

А. В. СПЕСИВЦЕВ, А. И. СЕМЕНОВ, В. А. СПЕСИВЦЕВ  
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,  
Санкт-Петербург  
А. И. СУХОПАРОВ

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства - филиал  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург

## НЕЧЁТКО-ВОЗМОЖНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ СОВОКУПНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОРМОВ ИЗ ТРАВ

*В докладе приведен пример построения нечетко-возможностной модели для оценивания качества кормов из трав по содержанию обменной энергии сухого вещества в корме, МДж/кг, как модель второго уровня иерархической объектно-ориентированной системы моделей технологии производства кормов из трав в целом. Численные эксперименты показали, что выполнение прогнозных решений обеспечивает получение в хозяйствах кормов I класса не ниже 50 %, а также повышению энергетической эффективности всего процесса заготовки до 30 %.*

**Введение.** Целью данного исследования является построение математических моделей трудноформализуемых систем и процессов, которые характерны для условий всего сельскохозяйственного производства, в том числе и заготовки кормов из трав для ферм крупного рогатого скота (КРС) [1, 2].

Заготавливаемые корма из трав высокого качества существенно повышают продуктивность сельскохозяйственных животных. Поэтому своевременное и оперативное выполнение технологических операций, применение эффективных технологических приёмов и способов в соответствии с агротехническими требованиями будет способствовать формированию сбалансированной по питательным веществам кормовой базы для животных. Особенно существенно качество кормов из трав влияет на продуктивность дойного стада КРС. Получение качественных кормов с минимальными затратами на единицу питательной ценности является одной из главных задач отрасли кормопроизводства [3–6].

Выбор и принятие эффективного решения на каждом этапе осуществления технологического процесса кормопроизводства из трав весьма трудоёмок и длителен по времени из-за большого количества альтернативных вариантов. При этом необходимо учитывать не только многообразие различных факторов, но и их совокупное влияние на реализацию всех этапов технологии с учётом имеющихся земельных, материальных, трудовых ресурсов и складывающихся погодных условий. В таких условиях актуальным является формализация и использование знаний и опыта экспертов на основе нечётко-возможностного подхода, что позволяет получить систему математических моделей, содержащую в себе различные технико-технологические решения, их степень значимости во взаимосвязи друг с другом и прогнозируемое в итоге качество получаемого корма из трав [2–4].

**Методы и материалы.** Нечётко-возможностный подход является синтезом элементов теории нечетких множеств (извлечение и представление экспертных знаний) и теории планирования экспериментов (задание опросной матрицы и построение математической модели). При этом следует особо подчеркнуть, что исходными для построения математической модели являются знания и опыт эксперта, а статистические данные предыдущих лет по хозяйствам служат только для оценивания степени адекватности расчетов по синтезированной модели [1].

Основное внимание направлено на методику построения адекватной нечетко-возможностной модели с использованием знаний и опыта эксперта. Подчеркнем, что «материалом» обработки служат знания, а сам при этом эксперт рассматривается как «интеллектуальная измерительно-диагностическая система» [1]. Решение поставленной задачи эксперт начинает с выбора факторного пространства из нечетких лингвистических переменных, в котором он осуществляет решение.

**Нечетко-возможностная модель качества кормов из трав.** Исследования, проведенные ранее [4], позволили построить математическую модель верхнего уровня иерархической структурной модели оценивания процесса кормопроизводства из трав, которая включала факторное пространство из пяти нечетких лингвистических переменных: почвенный ресурс ( $X_1$ ), кормовой ресурс ( $X_2$ ), технологический ресурс ( $X_3$ ), технико-административный ресурс ( $X_4$ ) и погодноклиматические условия ( $X_5$ ). В настоящем исследовании представлена одна из нечетко-возможностных моделей второго уровня иерархии, раскрывающая обобщенный показатель модели первого уровня иерархии  $X_3$  (технологический ресурс), который является некоторой функцией от шести переменных: фаза вегетации ( $X_{31}$ ); тип применяемых косилок и время скашивания ( $X_{32}$ ); интенсивность ворошений ( $X_{33}$ ); внесение консерванта ( $X_{34}$ ); способ досушивания ( $X_{35}$ ) и способ хранения ( $X_{36}$ ).

Согласно разработанной методике [1, 2], в результате обработки данных экспертной опросной матрицы получена нечетко-возможностная модель оценивания состояния технологического ресурса и влияние на его величину нечетких лингвистических переменных выбранного факторного пространства в рамках решения общей задачи первого уровня иерархической системы повышения содержания обменной энергии в кормах из трав [4]:

$$X_3 = 8,859 + 0,703X_{31} + 0,109X_{32} + 0,172X_{33} + 0,359X_{34} + 0,140X_{35} + 0,359X_{36} - 0,109X_{34}X_{35} - 0,131X_{31}X_{34}X_{36} - 0,109X_{32}X_{33}X_{35},$$

где приведены только члены разложения с коэффициентами, значимо отличающимися от нуля, а все переменные представлены в стандартизованном безразмерном масштабе.

Проведем краткий анализ полученной модели. Следует обратить внимание на нелинейность модели, где участвуют даже тройные взаимодействия переменных. Это указывает на сложный характер совокупного влияния технологических факторов на качественные параметры кормов из трав. Фаза вегетации ( $X_{31}$ ), внесение консервантов ( $X_{34}$ ) и способ хранения ( $X_{36}$ ) – наиболее сильно действующие факторы, что полностью соответствует теории агрономической науки, но в нашем случае получены количественные оценки степени их влияния в количественном выражении. Благодаря построенной адекватной модели можно утверждать, что при прочих равных условиях потери от внесения консервантов и неправильный способ хранения ухудшают качество готовой продукции по содержанию обменной энергии в два раза меньше, чем нарушение сроков скашивания трав в период вегетации.

В результате проведения численных экспериментов установлено, что гарантированное высокое качество кормов из трав I класса не ниже 50 % возможно только при соблюдении всех агробиологических требований на всех этапах их жизненного цикла. Кроме того, строгое выполнение требований показало, что расчетные значения энергетической эффективности всего процесса заготовки кормов из трав до 30 %.

Однако, как показывает анализ модели, не следует забывать и существенную взаимообусловленность факторов даже тройными взаимодействиями. Так, очень показательным является существенное влияние тройного взаимодействия именно наиболее значимых поименованных выше факторов. Это тем более важно, поскольку синтезированная модель второго уровня иерархии дает уже количественные оценки для такого важного фактора первого уровня иерархической метамоделю – обобщенного показателя агробиопотенциала по урожайности кормовых угодий.

**Заключение.** В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы.

Приведен практический пример применения новой методологии построения в шестифакторном пространстве нечетких лингвистических переменных математической модели на основе свертки явных и неявных экспертных знаний как одного из наиболее эффективных приемов цифровизации сельскохозяйственных производств в условиях неопределенности.

На основе знаний и опыта эксперта построена нечетко-возможностная модель потенциала урожайности трав для условий Северо-Запада России, которая позволяет прогнозировать выход качества кормов, получаемых из зелёной биомассы травы при реализации конкретных технико-технологических решений.

Осуществление процесса заготовки кормов при учете рациональных технико-технологических решений, рекомендованных прогнозированием на базе данной модели, может

обеспечить получение в хозяйствах кормов I класса не ниже 50 %, а также будет способствовать повышению энергетической эффективности всего процесса заготовки до 30 %.

Адекватность полученной модели на основании знаний экспертов подтверждена в ряде хозяйств Ленинградской области.

*Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Игнатьев М.Б., Марлей В.Е., Михайлов В.В., Спасивцев А.В.** Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. 430 с.
2. **Popov V.D., Spesivtsev A.V., Sukhoparov A.I., Spesivtsev V.A.** Use of logical-linguistic models to predict the retained biological potential of grasses during their conservation. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. Russia, June 22-24, 2016, Revised Selected Papers.* P. 244-246.
3. Справочник по кормопроизводству. 5-е изд., перераб. и дополн. / Под ред. В.М. Косолапова, чл.-корр. Россельхозакадемии, доктора с-х. наук. И.А. Трофимова, доктора географ. наук. М.: Россельхозакадемия, 2014. 717 с.
4. **Попов В.Д., Спасивцев А.В., Сухопаров А.И.** Формализация экспертных знаний в виде логико-лингвистических моделей. *Вестник РАСХН.* 2014. №3. С. 10-13.
5. **Flaten O., Bakken A. K., Randby A. T.** The profitability of harvesting grass silages at early maturity stages: An analysis of dairy farming systems in Norway. *Agricultural Systems.* 2015. Vol. 136. Jun. P. 85-95. DOI: 10.1016/j.agsy.2015.03.001
6. **Meripõld H., Tamm U., Tamm S., Võsa T., Edesi L.** Fodder galega (*Galega orientalis* Lam) grass potential as a forage and bioenergy crop. *Agronomy Research.* 2017. 15(4). P. 1693–1699. DOI: 10.15159/AR.17.021.

A.V.Spesivtsev, A.I.Semenov, V.A.Spesivtsev (St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg), A.I.Sukhoparov (Institute for engineering and environmental problems in agricultural production – branch of Federal state budgetary scientific institution “Federal scientific agroengineering center VIM”, St. Petersburg)

#### **Fuzzy-probability model for estimating the cumulative effect of technological factors on the qualitative parameters of grass feed**

The report gives an example of building a fuzzy-possibility model for assessing the quality of grass feed by the content of exchangeable energy of dry matter in the feed, MJ/kg, as a model of the second level of a hierarchical object-oriented system of models of grass feed production technology in general. Numerical experiments have shown that the implementation of predictive solutions ensures the receipt of class I feed in farms at least 50 %, as well as an increase in the energy efficiency of the entire harvesting process up to 30 %.

Авторы готовы представить текст на английском языке для сборника материалов мультиконференции, который будет подан для индексирования в Scopus