УДК 636.03

CC BY

DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-51-61

Биоэнергетическая модель растительного сырья и оценка технологий производства кормов

Мухтар Ахмиевич Керимов,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: martan-rs@yandex.ru;

Дмитрий Владимирович Иванов,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: dmit.vlad.ivanov@ya.ru

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Отметили, что эффективность функционирования технологических процессов в сельскохозяйственном производстве принято оценивать по экономическим, эксплуатационным и относительным критериям. Показали, что такая оценка при решении прикладных задач часто оказывается некорректной. Наиболее полно это несоответствие выявили при функционировании биотехнической системы «оператор – корм – машина – животное». Подтвердили необходимость и актуальность объективного анализа энергетических потоков, реализуемых в биотехнической системе, а также взаимодействие энергопотоков между собой и с внешней средой. (*Цель исследования*) Обосновать методологический подход к оценке эффективности производства кормов на основе биоэнергетического анализа технологий их заготовки. (*Материалы и методы*) Провели сравнительный анализ показателей накопления обменной энергии растениями до момента начала их уборки и параметров снижения содержания обменной энергии растительного сырья с учетом технологических воздействий на него. (*Результаты и обсуждение*) Выявили, что затраты 1 мегаджоуля механической энергии при возделывании злако-травяной кормосмеси обеспечивают получение 121 мегаджоуля обменной энергии. Определили расчетное содержание обменной энергии в злако-травяной кормосмеси, равное 44 850 мегаджоулей на гектар (1950 мегаджоулей на тонну) при удельных затратах механической энергии на возделывание кормосмеси 370,6 мегаджоуля на гектар (16,1 мегаджоуля на тонну). (*Выводы*) Установили, что динамика энергонакопления при выращивании растительного сырья и характер снижения его энергосодержания в процессе приготовления и хранения корма имеют общую и устойчивую во времени тенденцию. Доказали линейный характер тренда роста энергонакопления для различных видов кормовых культур и снижения энергосодержания кормов. Предложили критерии оценки эффективности затрат механической энергии на выращивание кормовых культур, переработку растительного сырья и хранение корма. Разработали математическую модель, которая позволяет проводить исследования неявных переменных в сложной системе накопления и энтропии обменной энергии корма, принимать оптимальные инженерные решения по обоснованию и совершенствованию технологий возделывания, уборки и приготовления кормов, а также их эффективному использованию.

Ключевые слова: животноводство, качество кормов, силос, сенаж, технологии кормозаготовки, эффективность использования кормов, биоконверсия, обменная энергия корма, пооперационный расход механической энергии, энтропия энергии корма.

Для цитирования: Керимов М.А., Иванов Д.В. Биоэнергетическая модель растительного сырья и оценка технологий производства кормов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N1. С. 51-61. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-51-61. EDN HSQHVC.

Bioenergy Model Of Plant Raw Materials And Assessment Of Feed Production Technologies

Mukhtar A. Kerimov,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: martan-rs@yandex.ru;

Dmitriy V. Ivanov,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: dmit.vlad.ivanov@ya.ru

Saint-Petersburg State Agrarian University (SPbSAU), St. Petersburg, Russian Federation.

Abstract. It is noted that the effectiveness of the technological processes in agriculture is usually evaluated according to economic, operational and relative criteria. Such an estimate often proves to be inaccurate for solving applied problems. The functioning of the biotechnical system "operator – feed – machine – animal" reveals this discrepancy to the highest extent. The paper confirms the necessity and relevance of a fact-based analysis of energy flows in the biotechnical system, as well as the energy flows interaction with each other and with the external environment. (*Research purpose*) To substantiate a methodological approach to assessing

the fodder production efficiency based on a bioenergetic analysis of fodder production technologies. (*Materials and methods*) The research involves the comparative analysis of exchange energy accumulation by plants before harvesting and the parameters of its reduction in the plant raw materials, taking into account technological impacts. (*Results and discussion*) It is obtained that a one-megajoule input of mechanical energy in the cultivation of cereal-grass forage mixtures provides 121 megajoules of exchange energy. The exchange energy content in the cereal-grass forage mixture is calculated to be 44,850 megajoules per hectare (1950 megajoules per ton) while the specific mechanical energy consumption amounts to 370.6 megajoules per hectare (16.1 megajoules per ton) for the feed mixture cultivation. (*Conclusions*) It is established that the dynamics of energy accumulation during the vegetable raw material cultivation and the character of a decrease in its energy content during fodder preparation and storage have a sustainable common trend. The growth trend of energy accumulation is proved to have a linear character for both various types of fodder crops and the decrease in the feed energy content. Efficiency assessment criteria are proposed for the mechanical energy consumption during fodder crop cultivation, plant material processing and feed storage. A mathematical model is developed making it possible to study implicit variables in a complex system of accumulation and entropy of feed exchange energy, take optimal engineering decisions to justify and improve the technologies for feed cultivation, harvesting and preparation, as well as its effective use.

Keywords: animal husbandry, feed quality, silage, haylage, forage harvesting technologies, feed utilization efficiency, bioconversion, feed exchange energy, mechanical energy consumption per operation, feed energy entropy.

For citation: Kerimov M.A., Ivanov D.I. Bioenergeticheskaya model' rastitel'nogo syriya i otsenka tekhnologiy proizvodstva kormov [Bioenergy model of plant raw materials and assessment of feed production technologies]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 51-61 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-51-61. EDN HSQHVC.

Биоцикл развития растений и биохимические превращения в процессе возделывания, уборки и хранения растительной массы представляют собой непрерывную цепь накопления и потери энергии [1-3].

Поиск новых и совершенствование известных приемов приготовления и хранения кормов на сегодняшний день помогают снизить энергетические, трудовые и материальные затраты.

По агротехническим требованиям уборку растительной массы необходимо провести в кратчайшие сроки с целью сохранения концентрации обменной энергии в 1 кг сухого вещества корма в пределах 10,0-10,5 МДж.

На качество стебельчатых кормов влияют условия в ходе заготовки (*рис. 1*).

Рис. 1. Влияние погодных, технических, технологических и организационных факторов на качество заготовки и приготовления стебельчатых кормов повышенной влажности

Fig. 1. Influence of weather, technical, technological and organisational factors on the quality of harvesting and preparation of high-moisture stalk fodder

Кормовая ценность растительной массы при силосовании зависит от продолжительности заполнения траншеи, уплотнения массы, герметизации от доступа воздуха и защиты от осадков представлены (*рис. 2*).

Модель изменения энергосодержания в растительном сырье базируется на трех элементах:

- динамике энергонасыщения корма, зависящей от природных факторов и агротехнических операций;
- постепенном или ступенчатом снижении энергосодержания корма (рассеивание его потенциальной энергии) под воздействием неблагоприятных внеш-

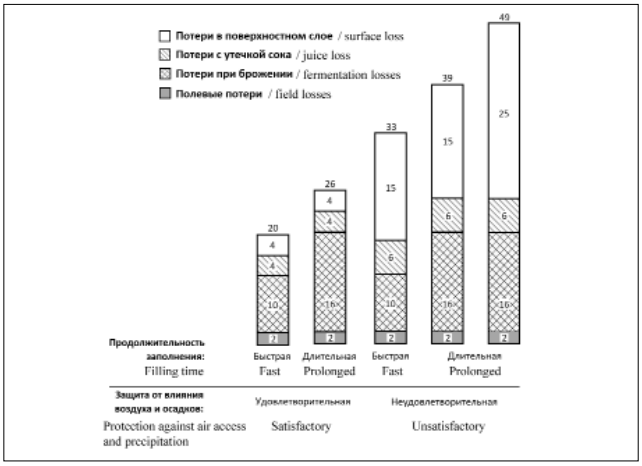

Рис. 2. Потери кормовой ценности (%) при силосовании растительной массы в зависимости от продолжительности заполнения траншеи, уплотнения массы, герметизации от доступа воздуха и защиты от осадков [3]

Fig. 2. Feed value loss (%) during the ensiling process, depending on the of trench filling duration, plant mass compaction, sealing against air access and protection against precipitation [3]

них факторов и биохимических процессов;

- остаточной энергии корма [4-6].

Для их характеристики используют содержание энергии, приходящееся на единицу массы, площади и т.д. Энергетическая оценка считается определяющим показателем производства животноводческой продукции животноводства [7-9]. Методы биоэнергетической оценки производственных процессов заготовки кормов позволяют выявить наиболее энергоемкие элементы применяемых технологий, полнее учесть ресурсы экономии энергии, определить направления повышения эффективности функционирования животноводческих ферм и комплексов.

Цель исследования – обоснование методологического подхода к оценке эффективности производства кормов на основе биоэнергетического анализа технологий их заготовки.

Материалы и методы. Исходным постулатом модели служит положение о том, что энергозатраты на выполнение совокупности необходимых технологических операций эффективны и целесообразны, если они обеспечивают рост содержания энергии в кормовых культурах при их возделывании или адекватно снижают потери (энтропию) этого показателя при хранении и использовании корма [10, 11].

Энергия корма в текущий момент времени (t) определяется из уравнения баланса энергии [12]:

$$Э = Э_0 - Э_{рас}, \quad (1)$$

где $Э$ – остаточная энергия корма на момент времени t, МДж;

$Э_0$ – энергия, накопленная растительным материалом к i-ому этапу его роста и преобразования, МДж;

$Э_{рас}$ – энергия, рассеянная в процессе скашивания растений, обработки и хранения корма, МДж.

Из уравнения рассеяния энергии известно [12]:

$$Э_{рас} = T \cdot S, \quad (2)$$

где T – абсолютная температура, К;

S – энтропия, МДж/К.

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$Э = Э_0 - T \cdot S. \quad (3)$$

Для исследования зависимости (3) реализован метод анализа размерностей, применяющийся при планировании экспериментов как прием сокращения числа переменных, а также используемый как способ анализа неявных переменных в сложных системах [13].

Энергию, полученную растительным материалом на i-ом этапе ($Э_{oi}$), а также сопутствующую энтропию (S_i) представим в виде аналитических выражений:

$$Э_{oi} = M_{oi} \cdot L_{oi}^2 \cdot \Theta_{oi}^{-2}, \quad (4)$$

где $Э_{oi}$ – энергия, полученная растительным материалом на i-ом этапе, МДж;

M_{oi} – растительная масса, убранная на i -ом этапе, т;

$$S_i = M_{si} \cdot \Theta_{si}^{-2} \cdot T_{si}^{-1} \cdot L_{si}^2, \quad (5)$$

где M_{si} – энтропия, сопутствующая i-ому этапу воздействия на растительный материал, МДж/К;

T_{si} – абсолютная температура растительного материала, соответствующая i-ому этапу воздействия на него, К;

L_{si} – расстояние перевозки корма на i-ом этапе его преобразования, м;

Θ_{si} – время рассеивания энергии растительным материалом на i-ом этапе, ч.

Подставив формулы (4) и (5) в уравнение (3), получим:

$$Э_i = M_{oi} \cdot L_{oi}^2 \cdot \Theta_{oi}^{-2} - M_{si} \cdot L_{si}^2 \cdot \Theta_{si}^{-2}, \quad (6)$$

где $Э_i \neq 0$ и $M_{oi} \cdot L_{oi}^{-2} \cdot \Theta_{oi}^{-2} > M_{si} \cdot L_{si}^2 \cdot \Theta_{si}^{-2}$.

Выражение (6) отражает картину в целом. Однако остаются неучтенными ряд важных факторов:

- обменная энергия корма;
- мероприятия, направленные на ее рост;
- затраты механической энергии, связанные с выращиванием урожая, выполнением уборочных работ и кормоприготовительных операций;
- меры по снижению энтропии.

В остаточной энергии корма потребительский интерес вызывает лишь обменная энергия, направленная на производство продукции животноводства (приросты живой массы, молочную продуктивность и т. д.) [14-16]. Тогда остаточную энергию корма можно представить равенством:

$$Э = [ОЭ] = M_{ОЭ_i} \cdot L_{ОЭ_i}^2 \cdot \Theta_{ОЭ_i}^{-2}, \quad (7)$$

где $[ОЭ]$ – остаточная энергия в корме на момент времени t , кДж;

$M_{ОЭ}$ – масса корма на i-ом этапе его производства, т;

$L_{ОЭ}$ – перемещение корма от момента заготовки до i-ого этапа его использования, м;

$\Theta_{ОЭ}$ – время от момента заготовки корма до i-ого этапа его использования, ч.

Результаты и обсуждение. Чтобы произвести корм с максимальным удельным содержанием обменной энергии ($[ОЭ] \rightarrow max$) на единицу массы или единицу площади, необходимо выполнить ряд технологических операций, затратив при этом некоторую механическую энергию (мощность) N_p, описываемую табличной формулой преобразования размерностей:

$$N = M \cdot L^2 \cdot \Theta^{-3}, \quad (8)$$

где N – затраты мощности при выполнении технологических операций, МДж/т;

L – длина пути, м;

Θ – время, необходимое для выполнения технологической операции, ч.

Суммарные затраты мощности на получение урожая составят:

$$N_p = \sum_{j=1}^{m} M_j \cdot L_j^2 \cdot \Theta_j^{-3}, \quad (9а)$$

или

$$N_p = \left(M_{1_j} \cdot L_{1_j}^2 + M_{2_j} \cdot L_{2_j}^2 \cdot \Theta_{2_j}^{-3} + \ldots + M_{m_j} \cdot L_{m_j}^2 \cdot \Theta_{m_j}^{-3}\right), \quad (9б)$$

где $M_{1_j} \cdot L_{1_j}^2 \cdot \Theta_{1_j}^{-3}, \ldots, M_{m_j} \cdot L_{m_j}^2 \cdot \Theta_{m_j}^{-3}$ – затраты мощности на выполнение операций по обработке почвы, внесению удобрений, посеву, уходу за растениями и др., Мдж/га, МДж/т.

Удельные энергозатраты на выполнение единичной операции машинным средством определяем по формуле:

$$Э_{oi} = \frac{3{,}6 \cdot N \cdot k}{Q}, \quad (10)$$

где $Э_{oi}$ – удельные энергозатраты на единицу массы (площади), МДж/т, (МДж/га);

Q – производительность агрегата, т/ч (га/ч);

N – номинальная мощность технического средства, кВт;

k – коэффициент использования эксплуатационной мощности технического средства.

Выполнение технологической операции с затратами мощности N_j обеспечивает некоторый прирост обменной энергии $\Delta[ОЭ]$ возделываемого корма:

$$\Delta [ОЭ]_{oj} > M_{mj} \cdot L_{mj}^2 \cdot \Theta_{mj}^{-3}, \quad (11а)$$

или

$$M_{oj} \cdot L_{oj}^2 \cdot \Theta_{oj}^{-2} > M_{mj} \cdot L_{mj}^2 \cdot \Theta_{mj}^{-3}. \quad (11б)$$

Получив урожай с искомым содержанием обменной энергии корма, необходимо выполнить комплекс мероприятий, связанных с уборкой и подготовкой к длительному хранению при минимальном сопутствующем рассеянии энергии (энтропии) $S \rightarrow min$ [17, 18].

Это в свою очередь потребует дополнительных затрат мощности:

$$N_{ПХ} = \sum_{i=1}^{n} M_i \cdot L_i^2 \cdot \Theta_{n_i}^{-3}, \quad (12а)$$

где $N_{ПХ}$ – затраты на выполнение дополнительных технологических операций (трамбовка массы, загрузка в пластиковые мешки и др.), МДж.

или

$$N_{ПХ} = \left(M_{1_i} \cdot L_{1_i}^2 \cdot \Theta_{1_i}^{-3} + M_{2_i} \cdot \Theta_{2_i}^{-3} + \ldots + M_{n_i} \cdot L_{n_i}^2 \cdot \Theta_{n_i}^{-3}\right), \quad (12б)$$

где $M_{1_i} \cdot L_{1_i}^2 \cdot \Theta_{1_i}^{-3}, \ldots, M_{n_i} \cdot L_{n_i}^2 \cdot \Theta_{n_i}^{-3}$ – затраты мощности на выполнение уборки урожая, измельчение или прессование растительной массы, закладки и обработки корма в хранилище и др., МДж.

При выполнении каждой из названных операций снижение энтропии должно превышать затраченную мощность [19, 20].

В общем виде концепция может быть представлена динамикой величины обменной энергии корма на текущее время t, а также затрат механической мощности – нарастающим итогом на выполнение необходимых технологических операций (*рис. 3*). Левая часть схемы характеризует динамику накопления обменной энергии ($\Delta[ОЭ]_{oi}$) при возделывании растительного сырья вплоть до момента уборки ($t_{уб}$). Правая часть отражает динамику снижения содержания обменной энергии корма (ΔS_{n_i}).

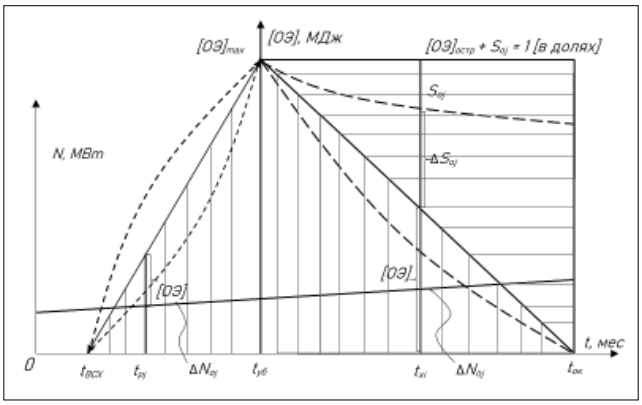

Рис. 3. Динамика обменной энергии корма ОЭ и затрат механической мощности N:
– при возделывании кормовых культур (левая часть);
– при переработке и хранении массы с учетом энтропии S (правая часть)
Fig. 3 Dynamics of feed exchange energy ОЭ and mechanical power input (N):
– during forage crop cultivation (left part);
– during mass processing and storage, taking into account entropy (S) (right part)

Желательно, чтобы затраты механической энергии на выполнение единичной операции возделывания культуры ΔN_{oj} были в разы меньше прироста обменной энергии корма $\Delta[ОЭ]_{oj}$, а затраты энергии на выполнение единичной операции на придание исходному корму состояния, пригодного для длительного хранения ΔN_{oj}, были в разы меньше величины предотвращенной энтропии (рассеивания) энергии корма ΔS_{o_i}, то есть:

$$\Delta N_{oj} < \Delta [ОЭ]_{oj}, \quad (13)$$

или

$$\Delta N_{oj} < \Delta S_{oj}. \quad (14)$$

Процессы энергонакопления и энергосодержания корма будут эффективными, если суммарные затраты мощности N_p на возделывание кормовой культуры окажутся меньше обменной энергии, содержащейся в урожае:

$$(N_p) < [ОЭ]_{max}, \quad (15а)$$

или

$$\sum_{j=1}^{m} M_{N_j} \cdot L_{N_i}^2 \cdot \Theta_{N_i}^{-3} < [ОЭ]_{max}, \quad (15б)$$

Суммарные затраты мощности на переработку и подготовку к длительному хранению $N_{ПХ}$ должны быть меньше величины предотвращенной энтропии:

$$N_{ПХ} < \Delta S_n, \quad (16а)$$

или

$$\sum_{j=1}^{n} M_{N_i} \cdot L_{N_i}^2 \cdot \Theta_{N_i}^{-3} < \Delta S_n. \quad (16б)$$

Отношение максимального значения полученной обменной энергии к суммарным затратам мощности на возделывание культуры определяется коэффициентом эффективности затрат механической мощности на выращивание урожая:

$$\lambda = \frac{[ОЭ]_{max}}{N_p}, \quad (17а)$$

или

$$\lambda = \frac{M_{max} \cdot L_{max}^2 \cdot \Theta^{-2}}{\sum_{j=1}^{m} M_{N_j} \cdot L_{N_j}^2 \cdot \Theta_{N_j}^{-3}}. \quad (17б)$$

Отношения остаточной обменной энергии корма на момент скармливания его скоту $[ОЭ]_{ост}$ к суммарным затратам мощности на приготовление и хранение корма $N_{ПХ}$ определяется коэффициентом эффективности затрат механической мощности на переработку и хранение корма:

$$\lambda_Э = \frac{[ОЭ]_{ост}}{N_{ПХ}}, \quad (18а)$$

или

$$\lambda_Э = \frac{M_{ОЭ_i} \cdot L_{ОЭ_i}^2 \cdot \Theta_{ОЭ_i}^{-2}}{\sum_{i=1}^{n} M_{N_i} \cdot L_{N_i}^2 \cdot \Theta_{N_i}^{-3}}. \quad (18б)$$

Остаточная обменная энергия корма $[ОЭ]_{ост}$, выраженная в долях на текущий момент времени t, может быть представлена как

$$[ОЭ]_{ост} + S_t = 1, \quad (19)$$

или

$$[ОЭ]_{ост} = 1 - S_t, \quad (20)$$

где S_t – энтропия на время t, МДж/К·ч, которая может быть выражена через остаточную обменную энергию:

$$S_{терм.} = k \cdot L \cdot \Theta. \quad (21)$$

Отношение доли остаточной обменной энергии $[ОЭ]$ на время t к доле энтропии S_t оценивается коэффициентом сохранности обменной энергии корма:

$$\tau_{ОЭ} = \frac{[ОЭ]_t}{S_t}. \quad (22)$$

Подставим значение S_t из формулы (21) и выполним соответствующие преобразования, тогда формула (22) примет вид:

$$\tau_{ОЭ} = \left(\frac{1}{[ОЭ]_t} - 1\right)^{-1}. \quad (23)$$

Наилучшим в прикладном плане считаются технологии, обеспечивающие наибольшее значение коэффициента $\tau_{ОЭ}$.

Энтропию как меру обесценивания энергии можно рассмотреть также в виде функции термодинамической системы, отражающей тепловое состояние корма во время выполнения тех или иных технологических операций.

Зная табличное значение размерности коэффициента теплопроводности:

$$k = M \cdot L \cdot \Theta^{-3} \cdot T^{-1}, \quad (24)$$

вычислим значение M:

$$M = k \cdot L^{-1} \cdot \Theta^3 \cdot T. \quad (25)$$

Подставив выражение (25) в формулу (5) и проведя соответствующие сокращения, определим величину термодинамической энтропии:

$$S_{терм.} = k \cdot L \cdot \Theta, \quad (26)$$

где k – коэффициент теплопроводности материала, влияющий на энтропию тепловой энергии (например, вследствие тепловыделения растительной резки).

Кормовая растительность различных видов существенно различается сроками и скоростью прироста массы, химическим составом, содержанием обменной энергии, пригодностью к консервации и другими параметрами. Отличаются друг от друга применяемые технологии, машины и оборудование для возделывания, уборки, переработки и хранения различных видов кормов. Неодинаков и расход материальных, трудовых и энергетических ресурсов.

Однако динамика энергонакопления в процессе выращивания кормового сырья и характер снижения его энергосодержания в процессе приготовления и хранения корма имеют общую и устойчивую во времени тенденцию.

Тренды роста энергонакопления для всех видов кормовых культур и тренды снижения энергосодержания кормов носят линейный характер (*рис. 4*).

На примере временного ряда схематически представлена динамика энергонасыщения озимых и яровых кормовых культур (восходящие кривые) и снижения их энергосодержания при уборке, переработке и хранении (нисходящие кривые).

Шкала ординат на схеме представлена единым показателем – удельным энергосодержанием, выраженным в процентах. Удельный показатель энергосодержания кормовой культуры на момент уборки принят равным 100%. Точка *A* соответствует появлению всходов, точки *B* и *C* –достижению культурой, соответственно, уровня 10 и 90% от максимума энергосодержания (точка *D*).

Зависимости роста энергонакопления во времени $Э_{ИР}(\%) = f(t, t_1)$ представлены кривыми *ABCD* (для озимых) и $A_1B_1C_1D_1$ (для яровых кормов), которые могут быть описаны сложными математическими выражениями. Однако участки интенсивного роста *BD* и B_1D_1 с приемлемой погрешностью можно представить прямыми – трендами процентного роста энергонакоплении для озимых $Э_{ИР}$ и яровых $Э_{ИР_1}$ соответственно:

$$Э_{ИР}(\%) = 2{,}25\,t - 440 \quad (27)$$

$$\text{и } Э_{ИР_1}(\%) = 1{,}29\,t - 311. \quad (28)$$

Кривые, описывающие снижение энергосодержания во времени, выражены как

$$Э_x(\%) = f(t, t_1).$$

Они также состоят из двух участков: кратковременного *DE* и D_1E_1 и долговременного – *EF* и E_1F_1 (*рис. 4*). Первый участок включает уборку, приготовление и закладку корма на хранение и характеризуется значительными механическими и качественными потерями, когда кормовое сырье, находящееся вне хранилища, подвергается интенсивному внешнему воздействию.

На втором участке кривой отражено постепенное снижение качественных показателей корма в ходе биохимических превращений, происходящих в процессе хранения. С некоторыми допущениями этот участок может быть представлен прямыми – трендами процентного снижения энергосодержания для озимых $Э_x$ и яровых $Э_{x_1}$ культур:

$$Э_X(\%) = 102{,}2 - 0{,}047\,t \quad (29)$$

и

$$Э_{X_1}(\%) = 103{,}2 - 0{,}04\,t_1. \quad (30)$$

Из приведенных зависимостей видно, что для зимнего периода кормления скота продолжительностью в 210-240 дней (с октября по март-апрель включительно) окупаемость вложений в корма озимого сева составляет 12-19 мес. Этот показатель достаточно велик и для кормов ярового сева – 6-12 мес.

При пересчете трендов роста энергонакопления и снижения энергосодержания в МДж в качестве реперных точек целесообразно использовать показатели удельного содержания обменной энергии (МДж/кг) для рассматриваемой кормовой культуры в период уборки (точка *D*) и в готовом корме на момент вскрытия хранилища (точка *G*) с привязкой к принятому временному ряду [6, 7].

Рассмотрим примеры построения по реперным точкам трендов роста удельного энергонакопления зеленой массы кукурузы ярового и поукосного сева и трендов снижения энергосодержания силоса, приготовленного из нее; озимой кормосмеси вики с овсом, убираемых на силос и сенаж; суданской травы поукосного сева, используемой на зеленый корм (*рис. 5*).

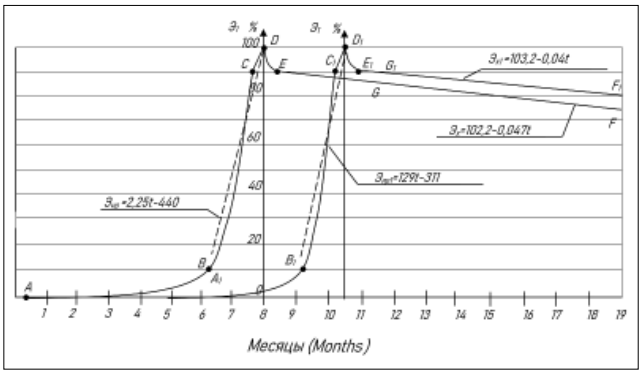

Рис. 4. Динамика энергонасыщения растительности (кривая ABCD) и энергосодержания приготовленной силосной массы из озимых (DEF) и яровых (соответственно, кривые $A_1B_1C_1D_1$ и $D_1E_1F_1$) кормовых культур, %

Fig. 4. Dynamics of vegetation energy saturation (curve ABCD) and a decrease in the energy content of prepared silage (curve DEF) for winter and spring (curves $A_1B_1C_1D_1$ and $D_1E_1F_1$) forage crops

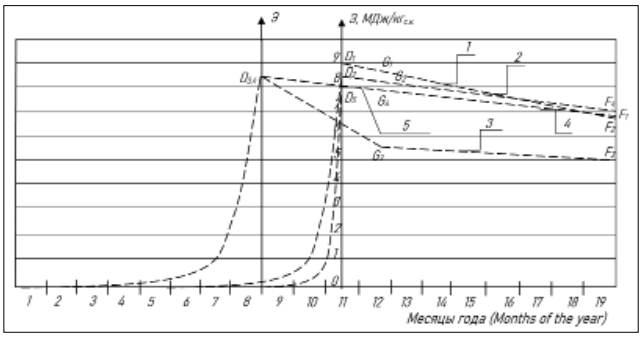

Рис. 5 Динамика энергосодержания в пересчете на 1 кг сухого вещества в процессе роста и хранения корма: 1 – для кукурузы ярового сева, убираемой на силос; 2 – для кукурузы поукосного сева, убираемой на силос; 3 – для озимой вики с овсом на силос; 4 – для озимой вики с овсом на сенаж; 5 – для суданской травы поукосного сева на зеленый корм

Fig. 5. Dynamics of energy content in terms of 1 kg of dry matter during the feed growth and storage: 1 – for spring corn harvested for silage; 2 – for corn harvested for silage; 3 – for winter vetch with oats for silage; 4 – for winter vetch with oats for haylage; 5 – for Sudanese grass harvested for green fodder

Приготовление сенажа из вико-овсяной кормосмеси сопровождается меньшей потерей обменной энергии корма, чем при заготовке силоса с влажностью 74%. Кукуруза и суданская трава поукосного (пожнивного) сева обладают достаточно высоким энергосодержанием – до 8,4 и 7,9 МДж/кг сухого вещества соответственно, что в большинстве случаев делает целесообразным возделывание их на зеленый корм.

Результаты и обсуждение. Получение высоких урожаев обеспечивается внесением больших доз минеральных и органических удобрений под основную обработку почвы, которую выполняют комбинированными агрегатами с рыхлением на 10-12 см. Для уничтожения всходов сорняков в допосевной период

проводят как минимум одну культивацию на глубину 6-8 см. Посев кормосмесей с междурядьем 15 см выполняют универсальными зернотравяными сеялками. Подвоз и загрузку семян в сеялки осуществляют автомобильными загрузчиками. При необходимости проводят осеннюю повсходную или весеннюю химическую обработку посевов.

Сравним технические характеристики и эксплуатационные показатели машин для возделывания злако-травяных кормосмесей, а также результаты расчета удельных затрат механической энергии на единицу урожая (*табл. 1*).

Суммарные удельные затраты мощности (механической энергии) на выполнение вышеуказанных операций (с учетом урожайности зеленой массы 23 т/га) определим по формуле (9б):

$$N_{\text{Р}}^{\text{уд}} = (67{,}32 + 153{,}21 + 81{,}36 + 62{,}06 + 6{,}67) = 370{,}62 \text{ МДж/га}.$$

Средняя урожайность злако-травяных кормосмесей, убираемых в фазу колошения злаковых и бутонизации и цветения других культур, равна 23 т/га [15]. Тогда обменная энергия 1 т натурального корма для КРС составляет 1800-2100 Мдж, или 44850 МДж на 1 га.

Приведенные выше удельные затраты механической энергии составляют 0,83% от энергии раститель-

Таблица 1 Table 1

Техническая характеристика и эксплуатационные показатели машин и агрегатов, принятых при расчете удельных энергозатрат на возделывание 1 га (1 т)[1] злаково-травяных кормосмесей
Technical characteristics and performance indicators of machines and units adopted for calculating specific energy consumption during the cultivation of 1 на (1 т)[1] of cereal-grass forage mixtures

№ п.п.	Технологическая операция Technological operation	Технические средства Technical means	Номинальная мощность энергосредства, кВт Rated power of the energy facility, kW	Коэффициент использования мощности энергосредства Power utilization factor of the energy facility	Производительность агрегата[2], га/ч Unit capacity[2], ha/h	Удельные энергозатраты, МДж/га Specific energy consumption, MJ/ha
1	Внесение органических и минеральных удобрений под основную обработку почвы[3] Application of organic and mineral fertilizers for basic tillage[3]	Т-150К + ПРТ-10	121,5	0,8	5,0	2,92
2	Обработка почвы комбинированным агрегатом на глубину 10-12 см Soil cultivation with a combined unit to a depth 10-12 cm	К-701 + АК11-6	198,6	0,9	4,2	6,66
3	Лопостевая культивация на глубину 6-8 см Blade cultivation to a depth of 6-8 cm	Т-150К + КП111-9	121,5	0,8	4,3	3,55
4	Посев злаково-травяной кормосмеси[4] Sowing the cereal-grass forage mixture[4]	Т-150К + сцепка гидрофиц. Hydrofiсated hitch + СЗА-3,6(3)	121,5	0,8	6,2	2,69
5	Обработка посевов гербицидами от вредителей и болезней[5] Treatment of crops with herbicides against pests and diseases[5]	МТЗ-80/82 + ОП-2000	55,2	0,7	24,0	0,29

[1] Урожайность на 1 га зеленой массы ржано-виковой кормосмеси принята равной 23 т/The yield per 1 ha of green mass of rye-vetch fodder mixture is assumed to be 23 tons.
[2] Производительность за 1 ч чистой работы/Productivity per 1woring hour.
[3] Энергозатраты на подвоз и загрузку удобрений составляют 10% энергозатрат рассматриваемой операции/Energy consumption during fertilizer delivery and loading equals to 10% of the energy consumption for the operation under consideration.
[4] Энергозатраты на подвоз и загрузку семян равны 10% энергозатрат рассматриваемой операции/Energy consumption during seed transportation and loading equals to 10% of the energy consumption for the operation under consideration.
[5] Энергозатраты на приготовление и подвоз химраствора приняты равными 15% энергозатрат на основную операцию/Energy consumption during the preparation and delivery of the chemical solution is assumed equal to 15% of the energy consumption for the main operation.

ной массы кормосмесей, собранной с той же площади. Полученные значения не учитывают энергозатраты живого труда, а также прошлые энергозатраты на производство энергосредств и сельхозорудий, топливо-смазочных материалов, гербицидов, семян и др. Прошлые энергозатраты на отдельных операциях могут составлять до 200% прямых энергозатрат на их выполнение.

Экспериментальными исследованиями (Иванов Д.В., 2008-2012 гг.) установлено, что удельные затраты механической энергии на приготовление и раздачу стебельчатых кормов значительно превышают затраты механической энергии на их возделывание. Так, при отъеме 1 т силоса из хранилища траншейного типа с использованием агрегатов МТЗ-82 + ПГ-0,4 затраты механической энергии составляют 10,6 МДж, что на 23,3% выше удельных затрат, приходящихся на основную обработку почвы для выращивания растительной массы под названное количество силоса – 8,6 МДж.

Однако и в этом случае затраты совокупной энергии на выращивание рассматриваемых кормосмесей не достигают и 2% энергии, содержащейся в получаемых урожаях. Это подтверждает известный факт, что растениеводство вообще и сельскохозяйственное производство в частности, занимает лидирующее положение как в получении возобновляемой энергии, так и в отношении минимальных затрат механической энергии на накопление энергии растениями.

Отношение обменной энергии, содержащейся в 1 т злаково-травяной кормосмеси при $[ОЭ]_{сред} = 1950$ Мдж, к удельным затратам механической энергии равно:

$$N_{р}^{уд} = 370{,}62 \text{ Мдж/га} : 23{,}00 \text{ т/га} = 16{,}11 \text{ Мдж/т}.$$

Его оценивают коэффициентом эффективности затрат механической энергии ($\lambda_Э$) на выращивание урожая:

$$\lambda_Э = \frac{1950 \text{ МДж/т}}{16{,}11 \text{ МДж/т}} = 121{,}04.$$

Таким образом, затраты 1 МДж механической энергии на возделывание злако-травяной кормосмеси принятой урожайности обеспечивают получение до 121 МДж обменной энергии корма.

Рассматриваемую модель можно применять для установления основных факторов, определяющих пооперационный расход и энтропию механической энергии, а также энергонасыщение продукта при возделывании растений.

Для операции возделывания злако-травяных кормосмесей установлены основные факторы, определяющие ее характер и эффективность, а исходными служат известные формулы энергонасыщения продукта и энтропии энергии (*табл. 2*).

Выводы

1. Предложили модель динамики энергосодержания растительных кормовых материалов, состоящую из двух последовательных этапов: энергонасыщения (выращивание урожая) в ходе прироста массы и увеличения обменной энергии корма, а затем снижения энергосодержания при переработке и хранении кормовой массы, характеризуемого энтропией. Оба этапа сопровождаются затратами механической энергии на выполнение необходимых и достаточных технологических операций.

Модель позволяет вести исследование неявных переменных в сложной системе накопления и энтропии обменной энергии корма, принимать научно обоснованные решения по выбору и совершенствованию технологий возделывания, уборки, переработки и подготовки кормов к хранению и эффективному использованию.

2. Составили обобщенные тренды роста удельного энергонасыщения озимых и яровых кормовых куль-

Таблица 2 Table 2

Основные факторы, установленные методом преобразования размерностей, определяющие пооперационный расход механической энергии и энергонасыщение при возделывании злако-травяных кормосмесей
The main factors obtained by the dimension reduction method, which determines the operational consumption of mechanical energy and energy saturation in the cultivation of cereal-grass forage mixtures

Технологические операции Technological operations	Окончательный вид формулы энергонасыщения и энтропии The final formula of the energy saturation and entropy	Основной фактор The main factor
Внесение удобрений под основную обработку почвы Application of fertilizers for basic tillage	$M \cdot v \cdot L \cdot \Theta^{-1}$	L – длина пути / path length v – скорость передвижения / movement speed
Рыхление почвы на глубину 10-12 см Loosening the soil to a depth of 10-12 cm	$\rho \cdot L^5 \cdot \Theta^{-2}$	ρ – плотность почвы soil density
Посев злаково-травяной кормосмеси Seeding cereal-grass forage mixture	$j \cdot L \cdot \Theta^{-1}$	j – количество движения (импульс) momentum
Обработка посевов от болезней и вредителей Treatment of crops against diseases and pests	$M \cdot v \cdot L \cdot \Theta^{-1}$	L – длина / path length v – скорость передвижения / movement speed
Энтропия механической энергии The entropy of mechanical energy	$N \cdot \Theta$	N – мощность power
Энергосодержание продукта Energy content of the product	$M \cdot v_р^2$	M – масса урожая/ crop weight $v_р^2$ – скорость роста массы/ mass growth rate

тур, а также тренды снижения энергосодержания силосованной массы в процессе ее хранения, где за 100% принято максимальное энергосодержание растительных материалов на момент уборки.

Описали тренды роста энергонасыщения в процентном выражении зависимостями общего вида для озимых злаковых кормосмесей и яровых культур.

Тренды снижения энергосодержания силосованной массы с учетом времени ее закладки на хранение, выраженные зависимостями общего вида, достигают минимума к моменту завершения кормового использования продукта.

3. Корма зимнего периода кормления имеют большую продолжительность срока окупаемости: для злако-травяных культур озимого сева – 12-19 мес., для кормовых культур ярового сева – 6-12 мес.

Подтвердили целесообразность выращивания поукосных и пожнивных посевов кормовых культур, использование которых увеличивает продолжительность кормления скота зелеными кормами, снижает потребность в кормах долговременного хранения (силос, сенаж, монокорм) и связанные с ними затраты.

4. Удельные затраты механической энергии на уборку, переработку и подготовку к хранению стебельчатых кормов существенно превышают затраты механической энергии на их возделывание. Так, затраты механической энергии на операциях отъема 1 т силоса из хранилища типовыми средствами (МТЗ-82 + ПГ-0,4) составляют 10,6 МДж, что на 23,3% выше удельных затрат, приходящихся на основную обработку почвы под названную массу – 8,6 МДж.

5. Методом преобразования размерностей установили формулы, анализ которых позволяет выделить основные факторы, определяющие расход энергии на выполнение технологической операции.

6. Предложили критерии численной оценки соотношений обменной энергии корма и затрат механической энергии на выполнение технологических операций: коэффициент эффективности затрат механической мощности на выращивание урожая, на переработку и хранение корма, коэффициент сохранности обменной энергии.

Определили расчетное содержание обменной энергии в злако-травяной кормосмеси, равное 44 850 МДж/га, или 1950 МДж/т, при удельных затратах механической энергии (мощности) на возделывание кормосмеси 370,6 МДж/га, или 16,1 МДж/т.

При расчете коэффициента эффективности затрат механической энергии выявили, что каждый МДж затрат механической энергии обеспечивает получение 121 МДж обменной энергии корма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Улимбашев М.Б., Тамаев И.Ш., Кулинцев В.В. и др. Новый метод определения протеинового отношения рациона энергетической оценкой // *Актуальные вопросы ветеринарной биологии*. 2018. N4(40). С. 34-37.
2. Никитин А.Н., Пузик А.А., Демьянова Л.А., Прудников А.Д. Питательная ценность зеленой массы кукурузы и силоса кукурузного, заготовленного в фазах молочно-восковой и восковой спелости зерна на примере почвенно-климатических условий Смоленской области // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018. N11-2(77). С. 33-37.
3. Коконов С.И., Зиновьев А.В. Оптимизация срока уборки кукурузы – основа получения высококачественного силоса // *Кормопроизводство*. 2018. N10. С. 41-44.
4. Волкова Е.А., Муратов А.А., Туаева Е.В. и др. Комплексная оценка эффективности производства и использования зерносенажа из зерновых злаковых культур в молочном животноводстве // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2018. N3(47). С. 145-153.
5. Дуборезов И.В., Косолапов А.В., Дуборезов В.М. Урожайность и питательность вегетативной массы силосных культур // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. N3. С. 14-18.
6. Косолапова В.Г., Осипян Б.А., Мамаев А.А. Использование биологических препаратов при силосовании злаковых культур // *Кормопроизводство*. 2018. N6. С. 27-33
7. Цыкунова О.В., Кодочилова Н.А., Салова Л.А. Эффективность применения химических и биологического препаратов для консервирования плющеного зерна кукурузы // *Адаптивное кормопроизводство*. 2019. N1. С. 41-48.
8. Гаганов А П. К оценке качества объемистых кормов // *Адаптивное кормопроизводство*. 2020. N2. С. 68-101.
9. Тишенков П.И. Качество силосов, заготовленных в различных силосных сооружениях // *Главный зоотехник*. 2018. N6. С. 30-37.
10. Кива А.А., Рабштына В.М., Сотников В.И. Биоэнергетическая оценка и снижение энергоемкости технологических процессов в животноводстве. М.: Агропромиздат. 1990. 176 с.
11. Четошникова Л.М. Биоэнергетическая оценка технологических процессов в сельскохозяйственном производстве // *Ползуновский альманах*. 2004. N4. С. 266-271.
12. Мишуров Н.П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока. М.: Росинформагротех. 2010. 152 с.
13. Керимов М.А., Валге А.М. Оптимизация и принятие решений в агроинженерии. М.: Колос-С. 2021. 460 с.
14. Федорова О.А., Текушев А.Х., Чаплыгин М.Е., Давыдова С.А. Технологии и технические средства для поверхностного улучшения кормовых угодий // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2022. N2(66). С. 404-414.
15. Текушев А.Х., Еремин П.А. Тенденции развития техни-

ческих средств для посева многолетних трав и поддержания продуктивного долголетия вырождающихся кормовых угодий // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2021. N1. С. 70-79.
16. Марченко О.С., Текушев А.Х., Костомахин М.Н., Воронов А.Н. Приоритетные направления развития технических средств для заготовки высококачественных кормов // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2019. N1. С. 26-30.
17. Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л. и др. Эффективность инновационной технологии производства продукции растениеводства в условиях ВТО – при низкой себестоимости и высокой рентабельности на основе использования отечественной техники. В сборнике: Система технологий и машин для инновационного развития АПК России. Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики академика В.П. Горячкина. Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. 2013. С. 50-54.
18. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Марченко О.С., Ценч Ю.С. Создание инновационной техники и ресурсосберегающих технологий производства кормов – основа развития животноводства // *Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина*. 2017. N82. С. 23-28.
19. Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин АГРОМАШ для обработки залежных земель // *Вестник ВИЭСХ*. 2018; N2(31): С. 40-47.
20. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55.

REFERENCES

1. Ulimbashev M.B., Tamaev I.Sh., Kulintsev V.V. et al. Novyy metod opredeleniya proteinovogo otnosheniya ratsiona energeticheskoy otsenkoy [Ration protein ratio new determining method by energy estimation]. *Aktual'nye voprosy veterinarnoy biologii*. 2018. N4(40). 34-37 (In Russian).
2. Nikitin A.N., Puzik A.A., Dem'yanova L.A., Prudnikov A.D. Pitatel'naya tsennost' zelenoy massy kukuruzy i silosa kukuruznogo, zagotovlennogo v fazakh molochno-voskovoy i voskovoy spelosti zerna na primere pochvenno-klimaticheskikh usloviy Smolenskoy oblasti [Nutritional value of green mass of corn and corn silage harvested in the phases of milky-wax and wax ripeness of grain on the example of soil and climatic conditions of the Smolensk region]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2018. N11-2(77). 33-37 (In Russian).
3. Kokonov S.I., Zinov'ev A.V. Optimizatsiya sroka uborki kukuruzy – osnova polucheniya vysokokachestvennogo silosa [Optimal time of maize harvest - basis for highquality silage]. *Kormoproizvodstvo*. 2018. N10. 41-44 (In Russian).
4. Volkova E.A., Muratov A.A., Tuaeva E.V. et al. Kompleksnaya otsenka effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya zernosenazha iz zernovykh zlakovykh kul'tur v molochnom zhivotnovodstve [Complex assessment of the efficiency of the production and use of the grain and haylage of cereal crops in dairy farming]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*. 2018. N3(47). 145-153 (In Russian).
5. Duborezov I.V., Kosolapov A.V., Duborezov V.M. Urozhaynost' i pitatel'nost' vegetativnoy massy silosnykh kul'tur [Yield and vegetative mass nutrition of silage crops]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2022. N3. 14-18 (In Russian).
6. Kosolapova V.G., Osipyan B.A., Mamaev A.A. Ispol'zovanie biologicheskikh preparatov pri silosovanii zlakovykh kul'tur [Biological preparations in gramineous silage making]. *Kormoproizvodstvo*. 2018. N6. 27-33 (In Russian).
7. Tsykunova O.V., Kodochilova N.A., Salova L.A. Effektivnost' primeneniya khimicheskikh i biologicheskogo preparatov dlya konservirovaniya plyushchenogo zerna kukuruzy [Efficiency of the application of chemical and biological preparations for canning of flattened grain of barley in the conditions of Nizhny Novgorod region]. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo*. 2019. N1. 41-48 (In Russian).
8. Gaganov A P. K otsenke kachestva ob"emistykh kormov [To evaluation quality of bulky feed]. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo*. 2020. N2. 68-101 (In Russian).
9. Tishenkov P.I. Kachestvo silosov, zagotovlennykh v razlichnykh silosnykh sooruzheniyakh [The quality of silos stored in various silos]. *Glavnyy zootekhnik*. 2018. N6. 30-37 (In Russian).
10. Kiva A.A., Rabshtyna V.M., Sotnikov V.I. Bioenergeticheskaya otsenka i snizhenie energoemkosti tekhnologicheskikh protsessov v zhivotnovodstve [Bioenergy assessment and energy intensity reduction of technological processes in animal husbandry.]. Moscow: Agropromizdat. 1990. 176 (In Russian).
11. Chetoshnikova L.M. Bioenergeticheskaya otsenka tekhnologicheskikh protsessov v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Bioenergy assessment of technological processes in agriculture]. *Polzunovskiy al'manakh*. 2004. N4. 266-271 (In Russian).
12. Mishurov N.P. Bioenergeticheskaya otsenka i osnovnye napravleniya snizheniya energoemkosti proizvodstva moloka [Bioenergy assessment and main directions for reducing the energy intensity in milk production]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2010. 152 (In Russian).
13. Kerimov M.A., Valge A.M. Optimizatsiya i prinyatie resheniy v agroinzhenerii [Optimization and decision making in agricultural engineering]. Moscow: Kolos-S. 2021. 460 (In Russian).
14. Fedorova O.A., Tekushev A.H., Chaplygin M.E., Davydova S.A. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya poverkhnostnogo uluchsheniya kormovykh ugodiy [Technologies

and technical means for simplificated improvement of forage lands]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2022. N2(66). 404-414 (In Russian).
15. Tekushev A.H., Eremin P.A. Tendentsii razvitiya tekhnicheskikh sredstv dlya poseva mnogoletnikh trav i podderzhaniya produktivnogo dolgoletiya vyrozhdayushchikhsya kormovykh ugodiy [Trends in the development of technical means for sowing perennial grassesand maintaining productive longevity of degenerate forage lands]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2021. N1. 70-79 (In Russian).
16. Marchenko O.S., Tekushev A.H., Kostomakhin M.N., Voronov A.N. Prioritetnye napravleniya razvitiya tekhnicheskikh sredstv dlya zagotovki vysokokachestvennykh kormov [Priority directions of developing technical means for harvesting high-quality feed]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2019. N1. 26-30 (In Russian).
17. Lobachevskiy Ya.P., Mazitov N.K., Sakhapov R.L., et al. Effektivnost' innovatsionnoy tekhnologii proizvodstva produktsii rastenievodstva v usloviyakh VTO – pri nizkoy sebestoimosti i vysokoy rentabel'nosti na osnove ispol'zovaniya otechestvennoy tekhniki [The effectiveness of innovative technology for the production of crop production in the WTO – at low cost and high profitability based on the use of domestic technology]. V sbornike: Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii. Sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya osnovopolozhnika zemledel'cheskoy mekhaniki akademika V.P. Goryachkina. Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva. 2013. 50-54 (In Russian).
18. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Marchenko O.S., Tsench Yu.S. Sozdanie innovatsionnoy tekhniki i resursosberegayushchikh tekhnologiy proizvodstva kormov – osnova razvitiya zhivotnovodstva [Creation of innovative equipment and resource-saving technologies of feed production-the basis of livestock development]. *Vestnik MGAU im. V.P. Goryachkina*. 2017. N82. 23-28 (In Russian).
19. Dmitriev S.Yu., Dmitriev Yu.P., Tsench Yu.S. Kompleks mashin AGROMASH dlya obrabotki zalezhnykh zemel' [Agromash machinery complex for processing of fallow land]. *Vestnik VIESH*. 2018. 2(31). 40-47 (In Russian).
20. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozdanie i razvitie sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Creation and development of machine systems and technologies for complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Керимов М.А. – научное руководство, формулирование основных направлений и разработка концептуальных положений исследования, доработка текста, формирование общих выводов;

Иванов Д.В. – литературный анализ, оценка технологий производства кормов с учетом природно-производственных условий, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kerimov M.A. – scientific guidance, formulating the main research concepts and development of the research conceptual provisions, finalization of the manuscript, formation of general conclusions;

Ivanov D.V. – literature review, evaluation of fodder production technologies with regard to natural-production conditions, experimental research, processing the research results.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию **The paper was submitted to the Editorial Office on** **23.01.2023**
Статья принята к публикации **The paper was accepted for publication on** **28.02.2023**