

## Внедрение энергоэффективных технологий в животноводческом комплексе

### Юрий Васильевич Забайкин

Кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов  
Российский государственный университет нефти и газа НИУ им. И.М. Губкина  
Москва, Россия  
79264154444@yandex.com  
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 05.11.2023

Принята 26.12.2023

Опубликована 15.03.2024

УДК 636.084.7

EDN HELWDO

BAK 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)  
OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### Аннотация

В контексте российской аграрной сферы, перспективы прогресса в секторе животноводства обусловлены сложным взаимодействием экономических, логистических и экологических факторов. Эти элементы определяют траектории усовершенствования и укрепления позиций продукции на международных рынках. Достижение указанных целей подразумевает ориентацию на ключевые тенденции, направленные на увеличение производительности и эффективности операций в животноводческих хозяйствах. В дискурсе данной статьи акцентируется внимание на стратегиях повышения производительности в отрасли скотоводства через применение методов математического моделирования и экономические оценки критериев эффективности. Исследователи предпочли параметры, утвердившиеся в международной практике, включая критерии, связанные с оптимизацией энергопотребления предприятий, и разработали комплексную экономическую модель, основанную на необходимости улучшения функциональных характеристик предприятий. Специфически, объектом анализа выступает сфера производства молока, которая сталкивается с острой конкуренцией, эманацирующей не только от классических производителей молочных продуктов, но и от производителей альтернативных продуктов. В контексте исследования представлены данные по производственным объемам, энергетическим и массовым характеристикам продукции, а также анализируется влияние сокращения энергозатрат на эффективность молоководческих предприятий в агрегате. Исследование включает модель, демонстрирующую экономическую выгоду от снижения энергетических затрат через модернизацию, а не полную реконструкцию производственных комплексов.

### Ключевые слова

животноводство, молоководство, снижение затрат, экономия энергии, развитие.

### Введение

Переосмысление экономических аспектов и энергетической эффективности в секторе аграрного производства Российской Федерации, в частности в отрасли производства молочной продукции, является ключевым фактором для достижения устойчивого развития и повышения конкурентоспособности на национальном и международном уровнях. Процесс глобализации и интеграция рыночных механизмов способствуют увеличению доли затрат на энергоносители в общей структуре издержек производства сельскохозяйственной продукции, подчеркивая значимость оптимизации энергопотребления (Godinot, 2015). Особенно это касается отрасли молоководства, где

издержки на энергоресурсы заметно снижают потенциал конкурентоспособности молока и молочной продукции как на внутреннем, так и на внешнем рынках (Chen, 2017).

Стратегическое направление в управлении энергетическими ресурсами предполагает разработку и внедрение энергосберегающих технологий и методик, что подразумевает не только сокращение объемов потребления энергоресурсов, но и повышение общей экономической эффективности производственного процесса (Roma, 2015). Тем не менее исследования в области минимизации энергоемкости в агропромышленном комплексе, в частности в секторе производства молока, продолжают оставаться актуальными и требуют дополнительного изучения и аналитического осмысления (Derner, 2017).

Производственная эффективность в аграрном секторе, а в частности в молочном скотоводстве, напрямую зависит от обеспеченности животных качественным кормом. В России затраты на кормление животных существенно превышают показатели, зафиксированные в странах с развитым агропромышленным сектором, что обусловлено неоптимальным распределением кормовых ресурсов и их недостаточным белковым составом (Naskar, 2012; Mottet, 2017).

Актуальность применения энергосберегающих технологий в процессе производства кормов обусловлена стремлением к оптимизации производственного цикла, включая выбор высокоурожайных и малоэнергозатратных культур, развитие культурных пастбищ и внедрение передовых методик хранения кормов с целью снижения дополнительных энергетических издержек (Soren, 2012).

Согласно исследованиям Qin (2000), наиболее энергетически эффективными и сбалансированными по нутриентному составу выступают зернофуражные культуры. Так, энергоемкость производства озимой пшеницы составляет 32,3 кг условного топлива на единицу продукции и 365,1 условного топлива на единицу продукции в протеиновом эквиваленте. Аналогичные показатели для ярового ячменя – 36,4 кг и 492,9 кг, для кукурузы на зерно – 40,2 кг и 680,8 кг соответственно. Зеленая масса улучшенных пастбищ характеризуется энергоемкостью 34,6 условного топлива на единицу продукции и 245,1 кг условного топлива на единицу продукции в пересчете на протеин. Для зеленой массы однолетних и многолетних трав, сена из них, сенажа и бахчевых кормовых культур эти показатели составляют 56,3 кг и 399,2 кг, 57,1 кг и 398,4 кг, 28,5 кг и 331,7 кг, 42,6 кг и 512 кг соответственно (Lee, 2010).

Ключевыми векторами снижения энергозатратности кормопроизводства и оптимизации энергоемкости рационов для сельскохозяйственных животных являются: повышение урожайности кормовых культур; минимизация количества и энергоемкости технологических операций; имплементация энергосберегающих технологий (пунктирный посев кормовых культур пневматическими сеялками, выполнение технологических операций на стационаре с использованием электропривода, редуцирование доз энергоемких минеральных азотных удобрений за счет увеличения доз органических удобрений с низкой энергоемкостью, применение интегрированной системы фитосанитарной защиты, позволяющей в 15-20 раз снизить энергоемкость по сравнению с химическими методами); балансирование кормов по энергии, белку и аминокислотам; пастбищное использование кормовых угодий; силосование кормов путем предварительного прессования зеленой массы в полевых условиях; приготовление кормовых реагентов без термической обработки.

Перспективным направлением редуцирования энергоемкости молочного производства выступает повышение продуктивности коров посредством полноценного кормления, использования высокопродуктивных пород, улучшения их генетического потенциала (Gracz, 2018). К мероприятиям, нацеленным на повышение продуктивности коров, относятся (Vanderholm, 2016): использование кормовых рационов, сбалансированных по энергии, белку, аминокислотам; внедрение специализированных, высокопродуктивных пород крупного рогатого скота; пролонгация срока продуктивного использования коров; применение необходимых ветеринарных препаратов; неукоснительное соблюдение режима работы фермы, недопущение остановки технологических процессов по уходу за животными (доение, поение, кормление, удаление навоза).

При двукратном увеличении продуктивности коров (с 3600 кг до 7200 кг) энергоемкость производства молока редуцируется в 1,54 раза, затраты кормов в расчете на 1 ц молока – в 1,26 раза,

себестоимость – в 1,22 раза (при этом стоимость кормов (без учета стоимости энергоресурсов) снижается на 21,8%, энергоресурсов на обслуживание молочной фермы – на 19,4%, а стоимость энергоресурсов на производство кормов – на 44,5%) (Archimede, 2014).

Значительные потери энергии обусловлены несовершенством объемно-планировочных и конструктивных решений животноводческих зданий и сооружений: ограждающих конструкций, въездных и оконных проемов, отсутствием тамбуров и чердачных перекрытий, необоснованными пространственными разрывами между фермами (Sejian, 2015). Только по этой группе факторов общее энергопотребление возрастает на 10-15% (Silva, 2017).

Для минимизации теплопотерь ограждающих конструкций животноводческих помещений целесообразно редуцировать их удельную площадь в расчете на одно скотоместо и повышать уровень теплозащиты (Niu, 2016). Переход от павильонной к блочной застройке позволяет снизить теплопотери здания на 34-40% (Mamedov, 2017). При блочной застройке по сравнению с павильонной, площадь, занимаемая фермой на 1000 коров, уменьшается от 9,5 до 3,3 га, общий периметр всех зданий (в расчете на одну голову) – от 1,3 до 0,42 погонных метра, площадь стен – от 3,39 до 1,67 кв. м соответственно.

Одним из основополагающих векторов энергосбережения в строительстве коровников являются конструктивные мероприятия, ассоциированные с повышением термического сопротивления ограждающих конструкций (van Zanten, 2016). Отдельные специалисты позиционируют строительные материалы как новый источник энергии. Одновременно этот источник может характеризоваться невысокой стоимостью и меньшей материалоемкостью. Так, редуцирование коэффициента теплопередачи стен с 4 до 2,5 кДж/(ч/куб. м/°С) и перекрытия с 2,8 до 1,6 кДж/(ч/куб. м/°С) обеспечивает сокращение теплопотерь через ограждающие конструкции в помещениях для КРС до 30%.

### **Материалы и методы исследования**

Проведен углубленный энергетический анализ фермы с беспривязным боксовым содержанием 400 голов крупного рогатого скота. В ходе исследования определены показатели энергоемкости и энергозатратности ключевых компонентов производства молока (Rukavishnikova, 2018). Для вычисления данных параметров использовались технологические операции и энергетические эквиваленты (Somwagu, 1996). При калькуляции совокупных энергозатрат на производство молока были приняты следующие исходные данные:

- среднегодовое поголовье животных (гол.): дойные коровы - 406; нетели – 16; телята в возрасте до 3 месяцев – 130; молодняк от 3 до 6 месяцев – 96;
- продолжительность зимнего периода – 220 дней, летнего – 145; годовой удой на одну корову – 3550 кг молока; ежегодная выбраковка животных – 22%;
- 60% отелов приходится на первое полугодие и 42% – на второе; выход телят на 100 коров – 92; средняя живая масса коровы – 557 кг;
- средняя живая масса телят при рождении – 32 кг, при реализации в 6-месячном возрасте – 1487 кг.

Предусмотрен односменный режим работы обслуживающего персонала, за исключением операторов по уходу за животными, которые трудятся в две смены. Продолжительность рабочей недели составляет 42 часа при 5-дневной рабочей неделе. Численность обслуживающего персонала – 34 человека.

В связи с волатильностью валютного курса все экономические показатели и расчеты эффективности финансовой модели приведены в долларах США.

### **Результаты и обсуждение**

Чтобы уменьшить массу конструкций целесообразно применять комплексные или комбинированные конструкции, в которых несущую функцию выполняют конструктивные плотные бетоны, а теплоизолирующую – легкие материалы. Перспективным является применение металлических конструкций с использованием полимеров и материалов на основе отходов сельскохозяйственного и промышленного производства. Перспективным направлением в области

энергосбережения является переход на новые типы конструкций ограждения – самонесущие и навесные наружные стены: деревянные с эффективными утеплителями, металлические панели – «сэндвичи» и тому подобное.

Затраты энергии на потребленную электроэнергию:

$$E_e = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m q_e N_i t_i n_i = 4,21 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Затраты совокупной энергии при потреблении жидкого топлива, а также смазочных материалов:

$$E_{PMM} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m q_{ni} g_{ni} n_i t_i = 1,46 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Затраты совокупной энергии при потреблении тепловой энергии:

$$E_T = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n q_{mi} M_i = 3,75 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Полная энергоемкость восстановления поголовья коров на протяжении года составила 18219,08 ГДж с учетом того, что поголовье коров, способных к отелу, составляет 98 голов.

В этом случае удельные затраты энергии при восстановлении поголовья будут составлять 12,7 МДж/кг.

Суммарная энергоемкость при производстве кормов составляет:

$$E_{KB} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n q_{vki} B_i C_i = 15,82 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Суммарная энергоемкость при подготовке кормов составляет:

$$E_{KP} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n q_{kpi} B_i C_i = 18,5 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Из расчета внесения на одну корову за сутки 0,6 кг подстилки, ее годовая масса будет составлять 118 т. Таким образом суммарная энергоемкость производства подстилки будет составлять:

$$E_p = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m q_{mi} B_i L_i = 1,2 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Суммарная энергоемкость потребленной животными в течение года воды составит:

$$E_v = \frac{q_v}{W} \sum_{i=1}^m g_v n_i = 0,0146 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Суммарная энергоемкость зданий и сооружений, машин и оборудования, которые амортизированы при производстве продуктов животноводства, будет составлять:

$$E_{ovf} = E_{zm} + E_b + E_{kc} = 1,078 + 0,6 + 0,12 = 1,898 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Суммарная энергоемкость рабочей силы:

$$E_p = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m q_{pi} n_i t_i = 2,34 \text{ МДж} / \text{кг}$$

По результатам проведенных расчетов определена полная энергоемкость при производстве продуктов животноводства в МДж на единицу изготовленной продуктов (1 кг):

$$E_{pt} = E_{pe} + E_{vpsm} + E_p + E_{ovf} = 61,86 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Энергоэквивалент производства молока составляет 3,07 МДж/кг. Таким образом коэффициент энергетической эффективности составляет:

$$K_{ee} = \frac{E_{vip}}{E_{pt}} 100\% = \left( \frac{3,07}{61,86} \right) 100\% = 4,9\%$$

На основе биоэнергетической оценки установлено, что коэффициент энергоэффективности производства молока составляет около 5%, что является достаточно низким. С учетом сопутствующей оценки (телята и их прирост, выбракованные животные) и косвенной (экскременты) он может вырасти в три-четыре раза.

В структуре удельных затрат энергии при производстве молока наибольший удельный вес приходится на корма, поголовье скота и энергоносители. Удельным весом для подготовки воды, а также применение ветеринарных препаратов пренебрегаем, поскольку они являются незначительными.

Таблица 1. Структура удельных затрат энергии по видам

Виды затрат	Удельные затраты энергии	
	МДж/кг	%
Электроэнергия	4,21	6,8
Топливо и смазочные материалы	1,46	2,4
Тепловая энергия	3,75	6,0
Поголовье скота	12,7	20,5
Корма	34,3	55,4
Подстилка	1,20	2,0
Основные производственные фонды	1,90	3,1
Работа	2,34	3,8
Всего	61,86	100

Усугубление экологической проблематики в совокупности с повышением стоимости традиционных энергоресурсов обусловили значительный интерес к технологиям биоконверсии органических отходов (биомассы) с целью получения энергии. Тот факт, что животные недостаточно эффективно усваивают энергию растительных кормов и более половины этой энергии утилизируется непродуктивно, трансформируясь в навоз, позволяет рассматривать органические отходы не только как ценное сырье для производства удобрений, но и как мощный возобновляемый источник энергии.

В послевоенный период, озаменованный энергетическим кризисом, в ряде европейских стран для компенсации дефицита жидкого топлива были инициированы исследования по получению биогаза из отходов животноводства, в частности, из экскрементов сельскохозяйственных животных. Эксплуатация нескольких десятков установок, сконструированных в тот период, продемонстрировала возможность переработки животных экскрементов путем метаногенеза. Полученный биогаз после компрессии применялся преимущественно для привода тракторов. Однако в условиях конкуренции с недорогими видами традиционного топлива малопродуктивное и трудоемкое производство биогаза и его утилизация оказались экономически нецелесообразными.

В настоящее время ситуация кардинально изменилась. Острый дефицит энергии, сопровождающийся ростом цен на нефть, как перманентно действующий фактор мировой экономики, обусловил инициацию ряда научно-исследовательских программ, ориентированных на поиск и практическое использование дополнительных локальных топливных ресурсов. В этих условиях проблема переработки биомассы в энергетический биогаз вновь выдвигается на первый план.

Следует акцентировать внимание на том, что причины возобновления интереса к анаэробной ферментации выходят за рамки, ограниченные исключительно энергетическими целями. Переход животноводства на индустриальную основу и ассоциированная с этим концентрация животных на крупных фермах и комплексах приводит к резкому увеличению отходов и стоков. Практика сброса животноводческих отходов на земли, не используемые в сельскохозяйственном производстве, в

современных условиях недопустима, а навоз и его стоки становятся важными источниками загрязнения окружающей среды.

Одним из путей рационального использования навоза и стоков животноводческих ферм является их метановое сбраживание (метаногенез), который оказался эффективным способом обеззараживания жидкого навоза и сохранения его в качестве удобрения при одновременном получении локального энергоносителя – биогаза.

В естественных условиях разрушение любых видов биомассы, в том числе животного навоза, происходит в гумусе почвы путем разложения на элементарные соединения под действием разлагающих организмов, грибов, бактерий. Для данного процесса желательны влажность, тепло и отсутствие света. На конечной стадии процесса полное разложение осуществляется под действием большого количества бактерий, классифицируемых как аэробные или анаэробные. Аэробные бактерии развиваются преимущественно в присутствии кислорода, с их участием углерод биомассы окисляется до  $\text{CO}_2$ . В замкнутых объемах с недостаточным поступлением кислорода из внешней среды развиваются анаэробные бактерии, также существующие за счет разложения углеводов. В конечном итоге в результате их жизнедеятельности углерод распределяется между полностью окисленным  $\text{CO}_2$  и полностью восстановленным  $\text{CH}_4$ . Питательные вещества, такие как растворимые соединения азота, сохраняются в качестве удобрений в почвенном гумусе. Реакции разложения биомассы, осуществляемые микроорганизмами, также относятся к процессам ферментации, однако для процессов, протекающих в анаэробных условиях, зачастую предпочтителен термин «брожение» («сбраживание»).

Биогаз представляет собой смесь  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , образующуюся в специальных установках – биогазогенераторах (метантенках), конструкция и режим работы которых обеспечивают максимальное выделение метана. Энергия, получаемая при сжигании биогаза, может достигать от 60 до 90% исходной энергии, которой обладает сухой исходный материал. Однако газ получают из жидкой массы, содержащей 95% воды, поэтому на практике выход достаточно трудно определить. Другим и, возможно, весьма важным преимуществом процесса является то, что в его отходах содержится значительно меньше патогенных организмов, чем в исходном материале.

Биохимические процессы при сбраживании протекают в три стадии, каждая из которых обеспечивается специфической группой анаэробных бактерий.

1. Нерастворимые биологические материалы, подвергающиеся разрушению (например, целлюлоза, полисахариды, липиды), расщепляются до углеводов и жирных кислот. В функционирующем биогазогенераторе данный процесс осуществляется при температуре  $25^\circ\text{C}$  в течение 24 часов.

2. Кислотопродуцирующие бактерии синтезируют преимущественно уксусную и пропионовую кислоты. Эта стадия при аналогичной температуре также длится сутки.

3. Метанобразующие бактерии в течение примерно 14 суток при температуре  $25^\circ\text{C}$  полностью сбраживают исходные продукты, генерируя 70%  $\text{CH}_4$  и 30%  $\text{CO}_2$  с незначительными примесями  $\text{H}_2$  и возможно  $\text{H}_2\text{S}$ .  $\text{H}_2\text{S}$  может иметь существенное значение. Продуцентами водорода являются некоторые виды бактерий, в частности, клостридий.

Таким образом, структурный анализ поголовья домашних животных свидетельствует о доминирующей роли свиноводства в животноводстве (более 40%). Однако при рассмотрении объема выхода навоза и потенциального получения биогаза его доля редуцируется до 7,5-8%.

Следует также принять во внимание, что фактически свиной навоз при удалении из помещений содержит стоки, которые в наибольшей степени загрязняют окружающую среду и требуют, в первую очередь, применения эффективных технологий переработки, например, энергосберегающей технологии анаэробного сбраживания биомассы. Основным источником производства биогаза может служить навоз и животноводческие стоки с ферм крупного рогатого скота, составляющие более 92%, при этом доля потенциальной энергии из навоза поголовья коров достигает 45%. Поголовье свиней в совокупности с поголовьем молочного скота составляет 62%, а выход экскрементов и получение биогаза может составить 57 и 53% от общего количества соответственно.

Экономическое состояние, обеднение почв вследствие катастрофического снижения внесения необходимого количества удобрений, и особенно топливно-энергетический кризис последних лет, остро

выявили неудовлетворительное положение с практическим внедрением природоохранной энергосберегающей технологии сбраживания навоза и соответствующего комплекта оборудования BIODEV (биоэнергетических устройств).

Опыт по внедрению метаногенеза в сельскохозяйственную практику показывает, что в иерархии эффективности данного метода первое место занимает его экологический эффект, затем следует эффект от получения высококачественных удобрений, и только третье место занимает зачастую недооцененная или изолированно оцениваемая энергетическая составляющая процесса.

Вместе с тем многие хозяйственники считают, что главным назначением биогазовых установок является получение биогаза, служащего дополнительным источником локального энергоснабжения. Оценивая с этой точки зрения экономическую эффективность переработки биомассы, они не учитывают, что биогазовые установки являются альтернативным или дополнительным оборудованием для переработки навоза и его стоков, а поэтому расходы на их создание и эксплуатацию должны быть отнесены к оборудованию, необходимому для обеззараживания навоза и производства удобрений, а также систем мероприятий по защите окружающей среды. В этом случае биогазовые установки всегда будут иметь положительный экономический эффект.

Для животноводческих ферм возможно применение технических средств автономного энергоснабжения с использованием нетрадиционных источников энергии, а именно ветра, солнца, тепловой энергии нетрадиционных топлив.

Применению указанных энергоисточников на малых фермах способствует то, что:

- большинство технологических процессов на них выполняется на стационарном оборудовании;
- существует возможность составить график загрузки машин и механизмов, исключающий пиковое потребление энергии, что позволяет использовать источник энергии небольшой мощности;
- имеется возможность создать ресурсо- и энергосберегающие технологии и процессы с полным использованием побочных продуктов и отходов производства.

Для реализации технологических процессов в качестве источника энергии на животноводческих фермах можно использовать:

- солнечную энергию – для сушки кормов при активном вентилировании, предварительном подогреве воды и технологических процессов сушки помещений и продукции;
- энергию ветра – для привода электрогенераторов, источника механической энергии при подаче воды, привода кормоизмельчителей и навозоуборочных механизмов, помп и компрессоров;
- отходы растениеводства – как энергоресурс для получения тепловой энергии в технологических целях и обогрева помещений, получения газа для газогенераторных двигателей внутреннего сгорания.

При этом отходы используются в виде брикетов. Пастбища, как правило, удалены от линий электропередач. Поэтому на летних пастбищах используют автономные источники. Для подогрева воды можно применять гелиоводонагреватели, а для получения электроэнергии – гелиопреобразователи, микро-ГЭС (при наличии реки).

Гелиоводонагревательные установки для передвижных доильных станций отличаются от привычных стационарных гелиосистем, а для мобильных доильных станций – своей портативностью. С наступлением весеннего сезона их доставляют к месту монтажа на тракторах, а по завершении сезона возвращают обратно.

Транспортировка гелиоводонагревателя вместе с доильной станцией требует обеспечения его легкой сборки и адаптированности к многократным циклам монтажа и демонтажа. Кроме того, на пастбищах, как правило, отсутствуют грузоподъемные механизмы. Техническая вода даже при максимальных температурах нагрева (до +70°C) должна отвечать строгим критериям качества, исключающим наличие следов ржавчины, посторонних запахов и привкусов, которые могут оказать негативное влияние на органолептические свойства молока. Модульная конструкция гелиоводонагревателей обеспечивает универсальность и возможность формирования необходимой площади принимающей поверхности для объектов, расположенных на широте 45, 50°.

Также на животноводческих фермах применяется комплекс машин и автоматизированных механизмов, предназначенных как для приготовления, так и для раздачи кормов сельскохозяйственным животным и птице. Так, для раздачи кормов животным преимущественно используются традиционные ленточные и пластинчатые транспортеры, функционирующие на основе бесконечного (замкнутого) полотна, то для раздачи кормов птице внедряются инновационные виды механизированных средств, обеспечивающих одновременное смешивание, транспортировку и раздачу кормовых смесей в замкнутых трубчатых магистралях, что способствует повышению эффективности реализации данных технологических процессов.

Трубчатые скребковые (шайбовые) конвейеры осуществляют транспортировку сыпучих материалов по сложным трассам, включающим вертикальные, криволинейные и горизонтальные участки. Системы транспортировки сыпучих кормов позволяют подавать их по стационарным трассам сложной конфигурации. Как правило, системы включают основной привод, приемный модуль, транспортные трубы, в которых на цепях или тросах закреплены шайбы, и выходы из кормодозатора.

В процессе транспортировки к основной массе корма, после прохождения ею первого вертикального участка, дозированно добавляются биодобавки, которые в ходе перемещения смешиваются с основной массой корма перед выгрузкой для кормления животных. Данный процесс может эффективно осуществляться при незначительных дозах добавок, однако для смешивания и одновременного транспортирования кормовых смесей необходима разработка специальных рабочих органов, обеспечивающих одновременное выполнение данного технологического процесса. Однако, вышеприведенный рабочий орган характеризуется громоздкостью и обеспечивает лишь транспортировку кормового материала.

С целью обеспечения одновременного смешивания и транспортировки с последующей раздачей кормов при общем снижении материалоемкости и энергозатрат на реализацию технологического процесса разработаны инновационные типы соответствующих рабочих органов транспортеров-смесителей, включающих направляющий кожух трубчатой формы, в котором расположены шарнирно соединенные скребковые секции с рабочей поверхностью в виде шайб. Каждая секция изготовлена из прутка и содержит кольцо и крюки. Кольцевая часть секций охвачена полиамидным диском, Г-образная цилиндрическая форма которого переходит в конусную с центральным внутренним отверстием. Рабочий орган формируется путем зацепления свободного крюка одной секции с лишним крюком соседней секции, образуя тем самым цепное соединение шарнирных секций.

Скребковый транспортер-смеситель приводится в движение приводным зубчатым колесом (на схеме не показано), контактирующим с конической поверхностью диска. При перемещении рабочего органа в кожухе компоненты сыпучих кормов увлекаются дисками и частично пересыпаются через центральные отверстия дисков, смешиваясь в однородную смесь, которая транспортируется в зону выгрузки.

Экономический эффект от применения подобного транспортера в сравнении с базовым образцом отечественного производства, спроектированным с учетом последних тенденций в области энергоэффективных технологий, заключается в снижении металлоемкости рабочего органа, а также в уменьшении энергозатрат на процесс транспортировки. Кроме того, в процессе транспортировки осуществляется смешивание компонентов смеси сыпучих грузов.

Себестоимость изготовления рабоче-тягового транспортера определяется

$$C_0 = C_m + C_{sh} + C_r$$

где  $C_m$  – стоимость материалов в себестоимости транспортера, долл;  $C_{sh}$  – стоимость шайбовых скребков;  $C_r$  – стоимость изготовления и сборки рабочего органа, долл.

Стоимость материалов в себестоимости определяется

$$C_m = mLq$$

где  $m$  – масса погонного метра рабочего транспортера;  $L$  – общая длина исходя из геометрических размеров трассы ( $L = 12\text{м}$ );  $q$  – средняя стоимость 1 кг чистой массы материала ( $q = 18$  долл/кг).



Исходя из геометрических размеров разработанных блоков, после их взвешивания получили:  
нового  $m_n = 30$  г;  
базового  $m_b = 47$  г.

При шаг скребков = 100 мм, один погонный метр тягового органа будет составлять:

$$m_{on} = m_n \cdot 10 = 300 \text{ г} = 0,3 \text{ кг}$$

$$m_{ob} = m_b \cdot 10 = 470 \text{ г} = 0,47 \text{ кг}$$

Тогда общая стоимость материала, из которого изготовили рабоче-тяговый орган будет составлять:

$$\text{нового: } C_{mn} = m_{on} Lq = 64,8 \text{ долл.}$$

$$\text{базового: } C_{mb} = m_{ob} Lq = 101,52 \text{ долл.}$$

В новом образце используются разработанные шайбовые скребки, причем их себестоимость зависит от типа производства. При изготовлении их в серийном производстве стоимость одного скребка при минимальной партии 1000 шт составляет 1,6 долл. Для транспортера-смесителя при длине трассы 12 м себестоимость новых шайбовых скребков будет составлять:

$$C_{shn} = C_{sh0} \frac{L}{t} = 0,16 \frac{12}{0,1} = 19,2 \text{ долл.}$$

Учитывая, что масса одного погонного метра базового рабочего органа в  $0,47 / 0,3 = 1,57$  является большей чем нового, то себестоимость базовых шайбовых скребков будет составлять  $C_{shb} = 19,2 * 1,57 = 30,1$  долл.

Технологическая операция изготовления и сбора рабоче-тягового органа составляет

$$C_r = mLk$$

где  $k$  – коэффициент стоимости технологической операции в отношении стоимости материала,  $k_n = 5$ ,  $k_b = 5,5$ :

$$C_{rn} = m_{on} Lk_n = 18$$

$$C_{rb} = m_{ob} Lk_b = 31$$

Тогда себестоимость изготовления рабочего органа транспортера-смесителя длиной составит:

$$\text{нового образца: } C_{0n} = C_{mn} + C_{shn} + C_{rn} = 64,8 + 19,2 + 18 = 102$$

$$\text{базового образца: } C_{0b} = C_{mb} + C_{shb} + C_{rb} = 101,5 + 30,1 + 31 = 162,6$$

Нормативная прибыль определяется

$$P = C_0 \frac{P_0}{100}$$

где  $C_0$  – себестоимость рабоче-тягового органа, долл;  $P_0 = 14...16\%$  – нормативная рентабельность, принимаем  $P_0 = 15\%$ .

Тогда для нового образца:

$$P_n = 102 \frac{15}{100} = 15,3$$

Для базового образца:

$$P_v = 162,6 \frac{15}{100} = 24,39$$

Цена рабочего органа транспортера-смесителя

$$Ch_r = C_0 + P$$

Для нового образца:

$$Ch_{rn} = C_{0n} + P_n = 102 + 15,3 = 117,3$$

Для базового образца:

$$Ch_{rb} = C_{0b} + P_b = 162,6 + 24,4 = 187$$

Балансовая цена рабоче-тягового органа транспортера-смесителя составляет

$$Ch_b = 1,2Ch_r$$

Для нового образца:

$$Ch_{bn} = 1,2Ch_{rn} = 140,8$$

Для базового образца:

$$Ch_{bb} = 1,2Ch_{rb} = 224,4$$

Экономическая эффективность от снижения материалоемкости составляет

$$E_1 = Ch_{bb} - Ch_{bn} = 83,6$$

Как было установлено, значение усилия на процесс транспортировки для разработанного рабоче-тягового органа со скребками меньше по сравнению с базовым примерно на 7% при транспортировке скорости  $v = 0,3$  м/с,  $Ft_n = 0,4$  кп, а  $Ft_b = 0,435$  кт. Тогда разница мощности за один час составит

$$N_0 = N_1 - N_2 = Ft_b v - Ft_n v = 0,01$$

Экономия электроэнергии будет в значительной степени зависеть от объемов производства, поэтому условно рассчитаем экономическую эффективность на перемещение  $V = 1000$  т кормо смеси.

При производительности транспортера-смесителя  $1,6...2$  т/ч, тогда расход электроэнергии составят:

$$W = N_0 \frac{V}{P} = 6,25$$

где  $V$  – масса кормо смеси, т;  $P$  – производительность транспортера-смесителя, т/ч.

При цене на электроэнергию за 1 кВт/ч – 1,14 долл, экономический эффект составит

$$E_2 = WC = 7,13$$

где  $W$  – расход электроэнергии, кВт;  $C$  – себестоимость электроэнергии, долл.

Так как базовый транспортер не осуществляет процесс смешивания, то необходимо выполнить дополнительную операцию на другом оборудовании. Согласно тарифов комбикормового предприятия, себестоимость смешивания 1 т кормовой смеси составляет порядка 2,642 долл. за 1 т. При массе продукции 1000т, затраты будут составлять:

$$C_z = mC_1 = 2642$$

Новый транспортер-смеситель данную операцию осуществляет в течение времени транспортировки, тогда:

$$E_z = C_{zb} - C_{zn} = 2642$$

Общая экономическая эффективность от использования нового транспортера-смесителя при перемещении 1000т сухих грузов, от уменьшения металлоемкости, энергозатрат и затрат смешивания составляет:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 2732,7$$

Рассчитанный экономический эффект не учитывает улучшение процесса транспортировки за уменьшения ремонтных работ и улучшения эксплуатационных показателей, что значительно увеличит его абсолютное значение.

### Заключение

Таким образом, существенную роль в энергосбережении играют организационно-экономические мероприятия, к которым относятся:

- имплементация энергетического менеджмента, энергетического аудита, нормирования энергопотребления;
- повышение квалификации персонала;
- усиление материальной заинтересованности работников в энергосбережении.

В современных условиях все большую значимость приобретает необходимость наличия на фермах кадров с соответствующими знаниями, квалификацией и опытом. Необходимость обеспечения слаженного и четкого функционирования всех участков единого технологического процесса, высокая техническая оснащенность промышленных комплексов требуют высокого уровня квалификации всех работников. С повышением уровня механизации работ на фермах труд животноводов все в большей степени становится ассоциированным с функционированием механизмов и требует специального обучения и подготовки.

Кроме того, важным представляется, что аграрные предприятия, специализирующиеся на производстве молока, исходя из необходимости обеспечения своего существования в условиях энергетического кризиса, должны в частности:

- исследовать рынки энергетических ресурсов, обеспечивать информационную безопасность путем создания собственных банков информации, позволяющих принимать обоснованные решения относительно деятельности молочной фермы в условиях нестабильности потоков энергоресурсов, негативной динамики цен на них;
- реализовывать эффективный финансовый менеджмент с целью обеспечения высокой экономической и энергетической эффективности производства молока;
- осуществлять эффективный инновационный менеджмент энергосбережения путем создания специальной подсистемы управления энергосберегающими инновациями.

Таким образом, обобщив все вышесказанное, можно сделать вывод, что энергосбережение в молочном животноводстве представляет собой масштабную комплексную задачу, реализация которой возможна по основным направлениям: таким как совершенствование и внедрение энергосберегающих технологий, повышение продуктивности животных, использование энергосберегающих зданий и сооружений, имплементация организационно-экономических мероприятий по энергосбережению в молочном скотоводстве.

### **Список литературы**

1. Agapi S, Nehring R. A graph efficiency multiproduct model of corn/livestock farming: accounting for nitrate pollution // *Annals of Operations Research*. 1996. № 68(3). pp. 379-408.
2. Archimède H. Agroecological Resources for Sustainable Livestock Farming in the Humid Tropics. Ed. H. Ozier-Lafontaine and M. Lesueur-Jannoyer // *Sustainable Agriculture Reviews: Agroecology and Global Change*. Cham: Springer International Publishing, 2014. № 14. pp. 299-330.
3. Chen X., Wilfart A., Puillet L., Aubin J. A new method of biophysical allocation in LCA of livestock co-products: Modeling metabolic energy requirements of body-tissue growth // *The International journal of life cycle assessment*. 2017. № 22(6). pp. 883-95.
4. Derner J.D. Livestock production systems in rangeland systems. Ed. David D Briske // *Processes, Management and Challenges*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 347-72.
5. Godinot O. Relative nitrogen efficiency, a new indicator to assess crop livestock farming systems // *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. № 35(2). pp. 857-68.
6. Gracz W., Golimowski W., Butlewski K., Marcinkowski D. Analysis of the potential of methane emission and energy power from excrement of livestock in Poland. Ed. K. Mudryk, S. Werle // *Renewable energy sources: Engineering, Technology, Innovation*. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 139-49.
7. Lee H., Jeonghwan H., Hyun Y. A Study of the Energy Efficient MAC Protocol Apply to Ubiquitous Livestock Farming. Ed. T. Kim, Y. Lee, B. Kang, D. Šikezak // *Future Generation Information Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. pp. 699-707.
8. Mamedov G.B, Mamedov E.S. Method for estimating and analyzing an increase of efficiency of the ventilation system in a livestock house // *Russian Agricultural Sciences*. 2017. № 43(6). pp. 516-18.

9. Maurya V.P. 2012. Walking stress influence on livestock production. Ed. V. Sejian // *Environmental Stress and Amelioration in Livestock Production*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 75–95.
10. Mottet A. Climate change mitigation and productivity gains in livestock supply chains: Insights from regional case studies // *Regional environmental change*. 2017. № 17(1). pp. 129-41.
11. Nira S.M. Nutritional manipulations to optimize productivity during environmental stresses in livestock. Ed. V. Sejian // *Environmental Stress and Amelioration in Livestock Production*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2012. pp. 181-218.
12. Niu, Qigui, and Yu-You Li. 2016. Recycling of Livestock Manure into Bioenergy. Ed. O.P. Karthikeyan, K. Heimann, S.S. Muthu // *Recycling of Solid Waste for Biofuels and Bio-Chemicals*. Singapore: Springer Singapore, 2016. pp. 165-86.
13. Qin Fu, and Weiming Tian. 2000. Feeding the livestock: Technological Choice, Trade Policy and Efficiency. Ed. Y. Yang, W. Tian // *China's agriculture at the crossroads*. London: Palgrave Macmillan, 2000. pp. 98-117.
14. Rocco R. Life cycle assessment in the livestock and derived edible products sector. Ed. B. Notarnicola // *Life cycle assessment in the agri-food sector. Case studies, methodological issues and best practices*. Cham: Springer International Publishing, 2015. pp. 251-332.
15. Rukavishnikova I., Rumyantseva A. A methodical approach to assess the efficiency of renewable energy projects with regard to environmental component. Ed. S. Syngellakis, C. Brebbia // *Challenges and solutions in the russian energy sector*. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 193-200.
16. Sejian V. Introduction to concepts of climate change impact on livestock and its adaptation and mitigation Ed. V. Sejian, J. Gaughan, L. Baumgard, C. Prasad. // *Climate change impact on livestock: adaptation and mitigation*. New Delhi: Springer India. 2015. pp. 1-23.
17. Silva S., Rodrigues A., Ferraz A., Alonso J. An integrated approach for efficient energy recovery production from livestock and agro-industrial wastes eds. L. Singh, V.Ch. Kalia // *Waste biomass management – a holistic approach*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 339-66.
18. Soumen N. Genetic. Adaptability of livestock to environmental stresses. Ed. V. Sejian // *Environmental Stress and Amelioration in Livestock Production*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 317-78.
19. Vanderholm D.H. Management of livestock wastes for water resource protection. Ed. L.K. Wang, M.-H. S. Wang, Y.-T. Hung, N.K. Shammam // *Natural Resources and Control Processes*. Cham: Springer International Publishing, 2016. pp. 1-71.
20. Zanten V., Hannah H. E. Global food supply: Land use efficiency of livestock systems // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2016. № 21(5). pp. 747-58.

### **The introduction of energy-efficient technologies in the livestock sector**

**Yuri V. Zabaykin**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes

Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Moscow, Russia

7926415444@yandex.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 05.11.2023

Accepted 26.12.2023

Published 15.03.2024

UDC 636.084.7

EDN HELWDO

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### **Abstract**

In the context of the Russian agricultural sector, the prospects for progress in the livestock sector are determined by a complex interaction of economic, logistical and environmental factors. These elements determine the trajectories of improving and strengthening the position of products in international markets. Achieving these goals implies focusing on key trends aimed at increasing productivity and efficiency of operations in livestock farms. The discourse of this article focuses on strategies to increase productivity in the livestock industry through the use of mathematical modeling methods and economic evaluation of performance criteria. The researchers preferred the parameters established in international practice, including criteria related to the optimization of energy consumption of enterprises, and developed a comprehensive economic model based on the need to improve the functional characteristics of enterprises. Specifically, the object of the analysis is the field of milk production, which is facing intense competition emanating not only from classic dairy producers, but also from producers of alternative products. In the context of the study, data on production volumes, energy and mass characteristics of products are presented, as well as the impact of reducing energy consumption on the efficiency of dairy enterprises in the unit is analyzed. The study includes a model demonstrating the economic benefits of reducing energy costs through modernization rather than complete reconstruction of production complexes.

### **Keywords**

animal husbandry, dairy farming, cost reduction, energy saving, development.

### **References**

1. Agapi S., Nehring R. Graphical model of multi-product corn production/animal husbandry: accounting for nitrate pollution // *Annals of Operations Research*. 1996. No. 68(3). pp. 379-408.
2. Archimedes H. Agroecological resources for sustainable livestock production in the humid tropics. Edited by H. Ozier-Lafontaine and M. Lesueur-Jeannoter // *Reviews of sustainable agriculture: agroecology and global changes*. - Moscow: Springer International Publishing, 2014. - No. 14. - pp. 299-330.
3. Chen H., Wilfart A., Puye L., Aubin J. A new method of biophysical distribution in the LCA of animal by-products: modeling the metabolic energy needs of body tissue growth // *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017. No. 22(6). pp. 883-95.
4. Derner J.D. Animal husbandry systems in pasture land systems. Ed. David D. Briske // *Processes, management and challenges*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 347-72.
5. Godinot O. The relative efficiency of nitrogen use is a new indicator for evaluating crop and livestock production systems // *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. No. 35(2). pp. 857-68.
6. Grach V., Golimovsky V., Butlevsky K., Marcinkowski D. Analysis of the potential of methane emissions and energy production from livestock excrement in Poland. Edited by K. Mudrik, S. Werle // *Renewable energy sources: engineering, technologies, innovations*. Cham: Springer International Publishing House, 2018. pp. 139-49.
7. Lee H., Jonghwan H., Hyun Yu. A study of the application of the energy-efficient MAC protocol to widespread livestock breeding. Edited by T. Kim, Y. Lee, B. Kang, D. Shlkezak // *Information technologies of the future generation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. pp. 699-707.
8. Mammadov G.B., Mammadov E.S. Method of evaluation and analysis of improving the efficiency of the ventilation system of livestock premises // *Russian agricultural sciences*. 2017. No. 43(6). pp. 516-18.

9. Maurya V.P., 2012. The effect of stress during walking on animal husbandry. Ed. V. Sejian // Environmental stress and improvement of animal husbandry conditions. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 75-95.
10. Mottet A. Climate change mitigation and productivity improvement in livestock supply chains: conclusions from regional case studies // Regional environmental changes. 2017. No. 17(1). pp. 129-41.
11. Nira S.M. Manipulations with nutrition to optimize productivity under environmental stress in animal husbandry. Ed. V. Sejian // Environmental stress and improvement of animal husbandry conditions. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 181-218.
12. Niu, Qigui and Yu-Yu Li. 2016. Processing of livestock manure into bioenergy. Edited by O.P. Kartikeyan, K. Heymann, S.S. Mutu // Recycling of solid waste for the production of biofuels and biochemicals. Singapore: Springer Singapore, 2016. pp. 165-86.
13. Qin Fu and Weiming Tian. 2000. Livestock feeding: technological choice, trade policy and efficiency. Edited by Yu. Yang, W. Tian // China's agriculture is at a crossroads. London: Palgrave Macmillan, 2000. pp. 98-117.
14. Rocco R. Life cycle assessment in the livestock and food derivatives sector. Edited by B. Notarnicola // Life cycle assessment in the agri-food sector. Case studies, methodological issues and best practices. Cham: Springer International Publishing, 2015. pp. 251-332.
15. Rukavishnikova I., Rumyantseva A. Methodological approach to evaluating the effectiveness of projects in the field of renewable energy, taking into account the environmental component / ed. by S. Singellakis, K. Brebbia // Challenges and solutions in the Russian energy sector. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 193-200.
16. Sejian V. Introduction to the concepts of the impact of climate change on animal husbandry, adaptation to it and mitigation of its consequences, edited by V. Sejian, J. Gogan, L. Baumgard, K. Prasad. // The impact of climate change on animal husbandry: adaptation and mitigation. New Delhi: Springer India, 2015. pp. 1-23.
17. Silva S., Rodriguez A., Ferraz A., Alonso J. An integrated approach to efficient energy production using waste from animal husbandry and agro-industrial complex, edited by L. Singh, V.Ch. Potassium // Biomass waste management – a holistic approach. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 339-66.
18. Soumen N. Genetics. Adaptability of livestock to environmental stresses. Ed. V. Sejian // Environmental stress and improvement of the quality of livestock products. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. pp. 317-78.
19. Vanderholm D.H. Livestock waste management for the protection of water resources. Edited by L.K. Wang, M.-H. S. Wang, Yu.-T. Hung, N.K. Shammass // Natural resources and control processes. Cham: Springer International Publishing, 2016. pp. 1-71.
20. Zanten V., Hanna H. E. Global food supply: land use efficiency in livestock systems // International Journal of Life Cycle Assessment. 2016. No. 21(5). pp. 747-58.