООО «ОНИКС 21 век», 2005. – 400 с.



УДК 548

Н.В. Цугленок, В.В. Матюшев, Г.И. Цугленок

### КОНЦЕПЦИЯ УСТОЙЧИВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЗАГОТОВКИ КОРМОВ

*Статья посвящена формированию рационального технологического комплекса заготовки кормов с устойчивыми процессами. Полученные методы и результаты позволяют исключить несовершенные операции и тем самым достичь стабильности и управляемости системы заготовки кормов.*

**Ключевые слова:** корм, заготовка, технология, комплекс, эффективность.

N.V. Tsuglenok, V.V. Matyushev, G.I. Tsuglenok

### CONCEPT OF THE STABLE TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR FORAGE CONSERVATION

*The article is devoted to the efficient technological complex formation for forage conservation with stable processes. The techniques and results which are received allow to exclude the imperfect operations and thereby achieve stability and controllability of the forage conservation system.*

**Keywords:** forage, conservation, technology, complex, efficiency.

Ведущая роль в широкой программе развития сельскохозяйственного производства принадлежит интенсификации, базирующейся на все возрастающем использовании в этой отрасли топливно-энергетических ресурсов. Повышение урожайности сельскохозяйственных растений и продуктивности животных сопровождается созданием современных технических средств и условий для их жизнедеятельности, а также проведением необходимых мероприятий по защите живых организмов от воздействия внешних факторов. Все это требует значительных затрат энергии. И чем современнее сельскохозяйственное производство, чем крупнее его масштабы, тем больше оно нуждается в дополнительных энергоресурсах. Эта тенденция четко прослеживается в аграрном секторе всех стран мира [1].

Функционально процесс управления энергопродуктивности кормопроизводства может быть представлен системой энергетических взаимосвязей с отражением в явном виде целей каждой подсистемы, выраженных в одних и тех же единицах и подчиняющихся системной иерархии для возможности рассмотрения компромиссных решений и сравнения различных вариантов применения отдельных технологий или технологических комплексов в целом при производстве кормов.

По существу, ведение сельскохозяйственного производства можно рассматривать как управление экосистемой с целью получения продукции растениеводства и животноводства, необходимых для питания или сырья, на основе использования дополнительных источников энергии и материалов.

**Цель исследований** – разработать комплексный подход по созданию энергосберегающих технологических комплексов производства и заготовки высокопродуктивных растительных кормов.

**В задачи исследований входило:** структурно-логическое проектирование управления энергопродуктивностью кормопроизводства;

формирование структуры механизированных операций машинной системы;

разработка имитационного алгоритма оптимизации комплекса производства и заготовки кормов.

Объектами исследования являются устойчивые технологические комплексы, адаптированные для данной территории. Используются методы имитационного моделирования.