

# **АФР** АДАПТИВНОЕ КОРМОПРОИЗВОДСТВО

Научный журнал ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса», № 2 (июнь) 2026



**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ  
«АДАПТИВНОЕ КОРМОПРОИЗВОДСТВО»**

**№ 2 (июнь) 2026**

**DOI: 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2**

Учредитель и издатель журнала –  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса»  
(ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»)

Главный редактор –  
Клименко В. П. – доктор сельскохозяйственных наук,  
руководитель Испытательного центра по оценке качества и стандартизации кормов  
ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»  
E-mail: [vniikormov@mail.ru](mailto:vniikormov@mail.ru)

Редактор Георгиади Н. И.  
E-mail: [adaptagro@vniikormov.ru](mailto:adaptagro@vniikormov.ru)

Верстка и дизайн: Георгиади Н. И.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере  
информационных технологий и массовых коммуникаций Роскомнадзор.  
Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-41724 от 20.08.2010 г.

Адрес редакции:

141055 Россия  
Московская область, г. Лобня,  
ул. Научный городок, корп. 1,  
ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»  
E-mail: [adaptagro@vniikormov.ru](mailto:adaptagro@vniikormov.ru)  
<http://www.adaptagro.ru>  
Тел.: +7 (495) 577 73 37

**SCIENTIFIC-PRACTICAL INTERNATIONAL ON-LINE JOURNAL  
ADAPTIVE FODDER PRODUCTION**

**№ 2 (June) 2026**

**DOI: 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2**

Founder and publisher –  
Federal State Budget Sciences Institution «Federal Williams Research Center  
of Forage Production and Agroecology»  
(FWRC FPA)

Editor-in-Chief  
Vladimir Klimenko  
Doctor of Agricultural Sciences,  
Head of the Testing Center for Quality Assessment and Standardization of Feeds  
of the Federal Scientific Center «FWRC FPA»  
E-mail: vniikormov@mail.ru

Editors Nelly Georgiadi  
FWRC FPA  
E-mail: adaptagro@vniikormov.ru

Page makeup and design  
N. Georgiadi

Registration Certificate  
ЭЛ № ФС77-41724 (20.08.2010)

Contact:  
141055, Nauchnyi gorodok str., k. 1, Lobnya,  
Moscow Region, Russia  
Federal State Budget Sciences Institution «Federal Williams Research Center  
of Forage Production and Agroecology»  
E-mail: adaptagro@vniikormov.ru  
<http://www.adaptagro.ru>  
Tel.: +7 (495) 577 73 37

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СЕЛЕКТИВНЫЙ ФОН ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА ЛЮЦЕРНЫ С ВЫСОКОЙ АДАПТИВНОЙ И СИМБИОТИЧЕСКОЙ СПОСОБНОСТЯМИ</b> .....	6–22
<b>Степанова Г. В., Ионов А. А.</b> <i>ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ ПРИЕМОВ ПОСЕВА НА УРОЖАЙНОСТЬ СУХОГО ВЕЩЕСТВА ЛЮЦЕРНЫ ИЗМЕНЧИВОЙ В СРЕДНЕМ ПРЕДУРАЛЬЕ</b> .....	23–32
<b>Касаткина Н. И., Нелюбина Ж. С.</b> <i>УдмФИЦ УрО РАН</i>	
<b>СПОСОБЫ ФЕНОТИПИЧЕСКОГО МАРКИРОВАНИЯ СОРТОВ КЛЕВЕРА ПОЛЗУЧЕГО</b> .....	33–40
<b>Иванова А. А.</b> <i>ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»</i>	
<b>БИОПРАЙМИНГ СЕМЯН КОРМОВЫХ БОБОВ ИЗОЛЯТАМИ ШТАММОВ TRICHODERMA С ПОВЕРХНОСТИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ</b> .....	41–49
<b>Акимов А. В.<sup>1,2</sup>, Думачева Е. В.<sup>1,2</sup>, Чернявских В. И.<sup>1,2</sup>, Максимова П. В.<sup>1,2</sup>, Гаар А. В.<sup>1,2</sup></b> <sup>1</sup> <i>ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»</i> <sup>2</sup> <i>ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ КОФЕЙНОГО ЖМЫХА В РАЦИОНЕ ОВЕЦ НА ПРОЦЕССЫ ПИЩЕВАРЕНИЯ И ПЕРЕВАРИМОСТЬ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ</b> .....	50–60
<b>Мишуров А. В.</b> <i>ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»</i>	
<b>К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ КОРМОВЫХ ТРАВ</b> .....	61–83
<b>Отрошко С. А., Шевцов А. В., Косолапов В. М.</b> <i>ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»,</i>	
<b>ПРОЦЕССЫ СУШКИ ЗЕЛЕННОЙ МАССЫ ЛЮЦЕРНЫ</b> .....	84–105
<b>Брагинец С. В.<sup>1,2</sup>, Бахчевников О. Н.<sup>1</sup>, Кузьменко Д. А.<sup>1</sup>, Максак Д. А.<sup>1</sup></b> <sup>1</sup> <i>Аграрный научный центр «Донской»</i> <sup>2</sup> <i>Донской государственный технический университет</i>	
<b>ПАМЯТИ УЧЕНОГО. А. А. Зотов</b> .....	106–107

## CONTENT

<b>SELECTIVE BACKGROUND FOR FORMING THE SOURCE ALFALFA MATERIAL WITH HIGH ADAPTIVE AND SYMBIOTIC ABILITIES.....</b>	<b>6–22</b>
<b>Stepanova G.V., Ionov A.A.</b> <i>Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology</i>	
<b>INFLUENCE OF SOWING TECHNIQUES ON DRY MATTER YIELD OF VARIABLE ALFALFA IN THE MIDDLE CIS-URALS REGION .....</b>	<b>23–32</b>
<b>Kasatkina N.I., Nelyubina Zh.S.</b> <i>Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences</i>	
<b>METHODS OF PHENOTYPIC LABELING OF WHITE CLOVER VARIETIES Ivanova A.A.....</b>	<b>33–40</b>
<i>Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology</i>	
<b>BIOPRIMING OF FODDER BEAN SEEDS WITH ISOLATES OF <i>TRICHODERMA</i> STRAINS FROM THE SURFACE OF SCOTS PINE .....</b>	<b>41–49</b>
<b>Akimov A.V.<sup>1,2</sup>, Dumacheva E.V.<sup>1,2</sup>, Chernyavskikh V.I.<sup>1,2</sup>, Maksimova P.V.<sup>1,2</sup>, Gaar A.V.<sup>1,2</sup></b> <sup>1</sup> <i>Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology</i> <sup>2</sup> <i>Belgorod State National Research University</i>	
<b>EFFECT OF COFFEE GROUNDS IN THE DIET OF SHEEP ON DIGESTION AND DIGESTIBILITY OF NUTRIENTS .....</b>	<b>50–60</b>
<b>Mishurov A.V.</b> <i>Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology</i>	
<b>TO A QUESTION OF A SUBSTANTIATION CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL PARAMETRES OF WORKING TOOLS FOR CONDITIONING OF FODDER GRASSES ...</b>	<b>61–83</b>
<b>Otroshko S.A., Shevtsov A.V., Kosolapov V.M.</b> <i>Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology</i>	
<b>DRYING PROCESSES OF ALFALFA GREEN BIOMASS (REVIEW) .....</b>	<b>84–105</b>
<b>Braginets S.V.<sup>1,2</sup>, Bakhchevnikov O.N.<sup>1</sup>, Kuzmenko D.A.<sup>1</sup>, Maksak D.A.<sup>1</sup></b> <sup>1</sup> <i>Agricultural Research Centre Donskoy</i> <sup>2</sup> <i>Don State Technical University</i>	
<b>IN MEMORY OF THE SCIENTIST. A.A. Zotov.....</b>	<b>106–107</b>

УДК 631.344:633.313

DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2-6-22

## СЕЛЕКТИВНЫЙ ФОН ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА ЛЮЦЕРНЫ С ВЫСОКОЙ АДАПТИВНОЙ И СИМБИОТИЧЕСКОЙ СПОСОБНОСТЯМИ\*

**Г. В. Степанова**, кандидат сельскохозяйственных наук  
**А. А. Ионов**, научный сотрудник

ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»  
141055, Россия, Московская область, г. Лобня, ул. Научный городок, корп. 1  
[gvstep@yandex.ru](mailto:gvstep@yandex.ru)

## SELECTIVE BACKGROUND FOR FORMING THE SOURCE ALFALFA MATERIAL WITH HIGH ADAPTIVE AND SYMBIOTIC ABILITIES

**G.V. Stepanova**, Candidate of Agricultural Sciences  
**A.A. Ionov**, Researcher

*Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology*  
141055, Russia, Moscow Region, Lobnya, Nauchnyi gorodok str., k. 1  
[gvstep@yandex.ru](mailto:gvstep@yandex.ru)

По результатам исследований 2022–2023 гг. выдвинута гипотеза: для создания высокоадаптивных сортов люцерны и комплементарных им штаммов клубеньковых бактерий, которые будут использованы в новых регионах люцерносеяния, отличающихся дефицитом тепла и солнечных дней, избыточной влагообеспеченностью, их испытание и отбор следует проводить в вегетационных опытах в феврале – апреле и сентябре – ноябре при пониженной температуре воздуха и низкой освещенности. Испытание сортов люцерны и штаммов клубеньковых бактерий проводили в поликарбонатной теплице с августа 2024 г. по май 2025 г. В период с 5 августа по 5 ноября сформировались люцерно-ризобияльные симбиотические системы с разной степенью эффективности. Зимостойкость высокоэффективных симбиотических пар с разными сортами люцерны составила 19,0–48,1 %, зимостойкость растений, не сформировавших эффективный симбиоз, — 1,0–2,3 %. Средняя продуктивность перезимовавших растений высокоэффективных симбиотических пар достигла 36,6–111,4 г/растение сухого вещества и 3,00–6,99 г/растение семян. Соответствующие показатели растений люцерны, не вступивших в эффективный симбиоз, были 28,1–49,20 и 2,13–2,62 г на растение. Самыми зимостойкими оказались люцерно-ризобияльные системы с сортами Вега 87 (36,1 %) и Таисия (48,1 %), самыми продуктивными — с сортами Люся и Таисия (96,7 и 111,4 г

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса» «Технология создания высокоэффективных сорто-микробных систем с высоким потенциалом адаптивности, регулируемой урожайностью, биохимическим составом, процессами роста и развития за счет возобновляемых ресурсов растительно-микробных симбиозов» (FGGW-2026-0004).

сухого вещества, а также 6,21 и 6,99 г семян на растение). Наиболее эффективные штаммы клубеньковых бактерий L6-1, L6-3 и A1 повысили продуктивность растений по сухому веществу в 2,3–2,9 раза, семенам — в 2,6–3,3 раза.

**Ключевые слова:** вегетационные опыты, селективный фон, люцерна изменчивая, люцерно-ризобиальный симбиоз, адаптивная способность.

Based on the results of research conducted in 2022–2023, it was hypothesized that in order to create highly adaptable alfalfa varieties and complementary strains of nodule bacteria that can be used in new alfalfa-growing regions characterized by a lack of heat and sunny days, as well as excessive moisture availability, their testing and selection should be conducted in vegetative experiments in February–April and September–November at lower air temperatures and lower light levels. The test of alfalfa varieties and nodule bacteria strains was conducted in a polycarbonate greenhouse from August 2024 to May 2025. During the period from August 5 to November 5, alfalfa-rhizobial symbiotic systems with varying degrees of efficiency were formed. The winter hardiness of highly effective symbiotic pairs with different alfalfa varieties was 19.0–48.1%, while the winter hardiness of plants that did not form an effective symbiosis was 1.0–2.3%. The average productivity of overwintered plants of highly effective symbiotic pairs reached 36.6–111.4 g/plant of dry matter and 3.00–6.99 g/plant of seeds. The corresponding indicators of alfalfa plants that did not enter into an effective symbiosis were 28.1–49.20 and 2.13–2.62 g per plant. The most winter-hardy systems were alfalfa-rhizobial systems with the varieties Vega 87 (36.1%) and Taisiya (48.1%), and the most productive systems were with the varieties Lyusya and Taisiya (96.7 and 111.4 g of dry matter per plant, as well as 6.21 and 6.99 g of seeds per plant). The most effective strains of nodule bacteria, L6-1, L6-3, and A1, increased plant productivity in 2.3–2.9 times by dry matter and in 2.6–3.3 times by seeds.

**Keywords:** vegetative experiments, selective background, alfalfa, alfalfa-rhizobial symbiosis, adaptive capacity.

**Введение.** Люцерна — одна из самых питательных и потому наиболее востребованных на мировом рынке кормовых культур. Она богата белком, клетчаткой и другими полезными веществами. В 2024 г. общая площадь посевов люцерны во всех категориях хозяйств России составляла около 2 млн га. [1]. Основные зоны выращивания люцерны — Центральный, Центрально-Черноземный, Северо-Кавказский, Нижневолжский, Уральский регионы [2]. Благодаря разработке биотехнологии сопряженной симбиотической селекции люцерны в ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» и созданию на ее основе сортов люцерны изменчивой с повышенной адаптивной способностью, ареал возделывания люцерны продвинулся на север и северо-восток до Карелии, Архангельской и Во-

логодской областей [3–5]. В основе новой методики лежит отбор исходных генотипов люцерны и клубеньковых бактерий с высокой адаптивной способностью на жестком полевым селективном фоне [6].

Селекционные программы на повышение адаптивной способности теоретически обоснованы и довольно широко используются. Одной из первых Е. Н. Синская показала, что большой интерес представляет среда как фон для отборов и формирования селекционного материала. Она выделяла три типа фонов: стабилизирующий, на котором полиморфизм популяции не выявляется; анализирующий, способствующий выявлению различных биотипов; нивелирующий — на котором угнетается жизнеспособность различных генотипов и ниве-

лируются различия между ними [7; 8]. Развитию адаптивной селекции особое внимание уделял А. А. Жученко. Он писал, что адаптивная система селекции растений — важнейшая сфера практического использования фундаментальных знаний, и перед селекционерами стоит задача не только повысить продуктивность растений, но и сочетать ее с устойчивостью к абиотическим и биотическим условиям среды. Селекционные программы должны быть направлены на придание сортам устойчивости к тем стрессорам, которые в наибольшей степени ограничивают величину и качество урожая в данной почвенно-климатической зоне [9; 10]. Большое внимание А. А. Жученко уделял созданию экологически устойчивых сортов. Он писал: «Экологическая устойчивость сорта — важнейшее условие реализации его ценных свойств в изменяющихся условиях внешней среды» [11]. В развитии этого утверждения А. И. Прянишников с соавторами отмечают: «При адаптивной селекции необходимо создавать сорта, у которых высокая потенциальная урожайность сочетается с экологической устойчивостью к тем стрессам, чье действие невозможно уменьшить за счет улучшения технологий» [12].

В практической селекции на первый план выходит проблема создания оптимального селективного фона. Е. Г. Добруцкая с соавторами отмечают, что при селекции на адаптивность проблема фона, способного выявлять комплексную изменчивость по заданному признаку, очень важна. В плохих условиях можно выявить устойчивые формы, но трудно обнаружить особи с высоким потенциалом продуктивности. Селективный фон

должен быть оптимально благоприятным для выделения устойчивых генотипов, но при этом не обеднять исходную популяцию признаками продуктивности и качества [13]. В Белоруссии при создании сорта ржи с высокой адаптивной способностью в качестве селективного фактора использовали контрастные погодные условия в разные годы оценки селекционного материала [14]. При оценке адаптивного потенциала новых сортов гречихи, испытания проводили в трех географических точках с разными экологическими условиями [15]. В исследованиях А. А. Гончаренко с соавторами установлено, что основными факторами влияния на экспрессию признаков качества оказались генотип сорта и погодные условия. По многим признакам сила влияния средового фактора превышала влияние генотипа сорта [16].

Основным недостатком испытания селекционного материала на вышеназванных фонах является сложная воспроизводимость из-за неконтролируемости погоды в полевых условиях. По видимому, фоны необходимо создавать искусственно в контролируемых условиях. Например, в Федеральном научном центре лубяных культур в условиях вегетационного опыта (2017–2019 гг.) на селективных фонах исследована реакция 27 образцов льна на снижение кислотности почвы до нейтральных значений. Выявлены образцы льна, которые могут быть использованы в качестве источников устойчивости к «физиологическому угнетению» льна, обусловленному стрессовыми факторами при нейтральной реакции среды [17].

В лаборатории селекции люцерны ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» ведется

работа по созданию специальных селективных фонов в частично контролируемых условиях для отбора исходного материала люцерны с высокой адаптивной и симбиотической способностью. В представленной статье показаны некоторые результаты отбора исходного материала на таком фоне.

**Цель работы** — изучить особенности роста и развития растений люцерны изменчивой, инокулированных активными штаммами ризобий, на жестком селективном фоне в частично контролируемых условиях выращивания; отобрать высокоадаптивные люцерно-ризобиальные комплементарные системы.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

1. Изучена эффективность люцерно-ризобиальных систем в вегетационных опытах селекционно-тепличного комплекса (СТК) (2022 и 2023 гг.).

2. Сформирован селективный фон в частично контролируемых условиях (поликарбонатная теплица, август 2024 г. – май 2025 г.)

3. Отобраны высокоэффективные люцерно-ризобиальные системы, отличающиеся высокой зимостойкостью.

4. Дана оценка отобранного материала по основным хозяйственно ценным признакам (май – сентябрь 2025 г.)

**Материалы и методы.** Исследования проводили в 2022–2025 гг. в вегетационных опытах в частично контролируемых условиях СТК и поликарбонатной теплицы на селективном фоне.

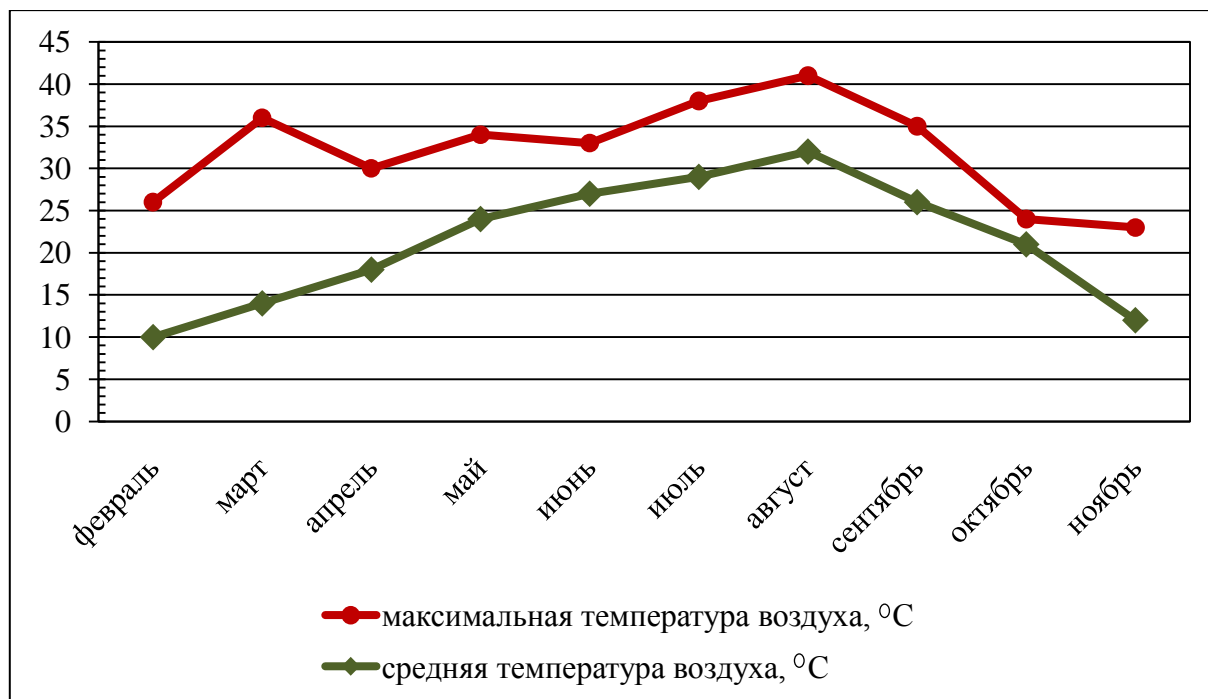
В целом работа представлена двумя этапами исследований. В 2022 и 2023 гг. в СТК были изучены люцерно-ризобиальные системы, полученные в результате инокуляции семян люцерны сортов Па-

стбищная 88 и Таисия изолятами клубеньковых бактерий (КБ), созданными в лаборатории селекции люцерны.

В СТК освещенность естественная; температура воздуха контролируется подогревом в холодный период года и вентиляцией в жаркий; влажность субстратов поддерживается поливом по мере подсыхания. Температура воздуха в СТК в период активного роста люцерны показана на рисунке 1.

Максимальная температура воздуха в солнечные дни, даже в холодное время года, поднималась до 24–36 °С, в то время как средняя температура была в пределах 10–14 °С. В мае – сентябре в 14–16 часов воздух прогревался до 35–43 °С, при этом среднесуточная температура составляла 24–29 °С. В СТК отмечали ежесуточные резкие перепады температуры воздуха, но в связи с тем, что у растений реакция на колебания температуры воздуха замедленная, растения успешно росли и развивались.

На втором этапе проверяли гипотезу, выдвинутую в результате анализа экспериментальных данных, полученных в 2022–2023 гг. Было высказано предположение, что для создания штаммов с высокой эффективностью симбиоза, которые будут использовать в новых регионах люцерносеяния, отличающихся дефицитом тепла, солнечных дней, избыточной влагообеспеченностью, а также отбора генотипов растений люцерны с высокой адаптивной способностью к вышеперечисленным стрессорам, испытание штаммов следует проводить в вегетационных опытах в феврале–апреле и сентябре–ноябре при пониженной температуре воздуха, обильном поливе и низкой освещенности.



**Рис. 1. Температура воздуха в селекционно-тепличном комплексе, вегетационные опыты, данные 2023 г.**

Исследования проводили в поликарбонатной теплице (август 2024 г. – май 2025 г.) и естественных условиях (на открытом воздухе в июне–сентябре 2025 г.). В поликарбонатной теплице температура воздуха была несколько выше по сравнению с внешней средой за счет солнечного нагрева его в замкнутом пространстве. В солнечные дни различия достигали 6–10 °C, в пасмурные в теплице было на 1,6–3,5 °C теплее. В 2024 г. устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через +5 °C произошел в третьей декаде октября, в теплице — на 10 дней позднее. Весенний переход через +5 °C отмечен в начале второй декады апреля 2025 г., в теплице — в конце первой декады марта. В теплице осенью вегетация прекратилась на 10–12 дней позднее по сравнению с естественными условиями, а весной началась на месяц раньше (рис. 2).

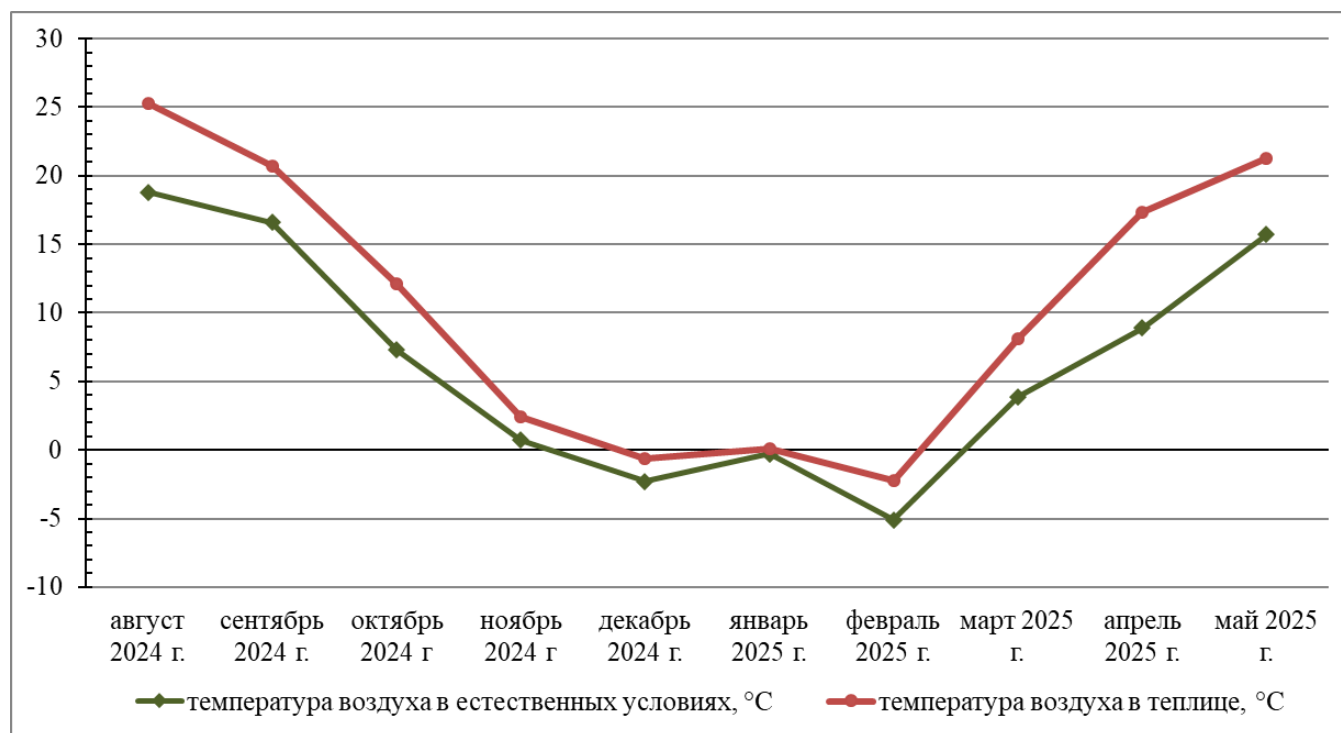
В вегетационных опытах (СТК) использовали полевую почву, в которой содержалось 2,04 % гумуса по Тюрину, общего азота 0,142 %, 138,81 мг/кг почвы подвижного фосфора и 92,75 мг/кг обменного калия, рН солевой вытяжки 5,73, В опыте посева 2022 г. провели шесть циклов скашивания с марта по октябрь 2023 г., а в опыте посева 2023 г. — четыре цикла с мая по октябрь 2023 г.

В поликарбонатной теплице при создании селективного фона использовали сильноокислую для выращивания люцерны почву (рН = 4,01). Содержание гумуса — 1,22 %, общего азота — 0,095 %, подвижного фосфора — 101,86 и обменного калия — 72,30 мг/кг почвы.

Во всех опытах инокулированные семена люцерны высевали в ящики, наполненные почвой. В СТК вегетационный опыт № 1 был заложен в сентябре 2022 г., а опыт № 2 — в марте 2023 г.

В поликарбонатной теплице люцерну высеяли 23 июля 2024 г., полные всходы появились 2–4 августа. В каждом ящике размещали по три рядка люцерны разных сортов, инокулированных одно-

именным штаммом (изолятом) клубеньковых бактерий (КБ). Семена люцерны раскладывали в рядке с расстоянием 1 см друг от друга. Повторность четырехкратная.



**Рис. 2. Температура воздуха в естественных условиях и поликарбонатной теплице в осенне-зимний и весенний периоды, частично контролируемый селективный фон**

В качестве макросимбионтов взяли сорта люцерны изменчивой (*Medicago varia* Mart.) селекции ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»: Пастбищная 88, Таисия, Агния ВИК, Вега 87, Лада, новый сорт Люся.

В качестве микросимбионтов в СТК использовали изоляты клубеньковых бактерий (*Sinorhizobium meliloti*), выделенные в лаборатории селекции люцерны: I — выделен из клубеньков люцерны изменчивой (*M. varia* Mart.), II и IV — из клубеньков донника белого (*Melilotus albus* Medik.), III — смыв с семян люцерны посевной (*M. sativa* L.), VI — выделен из клубеньков люцерны серповидной

(*M. falcate* L.), а также производственный штамм клубеньковых бактерий 445<sup>a</sup>. На селективном фоне использовали новые экспериментальные штаммы КБ серии L6, а также A1, A5 и 404<sup>b</sup>, созданные во ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии (г. С.-Петербург). Контроль — вариант без инокуляции.

Люцерно-ризобиальные системы формировали по общепринятой методике ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии [18]. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью компьютерной программы Microsoft Office Excel 2007 по методике, предложенной Б. А. Доспеховым [19].

В поликарбонатной теплице после появления всходов в начале августа 2024 г. растения люцерны выращивали до устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через +5 °С (5 ноября). 5 ноября провели учет: все растения срезали, высушили и взвесили для определения их продуктивности. Перед срезанием измерили высоту растений в вариантах с инокуляцией и без инокуляции (контроль). Отметили растения, начавшие формировать генеративные побеги, затем подсчитали их количество и количество растений, находящиеся в фазе розетки.

Весной 2025 г. все перезимовавшие растения были пересажены в вегетационные сосуды емкостью 5 л и перемещены в естественные условия (на открытый воздух) для получения семян от свободного опыления. Ко времени полного созревания семян (29 сентября 2025 г.) все растения были срезаны, высушены до постоянного веса, взвешены целиком с бобами, затем собраны бобы и выделены из них семена.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Основные показатели, по которым оценивали эффективность симбиотических взаимодействий новых изолятов КБ с сортами люцерны в вегетационных опытах — это высота и продуктивность растений люцерны.

1. В СТК в среднем за 6 циклов скашивания существенных различий между вариантами по высоте растений сортов Таисия и Пастбищная 88 не выявлено. По продуктивности (средняя масса сухого вещества растения) сорто-микробная система «Таисия + изолят III» оказалась

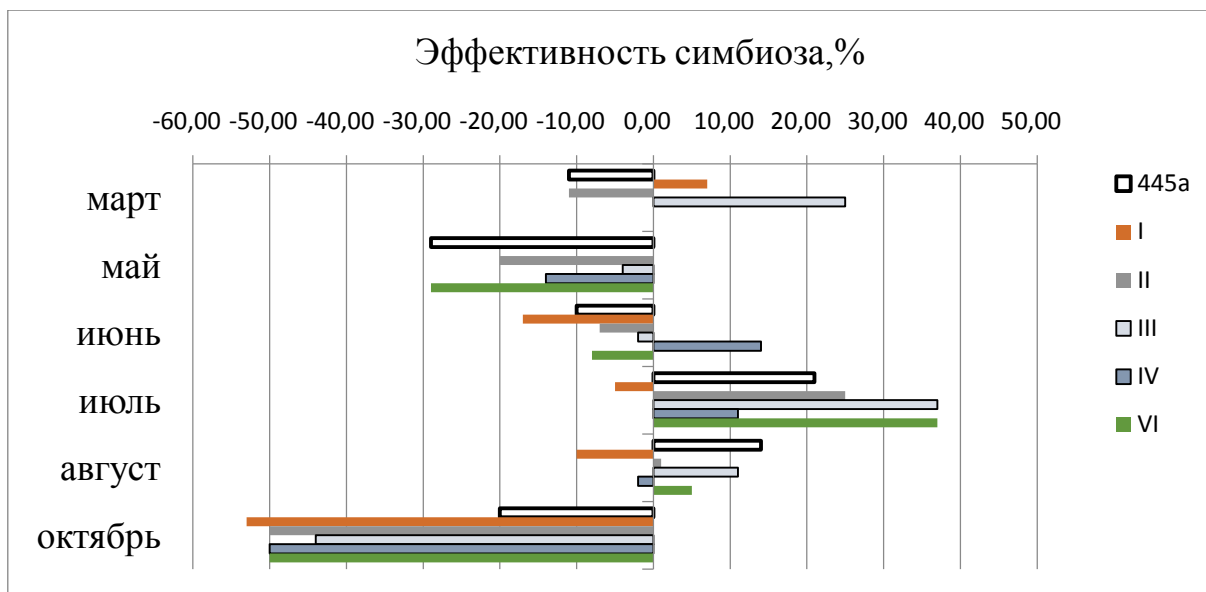
существенно продуктивнее растений в варианте без инокуляции: на 0,25 г на растение (+16 %).

Не выявлено изолятов КБ, оказывающих положительное влияние на продуктивность растений люцерны сорта Пастбищная 88. Причем изоляты II, III, IV и VI существенно (на 9–13 %) снижали продуктивность растений люцерны этого сорта.

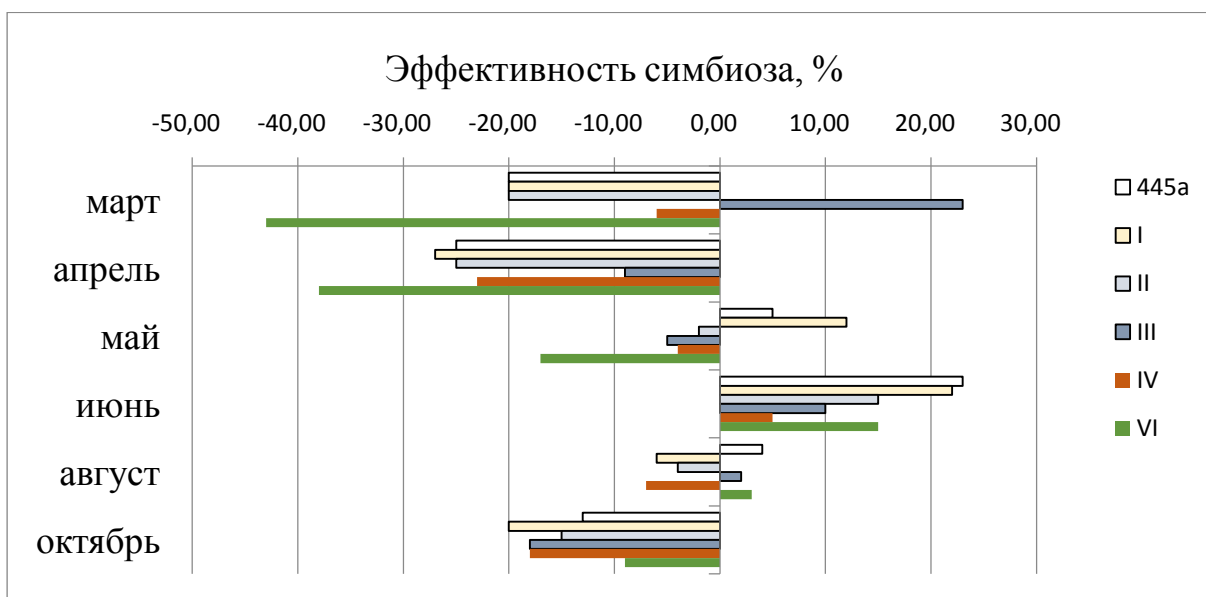
На рисунках 3 и 4 показана эффективность взаимодействий новых изолятов клубеньковых бактерий с сортами люцерны (среднее за вегетационные периоды 2022 и 2023 гг.).

В качестве контроля (вариант без инокуляции) на рисунках служит вертикальная ось. Слева от вертикальной оси показаны симбиотические пары с отрицательной эффективностью симбиоза (продуктивность растений была ниже, чем в варианте без инокуляции), справа — симбиотические пары с положительной эффективностью симбиоза (продуктивность возрастала под влиянием инокуляции).

Почти все люцерно-ризобиальные пары с сортом Таисия в периоды март–июнь и сентябрь–октябрь были менее продуктивными по сравнению с вариантом без инокуляции. Единственное исключение — изолят III, который оказался наиболее комплементарным сорту Таисия. В марте и июле люцерно-ризобиальная система с ним обеспечила прибавку продуктивности в размере 25 и 37 %, в августе — 11 %. В среднем за сезон продуктивность симбиотической пары «сорт Таисия + изолят III» была на 16 % выше контроля (рис. 3).



**Рис. 3. Эффективность люцерно-ризобийных систем с сортом люцерны изменчивой Таисия и новыми изолятами КБ, среднее по вегетационным опытам № 1 и № 2, СТК, 2022 и 2023 гг.**



**Рис. 4. Эффективность люцерно-ризобийных систем с сортом люцерны изменчивой Пастбищная 88 и новыми изолятами КБ, среднее по вегетационным опытам № 1 и № 2, СТК, 2022 и 2023 г.**

Гистограммы на рисунке 4 в основном похожи на гистограммы рисунка 3. В периоды с марта по июнь и с сентября по октябрь почти все люцерно-ризобийные системы уступали контролю по продуктивности сухого вещества. Не

выявлено ни одного изолята, формирующего эффективные люцерно-ризобийные системы с сортом Пастбищная 88. На уровне варианта без инокуляции был производственный штамм 445<sup>a</sup>. Средняя эффективность симбиоза соста-

вила  $-2\%$ . На рисунке 4 показано, что эффективность симбиоза штамма 445<sup>a</sup> с сортом Пастбищная 88 в мае и августе была 5 и 4 %, в июне достигла 22 %, в марте, апреле и октябре  $-13\ldots-25\%$ .

В период активного роста растений люцерны сорта Таисия их средняя высота достигала 34,1–38,4 см. Растения сорто-микробных систем со штаммом 445<sup>a</sup> и изолятами I, II и VI были существенно (на 2,8–3,7 см) выше по сравнению с вариантом без инокуляции. Инокуляция изолятами IV и III существенно (на 15 и 18 %) повысила продуктивность растений сорта Таисия. Средняя облиственность растений испытываемых сорто-микробных систем была в пределах 57,0–59,8 %, статистически значимых различий между люцерно-ризобиальными парами не отмечено.

Инокуляция сорта Пастбищная 88 штаммом 445<sup>a</sup>, изолятами I, II и VI существенно (на 3,1–5,0 см) увеличивала высоту растений люцерны. При этом продуктивность растений увеличивалась незначительно (на 1–7 %): изменения в пределах ошибки опыта. Инокуляция не оказала заметного влияния и на облиственность. Отклонения от стандарта составили 0,4–1,6 %, НСР<sub>05</sub> = 2,7 %. Следует отметить изолят IV, который увеличил облиственность сорта Таисия на 1,2 %, а сорта Пастбищная 88 — на 1,4 %.

Анализ эффективности симбиоза новых изолятов КБ с сортами люцерны в вегетационных опытах выявил три периода схожих реакций растений люцерны изменчивой на инокуляцию. Первый период: февраль–апрель. Эффективность симбиоза с сортом Таисия находилась в пределах от 0 до  $-28\%$ , с сортом Паст-

бищная 88 — от  $-5$  до  $-44\%$ . Во второй период (с мая по август), инокуляция повышала продуктивность растений сорта Таисия на 5–36 %, сорта Пастбищная 88 — на 2–23 %. Третий период: сентябрь–ноябрь. Продуктивность инокулированных растений люцерны сорта Таисия была на 9–54 % ниже растений без инокуляции, сорта Пастбищная 88 — на 9–20 % ниже (рис. 3; 4).

Проведенные в 2022–2023 гг. исследования позволили выдвинуть рабочую гипотезу: для создания высоко адаптивных сортов люцерны и комплементарных им штаммов КБ, которые будут использованы в новых регионах люцерносеяния, отличающихся дефицитом тепла и солнечных дней, избыточной влагообеспеченностью, их испытание и отбор следует проводить в вегетационных опытах в феврале–апреле и сентябре–ноябре при пониженной температуре воздуха и низкой освещенности. Такие условия можно смоделировать или в климатической камере (что очень дорого), или в поликарбонатной теплице, в которой осенью вегетация заканчивается в октябре, а весной начинается в марте, то есть продолжительность вегетации увеличивается примерно на месяц по сравнению с условиями поля. Для проверки этой гипотезы был заложен селективный фон в частично контролируемых условиях поликарбонатной теплицы.

2. Формирование селективного фона в частично контролируемых условиях (поликарбонатная теплица).

К 5 августа 2024 г. по всем номерам сформировались полные всходы. Несмотря на то, что погода в сентябре и октябре 2024 г. была теплая, на кислой почве и в условиях сокращающегося дня

большинство растений росли медленно, многие остались в фазе розетки. Однако были и такие, которые сравнительно быстро сформировали генеративные побеги и оказались в 2–3 раза выше остальных. Эти растения были отмечены, чтобы весной отобрать их для дальнейшей работы. 5 ноября 2024 г. провели учет зеленой массы растительно-микробных систем. Подготовили травостой к периоду зимнего покоя.

Селективный фон работает не только как инструмент отбора генотипов растений и комплементарных им штаммов

микроорганизмов с заданными свойствами. На селективных фонах можно проводить всестороннюю оценку селекционного материала по основным хозяйственным, биологическим и морфологическим признакам с учетом специфических условий фона и его модификации во времени.

Субстрат, на котором выращивали растительно-ризобиальные симбиотические системы, — низкоплодородный тяжелый суглинок, растения люцерны в таких условиях растут и развиваются очень плохо (рис. 5).



**Рис. 5. Травостой люцерны изменчивой сортов: 1 – Агния ВИК, 2 – Вега 87, 3 – Лада, 4 – Люся, 5 – Таисия в варианте без инокуляции (контроль), посев 23 июля 2024 г. фото 5 ноября 2024 г.**

Средняя высота растений всех сортов в контроле была небольшой: 1,7–2,4 см, а инокуляция штаммами А5, L6-34 и L6-3 увеличила высоту растений разных сортов в 3,7–4,4 раза: до 8,0–11,2 см (табл. 1).

Объясняется это тем, что в вариантах с инокуляцией значительная часть растений вступила в эффективный симбиоз с клубеньковыми бактериями, в результате чего ускорился рост и развитие рас-

тений люцерны.

Судя по высоте растений, наибольшей симбиотрофностью обладают сорта люцерны Агния ВИК и Вега 87. Высота растений, инокулированных штаммами L6-34, L6-72, А5, L6-3, возросла в 4,0–5,3 раза. Наибольший прирост (в 3,7–4,4 раза) в среднем по всем сортам обеспечила инокуляция штаммами А5, L6-34, L6-3 (табл. 1).

**1. Высота (см) растений люцерны изменчивой в разных вариантах инокуляции, вегетационный опыт (селективный фон), посев 2024 г.**

Сорт	Вариант инокуляции								НСР <sub>05</sub>
	Контроль	404 <sup>b</sup>	A1	A5	L6-1	L6-3	L6-34	L6-72	
Агния ВИК	1,8	7,2	4,6	7,2	3,4	9,3	9,3	7,4	2,6
	± к контролю	5,4	2,8	5,4	1,6	7,5	7,5	5,6	—
Вега 87	1,7	4,5	4,5	9,0	5,3	8,5	8,6	8,0	2,6
	± к контролю	2,8	2,8	7,3	3,6	6,8	6,9	6,3	—
Лада	2,4	5,0	4,1	6,0	5,2	8,4	6,9	5,5	2,4
	± к контролю	2,6	1,7	3,6	2,8	6,0	4,5	3,1	—
Люся	2,4	5,7	5,8	8,0	6,1	8,8	5,6	4,0	2,3
	± к контролю	3,3	3,4	5,6	3,7	6,4	3,2	1,6	—
Таисия	2,4	6,4	6,2	8,4	5,3	11,2	4,6	5,4	2,8
	± к контролю	4,0	3,8	6,0	2,9	8,8	2,2	3,0	—

Более важным показателем, характеризующим генетическую комплементарность и эффективность симбиоза макро- и микросимбионтов, является накопление сухого вещества растениями.

В данном исследовании установлено, что наиболее высокой общей комплементарной способностью обладают штаммы L6-3 и L6-34. Инокуляция пер-

вым штаммом увеличила продуктивность всех испытываемых сортов в среднем в 4,2 раза, вторым — в 3,6 раза. Наиболее комплементарными названным штаммам оказались сорта Агния ВИК и Вега 87, их продуктивность в вариантах инокуляции была в 4,4–3,0 и 5,9–5,6 раза выше, чем в контроле (табл. 2).

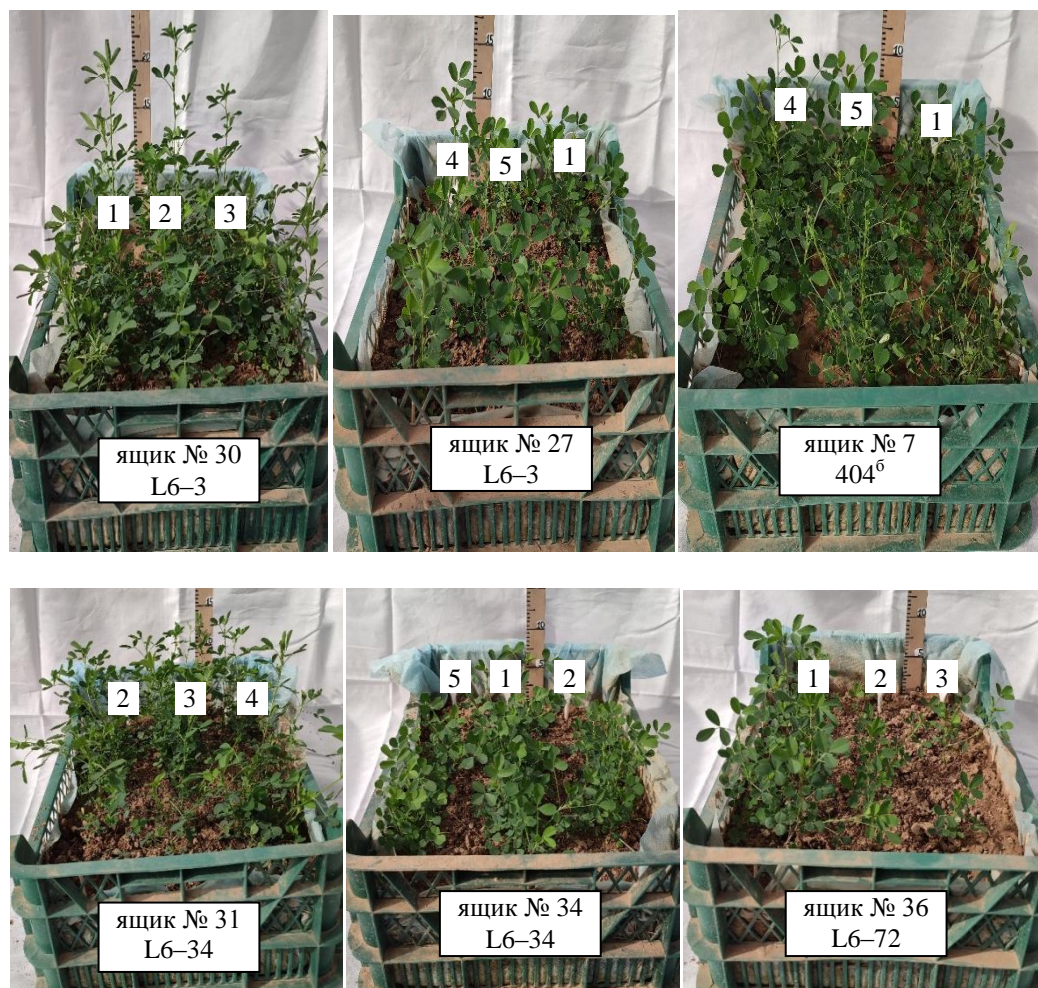
**2. Эффективность симбиоза по сухому веществу (г/растение) люцерно-ризобийных систем с новыми штаммами КБ, вегетационный опыт (СФ), данные 05.11.2024**

Сорт	Показатель	Штамм КБ								НСР <sub>05</sub>
		контроль	404 <sup>b</sup>	A-1	A-5	L6-1	L6-3	L6-34	L6-72	
Агния ВИК	СВ	0,49	1,67	0,98	2,24	0,79	2,67	1,97	2,71	0,45
	ЭС, %	—	+240	+100	+357	—	+445	+302	+453	—
Вега 87	СВ	0,30	0,92	1,16	2,20	1,31	2,08	1,98	1,92	1,65
	ЭС, %	—	—	—	+633	—	+593	+560	—	—
Лада	СВ	0,36	0,85	1,31	1,45	0,86	1,88	1,56	1,14	0,59
	ЭС, %	—	—	+264	+303	—	+422	+333	+271	—
Люся	СВ	0,53	1,52	1,47	1,70	1,44	2,01	1,82	1,46	0,48
	ЭС, %	—	+187	+177	+221	+172	+279	+243	+175	—
Таисия	СВ	0,53	1,49	1,25	1,62	1,65	2,40	0,89	1,23	0,53
	ЭС, %	—	+181	+136	+206	+211	+353	—	+132	—
Средняя ЭС, %		—	203	169	344	192	418	360	258	—

*Примечания: СВ – сухое вещество, г/растение; ЭС, % – эффективность симбиоза: отношение сухого вещества растений в варианте с инокуляцией к сухому веществу контроля; показана у симбиотических пар, которые существенно, при 5%-ном уровне значимости, превышают по продуктивности контроль.*

На рисунке 6 видно, что травостой всех пяти испытываемых сортов, инокулированных штаммами L6-3 и L6-34, был сравнительно мощным и густым.

В травостое симбиотических пар «Агния ВИК + L6-3» и «Вега 87 + L6-3» значительное количество растений сформировали генеративные побеги.



**Рис. 6. Травостой люцерны инокулированных сортов:**  
1 – Агния ВИК, 2 – Вега 87, 3 – Лада, 4 – Люся, 5 – Таисия,  
штаммом L6-3 (ящики № 30 и 27), штаммом 404<sup>б</sup> (ящик № 7),  
штаммом L6-34 (ящики № 31 и 34), штаммом L6-72 (ящик № 36).  
Фото 5 ноября 2024 г., посев 23 июля 2024 г.

Инокуляция кислотоустойчивым штаммом 404<sup>б</sup> существенно усиливала рост и развитие комплементарных этому штамму сортов Люся, Таисия и Агния ВИК (табл. 2; рис. 6, ящик № 7). Эти сорта созданы методами симбиотической селекции на специальном селективном полевом фоне [6].

Сорту Агния ВИК высоко комплементарен штамм L6-72, инокуляция этим штаммом в 4,5 раза повысила продуктивность растений по сравнению с контролем (табл. 2). На рисунке 6 (ящик № 36) представлен травостой сорта Агния ВИК (первый рядок) и сортов Вега 87, Лада (второй и третий рядки). Пер-

вый рядок — мощные растения, в стадии формирования генеративных побегов, второй и третий — слабые в фазе начала формирования розетки.

Таким образом, штаммы А5, L6-34, L6-3 обладают высокой общей комплементарной способностью. Продуктивность растений люцерны, инокулированных этими штаммами, увеличилась в среднем в 3,4–4,2 раза по сравнению с вариантом без инокуляции, а наиболее симбиотрофных, таких как Агния ВИК и Вега 87 — в 4,5–6,3 раза. Штамм 404<sup>б</sup> комплементарен сортам Агния ВИК, Люся, Таисия, созданным методами симбиотической селекции с использова-

нием этого штамма. Штамм L6-72 высококомплементарен сорту Агния ВИК, продуктивность возросла в 4,5 раза.

Как указано выше, перед проведением учета отметили растения (рядом воткнули тонкие пластиковые палочки), вступившие в эффективный симбиоз осенью 2024 г. в первый период роста. Весной 2025 г., после начала весеннего возобновления травостоя, подсчитали количество перезимовавших растений люцерны, отмеченных пластиковыми палочками (отобранные) и не отмеченных (общие), и сравнили их с количеством, ушедших в зиму осенью 2024 г. Результаты показаны в таблице 3.

### 3. Зимостойкость люцерно-ризобийных систем и продуктивность растений, перезимовавших на селективном фоне, посев 2024 г., данные 29.09.2025

Сорт	Зимостойкость, %		Сухое вещество, г/растение		Семена, г/растение	
	отобранные	общие	отобранные	общие	отобранные	общие
Агния ВИК	22,3	1,3	36,6	28,1	3,54	2,62
Вега 87	36,1	1,0	76,3	32,8	3,53	2,40
Лада	19,0	1,1	55,5	35,3	3,00	2,13
Люся	24,5	1,4	96,7	43,2	6,21	2,41
Таисия	48,1	2,3	111,4	49,20	6,99	2,61

Растений, вступивших в эффективный симбиоз с активными штаммами ризобий, сохранилось от 5 до 11 штук на все четыре повторности. От исходного количества это от 19,0 до 48,1 %, а не вступивших в эффективный симбиоз сохранилось 8–13 штук: от 1,0 до 2,3 %. Лучшими по этому показателю оказались Вега 87 (36,1 %) и Таисия (48,1 %) (табл. 3).

Средняя масса растений, вступивших в эффективный симбиоз осенью 2024 г. и успешно перезимовавших, составила от 36,6 до 111,4 г на растение, в то время как масса растений этих же сортов, не

вступивших в симбиоз, была значительно (на 30–130 %) ниже. Лучшими по этому показателю были Люся (96,7) и Таисия (111,4 г/растение). То же касается и семенной продуктивности, которая у растений с потенциально высокой симбиотрофностью составила 3,00–6,99 г/растение, а не обладающих этой способностью — только 2,13–2,62 г, что на 35–168 % ниже первых. Лучшими по семенной продуктивности были Люся (6,21 г) и Таисия (6,99 г) (табл. 3).

В таблице 4 представлена информация об испытании новых активных штаммов ризобий на селективном фоне.

Самыми эффективными по зимостойкости оказались штаммы 404<sup>б</sup> и L6-34: сохранилось 48,5 и 88,5 % растений, вступивших в эффективный симбиоз с этими штаммами. Самыми продуктивными по сухому веществу надземной массы были растения, сформировавшие эффективный симбиоз со штаммами A1 и L6-3

(127,5 и 127,2 г/растение). Эти же растения и растения, вступившие в эффективный симбиоз со штаммом L6-1, оказались и самыми продуктивными по семенам (7,1–8,9 г). Следует отметить, что осенью 2024 г. штаммы A1, L6-1 показывали средние результаты по продуктивности, лидерами были L6-3 и L6-34.

#### 4. Эффективность штаммов клубеньковых бактерий на селективном фоне, посев 2024 г., данные 29.09.2025

Признак		Вариант инокуляции							Среднее
		404 <sup>б</sup>	A1	A5	L6-1	L6-3	L6-34	L6-72	
Зимостойкость, %	отбор	48,5	25,0	5,5	25,0	32,0	88,5	7,8	33,2
	общие	3,0	0,6	0,6	1,4	1,2	2,2	1,0	1,4
	± к общим	45,5	24,4	4,9	23,6	30,8	86,3	6,8	31,8
Сухое вещество, г/растение	отбор	54,1	127,5	—	78,7	127,2	58,0	65,8	85,2
	общие	42,9	44,6	—	35,0	45,2	37,1	46,7	41,9
	ЭС, %	126	286	—	225	281	156	141	203
Семена, г/растение	отбор	4,6	8,9	—	7,3	7,1	4,1	4,2	3,8
	общие	3,2	2,7	—	2,2	2,7	1,5	3,0	2,6
	ЭС, %	144	330	—	332	263	273	140	68

Обобщая результаты исследований в частично регулируемом вегетационном селективном фоне, приходим к заключению, что штаммы клубеньковых бактерий L6-1, L6-3 и A1, сформировавшие эффективный симбиоз с растениями люцерны, повысили продуктивность растений по сухому веществу в 2,3–2,9 раза, семенам — в 2,6–3,3 раза, а штаммы 404<sup>б</sup> и L6-34 повышали зимостойкость на 45,5 и 86,3 % по сравнению растениями, не вступившими в симбиоз. Наиболее высокой зимостойкостью выделялись люцерно-ризобиальные системы с сортами Вега 87 (36,1 %) и Таисия (48,1 %). Самыми продуктивными по сухому веществу (96,7 и 111,4 г/растение) и семенам (6,21 и 6,99 г/растение) оказались симбиотические системы с сортами Люся и Таисия.

**Заключение.** Испытание люцерно-ризобиальных систем, сформированных инокуляцией сортов люцерны изменчивой селекции ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» активными штаммами клубеньковых бактерий, созданными во ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии (С.-Петербург), в вегетационном опыте на кислой почве (рН = 4,01) и зимовки без снежного покрова выявило следующее:

– высокоэффективные люцерно-ризобиальные симбиотические системы, сформировавшиеся в условиях сокращающегося дня, дефицита тепла и света, обладают более высокой устойчивостью и продуктивностью по сравнению с растениями люцерны не вступившими в эффективный симбиоз;

– Инокуляция штаммами 404<sup>б</sup> и L6-34, при перезимовке без снега, повысила

зимостойкость растений люцерны до 48,5 и 88,5 %, зимостойкость других люцерно-ризобиальных систем была 5,5–32,0 %.

– Самыми зимостойкими оказались люцерно-ризобиальные системы с сортами Вега 87 (36,1 %) и Таисия (48,1 %), самыми продуктивными — с сортами Люся и Таисия (96,7 и 111,4 г сухого вещества на растение, а также 6,21 и 6,99 г семян на растение);

– Предпосевная инокуляция люцерны штаммами клубеньковых бактерий L6-1, L6-3 и A1 повысили продуктивность растений по сухому веществу в 2,3–2,9 раза, семенам — в 2,6–3,3 раза;

– Судить об эффективности селективного фона, созданного в ограниченно контролируемых условиях, можно будет после оценки отобранного материала по основным хозяйственно ценным признакам.

## Литература

1. Агроэкспорт. Люцерна. 17 июля 2025. [Электронный ресурс] URL: <file:///C:/Users/User/Downloads/obzor-ved-lyuczerna.pdf> (дата обращения 01.04.2026).
2. Золотарев В. Н., Переправо Н. И. Агроэкологические основы семеноводства люцерны в России // Аграрная наука – сельскому хозяйству : сб. статей: в 3 книгах. Книга 2 : XII Международная научно-практическая конференция «Аграрная наука – сельскому хозяйству» Барнаул : Алтайский государственный аграрный университет, 2017. – С. 120–121. – EDN YSNVIP.
3. Исторические аспекты, состояние и перспективы развития семеноводства кормовых трав в России / В. Н. Золотарев, О. В. Трухан, П. И. Комахин, Т. В. Козлова // Кормопроизводство. – 2022. – № 7. – С. 3–9. – EDN XZSNLM.
4. Степанова Г. В. Сорт люцерны изменчивой Таисия // Адаптивное кормопроизводство. – 2020. – № 2. – С. 21–32. – EDN LYYXAR. – DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2020-2-21-32.
5. Степанова Г. В. Результаты симбиотической селекции люцерны // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2023. – Т. 53. – № 1. – С. 14–22. – EDN ZAPNWQ. – DOI 10.26898/0370-8799-2023-1-2.
6. Степанова Г. В., Золотарев В. Н. / Биотехнология сопряженной селекции люцерны на повышение адаптивной способности // Адаптивное кормопроизводство. – 2015. – № 1. – С. 28–38. – EDN TSVFQF.
7. Синская Е. Н. Экологическая система селекции кормовых растений. – Л. : ВИР, 1933. – 42 с.
8. Синская Е. Н. Проблема популяций у высших растений. – Л. : Сельхозиздат, 1963. – 124 с.
9. Жученко А. А. Адаптивное растениеводство. (Эколого-генетические основы). Теория и практика. М. : Агрорус, 2008, 2009. – Т. 1. – 814 с., – Т. 2. – 1098 с. – Т. 3. – 958 с.
10. Жученко А. А. Адаптивная система селекции растений (эколого-генетические основы). – Т. 2. – М. : Агрорус, 2001. – 1489 с.
11. Жученко А. А. Экологическая генетика культурных растений и проблемы агросферы (теория и практика). – Т. 1. – М. : Моск. тип. j 6, 2004. – 688 с. – EDN QKWOMZ.
12. Прянишников А. И., Савченко И. В., Мазуров В. Н. Адаптивная селекция: теория и практика отбора на продуктивность // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2018. – № 3. – С. 29–32. – EDN UVCAMV. – DOI 10.30850/vrsn/2018/3/29-32.
13. Добруцкая Е. Г., Смирнова А. М., Ушакова О. В. Оценка среды как фона для отбора при селекции на адаптивность урожайности моркови столовой // Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья. – 2015. – № 4 (31). – С. 27–34. – EDN WEAEZJ.
14. Чугаева В. В., Будько А. С. Адаптивный потенциал сортообразцов и гибридов F<sub>2</sub> озимой ржи // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2024. – № 60. – С. 184–190. – EDN LYVNDV.

15. Будько А. С., Лужинская Н. А., Кошечкина А. Т. Оценка адаптивного потенциала новых сортов гречихи различной плоидности // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2025. – № 61. – С. 218–224. – EDN YDWZGM.
16. Эколого-адаптивная характеристика сортов озимой ржи по признакам качества зерна / А. А. Гончаренко, Макаров А. В., Ермаков С. А., и др. – Теория и практика адаптивной селекции растений (Жученковские чтения VI) : сб. научн. трудов по материалам Междунар. научн.-практ. конф. – Краснодар : КубГАУ, 2021. – С. 15–20.
17. Устойчивость образцов генофонда льна к эдафическому стрессу, вызванному понижением кислотностью / Т. А. Рожмина, А. А. Жученко-мл., Н. В. Мельникова, А. Д. Смирнова // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2020 – № 21 (2) – С. 133–140. – EDN DSBSVI – DOI 10.30766/2072-9081.2020.21.2.133-140.
18. Селекция люцерны на повышение эффективности симбиоза с клубеньковыми бактериями / Н. А. Проворов, Б. В. Симаров, Н. И. Сметанин, Э. В. Квасова // Методические рекомендации. – М. : ВАСХНИЛ, 1990. – 50 с. – EDN YJSKBR.
19. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Колос, 1979. – 416 с.

## References

1. Agroeksport. *Lyucerna. 17 iyulya 2025* [Agroexport. Alfalfa. July 17th, 2025]. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/obzor-ved-lyuczerna.pdf (accessibly 30.03.2015).
2. Zolotarev V.N., Perepravo N.I. *Agroekologicheskie osnovy semenovodstva lyucerny v Rossii* [Agroecological foundations of alfalfa seed production in Russia]. *Agrarnaya nauka – sel'skomu khozyaistvu. Sbornik statei v 3 knigakh, Kniga 2. XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Agrarnaya nauka – sel'skomu khozyaistvu"* [Agrarian Science for Agriculture – collection of articles: in 3 books. XII International Scientific and Practical Conference "Agrarian Science for Agriculture"]. *Barnaul. Altaiskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet* Publ. 2017. Vol. 2. Pp. 120-121.
3. Zolotarev V.N., Trukhan O.V., Komakhin P.I., Kozlova T.V. *Istoricheskie aspekty, sostoyanie i perspektivy razvitiya semenovodstva kormovykh trav v Rossii* [Historical aspects, status and prospects of development of fodder grass seed production in Russia]. *Kormoproizvodstvo*. 2022. No. 7. Pp. 3-9.
4. Stepanova G.V. *Sort lyucerny izmenchivoj Taisiya* [Variety of variable alfalfa Taisia]. *Adaptive fodder production*. 2020. No 2. Pp. 21-32. DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2020-2-21-32.
5. Stepanova G.V. *Rezultaty simbioticheskoy selekcii lyucerny* [Results of symbiotic breeding of alfalfa]. *Siberian herald of agricultural science*. 2023. No 1. Pp. 14-22. DOI 10.26898/0370-8799-2023-1-2.
6. Stepanova G.V. *Biotekhnologiya sopryazhennoj selekcii lyucerny na povyshenie adaptivnoy sposobnosti* [The biotechnology of conjugated breeding of alfalfa for increasing adaptive capacity]. *Adaptive fodder production*. 2015. No. 1. Pp. 28-38.
7. Sinskaya E.N. *Ekologicheskaya sistema selekcii kormovykh rastenij* [Ecological system of breeding forage plants]. Leningrad. *Vsesoyuznyi institut rasteniyevodstva* Publ. 1933. 42 p.
8. Sinskaya E.N. *Problema populyatsij u vysshikh rastenij* [The problem of populations in higher plants]. Leningrad. *Sel'khozizdat* Publ. 1963. 124 p.
9. Zhuchenko A.A. *Adaptivnoe rasteniyevodstvo. (Ekologo-geneticheskie osnovy). Teoriya i praktika* [Adaptive crop production. (Ecological and genetic foundations). Theory and practice]. Moscow. *AgroRus* Publ. 2008, 2009. Vol. 1. 814 p. Vol. 2. 1098 p. Vol. 3. 958 p.
10. Zhuchenko A.A. *Adaptivnaya sistema selekcii rastenij (ekologo-geneticheskie osnovy)* [Adaptive plant breeding system (ecological and genetic foundations)]. Moscow. *RUDN. AgroRus* Publ. 2001. Vol. 2. 1489 p.
11. Zhuchenko A.A. *Ekologicheskaya genetika kul'turnykh rastenij i problemy agrosfery (teoriya i praktika)* [Ecological genetics of cultivated plants and problems of agricultural sphere (theory and practice)]. Vol. 1. Moscow. *Mosk. tip. j 6* Publ. 2004. 688 p.

12. Pryanishnikov A.I., Savchenko I.V., Mazurov V.N. *Adaptivnaya selektsiya: teoriya i praktika otbora na produktivnost'* [Adaptive breeding: theory and practice of selection for productivity]. Vestnik of the Russian Agricultural Science. 2018. No. 3. Pp. 29-32.
13. Dobrutskaya E.G., Smirnova A.M., Ushakova O.V. *Otsenka sredy kak fona dlya otbora pri selektsii na adaptivnost' urozhajnosti morkovi stolovoj* [Assessment of the environment as a background for selection during breeding for the adaptability of carrot yields]. Vestnik Gosudarstvennogo agrarnogo universiteta Severnogo Zaural'ya. 2015. No. 4(31). Pp. 27-34.
14. Chugaeva V.V., Bud'ko A.S. *Adaptivnyj potencial sortoobrazcov i gibridov F<sub>1</sub> ozimoy rzhi* [Adaptive potential of winter rye varieties and F<sub>1</sub> hybrids]. Zemledelie i selektsiya v Belarusi. 2024. No. 60. Pp. 184-190.
15. Bud'ko A.S., Luzhinskaya N.A., Koshevaya A.T. *Ocenka adaptivnogo potenciala novyh sortov grechihi razlichnoj ploidnosti* [Adaptive capacity of new buckwheat varieties of different ploidy]. Zemledelie i selektsiya v Belarusi. 2025. No 61. Pp. 218-224.
16. Goncharenko A.A., Makarov A.V., Ermakov S.A., et al. *Ekologo-adaptivnaya harakteristika sortov ozimoy rzhi po priznakam kachestva zerna* [Ecological and adaptive characteristics of winter rye varieties by characteristics and grain quality]. Teoriya i praktika adaptivnoj selektsii rastenij (Zhuchenkovskie chteniya VI): sb. nauchn. trudov po materialam Mezhd. nauchn.-prakt. konf [Theory and practice of adaptive plant breeding (Zhuchenkov Readings VI). Collection of scientific papers based on the materials of the international Scientific and Practical Conference]. Krasnodar. Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2021. Pp. 15-20.
17. Rozhmina T.A., Zhuchenko A.A. ml., Mel'nikova N.V., Smirnova A.D. *Ustoichivost' obraztsov genofonda l'na k edaficheskomu stressu vyzvannomu ponizhenii kislotnost'yu* [Resistance of flax gene pool samples to edaphic stress caused by low acidity]. Agricultural science of the Euro-North-East. 2020. No. 21(2). Pp. 133-140. DOI 10.30766/2072-9081.2020.21.2.133-140.
18. *Selektsiya lyucerny na povyshenie effektivnosti simbioza s kluben'kovymi bakteriyami* [Selection of alfalfa to increase the efficiency of symbiosis with nodule bacteria]. Metodicheskie rekomendatsii [Methodological recommendations]. Moscow. VASKhNIL Publ. 1990. 50 p.
19. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta: (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Field experience methodology: (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow. Kolos Publ. 1979. 416 p.

УДК 633.2:631.559

DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2-23-32

## ВЛИЯНИЕ ПРИЕМОВ ПОСЕВА НА УРОЖАЙНОСТЬ СУХОГО ВЕЩЕСТВА ЛЮЦЕРНЫ ИЗМЕНЧИВОЙ В СРЕДНЕМ ПРЕДУРАЛЬЕ\*

**Н. И. Касаткина**, доктор сельскохозяйственных наук

**Ж. С. Нелюбина**, доктор сельскохозяйственных наук

*УдмФИЦ УрО РАН*

*426067, Россия, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34*

[ugniish-nauka@yandex.ru](mailto:ugniish-nauka@yandex.ru)

## INFLUENCE OF SOWING TECHNIQUES ON DRY MATTER YIELD OF VARIABLE ALFALFA IN THE MIDDLE CIS-URALS REGION

**N.I. Kasatkina**, Doctor of Agricultural Sciences

**Zh.S. Nelyubina**, Doctor of Agricultural Sciences

*Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*

*427067, Russia, Izhevsk, T. Baramzinoj Str., 34*

[ugniish-nauka@yandex.ru](mailto:ugniish-nauka@yandex.ru)

Цель исследований — изучить влияние приемов посева (покровная культура, способ посева) и возраста травостоя (года пользования) на урожайность сухого вещества люцерны изменчивой сорта Виктория. Исследования проведены в 2019–2024 гг. на опытном поле Удмуртского НИИСХ — филиала УдмФИЦ УрО РАН. Почва дерново-подзолистая среднесуглинистая, содержание гумуса — 2,2 %, фосфора — 346 мг/кг почвы, калия — 101 мг/кг почвы, рН солевой вытяжки — 6,13. Вегетационный период в год посева был переувлажненным: гидротермический коэффициент (ГТК) равен 1,77, в годы пользования кормовым травостоем — засушливым (ГТК = 0,59–1,16). За пять лет пользования травостоем продуктивное долголетие люцерны было на достаточно высоком уровне: в первый и третий годы пользования (г.п.) — 6,2–10,3 т/га, в четвертый и пятый г.п. — 3,8–6,5 т/га сухого вещества. Отмечено увеличение плотности кормового травостоя с 592–644 шт./м<sup>2</sup> в первый г.п. до 841–1009 шт./м<sup>2</sup> в пятый г.п. Высота травостоя в относительно благоприятных условиях была на уровне 49–56 см, в засушливые годы — 40–46 см. Наибольшая урожайность сухого вещества (7,3 т/га) получена при посеве люцерны без покрова обычным рядовым способом при плотности травостоя 708 шт./м<sup>2</sup> и высоте 48 см. В данном варианте получен корм с высокими показателями качества: содержание сырого протеина — 20,2 %, концентрация обменной энергии — 9,20 МДж/кг, кормовых единиц — 0,69.

**Ключевые слова:** люцерна изменчивая, возраст травостоя, покровная культура, ширина междурядья, урожайность, биохимический состав.

\*Работа выполнена в рамках Государственного задания УдмФИЦ УрО РАН (тема № FUUE-2022-0001).

The aim of the research is to study the influence of sowing methods (cover crop, sowing method) and the age of the grass stand (year of use) on the dry matter yield of Victoria alfalfa. The studies were conducted in 2019–2024 at the experimental field of the Udmurt Agricultural Research Institute — a branch of the Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The soil is sod-podzolic, medium loamy, with a neutral reaction (pH), low humus content, a very high content of available phosphorus, and a medium content of exchangeable potassium. The weather conditions during the growing season in the year of sowing the Victoria alfalfa variable were excessively humid (hydrothermal coefficient = 1.77), while during the years of using the forage grass stand they were arid (hydrothermal coefficient = 0.59–1.16). Over five years of using the grass stand, long-term productivity of alfalfa at a fairly high level was revealed: in the first and third years of use — 6.2–10.3 t/ha, in the fourth and fifth years of use — 3.8–6.5 t/ha of dry matter. An increase in the density of the forage grass stand was noted, from 592–644 plants/m<sup>2</sup> in the first year of use to 841–1009 plants/m<sup>2</sup> in the fifth year of use. The height of the grass stand was at the level of 49–56 cm under relatively favorable conditions, and 40–46 cm in dry years. The highest dry matter yield (7.3 t/ha) was obtained when sowing alfalfa without a cover crop using the conventional row method, with a grass stand density of 708 plants/m<sup>2</sup> and a height of 48 cm. In this treatment, forage with high quality indicators was obtained: crude protein content of 20.2%, metabolizable energy concentration of 9.20 MJ/kg, and feed unit value of 0.69.

**Keywords:** alfalfa variable, grass stand age, cover crop, row spacing, yield, biochemical composition.

**Введение.** В Среднем Предуралье одной из основных кормовых культур, наряду с клевером луговым, является люцерна изменчивая. Данная культура характеризуется высокой урожайностью, качеством корма, продуктивным долголетием. На урожайность многолетних бобовых трав, в том числе и люцерны, в годы пользования травостоем большое влияние оказывает их рост и развитие в первый год жизни. Люцерна более светолюбива, чем другие многолетние бобовые травы. Поэтому «при посеве беспокровно она развивается лучше, более устойчива к неблагоприятным условиям среды и в последующие годы формирует более высокую урожайность зеленой массы» [1]. В то же время посев многолетних трав под покров имеет большое хозяйственное значение, обеспечивая получение оптимальной урожайности покровной культуры. «При выборе покровной культуры следует учитывать, что она не должна сильно затенять растения люцерны,

быть достаточно скороспелой, чтобы раньше освободить поле и дать возможность растениям люцерны подготовиться к перезимовке» [1; 2].

Хорошие результаты были получены при использовании в качестве покровной культуры яровых зерновых культур и при уменьшении их нормы высева на 20–30 % [3]. Также эффективно было возделывание люцерны под покровом льна масличного [4], однолетних трав — викоовсяной, горохоовсяной смеси [3; 5; 6; 7]. В исследованиях северной лесостепи Западной Сибири наибольшая кормовая продуктивность люцерны была при рядовом способе посева — 45,0 т/га, широкорядном — 34,1, ленточном — 37,1 т/га. Максимальное влияние на продуктивность люцерны оказывало взаимодействие трех факторов «год × способ посева × норма высева» [8].

**Цель исследования** — изучить влияние приемов посева (покровная культура, способ посева) и возраста травостоя (года пользования) на урожай-

ность люцерны изменчивой сорта Виктория по сухому веществу.

**Материалы и методы.** Объектом исследований послужила люцерна изменчивая сорта Виктория (оригинатор УрФАНИЦ). Исследования проведены в 2019–2024 гг. на опытном поле Удмуртского НИИСХ — филиала УдмФИЦ УрО РАН. Подробная схема полевого двухфакторного опыта представлена в таблице 1. Повторность вариантов в опыте четырехкратная, расположение вариантов — методом расщепленных делянок. Учетная площадь делянки — 20 м<sup>2</sup>. Покровные культуры и люцерна были посеяны весной 2019 г. Норма высева покровных культур была снижена на 30 % от рекомендуемой в Среднем Предуралье, норма высева люцерны составила при обычном рядовом посеве 4,0 млн шт., широкорядном с междурядьем 30 см — 3,0 млн шт., с междурядьем 60 см — 2,0 млн шт. на 1 га. На травостое люцерны первого – пятого г.п. после схода снега проводили боронование, подкормку минеральными удобрениями (нитроаммофоска) в дозе N<sub>30</sub>P<sub>30</sub>K<sub>30</sub>. Урожайность зеленой массы учитывали в фазе начала цветения люцерны.

Первый укос проведен в первой–второй (в 2022 г. — в третьей) декаде июня, второй укос — в третьей декаде июля–первой декаде августа. Третий укос провели только на травостое первого г.п. — в третьей декаде августа.

Закладка полевого опыта, учеты и наблюдения выполнены в соответствии с требованиями методик опытного дела в кормопроизводстве. Существенность различий между вариантами определяли методом дисперсионного анализа.

Почва опытного участка — дерново-подзолистая среднесуглинистая, содержание гумуса — 2,2 %, фосфора — 346 мг/кг почвы, калия — 101 мг/кг почвы, рН солевой вытяжки — 6,13.

Вегетационный период в год посева (2019) люцерны был переувлажненным (ГТК по Г. Т. Селянинову — 1,77), в годы пользования кормовым травостоем (2020–2024) — засушливым (ГТК = 0,59–1,16), из них вегетационные периоды 2021 и 2023 гг. были более засушливыми.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В Среднем Предуралье первый укос многолетних трав считается основным, приносящим наибольший вклад в сбор урожая. В наших исследованиях в первый г.п. в первом укосе люцерны изменчивой сорта Виктория получено 45 % всего урожая, в последующие годы первый укос составил 57–62 %. В относительно благоприятных метеоусловиях вегетационного периода 2020 г. (ГТК = 0,98) урожайность сухого вещества люцерны первого г.п. составила 6,6–10,3 т/га. Во второй г.п., в значительно засушливых условиях 2021 г. (ГТК = 0,77), урожайность была значительно ниже — 3,1–4,6 т/га. В третий г.п. (2022 г., ГТК = 1,08) урожайность сухого вещества люцерны была на достаточно высоком уровне — 6,3–9,8 т/га. Выявлено, что в эти годы на беспокровном посеве люцерны урожайность была выше в сравнении с подпокровным посевом, на широкорядных посевах с междурядьями 60 и 30 см урожайность снижалась по сравнению с данным показателем в контрольном варианте (табл. 1). Более детально изменения урожайности люцерны в первый–третий г.п. травостоем изложены ранее [2].

**1. Урожайность сухой массы люцерны изменчивой сорта Виктория по сухому веществу в зависимости от покровной культуры, способа посева и года пользования (в сумме за укосы, 2020–2024 гг.), т/га**

Покровная культура (А)	Способ посева (В)	Год пользования					В среднем
		1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	
		ГТК					
		0,98	0,77	1,08	0,59	1,16	
Без покрова*	обычный рядовой (15 см)*	10,3	4,6	9,8	6,5	5,3	7,3
	широкорядный (30 см)	9,2	3,4	6,8	5,9	4,8	6,0
	широкорядный (60 см)	9,0	3,8	8,1	5,2	4,7	6,1
	в среднем (А)	9,5	3,9	8,2	5,9	4,9	6,5
Яровая пшеница	обычный рядовой (15 см)*	7,8	4,2	8,4	5,7	4,7	6,2
	широкорядный (30 см)	7,5	4,1	6,6	4,8	4,5	5,5
	широкорядный (60 см)	6,2	3,9	7,3	4,9	4,2	5,3
	в среднем (А)	7,2	4,0	7,4	5,1	4,5	5,7
Ячмень	обычный рядовой (15 см)*	8,3	3,6	7,3	5,7	5,2	6,0
	широкорядный (30 см)	8,1	3,2	7,7	5,3	4,7	5,8
	широкорядный (60 см)	6,6	3,7	6,9	4,8	4,5	5,3
	в среднем (А)	7,6	3,5	7,3	5,3	4,8	5,7
Викоовсяная смесь	обычный рядовой (15 см)*	9,7	4,1	8,5	5,9	4,6	6,5
	широкорядный (30 см)	7,4	4,0	6,3	4,9	4,0	5,3
	широкорядный (60 см)	6,8	3,1	6,9	4,7	3,8	5,1
	в среднем (А)	8,0	3,7	7,2	5,2	4,1	5,6
В среднем (В)	обычный рядовой (15 см)*	9,0	4,1	8,5	6,0	5,0	6,5
	широкорядный (30 см)	8,0	3,7	6,8	5,2	4,5	5,6
	широкорядный (60 см)	7,2	3,6	7,3	4,9	4,3	5,5
НСР <sub>05</sub> главных эффектов	А	0,5	0,2	0,4	0,2	0,3	0,1
	В	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
НСР <sub>05</sub> частных различий	А	0,8	0,4	0,6	0,2	F <sub>φ</sub> < F <sub>T</sub>	0,2
	В	0,6	0,5	0,6	0,5	F <sub>φ</sub> < F <sub>T</sub>	0,3

\*Контроль.

В четвертый г.п. (2023 г.) в значительно засушливых условиях, с ГТК = 0,59 урожайность сухого вещества люцерны составила 4,7–6,5 т/га. Беспокровный посев люцерны имел преимущество по урожайности (5,9 т/га) перед подпокровным посевом (5,1–5,3 т/га), обычный рядовой (6,0 т/га) — над широкорядными посевами (4,9–5,2 т/га). При анализе взаимодействия изучаемых факторов выявлено, что наибольшая урожайность,

как и в предыдущие годы, сформировалась в контрольном варианте.

В пятый г.п. (2024 г.) в условиях незначительной засушливости вегетационного периода с ГТК = 1,16 наблюдается тенденция снижения урожайности сухой массы люцерны (3,8–5,3 т/га), по сухому веществу что, на наш взгляд, связано с возрастом травостоя: пятым годом пользования. При этом также сохраняется преимущество контрольного варианта.

В среднем за пять лет пользования травостоем беспокровный посев люцерны обычным рядовым способом обеспечил наибольшую урожайность сухого вещества — 6,5 т/га. При посеве люцерны под покров урожайность существенно снижалась на 0,7–0,8 т/га (НСР<sub>05</sub> — 0,1 т/га). На широкорядных посевах сбор сухого вещества был ниже на 0,7–1,1 т/га (НСР<sub>05</sub> — 0,2 т/га).

На плотность кормового травостоя люцерны влияли как агротехнические приемы, так и год пользования травостоем. В среднем за годы пользования густота стеблестоя в первом укосе составила 662–803 шт./м<sup>2</sup>, во втором укосе — 580–750 шт./м<sup>2</sup>. В первый–третий г.п. данный показатель в среднем за укосы был на уровне 545–644 шт./м<sup>2</sup> [2]. С возрастом отмечено некоторое увеличение плотности кормового травостоя. Так, в четвертый г.п. густота стеблестоя увеличилась до 684–863 шт./м<sup>2</sup>, в пятый г.п. — до 841–1009 шт./м<sup>2</sup>, наибольшая в контрольном варианте (без покрова).

Высота растений люцерны Виктория, по данным оригинатора сорта, достигает 63–92 см [9; 10]. В наших исследованиях в среднем за годы пользования высота в первом укосе составила 45–49 см, во втором укосе — 47–52 см. Отмечено влияние на данный показатель приемов посева. Так, в первый г.п. травостоем сохранилось последствие покровных культур, высота растений люцерны (53 см) была существенно больше в варианте без покрова. В пятый г.п. существенной разницы по данному показателю по обоим факторам (покровная культура, способ посева) не выявили. Следует отметить, что высота растений люцерны в более благоприятных условиях в первый

г.п. (2020 г.) была на уровне 49–53 см, в третий г.п. (2022 г.) — 54–56 см. В значительно засушливых условиях растения люцерны были ниже: во второй г.п. — 40–42 см, в четвертый г.п. — 44–46 см.

Выявлены аналогичные изменения массы стебля люцерны. В среднем за годы пользования масса стебля в первом укосе составила 3,4–3,9 г, во втором укосе — 2,6–3,2 г. Данный показатель в первый г.п. (2020 г.) был на уровне 4,1–4,5 г, в третий (2022 г.) — 4,3–5,2 г. В засушливых условиях масса стебля была ниже: во второй г.п. — 2,4–3,1 г, в четвертый г.п. — 2,5–3,0 г. С возрастом травостоя, в пятый г.п., масса стебля также была относительно низкой (2,2–2,5 г). Из изучаемых факторов следует отметить широкорядный посев с междурядьем 60 см, во второй и третий г.п. масса стебля люцерны в этом варианте была существенно выше (на 0,7 и 0,9 г) контрольного варианта.

По данным научной литературы, облиственность растений люцерны сорта Виктория колеблется от 44 до 53 % [9; 10]. В наших исследованиях во втором укосе во все годы пользования данный показатель был выше (45–50 %), чем в первом (39–42 %). В засушливые годы облиственность была более высокой: в первый г.п. — 42–49 %, во второй — 46–49, в четвертый — 51–52, в третий — 39–41, в пятый г.п. — 37–41 %.

Содержание основной культуры (люцерны) в травостое в первые годы пользования было высоким: в первый г.п. — 92–97 %, во второй г.п. — 94–98 %. К третьему г.п. содержание снизилось до 82–88 %, к пятому г.п. — до 83–91 %. В засушливом 2023 г. в четвертый г.п. содержание люцерны в тра-

востое было относительно высоким (92–95 %).

Ежегодно в растительных пробах люцерны изменчивой проводился анализ питательной ценности зеленой массы. По данным научной литературы, в 1 кг сухого вещества люцерны содержание сырого протеина в фазе начала бутонизации достигает 22,1–26,9 %, в фазе начала цветения — 17,8–18,7 % [1; 11; 12].

В наших исследованиях при уборке в фазе начала цветения содержание сырого протеина в среднем по укосам в первый г.п. составило 19,5–21,2 %, во второй — 19,5–22,0 %, в третий — 19,8–20,1 %, в четвертый — 16,9–18,0 % и в пятый г.п. — 19,8–20,7 %. В первом укосе содержалось 19,0–20,6 % сырого протеина, во втором укосе — 17,9–20,9 %. В среднем за годы исследования содержание сырого протеина составило 18,9–20,6 %, что соответствует требованиям ГОСТ Р 55452-2021 «Сено и сенаж» (для сена первого класса — не менее 150 г/кг сухого вещества). Данный показатель имел тенденцию к повышению до 20,2–20,6 % при посеве люцерны беспокровно обычным рядовым способом, а также под покров широкорядным (30 см) способом (табл. 2).

Содержание сырой клетчатки в среднем за укосы в первый г.п. составило 28,7–31,2 %, во второй — 30,8–33,5, в третий — 29,8–30,0, в четвертый — 30,3–30,9 и в пятый г.п. — 29,3–29,8 %. В среднем за годы пользования сырой клетчатки в первом укосе содержалось 29,0–32,3 %, во втором укосе — 28,5–32,0 %.

Количество сырой золы в растениях зависит как от специфики самого сы-

рья, так и условий сбора. Содержание сырой золы в исследуемых образцах люцерны в первый–четвертый г.п. не превышало нормативы ГОСТ Р 55452–2021 для сена первого класса.

Содержание сырого жира в первый г.п. составило 1,9–2,7 %, во второй–четвертый г.п. было относительно высоким — 2,7–3,5 % и к пятому г.п. снизилось до 2,4–2,6 %.

По данным ученых [14], «содержание фосфора в растениях составляет в среднем 0,5 % сухого вещества, изменяясь от 0,1 до 1,5 %, калия — 1,0 %, варьируя от 0,3 до 2,5 %».

В наших исследованиях содержание фосфора в сухом веществе люцерны наибольшим было в первый и пятый г.п. — 0,86–0,96 и 0,81–0,83 % соответственно, во второй г.п. — 0,58–0,63 %, в третий и четвертый г.п. — 0,38–0,39 и 0,36–0,38 % соответственно.

Калия содержалось в первый г.п. — 2,61–2,99 %, во второй г.п. произошло некоторое снижение — 1,82–2,15 %. В соответствии с существующими нормами кормления животных данный уровень содержания калия в корме (более 1,0 %) оценивается как высокий.

«В сухом веществе многолетних бобовых культур накапливается достаточно высокое количество кальция — до 2,1 %. Более высокое содержание кальция в растениях бывает в сухой вегетационный период, с возрастом содержание данного элемента в растениях увеличивается» [14]. Наибольшее содержание кальция в сухом веществе люцерны было отмечено во второй и пятый г.п. — 1,48–1,68 и 1,37–1,42 % соответственно, в остальные годы — 1,15–1,33 %.

**2. Биохимический состав сухого вещества люцерны изменчивой сорта Виктория  
в зависимости от покровной культуры и способа посева  
(в среднем за укосы, 2020–2024 гг.), %**

Покровная культура (А)	Способ посева (В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырая зола	Сырой жир
Без покрова*	обычный рядовой (15 см)*	20,2	30,2	9,5	2,6
	широкорядный (30 см)	19,2	29,7	9,5	2,8
	широкорядный (60 см)	18,9	30,6	9,1	2,6
	в среднем (А)	19,4	30,2	9,4	2,7
Яровая пшеница	обычный рядовой (15 см)*	19,3	31,4	8,8	2,8
	широкорядный (30 см)	20,3	31,1	8,7	2,7
	широкорядный (60 см)	19,6	31,2	9,0	3,1
	в среднем (А)	19,7	31,2	8,8	2,9
Ячмень	обычный рядовой (15 см)*	19,4	31,6	8,8	2,8
	широкорядный (30 см)	20,6	30,0	9,1	2,8
	широкорядный (60 см)	19,8	29,4	9,3	2,7
	в среднем (А)	19,9	30,3	9,1	2,8
Викоовсяная смесь	обычный рядовой (15 см)*	20,0	30,0	9,4	2,9
	широкорядный (30 см)	20,3	30,8	9,3	2,9
	широкорядный (60 см)	19,8	31,3	9,1	2,8
	в среднем (А)	20,0	30,7	9,3	2,9
В среднем (В)	обычный рядовой (15 см)*	19,7	30,5	9,1	2,8
	широкорядный (30 см)	19,7	30,6	9,1	2,8
	широкорядный (60 см)	19,8	30,7	9,1	2,8
ГОСТ Р 55452-2021 «Сено и сенаж»		не менее 150 г/кг	не более 290 г/кг	не более 100 г/кг	—

\*Контроль.

При необходимой концентрации обменной энергии (КОЭ) в корме (не менее 8,2–9,2 МДж/кг, согласно вышеуказанному ГОСТ), в наших исследованиях сухое вещество люцерны содержало в первый г.п. 8,88–9,49 МДж/кг, во второй — 8,77–9,60, в третий — 9,28–9,38, в четвертый — 9,09–9,22 и в пятый — 9,10–9,36 МДж/кг. В первом укосе содержалось 9,05–9,39 МДж/кг, во втором — 9,05–9,45 МДж/кг. В среднем за годы исследований КОЭ находилась на уровне 9,08–9,34 МДж/кг, при этом больше не-

обходимых 9,2 МДж/кг — в вариантах при посеве люцерны без покрова с междурядьями 30 и 15 см, а также под покров викоовсяной смеси с междурядьем 15 см. Сухое вещество люцерны содержало 0,67–0,71 кормовых единиц, содержание переваримого протеина было высоким: 137–152 г.

Сбор обменной энергии с 1 га характеризует кормовую продуктивность, высоким он был в варианте с беспокровным посевом люцерны обычным рядовым способом — 67,1 ГДж/га и под по-

кров викоовсяной смеси — 60,7 ГДж/га. Сбор кормовых единиц с 1 га составил 3,4–5,0 тыс., наибольший — в беспокровном посеве обычным рядовым способом и при посеве под викоовсяную смесь. В данных вариантах аналогично высоким (1474 и 1305 кг/га) был выход сырого протеина.

**Заключение.** За пять лет пользования травостоем (2020–2024 гг.) люцерны изменчивой сорта Виктория можно отметить, что данная культура является засухоустойчивой, обладающей продуктивным долголетием на достаточно высоком уровне: в первый и третий г.п. — 6,2–10,3 и 6,3–9,8 т/га, в четвертый и пятый г.п. — 4,7–6,5 и 3,8–5,3 т/га сухого вещества соответственно. С возрастом травостоя отмечено некоторое увеличение плотности кормового травостоя с 592–644 шт./м<sup>2</sup> в первый г.п. до 841–1009 шт./м<sup>2</sup> в пятый г.п. Высота травостоя в относительно более благоприят-

ных условиях в первый г.п. (2020 г.) была на уровне 49–53 см, в третий г.п. (2022 г.) — 54–56 см. В засушливых условиях растения люцерны были ниже: во второй г.п. — 40–42 см, в четвертый и пятый г.п. — 44–46 см.

В среднем за годы исследований наибольшая урожайность сухого вещества люцерны (7,3 т/га) получена при ее посеве без покрова обычным рядовым способом при формировании следующих показателей структуры урожайности: плотность травостоя — 708 шт./м<sup>2</sup>, высота — 48 см. В данном варианте получен корм с высокими показателями качества: содержание сырого протеина — 20,2 %, концентрация обменной энергии — 9,20 МДж/кг, кормовых единиц — 0,69. Сбор обменной энергии, кормовых единиц и сырого протеина с 1 га превышал аналогичные показатели, полученные в остальных изучаемых способах посева.

## Литература

1. Нагибин А. Е., Тормозин М. А., Зырянцева А. А. Травы в системе кормопроизводства Урала. — Екатеринбург : ООО «Медиа-холдинг «Уральский Рабочий», 2018. — 784 с. — EDN UTVOIP.
2. Нелюбина Ж. С., Касаткина Н. И., Фатыхов И. Ш. Кормовая продуктивность люцерны изменчивой Виктория в зависимости от покровной культуры и приемов посева // Пермский аграрный вестник. — 2023. — № 1 (41). — С. 46–53. — EDN EYSWRJ. — DOI 10.47737/2307-2873\_2023\_41\_46.
3. Дронова Т. Н. Влияние покровных культур на формирование высокопродуктивных травостоев орошаемой люцерны // Орошаемое земледелие. — 2019. — № 4. — С. 34–37. — EDN WNIBWS. — DOI 10.35809/2618-8279-2019-4-7.
4. Епифанова И. В. Кормовая продуктивность и энергетическая эффективность возделывания люцерны изменчивой в покровных посевах в условиях лесостепи Среднего Поволжья // Кормопроизводство. — 2024. — № 3. — С. 9–16. — EDN QZGLOX. — DOI 10.30906/1562-0417-2024-3-9-16.
5. Володькина Г. Н. Влияние покровных культур на кормовую продуктивность люцерны изменчивой // Современные проблемы агропромышленного комплекса : сб. науч. тр. 73-й Международ. науч.-практ. конф. — Самарский государственный аграрный университет, 2020. — С. 14–16. — EDN GDVVNE.

6. Рябова Т. Н., Вотинцев А. И., Коконов С. И. Кормовая продуктивность люцерны изменчивой в зависимости от покровной культуры и предпосевной обработки семян // Кормопроизводство. – 2020. – № 6. – С. 16–19. – EDN JNXEJH.
7. Гущина В. А. Влияние покровных культур на освещенность люцерны изменчивой // Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы : сб. статей XVI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Пензенского государственного аграрного университета. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 5–7. – EDN HSNKQ.
8. Дюкова Н. Н., Харалгин А. С. Приемы возделывания люцерны изменчивой в лесостепи Западной Сибири // Агропродовольственная политика России. – 2024. – № 2–3 (110). – С. 63–69. – EDN NGCHQU. – DOI 10.35524/2227-0280\_2024\_02-03\_63.
9. Нагибин А. Е., Тормозин М. А., Зырянцева А. А. Новый перспективный сорт люцерны изменчивой (*Medicago sativa* L. *nothosubsp. varia* (Martyn) Arcang) Виктория // Кормопроизводство. – 2016. – № 6. – С. 46–48. – EDN VZFYRR.
10. Тормозин М. А., Чернявских В. И. Реализация продуктивного потенциала популяций *Medicago varia* Mart. в условиях Среднего Урала // Кормопроизводство. – 2022. – № 10. – С. 18–22. – EDN QQEVR. – DOI 10.25685/KRM.2022.10.2022.003.
11. Степанова Г. В. Влияние погодных условий на химический состав сухого вещества люцерны (*Medicago varia* Mart.) в фазу цветения // Адаптивное кормопроизводство. – 2019. – № 2. – С. 26–39. – EDN GPZMNJ. – DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2019-2-26-39.
12. Зависимость питательной ценности люцерны посевной от нормы высева семян и срока уборки / В. Н. Шлапунов, Н. Ф. Надточаев, А. Н. Романович, А. Л. Бирюкович // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2019. – № 55. – С. 174–182. – EDN JELPWQ.
13. Выявление допустимых зон заготовки лекарственного растительного сырья вблизи транспортных магистралей / Н. А. Дьякова, А. И. Сливкин, Е. Е. Чупандина, С. П. Гапонов // Химия растительного сырья. – 2020. – № 4. – С. 179–186. – EDN KCCAGM. – DOI 10.14258/jcrpm.2020047609.
14. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа / В. М. Косолапов, В. А. Чуйков, Х. К. Худякова, В. Г. Косолапова. – М. : ООО «Угрешская типография», 2019. – 272 с. – EDN XJCOYG. – DOI 10.33814/monography\_1654.

## References

1. Nagibin A.E., Tormozin M.A., Zyryantseva A.A. *Travy v sisteme kormoproizvodstva Urala* [Herbs in the Feed Production System of the Urals]. Ekaterinburg. ООО "Media-kholding "Ural'skii Rabochii" Publ. 2018. 784 p.
2. Nelyubina Zh.S., Kasatkina N.I., Fatykhov I.Sh. *Kormovaya produktivnost' lyutserny izmenchivoy Viktoriya v zavisimosti ot pokrovnoy kul'tury i sposoba poseva* [Forage productivity of cultivar Victoria alfalfa variegated, depending on the cover crop and sowing techniques]. *Permskiy agrarnyy vestnik*. 2023. No. 1 (41). Pp. 46-53. DOI 10.47737/2307-2873\_2023\_41\_46.
3. Dronova T.N. *Vliyaniye pokrovnykh kul'tur na formirovaniye vysokoproduktivnykh travostoyev oroshayemoy lyutserny* [Influence of cover crops on the formation of high-efficient herbs irrigated alfalfa]. *Oroshayemoye zemledeliye*. 2019. No 4. Pp. 34-37. DOI 10.35809/2618-8279-2019-4-7.
4. Epifanova I.V. *Kormovaya produktivnost' i energeticheskaya effektivnost' vozdeleyvaniya lyutserny izmenchivoy v pokrovnykh posevakh v usloviyakh lesostepi Srednego Povolzh'ya* [Feed productivity and energy efficiency of *Medicago varia* cultivation in cover crops under the condition of the forest-steppe of the Middle Volga region]. *Kormoproizvodstvo*. 2024. No 3. Pp. 9-16. DOI 10.30906/1562-0417-2024-3-9-16.
5. Volod'kina G.N. *Vliyaniye pokrovnykh kul'tur na kormovuyu produktivnost' lyutserny izmenchivoy* [Influence of cover crops on the fodder productivity of alfalfa variable]. *Sovremennyye problemy*

- agropromyshlennogo kompleksa. *Sbornik nauchnykh trudov 73-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern Problems of the Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Papers of the 73rd International Scientific and Practical Conference]. Samara State Agrarian University. 2020. Pp. 14-16.
6. Ryabova T.N., Votintsev A.I., Kokonov S.I. *Kormovaya produktivnost' lyutserny izmenchivoy v zavisimosti ot pokrovnoy kul'tury i predposevnoy obrabotki semyan* [Forage productivity of alfalfa variable as affected by cover crop and seed treatment]. *Kormoproizvodstvo*. 2020. No 6. Pp. 16-19.
  7. Gushchina V.A. *Vliyaniye pokrovnykh kul'tur na osveshchennost' lyutserny izmenchivoi* [The Influence of Cover Crops on the Illumination of Alfalfa changeable]. *Agropromyshlennyy kompleks: sostoyaniye, problemy, perspektivy. Sbornik statey XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu Penzenskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. Penza. Penza State Agrarian University. 2021. Pp. 5-7.
  8. Dyukova N.N., Kharalgin A.S. *Priyemy vzdelyvaniya lyutserny izmenchivoy v lesostepi Zapadnoy Sibiri* [Cultivation methods of alfalfa in the forest-steppe of Western Siberia]. *Agro-food policy in Russia*. 2024. No 2-3 (110). Pp. 63-69. DOI 10.35524/2227-0280\_2024\_02-03\_63.
  9. Nagibin A.E., Tormozin M.A., Zyryantseva A.A. *Novyy perspektivnyy sort lyutserny izmenchivoy (Medicago sativa L. nothosubsp. varia (Martyn) Viktoriya* [The new promising bastard alfalfa (*Medicago sativa L. nothosubsp. varia (Martyn) arcang*) variety Victoria]. *Kormoproizvodstvo*. 2016. No 6. Pp. 46-48.
  10. Tormozin M.A., Chernyavskikh V.I. *Realizatsiya produktivnogo potentsiala populyatsiy Medicago varia Mart. v usloviyakh Srednego Urala* [Productive potential of *Medicago varia Mart.* in the Middle Urals]. *Kormoproizvodstvo*. 2022. No 10. Pp. 18-22. DOI 10.25685/KRM.2022.10.2022.003.
  11. Stepanova G.V. *Vliyaniye pogodnykh usloviy na khimicheskiy sostav sukhogo veshchestva lyutserny (Medicago varia Mart.) v fazu tsveteniya* [Influence of weather conditions on chemical composition of dry matter of alfalfa (*Medicago varia Mart.*) in the flowering phase]. *Adaptive Fodder Production*. 2019. No 2. Pp. 26-39. DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2019-2-26-39.
  12. Shlapunov V.N., Nadtochayev N.F., Romanovich A.N., Biryukovich A.L. *Zavisimost' pitatel'noy tsennosti lyutserny posevnoy ot normy vyseva i sroka uborki* [Dependence of the Purple medic (*Medicago sativa*) nutritional value on the seeding rate and harvest time]. *Zemledeliye i selektsiya v Belarusi*. 2019. No 55. Pp. 174-182.
  13. D'yakova N.A., Slivkin A.I., Chupandina E.E., et al. *Vyyavlenie dopustimyykh zon zagotovki lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya vblizi transportnykh magistralei* [Identification of permissible areas of preparation of medicinal vegetable raw materials near transport lines]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2020. No 4. Pp. 179-186. DOI 10.14258/jcprm.2020047609.
  14. Kosolapov V.M., Chuykov V.A., Khudyakova Kh.K., Kosolapova V.G. *Mineral'nyye elementy v kormakh i metody ikh analiza* [Mineral elements in feed and methods of their analysis]. Moscow. OOO "Ugreshskaya tipografiya". Publ. 2019. 272 p. DOI 10.33814/monography\_1654.

УДК 633.322:631.522

DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2-33-40

## СПОСОБЫ ФЕНОТИПИЧЕСКОГО МАРКИРОВАНИЯ СОРТОВ КЛЕВЕРА ПОЛЗУЧЕГО\*

**А. А. Иванова**, кандидат сельскохозяйственных наук

*ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»*

*141055, Россия, Московская область, г. Лобня, ул. Научный городок, корп. 1*

[alinaivanova@vniikormov.ru](mailto:alinaivanova@vniikormov.ru)

## METHODS OF PHENOTYPIC LABELING OF WHITE CLOVER VARIETIES

**A.A. Ivanova**, Candidate of Agricultural Sciences

*Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology*

*141055, Russia, Moscow region, Lobnya, Nauchnyi gorodok str., k. 1*

[alinaivanova@vniikormov.ru](mailto:alinaivanova@vniikormov.ru)

Для селекционных достижений большое значение имеет метод идентификации сортов, на основании которого дается заключение об их новизне, отличимости и правовой защите. В исследовании представлено применение фенотипических маркеров на культуре клевера ползучего. Поиск генотипов, имеющих отличимые фенотипические признаки, ведется на всех этапах селекционного процесса. Имеется рабочая коллекция фенотипических маркеров по рисунку листовой пластинки, антоциановому окрасу листьев и многолисточковости. Из выделенных единичных растений или группы растений посредством ручного опыления и многократного отбора создаются изогенные популяции с определенным маркерным признаком. Созданы изогенные популяции с маркерными признаками: «заполненная белая метка листовой пластинки», «удлиненная метка листовой пластинки», «отсутствие белой метки на листовой пластинке» и «розовый окрас соцветий». Фенотипически маркированные образцы могут сами стать сортами либо использоваться для маркирования перспективного селекционного материала. В опыте представлена возможность фенотипического маркирования перспективного селекционного материала клевера ползучего по маркерному признаку «розовый окрас соцветий». Показано, что в поколениях  $F_1$  и  $F_2$  передается признак окраса соцветий.

**Ключевые слова:** клевер ползучий, маркирование, фенотип, селекция, отбор.

For breeding achievements, the method of identifying varieties is of great importance, on the basis of which an opinion is given on their novelty, distinctiveness and legal protection. The study presents the application of phenotypic markers on the white clover culture. The search for genotypes having distinc-

---

\*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса» «Вывести новые сорта сельскохозяйственных культур (кормовых, аридных, зерновых и зернобобовых, плодовых и масличных), адаптированных к различным почвенно-климатическим условиям Российской Федерации и отличающихся высокой устойчивостью к основным заболеваниям и к местным неблагоприятным условиям среды, на основе использования существующих и вновь создаваемых методов получения исходного материала с заданными свойствами» (FGGW-2025-0002).

tive phenotypic features is carried out at all stages of the breeding process. There is a working collection of phenotypic markers on the pattern of the leaf plate, anthocyanic color of the leaves and multi-leaf. Isogenic populations with a specific marker trait are created from selected individual plants or groups of plants through manual pollination and repeated selection. Isogenic populations with marker traits have been created: "filled white leaf plate mark", "elongated leaf plate mark", "absence of a white mark on the leaf plate", and "pink inflorescence color". Phenotypically marked samples can become varieties themselves or be used for marking promising breeding material. The experiment demonstrates the possibility of phenotypically marking promising breeding material of white clover using the marker trait "pink inflorescence color". It has been shown that the inflorescence color trait is transmitted in the F<sub>1</sub> and F<sub>2</sub> generations.

**Keywords:** white clover, marking, phenotype, selection, breeding.

Для селекционных достижений большое значение имеет метод идентификации сортов и гибридов растений, на основании которых дается заключение об их новизне и правовой защите. Отличимость сорта можно достичь фенотипическим маркированием.

Маркерные признаки делятся на две категории:

– молекулярные, которые различают на белковые и ДНК-маркеры;

– фенотипические, связанные с морфологическими признаками (окраска соцветий, наличие пятна на листе, антоциановый окрас и др.)

Для маркирования подходят признаки с ярко выраженным фенотипическим эффектом. Признак должен иметь простой тип наследования, контролироваться не более чем двумя–тремя генами, которые легко выделяются в расщепляющихся популяциях независимо от условий внешней среды. Чаще всего это фенотипические признаки, связанные с окраской венчика, листьев, стеблей, а также различные морфологические отклонения. Количество «удобных» фенотипических маркеров внутри вида весьма ограничено [1].

Для маркирования вновь созданных и уже существующих сортов клевера необходимо правильно выбрать признак–

маркер. Предпосылками для выделения таких признаков являются несколько основных требований: рецессивный характер наследования; малое число генов, контролирующих этот признак; положительный вклад в общую доминанту признаков, на которую ведется селекция [2].

Генетика белого клевера осложняется аллотетраплоидией, высокой степенью гетерозиготности и перекрестным опылением. Поэтому гомозиготные линии недоступны для изучения наследования. Большинство морфологических маркеров органоспецифичны, и у растений с многолетним циклом развития они могут проявляться лишь на второй или последующие годы, что весьма неудобно. Кроме того, на многие изучаемые морфологические признаки сильно влияет окружающая среда [3], в том числе на регуляцию биосинтеза антоцианов с помощью гена MYB [4].

Наиболее распространенным маркером является белый треугольный рисунок на верхнем эпидермисе листьев. Этот мультиаллельный признак очень изменчив [5; 6; 7]. Многолисточковость клевера ползучего контролируется рецессивным геном (или генами) и на его проявление сильно влияет окружающая среда. Считается, что род *Trifolium* произошел от многораздельных предков и

количество листочков уменьшалось в ходе эволюции. У бобовых гены, подавляющие формирование большего количества листочков, приводили к уменьшению их количества [7; 8].

Антоциановая окраска листьев у рода *Trifolium* регулируется семейством генов R2R3-MYB [9]. *Trifolium repens* имеет несколько отчетливых антоциановых рисунков листьев, которые связаны с локусами пигментации R и V. Локус R связан с такими признаками как: «красный лист» (RL), «красная средняя жилка» (RM), «красная крапинка» (RF) и «диффузный красный лист» (RLD) [3; 8; 10;].

**Цель исследований** — создать фенотипически маркированный селекционный материал клевера ползучего.

**Материалы и методы.** Основным селекционным методом работы в исследовании являлся отбор. Образцы получены из Центра коллективного пользования «Биологические коллекции кормовых растений» ФНЦ «ВИК им.

В. Р. Вильямса».

Оценка проводилась в условиях селекционно-тепличного комплекса (СТК) и в научно-исследовательских полях. С целью ускорения селекционного процесса и получения развитых растений клевера ползучего в первый год жизни образцы выращивались через рассаду. Растения высаживались в феврале–марте в сосуды объемом 0,2 л в СТК. Рассада проходила яровизацию на открытом воздухе в апреле. Далее в зависимости от опыта растения высаживались в сосуды объемом 3 л (по одному растению), в грунтовую теплицу и в поле. В полевых условиях расстояние между растениями составило 50 × 50 см. Все учеты и наблюдения проведены согласно методическим указаниям [11; 12].

**Результаты исследований и их обсуждение.** Схема селекционного процесса, используемая при маркировании селекционного материала, представлена на рисунке 1.

Поиск фенотипических маркеров
Создание изогенной популяции с маркерным признаком
Маркирование перспективного селекционного материала
F <sub>1</sub>
F <sub>2</sub> отбор
Насыщающее скрещивание F <sub>3</sub> и F <sub>4</sub>
Испытание перспективного селекционного материала

**Рис. 1. Схема селекционного процесса**

Генотипы, имеющие фенотипические признаки, пригодные для маркирования сортов, в селекционном процессе подбираются в результате оценки коллекционного материала дикорастущих форм и

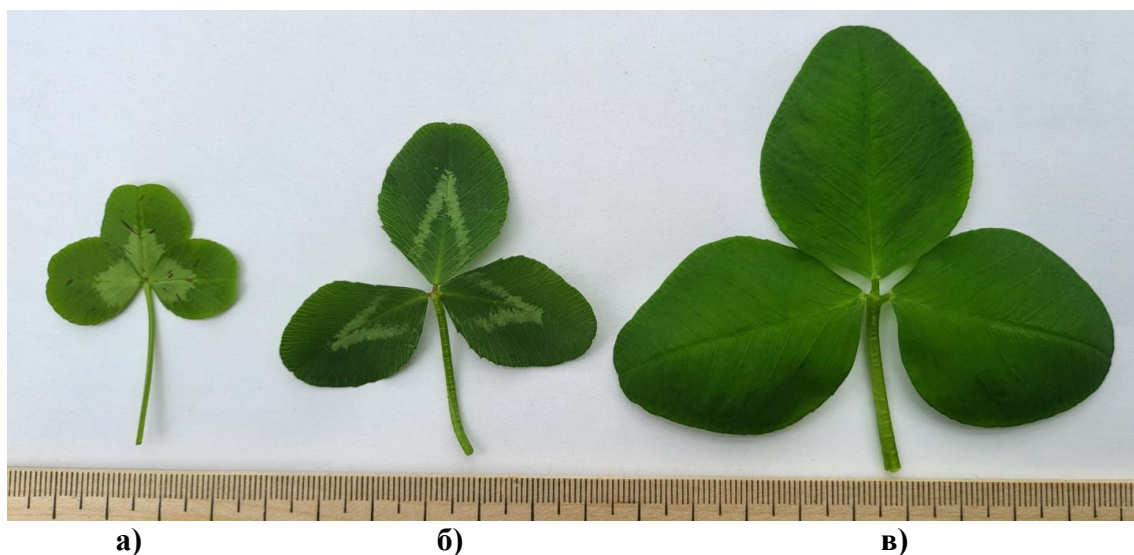
культурных сортов, расщепления гибридов и осмотре производственных посевов.

Из выделенных единичных растений или группы растений посредством руч-

ного опыления и многократного отбора создаются изогенные популяции с определенным маркерным признаком. Для маркирования может быть использован как доминантный (наличие треугольного пятна листьев, красная пятнистость листьев), так и рецессивный (многолисточковость, отсутствие треугольного пятна листьев, красная жилка листьев, окрас соцветий) признак. Фенотипически маркированные образцы могут сами стать сортами либо использоваться для маркирования перспективного селекционного материала.

Одним из способов фенотипического маркирования является создание попу-

ляции клевера ползучего с рисунком белой метки на листовой пластинке. С этой целью ведется поиск и пополняется рабочая коллекция фенотипических маркеров по рисунку листовой пластинки. Созданы изогенные популяции многократным отбором из образцов № 127 (дикорастущая форма, Амурская область) и № к-40561 (дикорастущая форма, Краснодарский край). Белая метка листовой пластинки образца № 127 полностью окрашена, лист яйцевидной формы, с красной пятнистостью. У образца № к-40561 треугольный рисунок подчеркнутый, вытянутый, форма листа удлинненная (рис. 2).



**Рис. 2.** Рисунок листовой пластинки а) № 127, б) № к-40561, в) № 302

Создана изогенная популяция клевера ползучего с отсутствием белой метки листовой пластинки (рецессивный признак). Образец является октоплоидом ( $2n = 64$ ). Удвоенное число хромосом привело к увеличению размеров клетки, а следовательно, и к увеличению размеров всех органов. Растения характеризуются крупными листьями (4,5 см) и головками (3,0 см), толстыми стеблями

(0,4 мм), высокими цветоносами (32,0 см). Октоплоидный образец № 302 имеет двойное фенотипическое маркирование: отсутствие треугольного пятна и форма пыльцевых зерен. Пыльца октоплоидных образцов ( $2n = 64$ ) имеет неправильную форму (треугольную, многоугольную), тетраплоидные образцы ( $2n = 32$ ) обладают правильной вытянутой формой (рис. 3).

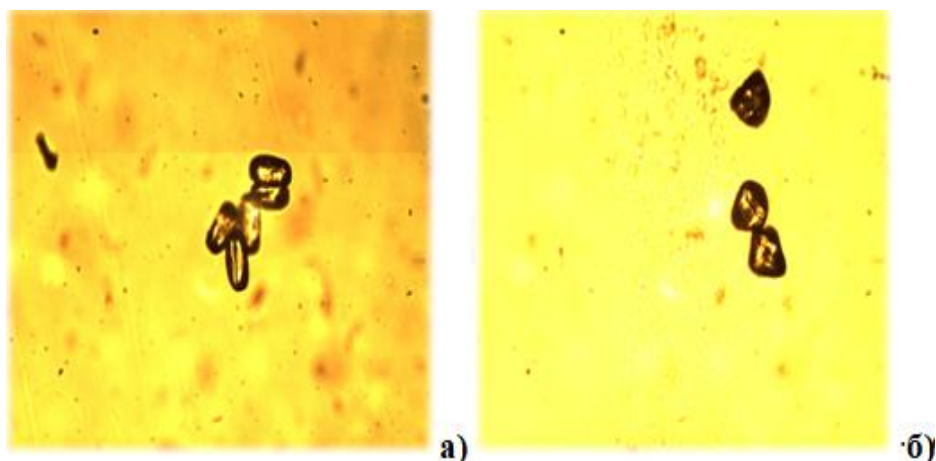


Рис. 3. Форма пыльцевых зерен: а) тетраплоид ( $2n = 32$ ), б) октоплоид ( $2n = 64$ )

В работе по поиску фенотипических маркеров клевера ползучего найдены образцы, имеющие рецессивные при-

знаки: многолисточковость, антоциановый окрас вегетативной массы (рис. 4) и др.



Рис. 4. Растения клевера ползучего с антоциановым окрасом вегетативной массы

Одним из фенотипических маркеров клевера ползучего является форма куста.

Для маркирования по данному признаку возможно использование «кустовых» форм клевера ползучего. Стебли таких форм скученные, многочисленные, не стелющиеся и не укореняющиеся в узлах.

«Кустовые» формы встречаются, как

правило, на краях ареала — альпийский пояс Киликийского Тавра и Каппадокии (Турция), Апеннин, Греции, Кыргызстана [13].

В результате исследований последних лет (с 2020 по 2025 гг.) создан образец клевера ползучего по маркерному признаку «розовый окрас соцветий» (рис. 5).



**Рис. 5. Соцветие клевера ползучего, имеющее маркерный признак «розовый окрас соцветий»**

Из гибрида, с исходными родительскими формами Атоляй (Латвия) × Печорский (дикорастущая форма, Россия, Республика Коми), отобрано два расте-

ния, выделившихся по окрасу соцветий. Из этих растений получено поколение F<sub>1</sub>–F<sub>4</sub>. Расщепление по окрасу соцветий представлено в таблице 1.

### 1. Расщепление образца клевера ползучего «Окрашенные соцветия» по окрасу соцветий

Цвет соцветий	Год исследований							
	2022		2023		2024		2025	
	Поколение							
	F <sub>1</sub>		F <sub>2</sub>		F <sub>3</sub>		F <sub>4</sub>	
	количество растений	%	количество растений	%	количество растений	%	количество растений	%
Белый	95	95,0	200	32,6	21	3,9	4	0,4
Розовый	3	3,0	364	59,4	471	87,9	906	94,4
Ярко-розовый	2	2,0	49	8,0	44	8,2	50	5,2
Всего растений	100	100	613	100	536	100	960	100

Маркирование перспективного селекционного материала F<sub>4</sub> (2 × 3) с применением образца «Окрашенные соцветия» проведено в 2023–2025 гг.

В поколениях F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub> маркерный признак «розовый окрас соцветий» передался по наследству.

В 2024 г. оценивались 130 гибридных растений F<sub>1</sub> ((2×3) × ОС). Расщепление по окрасу соцветий: с белым окрасом за-

цвело 13 растений (11%), с бледно-розовым — 72 растения (61%) и с ярко-розовым — 34 растения (29%). С лучших растений, имеющих ярко-розовый окрас соцветий, получены семена при ручном опылении головок. В 2025 г. оценивались 42 растения гибридов F<sub>2</sub>. Зацвело 22 растения, из которых 2 растения имели белый окрас и 20 растений розовый окрас соцветий. В поколениях

F<sub>3</sub> и F<sub>4</sub> будут проведены насыщающие скрещивания.

**Заключение.** В статье приведены способы фенотипического маркирования сортов клевера ползучего.

В результате исследований получены изогенные популяции с маркерными признаками «заполненная белая метка

листовой пластинки», «удлиненная метка листовой пластинки», «отсутствие белой метки на листовой пластинке» и «розовый окрас соцветий».

Проведено фенотипическое маркирование перспективного образца клевера ползучего по маркерному признаку «розовый окрас соцветий».

## Литература:

1. Taylor N. L. Registration of gene marker germplasm for red clover (Reg. CP1 for CP) // *Crop Science*. – 1982. – Vol. 22. – № 6. – P. 1269.
2. Матвеева О. С. Изучение сортового разнообразия на отличимость, однородность и стабильность признаков и создание генетически маркированного селекционного материала клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) : дис. канд. с.-х. наук. – Москва, 2004. – 163 с. – EDN NMQTJP.
3. Inheritance and frequencies of leaf markings in white clover / H. L. Carnahan, H. D. Hill, A. A. Hanson, K. G. Brown // *Journal of Heredity*. – 1955. – Vol. 46. – № 3. – Pp. 109–114. – EDN IRQGKH.
4. MYB-mediated regulation of anthocyanin biosynthesis / H. Yan, X. Pei, H. Zhang, et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2021. – Vol. 22. – № 6. – EDN WOANSG. – DOI 10.3390/ijms22063103.
5. Brewbaker J. L. V-leaf markings of white clover // *Journal of Heredity*. – 1955. – Vol. 46. – № 3. – Pp. 115–123. – EDN HVBQEK.
6. Genetic nomenclature in clovers and special purpose legumes: I. Red and white clover / K. H. Quesenberry, R. R. Smith, N. L. Taylor, et al. // *Crop Science*. – 1991 – Vol. 31. – № 4. – Pp. 861–867. – DOI 10.2135/cropsci1991.0011183X003100040003x.
7. Leaf trait coloration in white clover and molecular mapping of the red midrib and leaflet number traits / R. M. Tashiro, Y. Han, M. J. Monteros, et al. // *Crop Science*. – 2010. – Vol. 50. – № 4. – Pp. 1260–1268. – DOI 10.2135/cropsci2009.08.0457.
8. Zohary M., Heller D. The genus *Trifolium*. – Jerusalem : Israel Academy of Sciences and Humanities, 1984. Pp. 606.
9. Anthocyanin leaf markings are regulated by a family of R2R3-MYB genes in the genus *Trifolium* / N. W. Albert, A. G. Griffiths, G. R. Cousins, et al. // *New Phytologist*. – 2015. – Vol. 205. – № 2. – Pp. 882–893. – DOI 10.1111/nph.13100.
10. Corkill L. Leaf markings in white clover // *Journal of Heredity*. – 1971. – Vol. 62. – № 5. – Pp. 307–310. – EDN IRSVHX.
11. Методические указания по селекции и первичному семеноводству клевера / Под ред. З. Ш. Шамсутдинова, А. С. Новоселовой, С. А. Бекузаровой. – М. : Типография Россельхозакадемии, 2002. – 72 с. – EDN RSNVNH.
12. Малышев Л. Л., Дзюбенко Е. А., Малышева Н. Ю. Методические указания по работе с коллекцией кормовых культур. – СПб. : ВИР, 2024. – 52 с. – EDN KGACPO. – DOI 10.30901/978-5-907780-10-1.
13. Мухина Н. А., Станкевич А. К. Культурная флора, многолетние бобовые травы (клевер, люцерна). – М. : Колос, 1993. – 336 с.

## References:

1. Taylor N.L. Registration of gene marker germplasm for red clover (Reg. CP1 for CP). *Crop Science*. 1982. Vol. 22. No. 6. Pp. 1269.
2. Matveeva O.S. *Izuchenie sortovogo raznoobraziya na otlichimost', odnorodnost' i stabil'nost' priznakov i sozdanie geneticheski markirovannogo selektsionnogo materiala klevera lugovogo (Trifolium pratense L.)* [Study of varietal diversity for distinctiveness, uniformity, and stability of traits and creation of genetically marked breeding material for red clover (*Trifolium pratense* L.)]. *Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata sel'skokhozyaistvennykh nauk* [Dissertation for the degree of Candidate of Agricultural Sciences]. Moscow. 2004. 163 p. EDN NMQTJP.
3. Carnahan H.L., Hill H.D., Hanson A.A., Brown K.G. Inheritance and frequencies of leaf markings in white clover. *Journal of Heredity*. 1955. Vol. 46. No. 3. Pp. 109-114.
4. Yan H., Pei X., Zhang H., et al. MYB-mediated regulation of anthocyanin biosynthesis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22. No 6. DOI 10.3390/ijms22063103.
5. Brewbaker J.L. V-leaf markings of white clover. *Journal of Heredity*. 1955. Vol. 46. No. 3. Pp. 115-123.
6. Quesenberry K.H., Smith R.R., Taylor N.L., et al. Genetic nomenclature in clovers and special purpose legumes: I. Red and white clover. *Crop Science*. 1991. Vol. 31. No. 4. Pp. 861-867. DOI 10.2135/cropsci1991.0011183X003100040003x.
7. Tashiro R.M., Han Y., Monteros M.J., et al. Leaf trait coloration in white clover and molecular mapping of the red midrib and leaflet number traits. *Crop Science*. 2010. Vol. 50. No. 4. Pp. 1260-1268. DOI 10.2135/cropsci2009.08.0457.
8. Zohary M., Heller D. The genus *Trifolium*. Jerusalem. Israel Academy of Sciences and Humanities. 1984. 606 p.
9. Albert N.W., Griffiths A.G., Cousins G.R., et al. Anthocyanin leaf markings are regulated by a family of R2R3-MYB genes in the genus *Trifolium*. *New Phytologist*. 2015. Vol. 205. No. 2. Pp. 882-893. DOI 10.1111/nph.13100.
10. Corkill L. Leaf markings in white clover. *Journal of Heredity*. 1971. Vol. 62. No. 5. Pp. 307-310.
11. *Metodicheskie ukazaniya po selektsii i pervichnomu semenovodstvu klevera* [Guidelines for Clover Breeding and Primary Seed Production] ed. by Z.Sh. Shamsutdinov, A.S. Novoselova, S.A. Bekuzarova. Moscow. *Tipografiya Rossel'khozakademii* Publ. 2002. 72 p.
12. Malysheva L.L., Dzyubenko E.A., Malysheva N.Yu. *Metodicheskie ukazaniya po rabote s kolleksiei kormovykh kul'tur* [Guidelines for working with a collection of fodder crops]. Saint-Petersburg. *VIR* Publ. 2024. 52 p. DOI 10.30901/978-5-907780-10-1.
13. Mukhina N.A., Stankevich A.K. *Kul'turnaya flora, mnogoletnie bobovye travy (klever, lyadvenets)* [Cultivated flora, perennial leguminous grasses (clover, alfalfa)]. Moscow. *Kolos* Publ. 1993. 336 p.

УДК 57:632.9: 631.8

DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2-41-49

**БИОПРАЙМИНГ СЕМЯН КОРМОВЫХ БОБОВ ИЗОЛЯТАМИ ШТАММОВ  
*TRICHODERMA* С ПОВЕРХНОСТИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ\***

**А. В. Акимов**<sup>1,2</sup>, научный сотрудник  
**Е. В. Думачева**<sup>1,2</sup>, доктор биологических наук  
**В. И. Чернявских**<sup>1,2</sup>, доктор сельскохозяйственных наук  
**П. В. Максимова**<sup>1,2</sup>, научный сотрудник  
**А. В. Гаар**<sup>1,2</sup>, научный сотрудник

<sup>1</sup>ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»

141055, Россия, Московская область, г. Лобня, ул. Научный городок, корп. 1

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

308015, Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85

[dumacheva63@mail.ru](mailto:dumacheva63@mail.ru)

**BIOPRIMING OF FODDER BEAN SEEDS WITH ISOLATES  
OF *TRICHODERMA* STRAINS FROM THE SURFACE OF SCOTS PINE**

**A.V. Akimov**<sup>1,2</sup>, Researcher  
**E.V. Dumacheva**<sup>1,2</sup>, Doctor of Biological Sciences  
**V.I. Chernyavskikh**<sup>1,2</sup>, Doctor of Agricultural Sciences  
**P.V. Maksimova**<sup>1,2</sup>, Researcher  
**A.V. Gaar**<sup>1,2</sup>, Researcher

<sup>1</sup>Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology

141055, Russia, Moscow region, Lobnya, Nauchnyi gorodok str., k. 1

<sup>2</sup>Belgorod State National Research University

308015, Russia, Belgorod, Pobedy St., Bldg. 85

[dumacheva63@mail.ru](mailto:dumacheva63@mail.ru)

Представлены результаты комплексного исследования по оценке влияния шести новых штаммов *Trichoderma* на рост и развитие кормовых бобов (*Vicia faba* L.) в условиях искусственного инфицирования *Fusarium solani* и *Fusarium culmorum*. Работа направлена на изучение биоконтрольного и ростостимулирующего потенциала изолятов *Trichoderma*, выделенных с поверхности *Pinus sylvestris*, в отношении семян и проростков *V. faba*. Исследования проводили в 2025 г. в лаборатории физиологии растений ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса». Объектами исследования являлись новые изоляты *Trichoderma* (Tr-1, Tr-2, Tr-3, Tr-4, Tr-5, Tr-6), коммерческий штамм *Trichoderma viride* (штамм 471 ГНУ ВНИИСХМ РАСХН, ТМ «Ваше Хозяйство») — стандарт для сравнения, фитопатогены: *F. solani* и *F. culmorum* из коллекции ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса», семена и проростки

\*Исследования выполнены при поддержке Госзадания FGGW-2025-0010 «Оценка генофонда и создание коллекции видов рода *Medicago* и других бобовых трав с высокими кормовыми качествами на основе сопряженных морфобиологических признаков для селекции высокопродуктивных сортов, устойчивых к изменяющимся условиям среды».

*V. faba*. Контроль — необработанные семена. На фоне заражения *F. solani* штаммы Tr-2, Tr-3 и Tr-4 достоверно увеличили длину зародышевых корешков относительно коммерческого штамма на 105,4, 91,9 и 77,7 % соответственно, а относительно контроля — в 1,8 раз (Tr-2). Применение штаммов Tr-1 и Tr-2 обеспечило снижение пораженности семян на 45–50 % по сравнению со стандартом. В условиях инокуляции *F. culmorum* максимальный ростостимулирующий эффект отмечен у штаммов Tr-1 и Tr-2 — увеличение длины корней в 2,8 раза относительно коммерческого штамма. Консорциум штаммов (Tr-1, Tr-2, Tr-3, Tr-4, Tr-5, Tr-6) снизил пораженность семян на 90,9 % относительно коммерческого штамма. Выделенные изоляты *Trichoderma* характеризуются высоким биоконтрольным потенциалом и могут служить основой для создания специализированных биопрепаратов, сочетающих фунгицидное и ростостимулирующее действие, направленных против фузариозов кормовых бобов.

**Ключевые слова:** *Trichoderma*, биопрайминг семян, *Fusarium solani*, *Fusarium culmorum*, биоконтроль, ростостимуляция, *Vicia faba*, *Pinus sylvestris*.

The results of a comprehensive study on the effect of six new *Trichoderma* strains on the growth and development of faba bean (*Vicia faba* L.) under artificial infection with *Fusarium solani* and *Fusarium culmorum* are presented. The work is aimed at studying the biocontrol and growth-promoting potential of *Trichoderma* isolates derived from the surface of *Pinus sylvestris* in relation to seeds and seedlings of *V. faba*. The research was conducted in 2025 at the Laboratory of Plant Physiology of the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology. The objects of study were new *Trichoderma* isolates (Tr-1, Tr-2, Tr-3, Tr-4, Tr-5, Tr-6), the commercial strain *Trichoderma viride* (strain 471, TM "Vashe Khozyaistvo") as a reference standard, phytopathogens *F. solani* and *F. culmorum* from the collection of the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, and seeds and seedlings of *V. faba*. Untreated seeds served as the control. Under *F. solani* infection, strains Tr-2, Tr-3, and Tr-4 significantly increased the length of embryonic roots relative to the commercial strain by 105.4%, 91.9%, and 77.7%, respectively, and relative to the control — by 1.8 times (Tr-2). The use of strains Tr-1 and Tr-2 reduced seed infection by 45–50% compared to the reference standard. Under *F. culmorum* inoculation, the maximum growth-promoting effect was observed for strains Tr-1 and Tr-2, which increased root length by 2.8 times relative to the commercial strain. The consortium of strains (Tr-1, Tr-2, Tr-3, Tr-4, Tr-5, Tr-6) reduced seed infection by 90.9% relative to the commercial strain. The isolated *Trichoderma* strains are characterized by high biocontrol potential and can serve as a basis for the development of specialized biopreparations combining fungicidal and growth-promoting effects against fusariosis of faba bean.

**Keywords:** *Trichoderma*, seed biopriming, *Fusarium solani*, *Fusarium culmorum*, biocontrol, growth promotion, *Vicia faba*, *Pinus sylvestris*.

**Введение.** В условиях экологизации сельского хозяйства и сокращения применения химических фунгицидов особую актуальность приобретают биологические методы защиты. Грибы рода *Trichoderma* являются одними из наиболее изученных и эффективных агентов биоконтроля против широкого спектра фитопатогенов, включая *Fusarium* spp. [1; 2]. Их применение для биопрайминга семян и вегетирующих растений кормовых

бобов представляется перспективным направлением для создания устойчивых агроценозов. Исследования показывают, что инокуляция *Trichoderma* не только снижает пораженность растений патогенами, но и способствует ростостимулирующему эффекту, улучшая азотфиксирующую активность и повышая устойчивость к абиотическим стрессам [3; 4].

Спектр антагонистической активности *Trichoderma* реализуется через мно-

гоуровневую систему механизмов, включая прямой микопаразитизм, антибиоз и конкуренцию, а также опосредованную индукцию системной резистентности (ИСР) у растений-хозяев [5; 6]. Важно отметить, что ростостимулирующий эффект часто связан со способностью *Trichoderma* улучшать фосфорное питание и синтез регуляторов роста, что для бобовых культур может синергически сочетаться с активностью клубеньковых бактерий [7].

Таким образом, интеграция применения штаммов *Trichoderma* в технологии возделывания кормовых бобов является научно обоснованным подходом для одновременного решения задач защиты растений, повышения урожайности и улучшения качества продукции. Целью данного обзора является анализ современных данных о потенциале использования грибов рода *Trichoderma* для биоконтроля болезней и стимуляции продукционного процесса у кормовых бобов (*V. faba*) [1].

Гифы *Trichoderma* проявляют хемотропизм к фитопатогенам, плотно обвивают их мицелий и осуществляют лизис клеточных стенок за счет секреции хитиназ,  $\beta$ -1,3-глюканаз и протеаз. Этот механизм высокоэффективен против *Fusarium spp.* — основных возбудителей корневых гнилей бобовых [5; 8].

Многие штаммы *Trichoderma* продуцируют широкий спектр антимикробных вторичных метаболитов (пептаиболы, пироны, изоцианаты), которые ингибируют рост и развитие патогенов в ризосфере и на поверхности семян [6].

Обладая высокой скоростью роста и эффективным метаболизмом, *Trichoderma* успешно конкурирует с фитопатогенами

за пространство и питательные субстраты (углерод, железо), создавая «биологический барьер» в зоне корня [9].

Колонизация корней *Trichoderma* приводит к прайминг-эффекту — состоянию повышенной готовности защитной системы растения. При последующем поражении патогенами в тканях бобов происходит усиленная и быстрая активация защитных генов, накопление фитоалексинов, ферментов PR-протеинов и укрепление клеточных стенок. Это обеспечивает длительную системную защиту [7].

Штаммы *Trichoderma* способны мобилизовывать труднодоступные формы фосфора и микроэлементов в почве, что критически важно для энергоемкого процесса симбиотической азотфиксации у бобовых [2].

Грибы могут продуцировать или индуцировать синтез ауксинов, цитокининов и гиббереллинов в растении, стимулируя развитие корневой системы и надземной биомассы [4].

Инокуляция *Trichoderma* усиливает устойчивость растений к засухе и засолению за счет аккумуляции пролина и повышения активности антиоксидантных ферментов, что поддерживает ростовые процессы и жизнеспособность клубеньков [7; 8].

Современные научные данные свидетельствуют о высоком потенциале грибов рода *Trichoderma* как многофункциональных агентов для устойчивого возделывания кормовых бобов. Их применение позволяет интегрировано решать проблемы биологической защиты от почвенных патогенов (в первую очередь фузариозов) и повышения продуктивности

культуры за счет ростостимулирующего и адаптогенного действия [1].

Кормовые бобы (*Vicia faba* L.) представляют собой высокопродуктивную зернобобовую культуру, имеющую важное кормовое и пищевое значение благодаря высокому содержанию белка (20–35 %) и способности к симбиотической фиксации азота. Однако их продуктивность и качество урожая существенно ограничиваются поражением комплексом почвенных патогенов, среди которых грибы рода *Fusarium*, вызывающие корневые гнили и трахеомикозные увядания, занимают ведущее место. Это приводит к значительным потерям урожая и снижению питательной ценности бобов из-за накопления микотоксинов [1; 9].

Цель исследования заключалась в изучении биоконтрольного и ростостимулирующего потенциала новых штаммов *Trichoderma*, выделенных с поверхностей *Pinus sylvestris*, при биопряминге семян кормовых бобов в условиях искусственного заражения *F. solani* и *F. culmorum*.

**Материалы и методы.** Исследования выполнены в 2025 г. на базе лаборатории физиологии сельскохозяйственных растений ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса». Объектами исследования служили шесть новых штаммов *Trichoderma*, изолированных с поверхности сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), а также коммерческий штамм *Trichoderma viride* 471 (ТМ «Ваше Хозяйство»), принятый в качестве эталона сравнения. Тест-культурами выступали семена кормовых бобов (*Vicia faba* L.), фитопатогенные изоляты *F. solani* и *F. culmorum* были получены из коллекции микроорганизмов ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса». Кон-

трольную группу составляли интактные (необработанные) семена.

Выделение штаммов *Trichoderma* из природных субстратов осуществляли согласно общепринятым микологическим методикам с последующим культивированием на стандартных питательных средах [10]. Видовая принадлежность выделенных изолятов подтверждена методами молекулярного анализа в НИЦ «Курчатовский институт».

Семена подготовлены стандартными методами [11]. Для изучения ростостимулирующего эффекта применяли метод биопряминга. Подготовленные семена раскладывали в чашки Петри на увлажненную фильтровальную бумагу и проращивали в термостате при 22 °С в темноте до инициации прорастания, после чего переносили в климатическую камеру с регулируемыми параметрами: температура 22 °С, фотопериод 16/8 ч (свет/темнота), относительная влажность воздуха 70 %. На седьмые сутки проводили морфометрический анализ, измеряя длину главного корня. Повторность опытов трехкратная.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием стандартных методов вариационной статистики [12].

**Результаты и их обсуждение.** Влияние новых штаммов *Trichoderma* на ростовые показатели проростков *V. faba* в условиях заражения фузариозами.

Проведенные исследования выявили существенное стимулирующее действие новых штаммов *Trichoderma* на ростовые характеристики проростков кормовых бобов даже в условиях предварительной инокуляции семян фитопатогенными микроорганизмами.

При инфицировании *F. solani* обработка семян *V. faba* новыми штаммами *Trichoderma* способствовала увеличению длины зародышевых корешков в 0,18–1,80 раза по сравнению с контролем. Наибольшую эффективность проявили штаммы Tr-2, Tr-3 и Tr-4, которые статистически значимо ( $p < 0,05$ ) превзошли коммерческий штамм *T. viride* 471, показав увеличение длины корней на 105,4, 91,9 и 77,7 % соответственно относительно коммерческого стандарта.

В условиях заражения *F. culmorum* также наблюдалась выраженная ростостимулирующая активность исследованных штаммов. Новые изоляты *Trichoderma* обеспечили увеличение длины корней в 1,5–2,8 раза относительно коммерческого штамма. Наиболее эффективными в сравнительном анализе с *T. viride* 471 оказались штаммы Tr-1, Tr-2 и Tr-6, достоверно ( $p < 0,05$ ) увеличившие длину зародышевых корешков в 2,8; 2,1 и 1,5 раза соответственно (рис. 1).

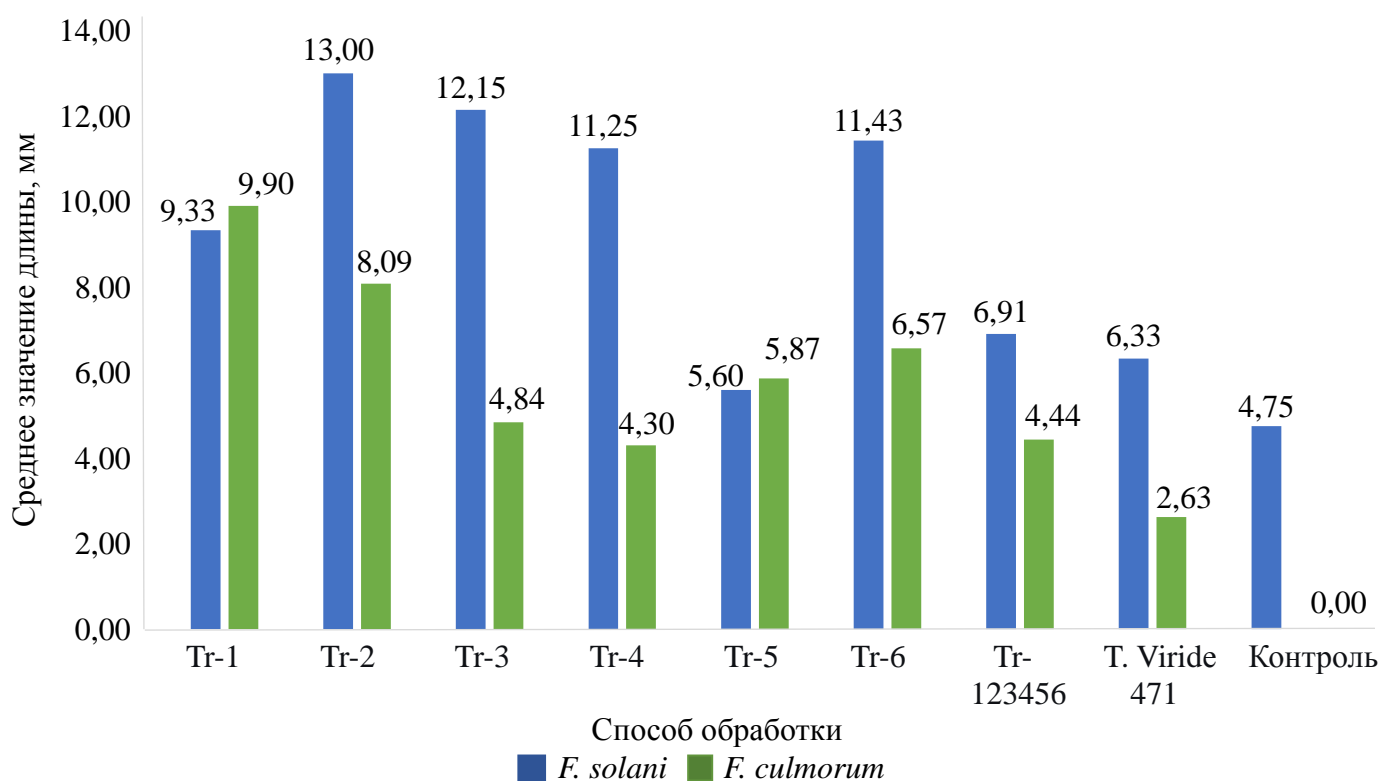


Рис. 1. Оценка стимуляции роста зародышевых корешков проростков *V. Faba*, обработанных различными штаммами *Trichoderma*, при поражении *F. solani* и *F. culmorum*, на седьмые сутки

Параллельно с ростостимулирующим действием все изученные штаммы показали выраженные антагонистические свойства. Пораженность семян *F. solani* в опытных вариантах уменьшилась на 5,0–50,0 % относительно контроля. При этом

штаммы Tr-1 и Tr-2 статистически значимо ( $p < 0,05$ ) превзошли коммерческий штамм *T. viride* 471 по эффективности подавления патогена, снизив пораженность семян на 45,0 и 50,0 % соответственно.

При воздействии *F. culmorum* применение выделенных штаммов *Trichoderma* позволило снизить пораженность семян на 22,7–90,9 % по сравнению с контролем. Консорциум штаммов (Tr-1, Tr-2, Tr-3, Tr-4, Tr-5, Tr-6) достоверно

( $p < 0,05$ ) превзошел коммерческий штамм *T. viride* 471, уменьшив пораженность на 90,9 %, а штаммы Tr-2 и Tr-5 показали снижение на 77,3 % относительно коммерческого стандарта (рис. 2, 3, 4).

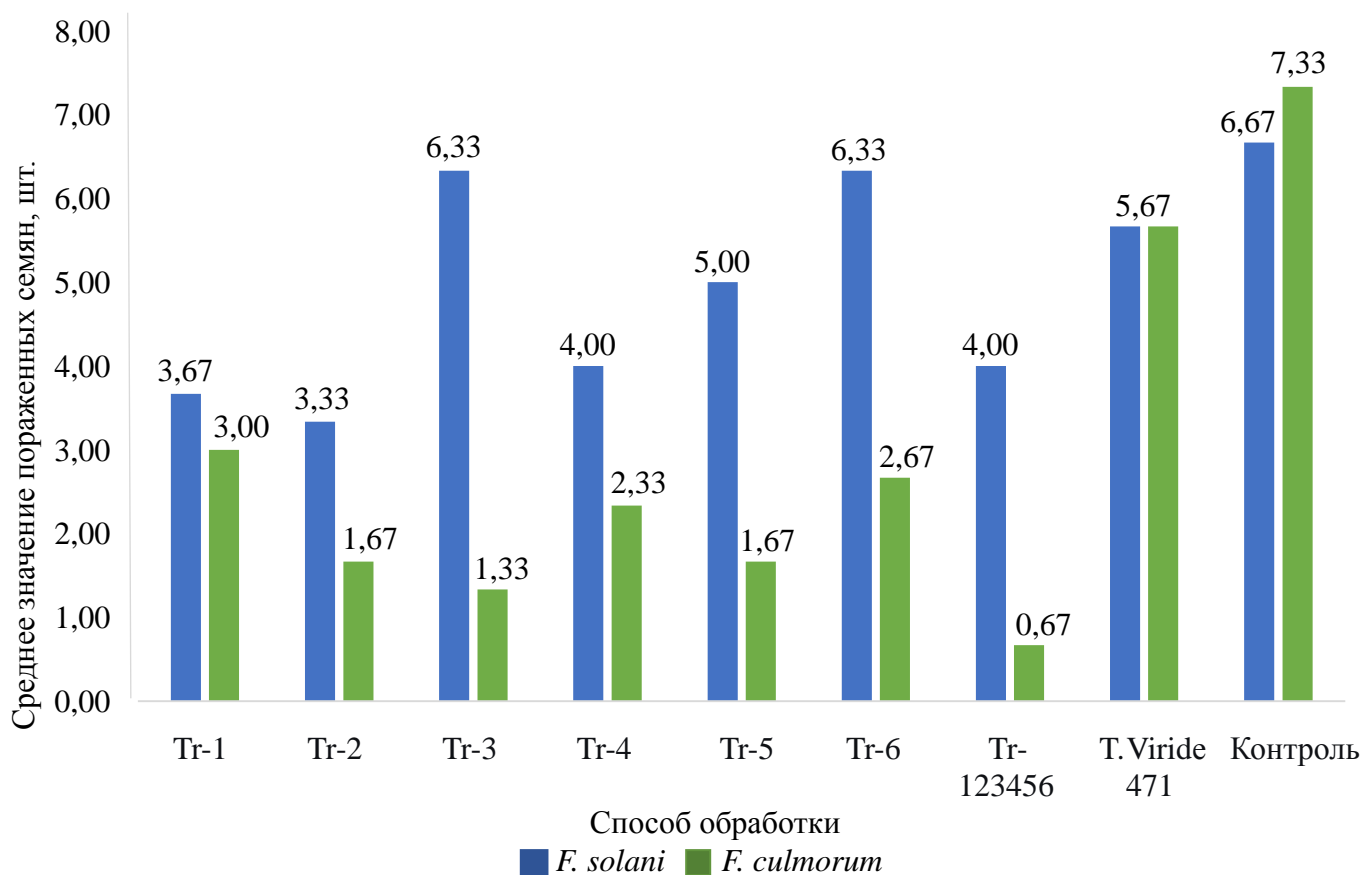


Рис. 2. Оценка среднего количества пораженных семян *V. Faba*, обработанных различными штаммами *Trichoderma*, в условиях поражения *F. solani* и *F. culmorum*, на седьмые сутки

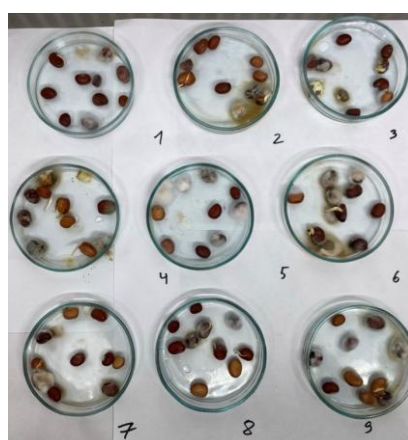
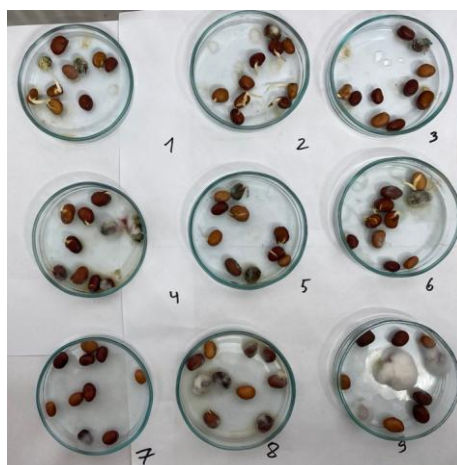


Рис. 3. Проростки кормовых бобов (*V. Faba*), пораженные *F. solani*, семена которых предварительно обработаны различными штаммами *Trichoderma*, на седьмые сутки (1 – Tr-1, 2 – Tr-2, 3 – Tr-3, 4 – Tr – 4, 5 – Tr-5, 6 – Tr-6, 7 – консорциум штаммов, 8 – *T. Viride* 471, 9 – контроль)



**Рис. 4.** Проростки кормовых бобов (*V. Faba*), пораженные *F. culmorum*, семена, которых предварительно обработаны различными штаммами *Trichoderma*, на седьмые сутки (1 – Tr-1, 2 – Tr-2, 3 – Tr-3, 4 – Tr-4, 5 – Tr-5, 6 – Tr-6, 7 – консорциум штаммов, 8 – *T. Viride* 471, 9 – контроль)

**Заключение.** Новые изоляты *Trichoderma* с поверхности *P. sylvestris* обладают выраженным биоконтрольным и ростостимулирующим действием против *F. solani* и *F. culmorum* на семенах кормовых бобов. Максимальная эффектив-

ность отмечена у штаммов Tr-1, Tr-2 и консорциума. Результаты обосновывают перспективу разработки биопрепаратов на их основе для устойчивого возделывания *V. faba* в системах адаптивного кормопроизводства.

## Литература

1. El-Mougy N. S., Abdel-Kader M. M. Long-term activity of bio-priming seed treatment for biological control of faba bean root rot pathogens // *Australasian Plant Pathology*. – 2008. – Vol. 37. – № 5 – Pp. 464–471. – EDN YJVLEM. – DOI 10.1071/ap08043.
2. *Trichoderma: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth* / R. Tyśkiewicz, A. Nowak, E. Ozimek, J. Jaroszk-Ścisł // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2022. – Vol. 23. – № 4. – Art. 2329. – EDN OKOSRW. – DOI 10.3390/ijms23042329.
3. *Trichoderma: The «Secrets» of a Multitalented Biocontrol Agent* / M. Sood, D. Kapoor, V. Kumar, et al. // *Plants*. – 2020. – Vol. 9. – № 6. – Art. 762. – EDN QUWDLY. – DOI 10.3390/plants9060762.
4. Zin N. A., Badaluddin N. A. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications // *Annals of Agricultural Sciences*. – 2020. – Vol. 65. – № 2 – Pp. 168–178. – EDN ILFXAK. – DOI 10.1016/j.aos.2020.09.003.
5. Bio-priming with salt tolerant endophytes improved crop tolerance to salt stress via modulating photosystem II and antioxidant activities in a sub-optimal environment / K. Irshad, Z. Shaheed Siddioqui, J. Chen, et al. // *Frontiers in Plant Science*. – 2023. – Vol. 14. – EDN HLJYAC. – DOI 10.3389/fpls.2023.1082480.
6. Potential of *Trichoderma* spp. and *Pinus sylvestris* Bark Extracts as Biocontrol Agents against Fungal Pathogens Residing in the Botryosphaerales / V. Karličić, J. Jovičić-Petrović, V. Marojević, et al. // *Environmental Sciences Proceedings*. – 2021. – Vol. 3. – № 1. – Art. 99. – DOI 10.3390/IECF2020-07960.

7. Efficacy of Seed-Biopriming with *Trichoderma* spp. and Foliar Spraying of ZnO-Nanoparticles induce Cherry Tomato Growth and resistance to *Fusarium* wilt disease / A. H. M. Shams, A. A. Helaly, A. M. Algeblawi, et al. // *Plants*. – 2023. – Vol. 12. – № 17. – EDN HEKUAА. – DOI 10.3390/plants12173117.
8. Кириллова Н. И., Дегтярева И. А., Прищепенко Е. А. Перспективы применения модифицированного биофунгицида на основе *Trichoderma viride* для оздоровления почв // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. – 2023. – Т. 13. – № 1 (44). – С. 107–114. – EDN AVWQYP. – DOI 10.21285/2227-2925-2023-13-1-107-114.
9. Булгакова В. М., Терещенко С. А. Продуктивность кормовых бобов (*Vicia faba* L.) в условиях Калининградской области // *Вестник молодежной науки*. – 2020. – № 1 (23). – С. 2. – EDN BSGXZA.
10. Поворова О. В. *Микробиология. Практикум*. – Могилев : Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова, 2015. – 88 с. – EDN UWXGCB.
11. *Практикум по физиологии растений*. 4-е издание, перераб. и доп. / Н. Н. Третьяков, Л. А. Паничкин, М. Н. Кондратьев, и др. — М. : КолосС, 2003. – 288 с. — EDN WFCDFH.
12. Доспехов Б. А. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. 6-е издание, стер., перепеч. с 5-го изд. – М. : Альянс, 2011. – 351 с. – EDN QLCQEP.

## Reference

1. El-Mougy N.S., Abdel-Kader M.M. Long-term activity of bio-priming seed treatment for biological control of faba bean root rot pathogens. *Australasian Plant Pathology*. 2008. Vol. 37. No. 5. Pp. 464–471. DOI 10.1071/ap08043.
2. Tyśkiewicz R., Nowak A., Ozimek E., Jaroszek-Ścisiel J. *Trichoderma*: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23. No. 4. Art. 2329. DOI 10.3390/ijms23042329.
3. Sood M., Kapoor D., Kumar V., et al. *Trichoderma*: The "Secrets" of a Multitalented Biocontrol Agent. *Plants*. 2020. Vol. 9. No. 6. Art. 762. DOI 10.3390/plants9070762.
4. Zin N.A., Badaluddin N.A. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*. 2020. Vol. 65. No. 2. Pp. 168–178. DOI 10.1016/j.aos.2020.09.003.
5. Irshad K., Shaheed Siddioqui Z., Chen J., et al. Bio-priming with salt tolerant endophytes improved crop tolerance to salt stress via modulating photosystem II and antioxidant activities in a sub-optimal environment. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Art. 1082480. DOI 10.3389/fpls.2023.1082480.
6. Karličić V., Jovičić-Petrović J., Veljko Marojević. et al. Potential of *Trichoderma* spp. and *Pinus sylvestris* Bark Extracts as Biocontrol Agents against Fungal Pathogens Residing in the Botryosphaeriales. *Environmental Sciences Proceedings*. 2021. Vol. 3. No. 1. Art. 99. DOI 10.3390/IECF2020-07960.
7. Shams A.H.M. Helaly A.A., Algeblawi A.M., et al. Efficacy of Seed-Biopriming with *Trichoderma* spp. and Foliar Spraying with ZnO-Nanoparticles to Control *Fusarium solani* and Improve Growth of Cherry Tomato. *Plants*. 2023. Vol. 12. No. 17. Art. 3117. DOI 10.3390/plants12173117.
8. Kirillova N.I., Degtyareva I.A., Prishchепенко E.A. *Perspektivy primeneniya modifitsirovannogo biofungitsida na osnove Trichoderma viride dlya ozdorovleniya pochv* [Prospects of a Modified Biofungicide Based on *Trichoderma viride* for Soil health Improvement]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2023. Vol. 13. No. 1 (44). Pp. 107–114. DOI 10.21285/2227-2925-2023-13-1-107-114.

9. Bulgakova V.M., Tereshchenko S.A. *Produktivnost kormovykh bobov (Vicia faba L.) v usloviyakh Kaliningradskoy oblasti* [Productivity of fodder Beans (*Vicia faba* L.) in the Conditions of the Kaliningrad Region]. *Vestnik molodezhnoy nauki*. 2020. No. 1 (23). P. 2.
10. Povorova O.V. *Mikrobiologiya: praktikum* [Microbiology: A Practical Guide]. Mogilev. *Mogilevskii gosudarstvennyi universitet imeni A.A. Kuleshova*. 2015. 88 p.
11. Tretyakov N.N., Panichkin L.A., Kondratyev M.N., et al. *Praktikum po fiziologii rasteniy* [Plant Physiology Practical Guide]. 4th ed. Moscow. *KolosS Publ*. 2003. 288 p.
12. Dospikhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy)* [Methods of Field Experimentation (With Basics of Statistical Processing of Research Results)]. Moscow. *Alyans Publ*. 2011. 351 p.

УДК 636.087.25

DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2-50-60

## ВЛИЯНИЕ КОФЕЙНОГО ЖМЫХА В РАЦИОНЕ ОВЕЦ НА ПРОЦЕССЫ ПИЩЕВАРЕНИЯ И ПЕРЕВАРИМОСТЬ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

**А. В. Мишуров**, кандидат сельскохозяйственных наук

*ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»*

*141055, Россия, Московская область, г. Лобня, ул. Научный городок, корп. 1*

[a.v.mishurov@mail.ru](mailto:a.v.mishurov@mail.ru)

## EFFECT OF COFFEE GROUNDS IN THE DIET OF SHEEP ON DIGESTION AND DIGESTIBILITY OF NUTRIENTS

**A.V. Mishurov**, Candidate of Agricultural Sciences

*Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology*

*141055, Russia, Moscow region, Lobnya, Nauchnyi gorodok str., k. 1*

[a.v.mishurov@mail.ru](mailto:a.v.mishurov@mail.ru)

Исследования проведены на экспериментальном дворе ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста на овцах породы Катадин с хроническими фистулами рубца по Басову, которые рассматривались как модель для жвачных животных. Химический анализ кофейного жмыха показал его низкую питательность: содержание сырой клетчатки составило около 34 %, сырого протеина — менее 8 % и более 11 % сырого жира. В рацион овец опытной группы жмых включали в количестве 90 г на голову в сутки, что составило 20,5 % от замены комбикорма. Установлено, что введение кофейного жмыха в рацион овец не оказало негативного влияния на потребление питательных веществ рациона: по сухому веществу (+1,3 %), по жиру (+20,2 %), по клетчатке (+14,8 %), при этом разница по сырому протеину на 2,3 %, была в пользу животных контрольной группы. Более высокое содержание жира и клетчатки в кофейном жмыхе, отразилось на лучшем их потреблении, на 20,2 % ( $P < 0,001$ ) и 14,8 % ( $P < 0,01$ ), соответственно. По переваримости питательных веществ значительной разницы между группами не наблюдалось. Анализ рубцового метаболизма выявил более высокое содержание летучих жирных кислот в опытной группе, что могло быть связано с более высоким содержанием жира в жмыхе. При этом амилолитическая активность оказалась на 8,8 % ниже по сравнению с контролем. Наблюдалось также снижение общего количества микробальной массы в рубце животных опытной группы, в сравнении с контролем, через 3 часа — на 13 %, через 5 часов — на 16 %. Возможно, это вызвано антипитательными веществами или жирными кислотами в жмыхе. Последние могут являться источником энергии, а при избытке — оказывать негативное влияние на пищеварительные и метаболические процессы в организме животных. Для более полной оценки использования кофейного жмыха рекомендуется провести дополнительные исследования при длительном его скармливании.

**Ключевые слова:** кофейный жмых, овцы, жвачные животные, переваримость, рубцовый метаболизм.

The studies were conducted at the experimental yard of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry on Katahdin sheep with chronic Basov's rumen fistulas, which were used as a model for ruminants. The chemical analysis of the coffee grounds revealed its low nutritional value, with a crude fiber content of approximately 34%, a crude protein content of less than 8%, and a crude fat content of over 11%. In the diet of the experimental group of sheep, the grounds were included in the amount of 90 grams per head per day, which was 20.5% of the replacement of compound feed. It was found that the introduction of coffee grounds in the diet of sheep did not have a negative effect on the consumption of nutrients in the diet, on dry matter (+1.3%), on fat (+20.2%), on fiber (+14.8%), while the difference in crude protein by 2.3% was in favor of the animals of the control group. The higher fat and fiber content in the coffee grounds resulted in better consumption, with a 20.2% ( $p < 0.001$ ) and 14.8% ( $p < 0.01$ ) increase, respectively. There was no significant difference in nutrient digestibility between the groups. The analysis of ruminal metabolism showed a higher content of volatile fatty acids in the experimental group, which may be due to the higher fat content in the grounds. However, the amylolytic activity was 8.8% lower compared to the control group. There was also a decrease in the total microbial mass in the rumen of the experimental group animals, compared to the control, by 13% after 3 hours and by 16% after 5 hours. This may be caused by antinutrients or fatty acids in the grounds. The latter can be a source of energy, and if there is an excess, it can have a negative impact on the digestive and metabolic processes in the animal's body. To fully assess the use of coffee grounds, it is recommended to conduct additional studies with long-term feeding.

**Keywords:** coffee grounds, sheep, ruminants, digestibility, ruminal metabolism.

**Введение.** Одной из актуальных проблем на сегодняшний день является рациональное использование отходов перерабатывающих производств. Это особенно важно при переработке биологического сырья, в состав которого входят природные биополимеры белковой, углеводной, липидной и нуклеотидной природы.

Кофе является одним из самых популярных напитков в мире, и на всех стадиях его переработки образуется ряд побочных продуктов, в частности, кофейный жмых, который составляет 60–65% сырой массы кофейных зерен [8]. Жмых содержит органические соединения: липиды, полисахариды, полифенолы, дубильные вещества, кофеин, хлорогеновую и кофейную кислоты, антоцианы, имеющие высокую биологическую ценность [7; 14]. Требуя высоких затрат, утилизация кофейного жмыха, приводит к потере этих ценных биологически активных соединений, которые можно

фракционировать и использовать более эффективно [2; 9].

Использование кофейного жмыха в качестве источника корма для жвачных животных зависит от ряда факторов, таких как стоимость, доступность, обработка и совместимость с другими компонентами рациона. Необходимо определить соответствующие методы обработки, чтобы смягчить любые негативные воздействия соединений на продуктивность животных и усвоение питательных веществ [14].

В настоящее время предложено несколько новых методов экстракции, разработанных для более эффективного извлечения биологически активных соединений за счет сокращения как времени экстракции, так и используемого растворителя. Эффективная экстракция таких соединений может служить как пищевыми добавками, так и биоактивными веществами в косметике и фармацевтике [10]. Так, разработана технология пере-

работки отходов производства растворимого кофе, которая включает экстракцию антипитательных веществ из кофейного жмыха органическим растворителем (ацетоном) с получением кофейного масла. Твердый остаток, предварительно обработанный путем кислотного гидролиза, предложено использовать при глубинном культивировании дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* П, в результате чего получается продукт, содержащий не менее 49 % белковых веществ (сырого белка) [1].

Путем экстракции кофейного жмыха можно получить кофейный экстракт (из 1 т кофейного жмыха — 100–120 кг экстракта). Этот продукт имеет вид жиромасляной массы и отличается полноценным жирнокислотным составом, основу которого составляют линоленовая (58,7 %), пальмитиновая (17,58 %) и олеиновая (12,7 %) кислоты.

Исследованиями установлено, что в процессе хранения кофейного экстракта число омыления, йодное число и показатели кислотности практически не изменяются, что свидетельствует о наличии антиоксидантов и, соответственно, положительном влиянии на течение внутриклеточных гидролитических и окислительных ферментативных процессов. Поэтому есть основания полагать, что этот продукт будет иметь определенную ценность в кормлении молодняка крупного рогатого скота в качестве частично-заменителя молочного жира.

Исследования показали, что частичная замена молочного жира липидами кофейного экстракта способствовала оптимизации азотистого обмена в организме телят и увеличению среднесуточных приростов на 7,7 % по сравнению с теля-

тами, получавшими молоко без добавок [8].

Для взрослых животных определяющее значение имеет доза ввода кофейного жмыха в рацион. Установлено, что его добавление приводит к увеличению летучих жирных кислот в рубцовой жидкости в частности пропионата без изменения ацетата. Что, в свою очередь, может оказывать антимиетаногенное действие в рубце. В то же время более высокие дозы кофейного жмыха за счет фенольных соединений и жирных кислот могут снижать питательную ценность кормов рациона, замедляя расщепление белка и крахмала, препятствуя расщеплению аминокислот за счет избирательного воздействия на определенные микроорганизмы рубца [11].

Это согласуется с проведенными на овцах молочной породы исследованиями, в которых изучались три уровня введения кофейного жмыха в рацион: на 1 кг сухого вещества рациона вводили 100 г, 150 г, 200 г. Исследования показали, что включение кофейного жмыха в количестве до 200 г/кг в концентрат не повлияло на характер рубцовой ферментации. На фоне снижения усвояемости белка и крахмала это привело к снижению выбросов  $\text{CH}_4$ , что, в свою очередь, может стать частью стратегий по снижению уровня метана в рубце жвачных животных. Вместе с этим, в крови овец, получавших дополнительно к рациону кофейный жмых, улучшился антиоксидантно-иммунный статус [14].

Установлено, что использование кофейного жмыха в рационе коров в количестве 8 и 16 % привело к снижению концентрации аммиачного азота и аминокислотного азота в рубцовой жидкости, при

этом количество белкового азота в рубцовой жидкости этих животных увеличилось. Наиболее выраженное влияние на обменные процессы азотсодержащих соединений в рубце и продуктивные показатели коров оказало дополнительное скармливание кофейного жмыха в количестве 16 % от массы комбикорма. У этих животных наблюдалось увеличение среднесуточного удоя и улучшение качественных показателей молока (увеличение содержания белка, жира и лактозы в молоке) и привело к увеличению насыщенных жирных кислот с четным и нечетным числом атомов углерода в цепи, мононенасыщенных жирных кислот семейств n-7 и n-9 и полиненасыщенных жирных кислот семейств n-3 и n-6 общих липидов [3; 4; 5].

На коровах голштинской породы было проведено несколько опытов, в которых изучалась разная доза ввода в рацион кофейного жмыха (в первом — 0–5 %, во втором — 0,5–10 %). Выявлено что 5 % кофейного жмыха в рационе коров не оказали негативного влияния на потребление корма или продуктивность. Во втором эксперименте по мере увеличения концентрации жмыха в рационе животных, продуктивность и приросты живой массы постепенно снижались. В третьем и четвертом исследованиях кофейный жмых добавлялся в зерновые рационы откормочного скота, получавшего высококонцентрированные рационы с низким содержанием грубых кормов. Постепенное добавление кофейного жмыха (5 или 10 %) в зерновой рацион приводило к снижению потребления зерна и прироста живой массы [11].

В исследованиях на лактирующих овцах также была изучена разная доза

включения в концентрат кофейного жмыха (30, 50 и 100 г/кг). Установлено, что включение кофейного жмыха в количестве 100 г/кг в состав концентрата изменило характер ферментации в рубце в сторону увеличения содержания уксусной и масляной кислот в рубце, и уменьшению содержания пропионовой, что привело к улучшению продуктивности и состава молока без ухудшения пищевого поведения или переваримости [13].

**Цель исследований** — изучить питательную ценность и физиологическое действие жмыха кофейного для определения целесообразности его применения в кормлении жвачных животных.

**Материалы и методы исследований.** Физиологические исследования проведены на экспериментальном физиологическом дворе ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста на овцах породы Катадин с хроническими фистулами рубца по Басову, которые рассматривались как модель для жвачных животных. Используемый метод — пар аналогов, с учетом живой массы (60 кг) и возраста (2 года).

Длительность исследований составила 30 дней (21 день — предварительный и 7 дней — учетный).

Для проведения исследований в рационе овец опытной группы использовали кофейный жмых в количестве 90 г/гол/сутки (табл. 1). Поение осуществлялось вволю.

Во время предварительного и учетного периодов проводили учет задаваемых кормов и их остатков.

В учетный период отбирались среднесуточные пробы кормов, их остатков, кала и мочи по общепринятой методике проведения опытов по переваримости.

## 1. Схема опыта на овцах

Корма	Группа (n = 3)	
	контрольная	опытная
Сено, г	1500	1500
Комбикорм, г	400	350
Кофейный жмых, г	—	90
Соль лизунец	+	+

Все анализы проводили по общепринятым методикам.

Для изучения переваримости питательных веществ рациона после окончания опыта были проанализированы средние пробы кормов, остатков, кала и мочи.

В кормах, их остатках и кале определяли: первоначальную влагу, воздушно-сухое вещество, сырой протеин, сырой жир, сырую клетчатку, сырую золу, кальций, фосфор, БЭВ и органическое вещество.

Для характеристики рубцового пищеварения у животных через фистулы отбирали пробы содержимого рубца за один час до кормления, через три часа после кормления и через пять часов после кормления. Определены: рН содержимого рубца; общее количество летучих жирных кислот (ЛЖК); аммиачный азот; амилолитическая активность рубцовой жидкости; биомасса простейших и бактерий.

Полученные в опыте материалы обработаны биометрически с вычислением следующих величин: среднеарифметическая, среднеквадратическая ошибка и уровень значимости (P). Результаты исследований считали высоко достоверными при  $P < 0,001$  и достоверными при  $P < 0,01$  и  $P < 0,05$ . При  $P < 0,1$ , но  $P > 0,05$  — тенденция к достоверности полученных данных. При  $P > 0,1$  разница будет считаться недостоверной.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Проведенные химико-аналитические исследования кофейного жмыха показали, что продукт характеризуется высоким содержанием клетчатки (около 34 %) и низким содержанием сырого протеина (менее 8 %), что характеризует продукт как низкопитательный. В то же время относительно высокое содержание сырого жира (более 11 %) обеспечивает его энергетическую ценность, сравнимую с зерноотходами (табл. 2).

## 2. Химический состав кофейного жмыха, в 1 кг натурального корма

Показатель	Содержание
Сухое вещество, г	906
Энергетическая кормовая единица	0,83
Обменная энергия, МДж/кг	8,27
Сырой протеин, г/кг	76,51
Сырой жир, г/кг	114,09
Сырая клетчатка, г/кг	338,89
Зола, г/кг	6,46
БЭВ, г/кг	363,64

Рацион животных был сбалансирован в соответствии с детализированными нормами для данной половозрастной группы овец.

В рационе овец опытной группы 50 г

комбикорма заменили на 90 г кофейного жмыха, в связи с этим животным опытной группы задали несколько большее (на 2,3 %) количество питательных веществ (табл. 3).

### 3. Задано питательных веществ с рационом

Показатель	Группа (n = 3)	
	контрольная	опытная
Сухое вещество, г	1624,7	1662,35
Органическое вещество, г	1505,2	1545,71
Сырой протеин, г	210,15	208,97
Сырой жир, г	43,03	51,78
Сырая клетчатка, г	413,79	441,60
БЭВ, г	838,22	843,36
Сырая зола, г	119,49	116,63

Потребление кормов — одна из первых основных характеристик кормовой ценности рациона. Скармливание кофейного жмыха не оказало отрицательного влияния на потребление кормов.

Наоборот, по физическому потреблению сухого вещества животные опытной группы превышали аналогичный показатель в контроле на 17,71 г (+1,3 %) (табл. 4).

### 4. Фактическое потребление питательных веществ рациона (n = 3)

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Сухое вещество, г	1346,00 ± 17,92	1363,71 ± 18,68
Органическое вещество, г	1238,60 ± 17,14	1265,08 ± 17,56
Сырой протеин, г	193,25 ± 1,09	188,89 ± 1,26
Сырой жир, г	38,94 ± 0,26	46,82 ± 0,31*
Сырая клетчатка, г	305,65 ± 6,95	350,95 ± 5,67**
БЭВ, г	700,77 ± 8,84	678,43 ± 10,32
Сырая зола, г	107,36 ± 1,34	98,63 ± 1,13**

Достоверно при \* $P \leq 0,001$ , \*\* $P \leq 0,01$ .

Из-за более высокого содержания жира и клетчатки в кофейном жмыхе их потребление в опытной группе оказалось достоверно выше по сравнению с контролем на 20,2 % и 14,8 % соответственно.

Второй показатель полноценности рациона — переваримость питательных веществ. Данные, полученные в опыте

по переваримости, показали, что переваримость сухого вещества и питательных веществ рациона подопытных животных имели характерные для данного возраста овец значения и практически не отличались между собой, что указывает на отсутствие отрицательного воздействия от скармливания кофейного жмыха (табл. 5).

### 5. Переваримость питательных веществ (n = 3)

Показатель	Группа			
	контрольная		опытная	
	граммов	%	граммов	%
Сухое вещество	876,58 ± 16,45	65,12 ± 0,64	887,62 ± 9,48	65,09 ± 0,22
Органическое вещество	827,33 ± 16,01	66,79 ± 0,52	840,51 ± 7,03	66,45 ± 0,30
Сырой протеин	126,22 ± 2,54	65,32 ± 1,31	124,11 ± 0,42	65,71 ± 0,26
Сырой жир	25,01 ± 0,18	64,23 ± 0,35	30,56 ± 0,31*	65,28 ± 0,41
Сырая клетчатка	196,68 ± 5,65	64,34 ± 0,84	223,87 ± 1,86**	63,81 ± 0,73
БЭВ	479,43 ± 9,51	68,41 ± 0,50	461,97 ± 5,87	68,10 ± 0,28

Достоверно при \* $P \leq 0,001$ , \*\* $P \leq 0,05$ .

Не менее важной характеристикой ществ, что характеризуется рядом по- корма или рациона является усвое- казателей рубцового метаболизма мость переваренных питательных ве- (табл. 6).

### 6. Показатели рубцового метаболизма (n = 3)

Группа	Время взятия проб		
	за 1 час до кормления	через 3 часа после кормления	через 5 часов после кормления
рН в рубцовом содержимом			
Контрольная	6,81 ± 0,04	6,07 ± 0,03	6,2 ± 0,05
Опытная	6,67 ± 0,08	6,04 ± 0,09	6,21 ± 0,09
ЛЖК в рубцовой жидкости (Ммоль/100 мл)			
Контрольная	6,61 ± 0,25	8,05 ± 0,67	7,54 ± 0,0,29
Опытная	6,83 ± 0,67	8,65 ± 0,34	7,27 ± 0,35
Аммиак в рубцовой жидкости (мг %)			
Контрольная	15,65 ± 0,34	19,46 ± 3,33	17,68 ± 0,97
Опытная	14,16 ± 3,18	17,68 ± 2,57	16,11 ± 0,70
Амилолитическая активность (ед./мл)			
Контрольная	18,60 ± 0,17		
Опытная	16,96 ± 0,33*		

Достоверно при: \* $P \leq 0,05$ .

При нормальном функционировании рубца показатель кислотности (рН) рубцовой жидкости имеет значения 6,0–7,0. При снижении рН ниже 6,0, что связано с избыточным количеством летучих жирных кислот, отмечается закисление рубцового содержимого — ацидоз. При образовании избыточного количества

аммиака показатель рН смещается в щелочную сторону ( $>7$ ), что именуется как алкалоз.

В нашем случае значения рН, как до кормления, так и после него, находились в пределах физиологических значений и имели близкие между собой показатели.

Более 60 % энергии, используемой животными для обеспечения жизни и продуктивности, поступает из летучих жирных кислот. Повышенное содержание ЛЖК через три часа после кормления и пониженное их содержание через пять часов после кормления у животных опытной группы может свидетельствовать о более интенсивном переваривании питательных веществ и лучшей их усвояемости. Не следует также исключать, что данное благоприятное количество ЛЖК в опытной группе связано с более высоким содержанием в рационе сырого жира.

Пониженное содержание аммиака в рубцовом содержимом животных опытной группы, по сравнению с контролем, указывает на лучшее его использование бактериями рубца для производства микробного протеина.

Амилолитическая активность (выражается числом единиц указанных ферментов в 1 г препарата) характеризует

способность амилолитических ферментов катализировать гидролиз крахмала до декстринов различной молекулярной массы. Исследованиями отмечено, что в опытной группе данный показатель оказался достоверно ниже, чем в контроле — 16,96 против 18,60 ед./мл. Полученные данные перекликаются с исследованиями других авторов [11]. Предполагаемые причины — повышенное содержание в рационе жира и клетчатки, либо избыточное количество антипитательных веществ, поступивших с кофейным жмыхом, ингибирующее амилолитические ферменты.

Вышеуказанные возможные причины, очевидно, оказали и негативное действие на состав микробиальной массы в рубце. В частности, количество бактерий и простейших в рубцовой жидкости животных опытной группы имели меньшее значение по сравнению с контролем, как через три часа, так и через пять часов после кормления (табл. 7).

#### 7. Содержание микробиальной массы в рубцовой жидкости (n = 3)

Группа	В 100 мл рубцового содержимого, г								
	до кормления			через 3 часа после кормления			через 5 часов после кормления		
	бакте- рии	про- стейшие	всего	бакте- рии	про- стейшие	всего	бакте- рии	про- стейшие	всего
Контроль- ная	0,352 ± 0,046	0,346 ± 0,007	0,69 ± 0,045	0,425 ± 0,040	0,525 ± 0,060	0,95 ± 0,101	0,343 ± 0,055	0,573 ± 0,057	0,91 ± 0,101
Опытная	0,307 ± 0,014	0,369 ± 0,029	0,676 ± 0,040	0,440 ± 0,059	0,386 ± 0,027	0,826 ± 0,086	0,306 ± 0,046	0,464 ± 0,036	0,770 ± 0,063

**Заключение.** Кофейный жмых по содержанию обменной энергии и питательных веществ представляет определенную кормовую ценность, сравнимую с зерноотходами, и может служить по-

тенциальным кормом для жвачных животных.

Скармливание овцам кофейного жмыха в качестве частичной замены концентрированных кормов в рационе

в количестве 90 г на голову в сутки не оказало отрицательного действия на потребление и переваримость питательных веществ рациона.

В то же время, в наших исследованиях выявлено, что использование кофейного жмыха не оказало существенного положительного влияния на ферментацию рубца и усвояемость корма. Возможно, это связано с антипитательными веществами или жирными кислотами, содержащимися в кофейном жмыхе. Последние, с одной стороны,

могут рассматриваться в качестве энергетических источников, оказывая положительное влияние на продуктивность жвачных животных, а с другой стороны, при высоких дозах скармливания, оказывать негативное действие на пищеварительные и обменные процессы в организме.

Для более полной оценки использования кофейного жмыха в рационе жвачных животных рекомендуется провести дополнительные исследования при длительном его скармливании.

## Литература

1. Биоконверсия отходов производства растворимого кофе в продукты кормового назначения / Е. В. Башашкина, Н. А. Суясов, И. В. Шакир, В. И. Панфилов // Экология и промышленность России. – 2011. – № 1. – С. 18–19. – EDN PCOSHX.
2. Ксенофонтова А. А., Шаповалов С. О., Буряков Н. П. Жмых кофейный — альтернативное кормовое средство в питании животных // Комбикорма. – 2024. – № 9. – С. 38–41 – EDN XIUELW. – DOI 10.69539/2413-287X-2024-09-3-228.
3. Романчук А. С. Обмен незестерифицированных жирных кислот в жидком содержимом рубца и продуктивные показатели коров при наличии в их рационе кофейного шлама // Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва. – 2016. – № 2 (129). – С. 21–29. – EDN YZLSLF.
4. Романчук А. С. Обмен азотсодержащих соединений в жидком содержимом рубца и продуктивные показатели коров при наличии в их рационе кофейного шлама // Біологія тварин. – 2016. – Т. 18. – № 3. – С. 84–90. – EDN WWKLIV. – DOI 10.15407/animbiol18.03.084.
5. Романчук А. С., Рівіс Й. Ф. Середньодобове виділення жирних кислот загальних ліпідів з молоком та продуктивні ознаки корів за наявності в їх раціоні кавового шламу // Передгірне та гірське землеробство і тваринництво. – 2017. – № 61. – С. 173–183. – EDN YZJWKT.
6. Санников Д. С., Санникова Н. В. Проблемы утилизации отходов в сельском хозяйстве и их последствия // Мир инноваций. – 2021. – № 1. – С. 46–50. – EDN MWJJSJL.
7. Соболева О. М. Использование ассоциата микромицетов для твердофазной ферментации кофейного жмыха // Глобализация экологических проблем: прошлое, настоящее и будущее : сб. материалов заочной междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – 226 с. – EDN ZETEDT.
8. Федак Н. М., Чумаченко С. П., Вовк Я. С. Использование продуктов переработки кофе в кормлении молодняка КРС // Научно-технический бюллетень Института животноводства Национальной академии аграрных наук Украины. – 2013. – № 109-2. – С. 174–179. – EDN SMFZOF.
9. Хашпакянц Б. О., Лысенко А. В., Красина И. Б. Антиоксидантные свойства кофейного шлама // Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции : сб. статей II Междунар. науч.-практ. конф. в рамках междунар. науч.-практ. форума, посвящ. Дню Хлеба и соли. – Саратов : ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2021. – С. 579–583. – EDN YUMNHQ.
10. Aazza S. Application of Multivariate Optimization for Phenolic Compounds and Antioxidants Extraction from Moroccan Cannabis sativa Waste // Journal of Chemistry. – 2021. – Vol. 2021. – 9738656 p. – EDN KOCMPN. – DOI 10.1155/2021/9738656.

11. Effects of Coffee Grounds on Performance of Milking Dairy Cows and Feedlot Cattle, and on Rumen Fermentation and Dry Matter Removal Rate / E. E. Bartley, R. W. Ibbetson, L. J. Chyba, A. D. Dayton // *Journal of Animal Science*. – 1978. – Vol. 47. – Issue 4. – Pp. 791–799.
12. Supplementation with lipid sources alters the ruminal fermentation and duodenal flow of fatty acids in grazing Nellore steers / I. Carvalho, P. Castagninoet, G. Fiorentini, et al. // *Animal Feed Science and Technology*. – 2017. – Vol. 227. – Pp. 142–153. – DOI 10.1016/J.ANIFEEDSCI.2017.02.017.
13. Valorizations of spent coffee grounds as functional feed ingredient improves productive performance of Latxa dairy ewes / X. D. de Otálora, R. Ruiz, I. Goiri, J. Rey // *Animal Feed Science and Technology*. – 2020. – Vol. 264. – 114461 p. – EDN DGDBEX. – DOI 10.1016/j.anifeedsci.2020.114461.
14. Dose-dependent effect of spent coffee grounds on intake, apparent digestibility, fermentation pattern, methane emissions, microbial protein supply, and antioxidant status in Latxa sheep / M. Medjadbi, A. Garcia-Rodriguez, R. Atxaerandio, et al. // *Journal of Animal Science*. – 2024. – Vol. 102. – EDN SXFZXS. – DOI 10.1093/jas/skae351.

## References

1. Bashashkina E.B., Suyasov N.A., Shakir I.V., Panfilov V.I. *Biokonversiya otkhodov proizvodstva rastvorimogo kofe v produkty kormovogo naznacheniya* [Bioconversion of Waste from Instant Coffee Production into Feed Products]. *Ecology and Industry of Russia*. 2011. No. 1. Pp. 18-19.
2. Ksenofontova A.A., Shapovalov S.O., Buryakov N.P. *Zhmykh kofeinyi — al'ternativnoe kormovoe sredstvo v pitanii zhyvotnykh* [Coffee grounds is an alternative feed for animals]. *Compound Feeds*. 2024. No. 9. Pp. 38-41. DOI 10.69539/2413-287X-2024-09-3-228.
3. Romanchuk A.S. *Obmen neesterifitsirovannykh zhirnykh kislot v zhidkom sodержimom rubtsa i produktivnye pokazateli korov pri nalichii v ikh ratsione kofeinogo shlama* [The exchange of unesterified fatty acids in the liquid contents of the rumen and the productive indicators of cows when coffee sludge is present in their diet]. *Tekhnologiya virobnitstva i pererobki produktsii tvarinnitstva*. 2016. No. 2 (129). Pp. 21-29.
4. Romanchuk A.S. *Obmen azotsoderzhashchikh soedinenii v zhidkom sodержimom rubtsa i produktivnye pokazateli korov pri nalichii v ikh ratsione kofeinogo shlama* [The exchange of nitrogen-containing compounds in the liquid contents of the rumen and the productive indicators of cows when coffee sludge is present in their diet]. *The Animal Biology*. 2016. Vol. 18. No. 3. Pp. 84-90. DOI 10.15407/animbiol18.03.084.
5. Romanchuk A.S., Ravis Y.F. *Seredn'odobove vidilennyya zhirnykh kislot zagal'nykh lipidiv z molokom ta produktivni oznaki koriv za nayavnosti v ikh ratsioni kavovogo shlamu* [Average daily excretion of fatty acids of total lipids with milk and productive features of cows in the presence of a ration of sludge]. *Predgirne ta girs'ke zemlerobstvo i tvarinnitstvo*. 2017. No. 61. Pp. 173-183.
6. Sannikov D.S., Sannikova N.V. *Problemy utilizatsii otkhodov v sel'skom khozyaistve i ikh posledstviya* [Problems of waste disposal in agriculture and their consequences]. *World of Innovation*. 2021. No. 1. Pp. 46-50.
7. Soboleva O.M. *Ispol'zovanie assotsiata mikromitsetov dlya tverdofaznoi fermentatsii kofeinogo zhmykha* [The use of the micromycetes associate for solid-state fermentation of coffee grounds]. In the collection: *Globalization of environmental problems: past, present and future*. Collection of materials of the correspondence international scientific and practical conference. 2017. 226 p.
8. Fedak N.M., Chumachenko S.P., Vovk Ya.S. *Ispol'zovanie produktov pererabotki kofe v kormlenii molodnyaka KRS* [Use of coffee processing products in feeding young cattle]. *Nauchno-tekhnicheskii byulleten' Instituta zhyvotnovodstva Natsional'noi akademii agrarnykh nauk Ukrainy*. 2013. No. 109-2. Pp. 174-179.
9. Khashpakyants B.O., Lysenko A.V., Krasina I.B. *Antioksidantnye svoistva kofeinogo shlama* [Antioxidant Properties of Coffee Sludge]. In the Collection: *Food Technologies of the Future: Innovations in the Production and Processing of Agricultural Products*. Collection of Articles of the II Internation-

- al Scientific and Practical Conference within the Framework of the International Scientific and Practical Forum Dedicated to the Day of Bread and Salt. Saratov. *OOO "Tsentr sotsial'nykh agroinnovatsii SGAU"* Publ. 2021. Pp. 579-583.
10. Aazza S. Application of Multivariate Optimization for Phenolic Compounds and Antioxidants Extraction from Moroccan Cannabis sativa Waste. *Journal of Chemistry*. 2021. Issue 1. P. 9738656. DOI 10.1155/2021/9738656.
  11. Bartley E.E., Ibbetson R.W., Chyba L.J., Dayton A.D. Effects of Coffee Grounds on Performance of Milking Dairy Cows and Feedlot Cattle, and on Rumen Fermentation and Dry Matter Removal Rate. *Journal of Animal Science*. 1978. Vol. 47. Issue 4. Pp. 791–799.
  12. Carvalho I., Castagnino P., et al. Supplementation with lipid sources alters the ruminal fermentation and duodenal flow of fatty acids in grazing Nellore steers. *Animal Feed Science and Technology*. 2017. Vol. 227. Pp. 142-153. DOI 10.1016/J.ANIFEEDSCI.2017.02.017.
  13. Medjadbi M., Garcia-Rodriguez A., Atxaerandio R., et al. Valorization of spent coffee grounds as functional feed ingredient improves productive performance of Latxa dairy ewes. *Animal Feed Science and Technology*. 2020. Vol. 264. 114461 p. DOI 10.1016/j.anifeedsci.2020.114461.
  14. Medjadbi M., Garcia-Rodriguez A., Atxaerandio R., et al. Dose-dependent effect of spent coffee grounds on intake, apparent digestibility, fermentation pattern, methane emissions, microbial protein supply, and antioxidant status in Latxa sheep. *Journal of Animal Science*. 2024. Vol. 102. DOI 10.1093/jas/skae351.

УДК 631.352

DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2-61-83

## К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ КОРМОВЫХ ТРАВ

**С. А. Отрошко**, кандидат сельскохозяйственных наук

**А. В. Шевцов**, кандидат технических наук

**В. М. Косолапов**, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук

*ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»,  
141055, Россия, Московская область, г. Лобня, ул. Научный городок, корп. 1  
[osa.granit@yandex.ru](mailto:osa.granit@yandex.ru)*

## TO A QUESTION OF A SUBSTANTIATION CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL PARAMETRES OF WORKING TOOLS FOR CONDITIONING OF FODDER GRASSES

**S.A. Otroshko**, Candidate of Agricultural Sciences

**A.V. Shevtsov**, Candidate of Technical Sciences

**V.M. Kosolapov**, Academician of the Russian Academy of Sciences,  
Doctor of Agricultural Sciences

*Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology  
141055, Russia, Moscow region, Lobnya, Nauchnyi gorodok str., k. 1  
[osa.granit@yandex.ru](mailto:osa.granit@yandex.ru)*

Повышение качества объемистых кормов в виде сена, сенажа и силлажа из многолетних трав за счет максимального сохранения биологической ценности зеленой растительной массы и повышения энергетической питательности до 9,8 МДж обменной энергии (ОЭ) в расчете на 1 кг сухого вещества при содержании сырого протеина 13 % является главной задачей кормопроизводства. Однако традиционные технологии их заготовки несовершенны и сопровождаются высокими потерями питательных веществ, связанными с длительностью обезвоживания, ускорение которого осуществляют разными способами. В настоящее время в сельскохозяйственном производстве для ускорения полевой сушки трав применяются: равномерная укладка скошенных растений в расстил, многократное ворошение, валкование и оборачивание валков. Эффективным является прием кондиционирования трав бильными или плющильными рабочими органами, увеличивающими площадь их испаряющей поверхности. Однако их использование ведет к увеличению массы косилок, усложнению их конструкций и удорожанию. В этой связи разработка простого по конструкции кондиционирующего устройства динамического действия, обеспечивающего ускорение их провяливания и заготовку высококачественных объемистых кормов в сжатые сроки, является актуальной и требует безотлагательного решения.

**Ключевые слова:** макетный образец, кондиционер, рабочие органы, люцерна, повреждения, фракции, испаряющая поверхность, конструктивные и технологические параметры, провяливание.

Improvement of quality of voluminous forages in the form of hay, haylage and drying silage from perennial grasses at the expense of the maximum preservation of biological value of green vegetative mass and increase its energy content to 9.8 MJ of exchange energy per 1 kg of dry matter, with a crude protein content of 13% is the main task of feed production. However traditional technologies of their preparation are not perfect and result in high nutrient losses due to the prolonged dehydration process, which can be accelerated using various methods. Currently, agricultural production uses the following methods to accelerate the field drying of grasses: uniform laying of cut plants on the ground, repeated turning, rolling, and turning of the rolls. The use of conditioning tools, such as beating or flattening devices, which increase the evaporation surface area of the grasses, is also effective. However, their use leads to an increase in the mass of mowers, complicates their designs, and increases their cost. In this regard, the development of a simple-design dynamic-action conditioning device that accelerates their drying and allows for the production of high-quality voluminous forages in a short time is an urgent and necessary solution.

**Keywords:** model sample, conditioner, working tools, alfalfa, damages, fractions, evaporating surface, constructive and technological parameters, drying.

**Состояние вопроса.** Для ускорения проявлявания скошенных трав на сено и сенаж традиционно используются различные технологические приемы: укладка в расстил скошенных растений на поверхности поля равномерным, хорошо продуваемым, рыхлым слоем, многократное ворошение, валкование и оборачивание валков [1; 2].

Ведущие предприятия России и Беларуси предлагают широкий ассортимент роторных граблей-ворошилок. Это «ГВР-6Р» производства ОАО «Бежецксельмаш»; «ГРР-3,6», «ГВД-1-Ф-6» (ОАО «Людиновский машиностроительный завод»); «ГВР-420», «ГВР-630», «ГР-700 Каскад» (ОАО «Бобруйскагромаш») и др.

Широкое распространение получили и зарубежные специализированные ротационные грабли и ворошилки [3]. Среди них ротационные грабли «ТААРУР 9076С», «ТААРУР 9178С-9184С», «ТААРУР 91150С» (Дания), ворошилки «GF 5001Т», «GF 5001 ТНА», «GF 7001 Т»; валкообразователи «GA 4321GM» (фирма «KUHН», Франция), ворошилки серии «VOLTO» 45, 52, 64, 75Т, 770, 770 Т, 870, 870 Т, 1050 Т, 1320 Т; валко-

ватели «LINER» 2600, 2700, 2800, 2900 фирмы («CLAAS», Германия) и др.

Однако даже полностью обеспеченное имеющейся кормозаготовительной техникой в оптимальном наборе и в экономически оправданном количестве хозяйство при применении традиционных технологий может провести заготовку кормов качественно и в технологически обоснованные сроки только части посевов трав.

Быстрому увяданию травы в полевых условиях также способствует нестандартная укладка массы в рыхлые валки, применение различных устройств для кондиционирования и мацерации растений с образованием травяных матов, повторного плющения стеблей скошенных трав и т. п.

Одним из способов ускорения полевой сушки скашиваемых трав является разуплотнение образуемых при скашивании трав валков и различные приемы укладки их на стерню.

В саратовском институте механизации сельского хозяйства имени М. И. Калинина с целью образования валка шатрообразной формы с размещением в нем стеблей комлевой частью

вверх разработано специальное приспособление к косилкам-плющилкам [4], содержащее направители стеблей, установленные по обеим сторонам плющильных валцов.

Подобное устройство защищено авторским свидетельством № 651746 [5]. В нем формирующее устройство выполнено в виде треугольной призмы, по обеим сторонам которой установлены с возможностью вращения вокруг осей пальцевые стеблеукладчики.

Известен способ подготовки кормовых растений к сушке [6], включающий плющение растений и их укладку в валок с размещением в нем стеблей комлевой частью вверх. Плющению подвергают только комлевою часть растений.

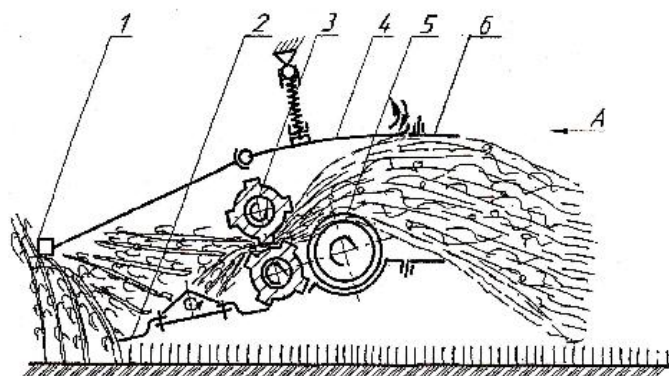
Известен способ уборки трав [7], включающий скашивание растений с их плющением, формирование валка скошенной массы, его укладку на гибкую перфорированную ленту, предваритель-

но расстилаемую на стерне и последующую сушку.

В патентной литературе имеются сведения о способе уборки стеблевых культур и устройстве для его осуществления [8], содержащем валцы, которые «гофрируют» стебли и укладывают на землю в виде «гофрированной» ленты.

Известен способ уборки сельскохозяйственных культур [9], обеспечивающий быстрое их провяливание в полевых условиях путем формирования из потока скошенных растений цилиндрической спирали диаметром 0,5–1,0 м с горизонтальной вентиляционной полостью.

Для образования вспушенного валка с вентиляционным каналом применяется косилка-плющилка [10], снабженная установленным за нижним плющильным валцом битером-активатором с конусом в центральной части (рис. 1), диаметр которого в 1,5 раза превышает диаметр цилиндрической части.



**Рис. 1. Косилка-плющилка с устройством для формирования вспушенного валка с вентиляционным каналом: 1. заламывающий брус; 2. ротационный режущий аппарат; 3. плющильные валцы; 4. верхний щит; 5. битер-активатор; 6. задние щиты [10]**

Интенсифицировать процесс полевой сушки и снизить потери питательных веществ в зеленой массе возможно за счет применения устройства для

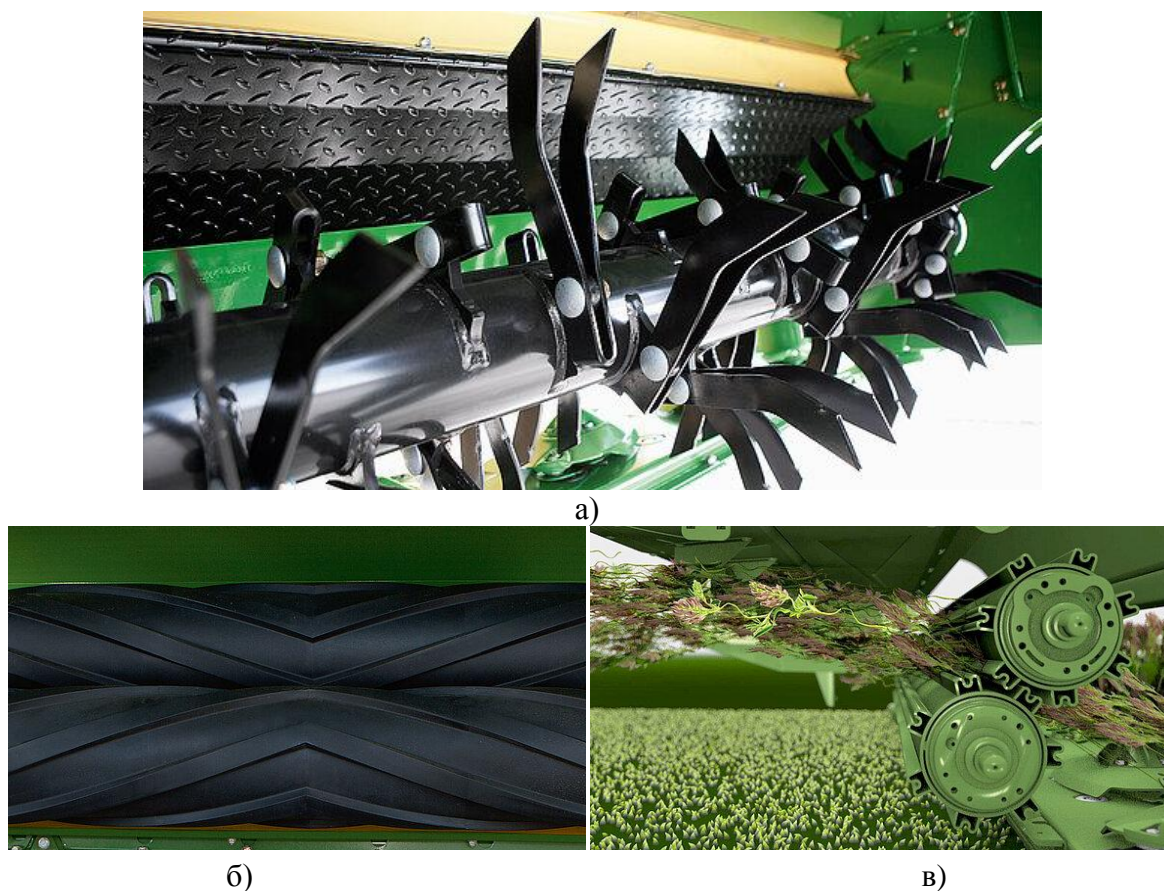
уменьшения плотности валка [11], расположенного за плющильными валцами самоходной косилки и содержащего подающий транспортер и установлен-

ный за ним шнек, выполненный с двумя участками, имеющими взаимно противоположные направления навивки для увеличения ширины валка.

Однако, несмотря на разнообразие применяемых специальных устройств для снижения плотности образуемых после скашивания трав валков и укладки их на стерню, они не нашли широкого применения в производстве.

Эффективным приемом, позволяю-

щим ускорить процесс влагоотдачи скошенной массы, является кондиционирование — динамическое воздействие на стебли трав вальцовыми или бильно-дековыми устройствами, устанавливаемыми на косилки, как правило, ротационные. Для снижения механических потерь бильно-дековые кондиционеры применяются в основном для обработки злаковых трав, вальцовые плющилки — для бобовых (рис. 2).



**Рис. 2. Кондиционеры динамического действия фирмы KRONE, Германия (<https://www.krone-rus.ru/katalog-produkcii/diskovye-kosilki/easycut-f>): а) бильно-дековый; б) вальцовый с полиуретановыми вальцами; в) вальцовый с эффектом зубчатого зацепления M-Rolls со стальным профилем [12]**

Несмотря на большое разнообразие кондиционирующих устройств, обеспечивающих ускорение провяливания трав в поле, следует учитывать, что они

сложны по конструкции, дорогостоящи и материалоемки.

Во второй половине 80-х годов прошлого столетия начаты исследования по

разработке суперкондиционеров, которые растирают и дробят растения до появления сока с последующим прессованием их в маты толщиной около 6 мм. Сушка такой массы на сено кондиционной влажности (17 %) рассчитана на четыре–шесть часов. Первые исследования по разработке способа суперкондиционирования проведены в США [13–16]. Затем подробные исследования проведены в Канаде [17; 18], Германии [19], Турции [20], Японии [21].

Несмотря на быструю сушку массы суперкондиционирование пока не нашло применения, главным образом из-за неустойчивости матов от воздействия дождя. Однако в степных районах, отличающихся сухой жаркой погодой, суперкондиционирование может иметь практическое значение.

Важным направлением в процессе ускорения провяливания кормовых трав является использование различных плющильных устройств, устанавливаемых на различных косилках и стационаре.

Анализ научно-технической литературы и патентной документации показал, что плющильные вальцы могут быть гладкими, ребристыми, штифтовыми или шевронными. Гладкие вальцы обеспечивают требуемую полноту плющения при минимальном отрыве и потере листьев. В ребристых и штифтовых вальцах ребра (штифты) одного вальца проходят между ребрами (штифтами) другого. Наиболее широко распространены устройства шевронного типа.

На качество плющения и динамику влагоотдачи влияют давление между вальцами, материалы, форма поверхности, диаметр и окружная скорость вальцов.

Известна косилка-плющилка [22], содержащая раму с установленными на ней параллельно друг другу режущим и плющильным вальцевым аппаратами и расположенную между ними направляющую растения доску. Режущий аппарат установлен подвижно относительно плющильного аппарата и соединен с плющильным посредством гидроцилиндров. Направляющая растения доска с одной стороны шарнирно установлена на корпусах гидроцилиндров, соединяющих режущий аппарат с плющильным, а с другой — опирается на нижний валец плющильного аппарата.

Однако данное устройство не может обеспечить полноты плющения стеблей растений вдоль волокон.

Известна косилка-плющилка [23], включающая ротационный режущий аппарат и несколько пар плющильных вальцов, которые установлены под углом один к другому и к горизонтальной плоскости. Плющильные вальцы данного устройства лучше проплющивают скашиваемые растения, однако при высоких урожайностях травостоя не могут обеспечить высокое качество плющения.

Добиться повышения качества заготавливаемых объемистых кормов в виде силлажа, сенажа и сена возможно за счет разрушения стеблей предельным расщеплением.

Так, например, известен способ заготовки сена [24], включающий скашивание травостоя, механическое разрушение стеблей, их провяливание в прокосах с ворошением, подбор с поля и последующее досушивание подогретым воздухом.

Траву скашивают косилкой КС-2,1. При провяливании до влажности 59–

66 % проводят двукратное ворошение, затем подвяленную массу подбирают зерноуборочным комбайном, оборудованным расщепляющим рабочим органом. Такая обработка позволяет ускорить процесс последующего досушивания стеблей в три–пять раз. В способе достигается предельное расщепление стеблей, однако он трудозатратен.

Известен измельчитель длинноволокнистых материалов [25], включающий встречно вращающиеся валы с радиальными ножами, имеющими противорезающие элементы, взаимодействующие с ножами другого вала, рабочие органы которого могут быть применены для тщательного механического разрушения стеблей трав.

Одним из таких устройств является измельчитель растительного материала [26], содержащий два встречно вращающихся барабана, на которых смонтированы радиальные ножи.

Заслуживает внимание устройство для измельчения растительного сырья [27], содержащее бункер и измельчающий механизм, состоящий из двух приводимых во встречное вращение горизонтально расположенных барабанов, несущих ножевые элементы.

Интересна конструкция измельчителя грубых кормов [28], содержащая корпус с загрузочной и выгрузной горловинами, установленные в нем в двух ярусах горизонтальные валы с закрепленными на них рабочими органами, которые на паре валов нижнего яруса расположены радиально. В верхнем ярусе установлена пара валов, рабочие органы которых выполнены в виде тангенциально закрепленных стержней,

при этом все валы смонтированы с возможностью вращения по направлению от соседнего в ярусе вала к боковой стенке корпуса. Закрепленные на валах нижнего яруса рабочие органы выполнены в виде ножей, торцевые поверхности которых наклонены в сторону, противоположную направлению вращения вала.

Рабочие органы косилки-измельчителя эшелонированного резания [29] также могут быть использованы для обеспечения полного плющения трав с расщеплением стеблей. Данное устройство содержит раму, вертикальные приводные оси с установленными на них в несколько ярусов ротационными дисками с режущими элементами. Указанные ротационные диски установлены с убыванием их диаметра от верхнего яруса к нижнему.

Оригинальными являются рабочие органы устройства для транспортировки и измельчения кормов [30], представленные на рис. 3. В данном устройстве повышается степень измельчения кормов за счет наличия дополнительных режущих кромок, которыми снабжены вкладыши и зубья шестерен. Подобные рабочие органы могут осуществлять предельное расщепление стеблей растений и увеличение площади их испарительной поверхности.

Применение нескольких пар плющильных вальцов также может способствовать увеличению испаряющей поверхности стеблей, приближающуюся к поверхности листьев растений. Такое техническое решение присутствует в устройстве для отжима сока из стеблей растений кормоуборочной машины [31] (рис. 4).

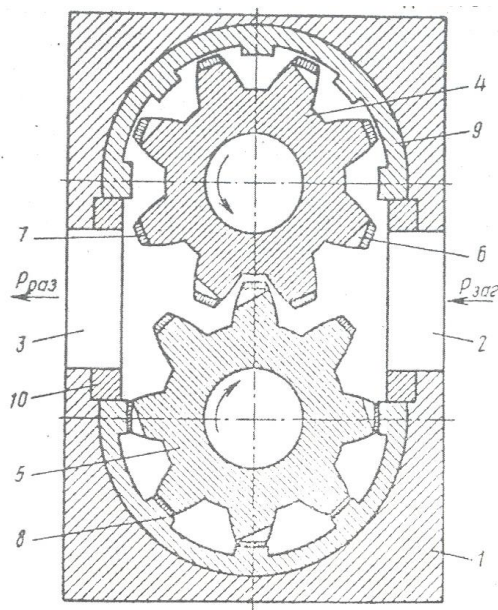


Рис. 3. Вид сбоку на устройство для транспортировки и измельчения кормов [30]

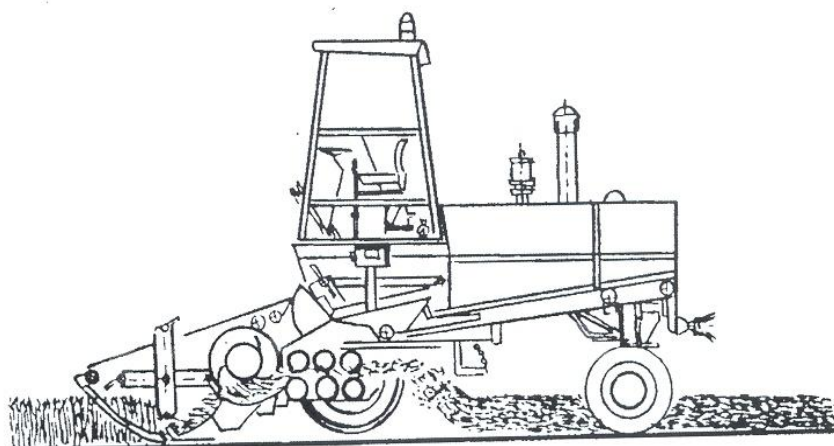


Рис. 4. Кормоуборочная машина с устройством для отжима сока из стеблей растений [31]

Известно устройство для плющения кормовых материалов [32], содержащее два установленных параллельно друг другу вальца, поверхность каждого из которых выполнена в виде периодически расположенных по периметру кольцевых выступов и впадин, при этом выступы одного вальца размещены во впадинах другого и в продольном сечении вальцов каждый выступ и каждая впадина имеют трапецеидальную форму. Вальцы относительно друг друга уста-

новлены с образованием между ними постоянного по всей их длине рабочего зазора (рис. 5).

М. Н. Ермолаев предлагает для продольного расщепления стеблей устройство для обработки растений [33], содержащее подающий механизм и механизм плющения с верхним и нижним вальцами, причем последний выполнен в виде жестко смонтированных по длине вальца усеченных конусов, сопрягающихся друг с другом одноименными

основаниями. Верхний валец снабжен жестко закрепленными на его поверхности по всей длине зубьями, которые выполнены трехгранными, причем боковые грани каждого из них расположены

под острым углом, а образуемое ими ребро выполнено дугообразным. Верхний валец выполнен в виде смонтированных на торцевых дисках продольных планок.

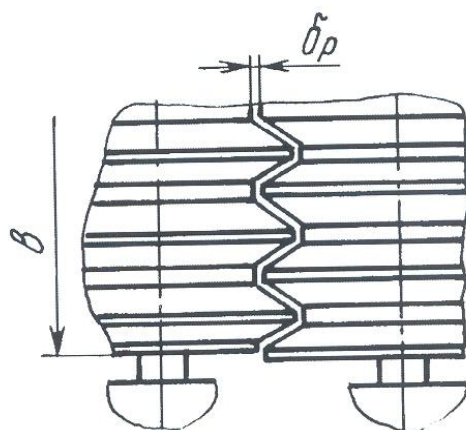


Рис. 5. Вид сверху на плющильные вальцы

Расщепление вдоль волокон предварительно измельченной растительной массы осуществляется рабочими органами в устройстве для обработки растений [34]. Устройство содержит горизонтально установленные параллельные вальцы в виде последовательно соединенных между собой одноименны-

ми основаниями конусов с расположенными на их поверхности по касательной к меньшим основаниям прямолинейными рифлями (рис. 6). Последние ориентируют захватываемые зубьями стебли растений вдоль направления подачи и расщепляют их вдоль волокон.

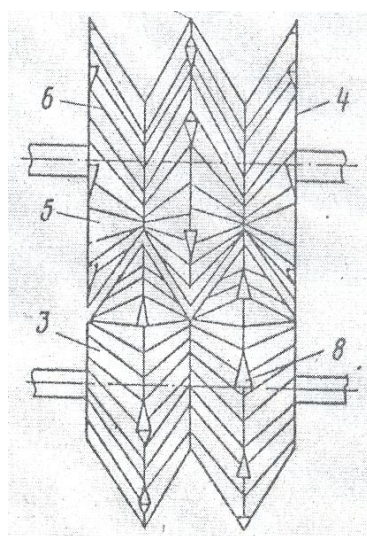


Рис. 6. Вид сверху на рабочие органы устройства для обработки растений [34]

Для форсирования полевой сушки в последние годы применяются технические средства для повторного плющения подвяленных трав. Одной из таких машин является рекондиционер ReCon 300 канадской компании «Ag Shild», который обеспечивает подбор, повторное плющение и оборачивание валков скошенных трав. Машина содержит ребристые плющильные вальцы и установленные на раме смесители-дефлекторы, которые перемещают обработанный вальцами валок в сторону и укладывают его на сухое место [35].

В Великолукской государственной сельскохозяйственной академии разработан опытный образец устройства для повторного плющения стеблей скошенных трав [36–38]. Плющильный аппарат разработанной машины состоит из двух вальцов с закрепленными на их поверхности резиновыми бичами. Подбор растительной массы и ее подача в зону плющения осуществляется механизмом периодического выноса пальцев в двух взаимно перпендикулярных диаметральных плоскостях, расположенном в нижнем плющильном вальце. Движение пальцев механизма подбора складывается из поступательного движения вместе с машиной и вращательного вместе с плющильным вальцом, что обеспечивает подъем скошенной травяной массы с поля и подачу материала в зону плющения.

В Беларуси выполнен комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке устройства для повторного плющения и вспушивания скошенных трав. Новая разработка имеет марку УПВТ-4 [39]. Для ускорения процесса влагоотдачи

скошенных трав устройство комплектуется плющильными адаптерами: аппаратом плющильным и кондиционером бильно-дековым с валкообразователями. Устройство УПВТ-4 агрегатируется с тракторами класса 1,4, имеющими вал отбора мощности с частотой вращения  $1000 \text{ мин}^{-1}$ .

Применение устройств для повторного плющения скошенной массы, проявляемой в валках, хотя и обеспечивает ускорение проявливания и улучшение качества заготавливаемых объемистых кормов, тем не менее ведет к увеличению экономических и энергетических затрат.

Таким образом, анализ научно-технической литературы показал, что наиболее приемлемыми рабочими органами для кондиционирования растений с расщеплением стеблей вдоль волокон являются валы, вращающиеся навстречу друг другу, с рядами рабочих органов в виде ножей, бил, дисков, зубчатых колес с рифлями, установленных радиально с определенным шагом на их поверхности и зазорами между рабочими элементами и поверхностями валов.

**Методика исследований.** В ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» разработан макетный образец кондиционера в двух вариациях для ускорения проявливания в поле кормовых трав, конструктивно отличающийся от применяемых на практике в нашей стране и за рубежом. И в первом и во втором вариантах кондиционер снабжен двумя роторами, на валах которых расположены билы, вращающиеся навстречу друг другу с разной частотой вращения. Роторы с билами расположены на раме экспериментальной установки горизонтально и ка-

ждый из них имеет независимый привод.

Для определения параметров и режимов работы макетного образца кондиционера использовали люцерну изменчивую, желто-гибридный сортотип, селекционный номер ТБ 10 второго укоса в фазе бутонизации.

Урожайность люцерны в поле, состав травостоя, его высоту, а также фазу развития растений устанавливали в соответствии с «Методическими указаниями по проведению полевых опытов с кормовыми культурами» [40].

При проведении исследований в лабораторных условиях, на ленту транс-

портера экспериментальной установки, движущуюся с поступательной скоростью 1 м/с, укладывали хаотично люцерну массой 3 кг, что соответствовало пропускной способности 3 кг/с разработанного макета кондиционера.

В опытах также определяли площадь испаряющей поверхности обработанных растений люцерны (согласно разработанной в ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» методики [41]) по отношению количества жидкого вещества (мыльный раствор), удерживаемого на поверхности любого из исследуемых образцов, к его количеству на 1 см<sup>2</sup> листа по формуле:

$$\text{ИП} = \frac{\text{МО} - \text{СО}}{\text{Р}},$$

где: ИП – площадь испаряющей поверхности, см<sup>2</sup>;

МО – масса мокрого (смоченного мыльным раствором) образца, г;

СО – масса сухого (не смоченного) образца, г;

Р – масса мыльного раствора, удерживаемого на 1 см<sup>2</sup> листа, г/см<sup>2</sup>.

Определение повреждений стеблей растений в образцах массой по 100 г проводили визуально. Для распределения отрезков поврежденных стеблей по фракциям использовали линейку с ценой делений от 0 до 1000 мм.

Взвешивание исследуемых образцов и фракций поврежденных стеблей растений, а также сухих и смоченных в мыльном растворе целых растений с поврежденными и неповрежденными стеблями осуществляли на электронных весах МИДЛ стандарт МТ6В1ДА (1/2; 230×320) ТУ 4274-012-56692889-2012 производства ООО «МИДЛ и К». Взвешивание листовых пластинок проводили на электронных весах E10640 Explorer OHAUS.

Провяливание образцов люцерны — необработанных (контроль) и обработанных инновационными кондиционирующими рабочими органами массой по 1000 г проводили в динамике в соответствии с ГОСТ 28722-90 [42], «Методикой полевых опытов по провяливанию и сушке трав на сено и сенаж» [43] и методическим рекомендациям «Проведение опытов по консервированию и хранению объемистых кормов» [44].

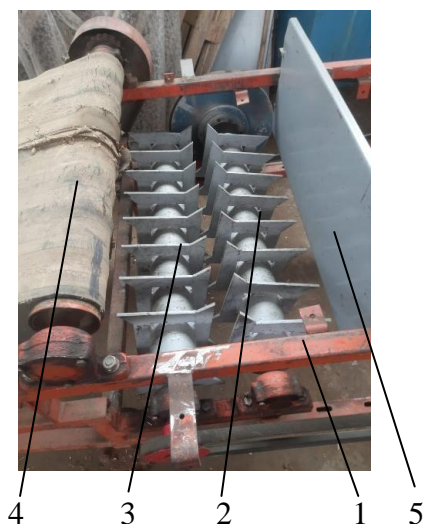
Отбор проб на влажность осуществляли в соответствии с ГОСТ 27262-87 [45].

Образцы высушивали в термощкафу при температуре 100–105 °С до постоянного веса в соответствии с ГОСТ 27548-87 [46].

**Результаты исследований и их об-суждение.** В лаборатории механизации кормопроизводства ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» разработан макетный образец кондиционера с новыми конструктивно-технологическими решениями для интенсификации полевой сушки скошенных кормовых трав, обеспечивающий увеличение испаряющей поверхности стеблей, приближающуюся к поверхности листьев растений.

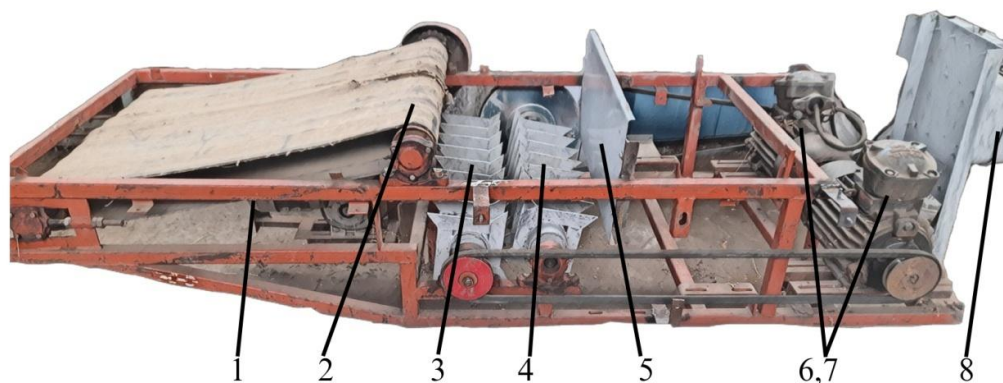
Макетный образец кондиционера разработан в двух вариациях, конструктивно отличающихся от применяемых на практике в нашей стране и за рубежом

устройств, обеспечивающих ускорение провяливания кормовых трав в поле. В первом варианте (рис. 7) кондиционер представляет собой два вала с билами, жестко закрепленными на поверхности роторов по касательной, вращающимися навстречу друг другу с разной частотой вращения. Роторы с билами расположены на раме экспериментальной установки горизонтально и каждый из них имеет независимый привод (рис. 8). Мощность каждого приводного электродвигателя составляет 3 кВт. Рабочая зона вращающихся навстречу друг другу роторов составляет 800 мм.



**Рис. 7. Макетный образец кондиционера с инновационными билами — первый вариант конструктивного исполнения:**

**1 – рама, 2 – тихоходный вал, 3 – быстроходный вал, 4 – подающий транспортер, 5 – щиток**



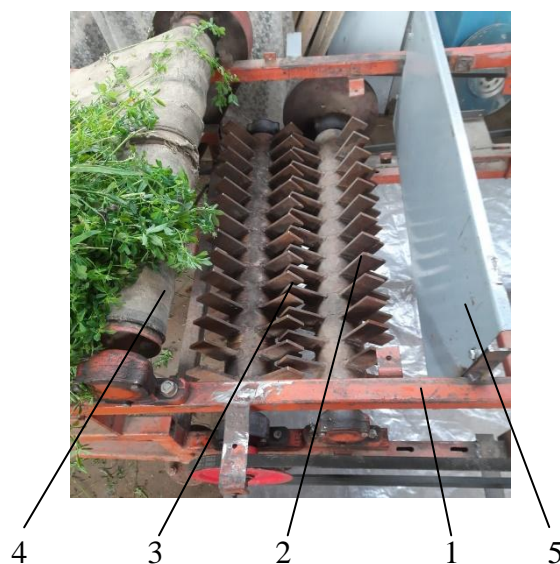
**Рис. 8. Экспериментальная установка: 1 – рама, 2 – подающий транспортер, 3 – быстроходный вал, 4 – тихоходный вал, 5 – щиток, 6–7 – электродвигатели, 8 – щит управления**

Билы тихоходного ротора (восемь концентрических рядов по четыре штуки) расположены между билами быстроходного ротора (девять концентрических рядов по четыре штуки) на расстоянии 40 мм друг от друга, а их торцы — от поверхности каждого противоположного вала на расстоянии 12 мм.

Диаметр роторов по концам бил составляет 300 мм. Билы представляют собой четыре пластины из полосы прямоугольного сечения, каждая из которых снабжена прямым торцом с одной стороны и заостренным под углом 45° с другой, сваренных между собой таким образом, что внутри образуется квадратное отверстие с четырьмя радиусными выемками, которые позволяют жестко закреплять билы в сборе на концентрических окружностях, выполненных

на поверхности тихоходного и быстроходного валов на определенном расстоянии друг от друга вдоль их осей, причем обработка трав производится тупыми прямоугольными рабочими кромками удлиненной части каждой полосы каждого била.

Второе конструктивно-технологическое решение (рис. 9) отличается от первого тем, что на концентрических окружностях валов кондиционера жестко закреплены радиально билы из полосы прямоугольного сечения (по четыре штуки). Билы тихоходного вала (13 рядов по четыре штуки) расположены между билами быстроходного (14 рядов по четыре штуки) на расстоянии 20 мм друг от друга, а их торцы от поверхности каждого противоположного вала — на расстоянии 10 мм. Диаметр роторов по концам бил составляет 280 мм.



**Рис. 9. Макетный образец кондиционера с инновационными билами — второй вариант конструктивного исполнения: 1) рама; 2) тихоходный вал; 3) быстроходный вал; 4) подающий транспортер; 5) щиток**

Подача растительной массы к обрабатывающим рабочим органам осуществляется наклонным транспортером,

поступательная скорость полотна которого составляет 1 м/с, что соответствует скорости движения косилки в поле, рав-

ной 3,6 км/ч. Ширина полотна транспортера составляет 800 мм, длина — 1000 мм. Привод полотна подающего транспортера осуществляется от мотор-редуктора мощностью  $N = 1,1$  кВт;  $n = 1390$  об/мин и передаточным отношением 1 : 7.

Проведены исследования по определению режимов работы двух вариантов разработанного кондиционера при варьировании частот вращения быстроходного и тихоходного вала, об/мин: 1450/500, 1100/500, 700/500, 1100/700. Для этого использовали шкивы диамет-

ром 390; 215; 190 и 125 мм.

В опытах использовали желто-гибридный сортотип люцерны изменчивой ТБ 10 второго укоса в фазе бутонизации с урожайностью 232 ц/га. Средняя высота растений люцерны составила 62 см, облиственность — 32 %, исходная влажность — 75,6 %.

После пропуска люцерны через новые разработанные кондиционирующие рабочие органы определяли площадь испаряющей поверхности обработанных и необработанных (контроль) растений люцерны (таблица).

**Определение площади испаряющей поверхности травянистой массы люцерны изменчивой, желто-гибридного сортотипа ТБ 10, обработанной билами первого варианта конструктивного исполнения (рис. 7)**

Варианты обработки растений люцерны	Вес сухих образцов, г	Вес образцов, смоченных мыльным раствором, г	Вес влаги, удерживаемой смоченными растениями, г	Площадь испаряющей поверхности смоченного образца, см <sup>2</sup>
Без обработки (контроль)	100	122,5	22,5	3462
1-й вариант валов				
500/1450 об/мин	100	126	26	4000
500/1100 об/мин	100	124	24	3692
500/700 об/мин	100	122	22	3308
700/1100 об/мин	100	125	25	3846
Количество влаги, удерживаемое 1 см <sup>2</sup> листовой пластинки	0,0065			

Данные таблицы свидетельствуют о том, что наибольшая площадь испаряющей поверхности (4000 см<sup>2</sup>) обеспечивается при соотношении скоростей вращения тихоходного и быстроходного валов 500/1450 об/мин. Близким (3846 см<sup>2</sup>) является вариант с соотношением скоростей 700/1100 об/мин. Наименьшая площадь испаряющей поверхности (3308 см<sup>2</sup>) наблюдалась при соотношении скоростей вращения

500/700 об/мин, что, вероятно, связано с частичным отрывом листовых пластинок во время обработки массы, но ее значение было близким к контрольному образцу.

Обработанную зеленую массу люцерны (образцы по 100 г) после пропуска через рабочие органы двух вариантов макетного образца кондиционера разбирали по фракциям и определяли количество повреждений стеблей.

Оптимальный вариант обработки зеленой массы люцерны разными рабочими органами макетного образца кондиционера (рис. 7; рис. 9) определяли при варьировании частот вращения тихоходного и быстроходного валов, об/мин: 500/1450; 500/1100; 500/700; 700/1100.

Разбор образцов обработанных растений люцерны проводили с учетом средней длины ее стеблей ( $l_{cp} = 62$  см), а обработанные растения распределяли по следующим фракциям, см: 0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50; 50–60, 60–70, выше 70.

*Вариант 1 (рис. 7, конструктивное исполнение кондиционера 1) частота вращения тихоходного вала — 500, быстроходного — 1450 об/мин.*

После пропуска зеленой массы люцерны через рабочие органы в ворохе наблюдалось наличие листовых пластинок, оторванных от стеблей.

Анализ полученных фракций показал, что при таком соотношении скоростей вращения  $W_{т. вала}/W_{б. вала} = 500/1450 = 1/3$  во фракции 0–10 см наблюдалось 1,0 % стеблей; 10–20 см — 1,0 %; 20–30 — 1,0 %. Стебли интенсивно повреждены во фракциях: 30–40 см (фракция составляет 25,7 %), 40–50 см (34,5 %) и 50–60 см (26,7 %). На поврежденные стебли во фракции 60–70 см приходится 10,1 %.

Практически на всех стеблях длиной свыше 30 см наблюдаются изломы и расщепления. Количество повреждений во фракции 30–40 см колеблется от одного до 13 шт. на каждом стебле и составляет 85 шт.; 40–50 см — от одного до 12 шт. и составляет в среднем 76 шт.; 50–60 — от одного до восьми штук и составляет 32 шт.; 60–70 — от двух до

семи и составляет 27 шт. Общее количество повреждений на стеблях во фракциях от 30 до 70 см составляет 205 шт.

*Вариант 2 (рис. 7, конструктивное исполнение кондиционера 1) частота вращения тихоходного вала — 500 быстроходного — 1100 об/мин.*

После пропуска зеленой массы люцерны через рабочие органы в ворохе наблюдалось несколько меньшее количество листьев, оторванных от стеблей по сравнению с первым вариантом (500/1450 об/мин).

Анализ полученных фракций показал, что при таком соотношении скоростей вращения  $W_{т. вала}/W_{б. вала} = 500/1100 = 1/2,2$  во фракции 0–10 см наблюдалось 0,5 % стеблей, 10–20 см — 0,5 %, 20–30 — 2,5 %. Стебли интенсивно повреждены во фракциях: 30–40 см (фракция составляет 18,3 %); 40–50 см (28,5 %) и 50–60 см (24,4 %). На поврежденные стебли во фракции 60–70 см и выше 70 приходится соответственно 15,7 и 9,6 %.

Практически на всех стеблях длиной свыше 30 см наблюдаются изломы и расщепления. Количество повреждений во фракции 30–40 см колеблется от одного до восьми шт. на каждом стебле и составляет 32 шт.; 40–50 см — от одного до девяти шт. и составляет 82 шт.; 50–60 см — от одного до 6 шт. и составляет 24 шт.; 60–70 см — от пяти до 10 и составляет 36 шт.; выше 70 см — 5,5 шт. Общее количество повреждений на стеблях во фракциях от 30 до 70 см составляет 174 шт.

*Вариант 3 (рис. 7, конструктивное исполнение кондиционера 1) частота вращения тихоходного вала — 500, быстроходного — 700 об/мин.*

После пропуска зеленой массы люцерны через рабочие органы в ворохе наблюдалось немного свободных листьев.

Анализ полученных фракций показал, что при таком соотношении скоростей вращения  $W_{т. вала}/W_{б. вала} = 500/700 = 1/1,4$  во фракции 0–10 см наблюдалось 0,5 % стеблей; 10–20 см — 1,6 %; 20–30 — 1 %. Стебли интенсивно повреждены во фракциях: 30–40 см (фракция составляет 9,4 %); 40–50 см (24,1 %) и 50–60 см (43,5 %). На поврежденные стебли во фракциях 60–70 см и выше 70 приходится соответственно 13,1 и 6,8 %.

Практически на всех стеблях длиной выше 30 см наблюдаются изломы и расщепления. Количество повреждений во фракции 30–40 см колеблется от двух до 13 шт. на каждом стебле и составляет 19 шт.; 40–50 см от одного до 20 шт. и составляет 28 шт.; 50–60 — от одного до 10 шт. и составляет 69 шт.; 60–70 — от трех до семи и составляет 22 шт. Общее количество повреждений на стеблях во фракциях от 30 до 70 см составляет 138 шт.

*Вариант 4 (рис. 7, конструктивное исполнение кондиционера 1) частота вращения тихоходного вала — 700, быстроходного — 1100 об/мин.*

Пропускная способность рабочих органов при таких оборотах значительно увеличилась. Свободных листьев визуально не наблюдалось.

Анализ полученных фракций показал, что при таком соотношении скоростей вращения  $W_{т. вала}/W_{б. вала} = 700/1100 = 1/1,6$  во фракции 0–10 см не наблюдалось стеблей; 10–20 см — 1,5 %; 20–30 — 5,1 %. Стебли интенсивно повреждены во фракциях: 30–40 см (фракция составляет 12,1 %); 40–

50 см — 15,7 % и 50–60 см — 24,2 %. На поврежденные стебли во фракциях 60–70 см и выше 70 приходится соответственно 30,8 и 10,6 %.

Практически на всех стеблях длиной свыше 30 см наблюдаются изломы и расщепления. Количество повреждений во фракции 30–40 см колеблется от двух до 12 шт. на каждом стебле и составляет 61 шт.; 40–50 см — от двух до 12 шт. и составляет 73 шт.; 50–60 — от трех до 10 шт. и составляет 40 шт.; 60–70 — от трех до семи и составляет 31 шт. и выше 70 — 22 шт. Общее количество повреждений на стеблях во фракциях от 30 до 70 см составляет 205 шт.

Разбор обработанной люцерновой массы по фракциям с определением повреждений стеблей во всех исследованных вариантах (с первого по четвертый) показал, что стебли наиболее интенсивно повреждены во фракциях: 30–40, 40–50, 50–60 см при соотношении скоростей вращения тихоходного и быстроходного валов 500/1450 об/мин. Поэтому есть все основания полагать, что эти результаты будут способствовать ускорению проявлявания обработанной люцерновой массы.

Эффективность работы инновационного кондиционера первого конструктивного исполнения определяли по скорости сушки обработанных образцов в сравнении с контролем. Полученные результаты представлены на графике (рис. 10).

Погодные условия были неоптимальными для проявлявания: переменная облачность, температура воздуха около 18 °С, скорость ветра в среднем составляла около 6 м/с, ветер северный, относительная влажность воздуха около 60 %.

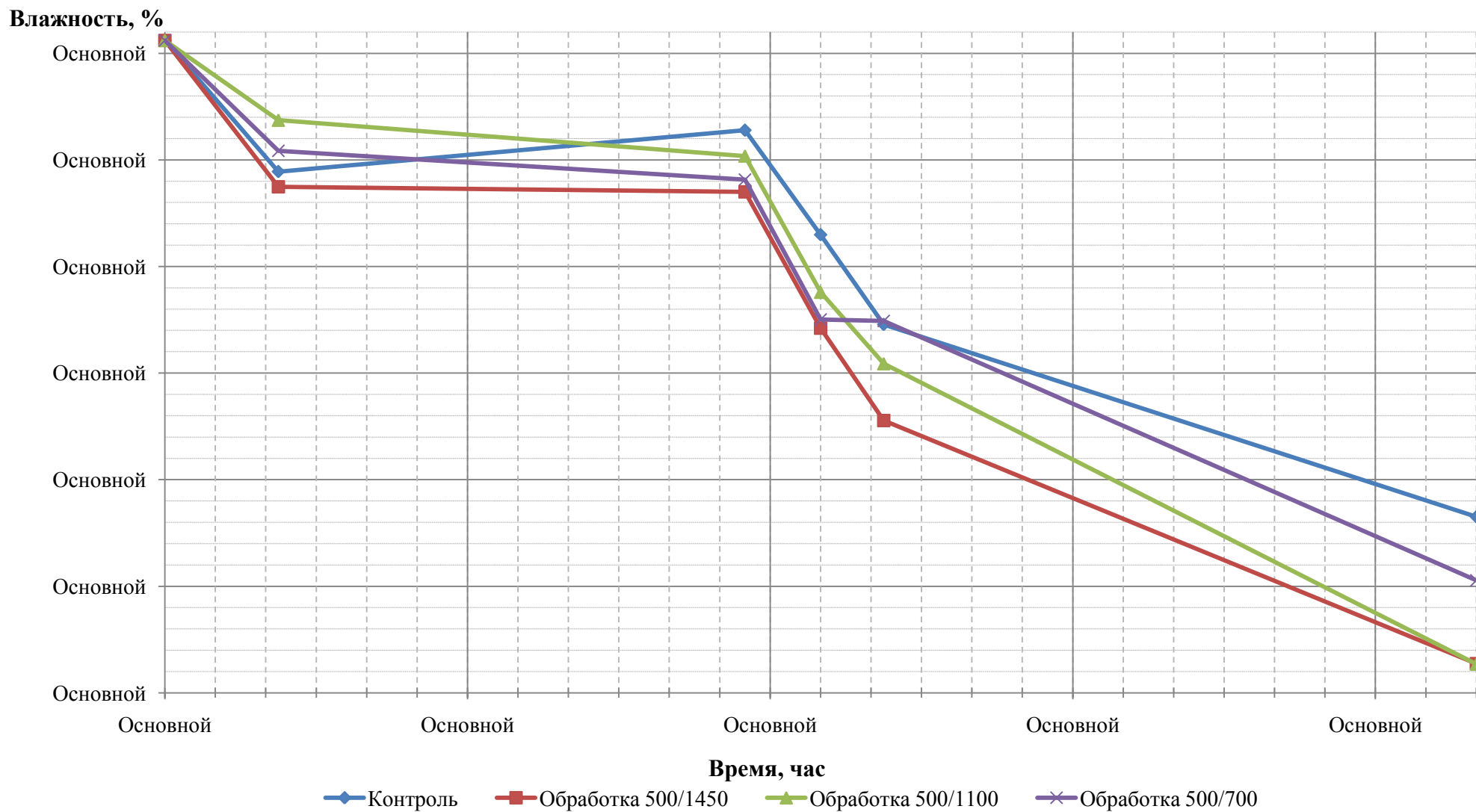


Рис. 10. Динамика сушки люцерны желто-гибридного сортотипа ТБ 10 в фазе бутонизации, 2-й укос (03.09.25 – 05.09.25)

Из графика следует, что обработка люцерны при соотношении скоростей вращения  $W_{т. вала}/W_{б. вала} = 500/1450$  об в 1 мин превосходит все исследуемые варианты обработки люцерны и контроль. При таком режиме влажность люцерновой массы через 28,5 ч провяливания достигла 57,77 %, в то время как влажность в контрольном варианте составила 62,28 %. Опережал контроль и вариант при соотношении скоростей 500/1100 об в 1 мин.

Данный график также показывает, что все исследуемые образцы при разных режимах обработки и контроль достигли влажности сенажа через 52 часа провяливания, но наименьшая влажность (46,37 и 46,35 %) была у обработанных образцов при соотношении скоростей вращения 500/1450 об/мин и 500/1100 об/мин.

*Вариант 5 (рис. 9, конструктивное исполнение кондиционера 2) частота вращения тихоходного вала — 500, быstroходного — 1100 об/мин.*

Растения люцерны в этом варианте интенсивно обработаны, наряду с многократно перебитыми стеблями в массе присутствовало большое количество оторванных листьев.

Анализ полученных фракций показал, что при соотношении скоростей вращения  $W_{т. вала}/W_{б. вала} = 500/1100$  об в 1 мин во фракции 0–10 см не наблюдалось стеблей, но наблюдалось 8,9 % свободных листьев. Стебли интенсивно повреждены во фракциях: 10–20 см (фракция составляет 6,8 %); 20–30 см — 12,1 %; 30–40 см — 17,4 %; 40–50 см — 21,2 % и 50–60 см — 18,9 %. Во фракции 60–70 см содержалось 14,7 % поврежденных стеблей.

Практически на всех стеблях длиной свыше 10 см наблюдаются изломы и расщепления. Количество повреждений во фракции 10–20 см составило от одного до 10 шт. на каждом стебле и составляет 31 шт.; 20–30 см составило от одного до 15 шт. на каждом стебле и составляет 124 шт.; 30–40 — от трех до 13 на каждом стебле и составляет 148 шт.; 40–50 см от трех до 17 шт. и составляет 113 шт.; 50–60 — от шести до 14 шт. и составляет 97 шт.; 60–70 — от трех до 11 и составляет 10 шт. Общее количество повреждений на стеблях во фракциях от 10 до 70 см составляет 523 шт.

Данный режим работы макетного образца кондиционера 500/1100 об/мин обеспечивает большую интенсивность обработки растений люцерны, стебли многократно перебиты и расплющены. Однако во время обработки массы наблюдается большой отрыв листовых пластинок. Во фракции 0–10 см их содержалось 8,9 %, и со свободными листьями в других фракциях они будут являться полевыми потерями.

Данный режим работы эффективен, но требует продолжения исследований в направлении снижения интенсивности отрыва листьев, улучшения вывода массы из зоны обработки билами разработанного кондиционера.

*Вариант 6 (рис. 9, конструктивное исполнение кондиционера 2) частота вращения тихоходного вала — 700, быstroходного — 1100 об/мин.*

Во время пропуска наблюдалась интенсивная обработка люцерновой массы с содержанием в ворохе большого количества перебитых стеблей и свободных листьев, что явилось следствием задержки выхода массы из рабочей зоны.

На таких оборотах тихоходного и быстроходного валов возможно забивание рабочих органов.

*Вариант 7 (рис. 9, конструктивное исполнение кондиционера 2) частота вращения тихоходного вала — 500, быстроходного — 700 об/мин.*

При таком режиме обработки стебли значительно повреждены, в ворохе содержалось большое количество обитых листьев, наблюдалось наматывание на быстроходный вал и повторная обработка массы билами.

*Вариант 8 (рис. 9, конструктивное исполнение кондиционера 2) частота вращения тихоходного вала — 500, быстроходного — 1450 об/мин.*

В этом варианте наблюдалось наматывание массы на быстроходный вал и повторная дообработка, отмечено большое количество обитых листьев (больше чем в предыдущих вариантах), стебли повреждены значительно.

#### **Выводы:**

1. Разработанный в ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса» макетный образец кондиционера с бильными рабочими органами в двух вариантах конструктивного исполнения работоспособен.

2. В первом варианте исполнения билы, установленные на поверхности быстроходного и тихоходного валов с зазором, равным 40 мм, обеспечивают наиболее интенсивную обработку стеблей люцерны сортотипа ТБ 10 во фракциях: 30–40; 40–50; 50–60 см при соот-

ношении скоростей вращения тихоходного и быстроходного валов 500/1450 об/мин.

3. При применении бил первого варианта исполнения наблюдается увеличение площади испаряющей поверхности обрабатываемых растений люцерны до 4000 см<sup>2</sup> при соотношении скоростей вращения тихоходного и быстроходного валов 500/1450 об/мин, что превышает площадь контрольного, необработанного образца (3462 см<sup>2</sup>) на 13,5 %.

4. Провяливание люцерны, обработанной билами первого конструктивного исполнения при соотношении скоростей вращения тихоходного и быстроходного валов 500/1450 об/мин, превосходит по динамике все исследуемые варианты обработки. При таком режиме влажность люцерновой массы через 28,5 час провяливания достигла 57,77 %, в то время как влажность в контрольном варианте составила 62,28 %.

5. Во втором варианте исполнения билы, установленные на поверхности быстроходного и тихоходного валов с зазором равным 20 мм при соотношении скоростей вращения 500/700, 500/1100, 500/1450 и 700/1100 об/мин, чрезмерно обрабатывают растения люцерны. Данный вариант конструктивного исполнения бил эффективен, но требует проведения дополнительных исследований в направлении снижения интенсивности отрыва листьев, улучшения вывода массы из рабочей зоны.

#### **Литература**

1. Орси́к Л. С., Ревякин Е. Л. Инновационные технологии и комплексы машин для заготовки и хранения кормов. (Рекомендации). – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 140 с. – EDN QKZPJT.
2. Особов В. И. Современные технологии и комплексы машин для заготовки кормов. – М. : ООО КЛААС Восток, 2008. – 52 с.

3. Технологические основы приготовления сенажа (научно-практические рекомендации) / В. П. Клименко, А. С. Абрамян, В. М. Косолапов, и др. – М. : ФГБОУ ДПО РАКО АПК, 2024. – 40 с. – EDN ISCIZR. – DOI 10.33814/senazh\_2024\_40.
4. Уланов И. А., Мухин В. А. Приспособление к косилкам-плющилкам для образования валков. Авторское свидетельство SU 541458 A1, 05.01.1977. Заявка № 2097929 от 17.01.1975; – EDN QDRLYV.
5. Уланов И. А., Мухин В. А. Приспособление к косилкам-плющилкам для образования валков шатрообразной формы. Авторское свидетельство SU 651746 A1, 15.03.1979. Заявка № 2453387 от 17.02.1977. – EDN WEENFU.
6. Евдокимов Ю. А., Торопов В. Р. Способ подготовки кормовых растений к сушке. Авторское свидетельство SU 1153856 A1, 07.05.1985. Заявка № 3544510 от 21.01.1983. – EDN LFLGQO.
7. Геер В. А., Каратеев Н. П., Способ уборки трав. Авторское свидетельство SU 1701162 A1, 30.12.1991. Заявка № 4758740 от 15.11.1989. – EDN YYBVCM.
8. Скуратов В. С. Способ уборки стеблевых культур и устройство для его осуществления. SU 1718749 A1, 15.03.1992. Заявка № 4663926 от 30.01.1989. – EDN VUGBQG.
9. Валимов В. Г. Способ уборки сельскохозяйственных культур. Авторское свидетельство SU 1577091 A1. Заявка № 4294241 от 15.08.1987.
10. Косилка-плющилка / В. С. Быков, В. А. Семькин, Д. В. Быков, Л. В. Синявская. Патент на изобретение RU 53839 U1, 10.06.2006. Заявка № 2005136676/22 от 24.11.2005. – EDN XFXRFQ.
11. Янко Н. С. Устройство в косилке-плющилке для уменьшения плотности валка. Авторское свидетельство SU 1166715 A1, 15.07.1985. Заявка № 3693613 от 20.01.1984. – EDN HCOSFF.
12. Кондиционеры динамического действия фирмы KRONE (Германия). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.krone-rus.ru/katalog-produkcii/diskovye-kosilki/easycut-f> (дата обращения 19.05.2026 г.)
13. Forming mats from macerated alfalfa to increase drying rates / K. J. Shinners, G. P. Barrington, R. J. Straub, R. G. Koegel // Transactions of the ASAE. – 1985. – Vol. 28. – № 2. – Pp. 374–377. – DOI 10.13031/2013.32261.
14. Shinners K. J., Koegel R. G., Straub R. J. Consolidation and compaction characteristics of macerated alfalfa used for silage production // Transaction of the ASAE. – 1988. – Vol. 31. – № 4. – Pp. 1020–1026. – DOI 10.13031/2013.30816.
15. An overview of physical treatments of lucerne performed at Madison, Wisconsin, for improving properties / R. G. Koegel, R. J. Straub, K. J. Shinners, et al. // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1992. – Vol. 52. – № 3 – Pp. 183–191.
16. Evaluation of a crushing-impact forage macerator / T. J. Kraus, K. J. Shinners, R. G. Koegel, R. J. Straub // Transaction of the ASAE. – 1993. – Vol. 36. – № 6. – Pp. 1541–1545. – DOI 10.13031/2013.28494.
17. Round bale ensilage of intensively conditioned forage / P. Savoie, D. Tremblay, E. Charmley, R. Trerault // Canadian Agricultural Engineering – 1996. – Vol. 38. – № 4. – Pp. 257–263.
18. Savoie P., Roberge M., Tremblay D. Quantification of mechanical forage conditioning by compressibility // Canadian Agricultural Engineering – 1996. – Vol. 38. – № 3. – Pp. 157–165.
19. Luger E. Mattentechnik // Landtechnik im Alpenraum: Auswirkungen der Europäischen Union. – 1996. – Pp. 48–50.
20. Oztekin S., Ozcan M. T. Application of the Maceration Technique for Drying Forage in Turkey // Journal of Agricultural Engineering Reseach. – 1997. – Vol. 66. – № 1. – Pp. 79–84.
21. Itokawa N. Field machinery for forage production in Japan // Proceedings of the International Workshop on Opening for Low-input Sustainable Forage Production and Use. – Hokkaido : Hokkaido National Agricultural Experiment Station, 2000. – Pp. 211–218.
22. Монтаков В. А., Пучков В. А. Косилка-плющилка. Авторское свидетельство SU 378172A1, 18.04. 1973. Заявка № 1659608/30-15 от 11.05.1971. – EDN AKVFEJ.

23. Лавренов В. В., Орлов П. С., Скицкий А. А. Косилка-плющилка. Авторское свидетельство SU 375050 A1, 23.03.1973. Заявка № 1650732/30-15 от 19.04.1971. – EDN QHDHAV.
24. Ермолаев М. Н. Способ заготовки сена. Авторское свидетельство SU 1436922 A1, 15.11.1988. Заявка № 4176955 от 09.01.1987. – EDN IBFKZB.
25. Беспамятнов А. Д., Мацуца В. К. Измельчитель длинноволокнистых материалов. Авторское свидетельство SU 246192 A1, 11.06.1969. Заявка № 1194038/30-15 от 19.10.1967. – EDN ECRFKT.
26. Чубуков В. Д. Измельчитель растительного материала. Авторское свидетельство SU 1140716 A1, 23.02.1985. Заявка № 3644457 от 23.09.1983. – EDN EAGCXC.
27. Маковкина Н. П., Короневский В. С., Загута Н. Ф. Устройство для измельчения растительного сырья. Авторское свидетельство SU 1189388 A1, 07.11.1985. Заявка № 3736100 от 03.05.1984. – EDN AVYAKK.
28. Герейш О. П. Измельчитель грубых кормов. Авторское свидетельство SU 1792588 A1, 07.02.1993. Заявка № 4602356/15 от 10.10.1988. – EDN CTWTAS.
29. Шекихачев Ю. А., Шомахов Л. А. Косилка-измельчитель эшелонированного резания. Патент на изобретение RU 2297131 C2, 20.04.2007. Заявка № 2003123694/12 от 28.07.2003. – EDN TLFSQJ.
30. Устройство для транспортировки и измельчения кормов / Н. А. Барсов, И. И. Акмалходжаев, М. А. Селиванова, и др. Авторское свидетельство SU 1604465 A1, 30.09.1991. Заявка № 4752206/33 от 24.10.1989.
31. Устройство для отжима сока из стеблей растений кормоуборочной машины / В. М. Кононов, М. В. Кононов, И. В. Пулин, и др. Патент на изобретение RU 2070375 C1, 20.12.1996. Заявка № 94028117/15 от 27.07.1994. – EDN OWBYSX.
32. Адамень Ф. Ф., Лузин В. А. Устройство для плющения кормовых материалов. Патент на изобретение RU 2064233 C1, 27.07.1996. Заявка № 5019932/15 от 04.11.1991. – EDN THZMFO.
33. Ермолаев М. Н. Устройство для обработки растений. Авторское свидетельство SU 1207421 A1, 30.01.1986. Заявка № 3630807 от 09.08.1983. – EDN GGBVZN.
34. Ермолаев М. Н. Устройство для обработки растений. Авторское свидетельство SU 1678238 A1, 23.09.1991. Заявка № 4770752 от 22.12.1989. – EDN QSDBXI.
35. Механизация полевой сушки: пути совершенствования / П. П. Казакевич, С. Г. Яковчик, И. М. Лабоцкий, Л. И. Трофимович // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – Минск, 2018. – Т. 56. – № 4. – С. 481–491. – EDN VLXUVZ. – DOI 10.29235/1817-7204-2018-56-4-481-491.
36. Стречень М. В., Кокунова И. В. Обоснование конструктивных параметров плющилки стебельчатых кормов // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – М. : РГАУ МСХА им. К. А. Тимирязева, 2012. – № 5 (56). – С. 38–40. – EDN RBJJSL.
37. Кокунова И. В., Стречень М. В., Смирнов Р. Н. Машина для плющения стеблей скошенных трав. Патент на изобретение RU 117772 U1, 10.07.2012. Заявка № 2011152362/15 от 21.12.2011.
38. Кокунова И. В., Стречень М. В., Титенкова О. С. Технические средства для интенсификации процесса сушки трав в поле // Известия Великолукской ГСХА. – 2013. – № 1. – С. 20–30. – EDN TILJOT.
39. Комлач Д. И., Бакач Н. Г., Салапура Ю. Л. Современная сельскохозяйственная техника для механизации технологических процессов в растениеводстве // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Минск : Беларуская навука, 2020. – С. 3–7. – EDN YWZLDB.
40. Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами / Ю. К. Новоселов, В. Н. Киреев, Г. П. Кутузов, и др. – М. : Россельхозакадемия, 1997. – 156 с. – EDN WNBLWF.
41. Способ определения площади испаряющей поверхности трав / С. А. Отрошко, В. М. Соколов, А. В. Шевцов, В. М. Косолапов. Патент на изобретение RU 2843628 C1, 17.07.2025. Заявка № 2024104991 от 27.02.2024. – EDN LALUNH.

42. ГОСТ 28722-90. Машины сельскохозяйственные и лесные. Косилки-плющилки. Методы испытаний. – М. : Стандартиформ, 2005. – 6 с.
43. Бондарев В. А., Панов А. А. Методика полевых опытов по проявлению и сушке трав на сено и сенаж. – М. : РАСХН, ВИК, 1994. – 11 с.
44. Проведение опытов по консервированию и хранению объемистых кормов / В. А. Бондарев, В. М. Косолапов. Ю. А. Победнов, и др. // Методические рекомендации. – М. : ФГУ РЦСК, 2008 – 67 с.
45. ГОСТ 27262-87. Корма растительного происхождения. Методы отбора проб. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 9 с.
46. ГОСТ 27548-87. Корма растительные. Методы определения влаги. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 7 с.

## Reference

1. Orsik L.S. Revyakin E.L. *Innovatsionnye tekhnologii i kompleksy mashin dlya zagotovki i khraneniya kormov. (Rekomendatsii)* [Innovative technologies and machine complexes for harvesting and storing feed. (Recommendations)]. *FGNU "Rosinformagrotekh"* Publ. 2008. 140 p.
2. Osobov V.I. *Sovremennye tekhnologii i kompleksy mashin dlya zagotovki kormov* [Modern technologies and machine complexes for fodder harvesting]. 2008. 52 p.
3. Klimenko V.P., Abramyan A.S., Kosolapov V.M., et al. *Tekhnologicheskie osnovy prigotovleniya senazha (nauchno-prakticheskie rekomendatsii)* [Technological Fundamentals of Making Haylage (Scientific and Practical Recommendations)]. *FGBOU DPO RAKO APK* Publ. 2024. 40 p. DOI 10.33814/senazh\_2024\_40.
4. Ulanov I.A., Mukhin V.A. *Prisposoblenie k kosilkam-plyushchilkam dlya obrazovaniya valkov* [Adaptation to mowers-flatteners for roll formation]. Copyright certificate SU 541458. 05.01.1977. Application No. 2097929 dated 17.01.1975.
5. Ulanov I.A., Mukhin V.A. *Prisposoblenie k kosilkam-plyushchilkam dlya obrazovaniya valkov shatroobraznoi formy* [Adaptation to mowers-flatteners for forming tent-shaped rolls]. Copyright certificate SU 651746 A1, 15.03.1979. Application No. 2453387 dated 17.02.1977.
6. Evdokimov Yu.A., Toropov V.R. *Sposob podgotovki kormovykh rastenii k sushke* [A method for preparing fodder plants for drying]. Copyright certificate SU 1153856 A1, 07.05.1985. Application No. 3544510 dated 21.01.1983.
7. Geer V.A., Karateev N.P. *Sposob uborki trav* [The method of harvesting herbs]. Copyright certificate SU 1701162 A1, 30.12.1991. Application No. 4758740 dated 15.11.1989.
8. Skuratov V.S. *Sposob uborki steblevykh kul'tur i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of harvesting stem crops and device for its implementation]. Copyright certificate SU 1718749 A1, 15.03.1992. Application No. 4663926 dated 30.01.1989.
9. Valimov V. G. *Sposob uborki sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [The method of harvesting crops]. Copyright certificate SU 1577091 A1. Application No. 4294241 dated 15.08.1987.
10. Bykov V.S., Semykin V.A., Bykov D.V., Sinyavskaya L.V. *Kosilka-plyushchilka* [Mower-flattener]. A patent for an invention RU 53839 U1, 10.06.2006. Application No. 2005136676/22 dated 24.11.2005.
11. Yanko N.S. *Ustroystvo v kosilke-plyushchilke dlya umen'sheniya plotnosti valka* [Device in a mower-flattener for reducing the density of a swath]. Copyright certificate SU 1166715 A1, 15.07.1985. Application No. 3693613 dated 20.01.1984.
12. Кондиционеры динамического действия фирмы KRONE (Германия) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.krone-rus.ru/katalog-produkcii/diskovye-kosilki/easycut-f> (дата обращения 19.05.2026 г.)

13. Shinnars K.J., Barrington G.P., Straub R.J., Koegel R.G. Forming mats from macerated alfalfa to increase drying rates. Transactions of the ASAE. 1985. Vol. 28. No. 2. Pp. 374-377. DOI 10.13031/2013.32261.
14. Shinnars K.J., Koegel R.G., Straub R.J. Consolidation and compaction characteristics of macerated alfalfa used for silage production. Transaction of the ASAE. 1988. Vol. 31. No. 4. Pp. 1020-1026. DOI 10.13031/2013.30816.
15. Koegel R.G., Straub R.J., Shinnars K.J., et al. An overview of physical treatments of lucerne performed at Madison, Wisconsin, for improving properties. Journal of Agricultural Engineering Research. 1992. Vol. 52. No. 3. Pp. 183-191.
16. Kraus T.J., Shinnars K.J., Koegel R.G., Straub R.J. Evaluation of a crushing-impact forage macerator. Transaction of the ASAE. 1993. Vol. 36. No. 6. Pp. 1541-1545. DOI 10.13031/2013.28494.
17. Savoie P., Tremblay D., Charmley E., Treriault R. Round bale ensilage of intensively conditioned forage. Canadian Agricultural Engineering. 1996. Vol. 38. No. 4. Pp. 257-263.
18. Savoie P., Roberge M., Tremblay D. Quantification of mechanical forage conditioning by compressibility. Canadian Agricultural Engineering. 1996. Vol. 38. No. 3. Pp. 157-165.
19. Luger E. Mattentechnik. Landtechnik im Alpenraum: Auswirkungen der Europäischen Union. 1996. Pp. 48-50.
20. Oztekin S., Ozcan M.T. Application of the Maceration Technique for Drying Forage in Turkey. Journal of Agricultural Engineering Research. 1997. Vol. 66. No. 1. Pp. 79-84.
21. Itokawa N. Field machinery for forage production in Japan. Proceedings of the International Workshop on Opening for Low-input Sustainable Forage Production and Use. 1999. Lugovaya, Moscow reg., Russia. 2000. Pp. 211-218.
22. Montakov V.A., Puchkov V.A. *Kosilka-plyushchilka* [Mower-flattener]. Copyright certificate SU 378172A1, 18.04. 1973. Application No. 1659608/30-15 dated 11.05.1971.
23. Lavrenov V.V., Orlov P.S., Skitskii A.A. *Kosilka-plyushchilka* [Mower-flattener]. Copyright certificate SU 375050 A1, 23.03. 1973. Application No. 1650732/30-15 dated 19.04.1971.
24. Ermolaev M.N. *Sposob zagotovki sena* [The method of harvesting hay]. Copyright certificate SU 1436922 A1, 15.11. 1988. Application No. 4176955 dated 09.01.1987.
25. Bespamyatnov A.D., Matsutsa V.K. *Izmel'chitel' dlinnovoloknistykh materialov* [Long-fiber material shredder]. Copyright certificate SU 246192 A1, 11.06.1969. Application No. 1194038/30-15 dated 19.10.1967.
26. Chubukov V.D. *Izmel'chitel' rastitel'nogo materiala* [Shredder of plant material]. Copyright certificate SU 1140716 A1, 23.02.1985. Application No. 3644457 dated 23.09.1983.
27. Makovkina N.P., Koronevskii V.S., Zaguta N.F. *Ustroistvo dlya izmel'cheniya rasti-tel'nogo syr'ya* [Device for grinding plant raw materials]. Copyright certificate SU 1189388 A1, 07.11.1985. Application No. 3736100 dated 03.05.1984.
28. Gereish O.P. *Izmel'chitel' grubykh kormov* [Coarse Feed Shredder]. Copyright certificate SU 1792588 A1, 07.02.1993. Application No. 4602356/15 dated 10.10.1988.
29. Shekikhachev Yu.A., Shomakhov L.A. *Kosilka-izmel'chitel' eshelonirovannogo rezaniya* [Stepped cutting mower-grinder]. Patent for an invention RU 2297131 C2, 20.04.2007. Application No. 2003123694/12 dated 28.07.2003.
30. Barsov N.A., Akmalkhodzhaev I.I., Selivanova M.A., et al. *Ustroistvo dlya transportirovki i izmel'cheniya kormov* [A device for transporting and crushing feed]. Copyright certificate SU 1604465 A1, 30.09.1991. Application No. 4752206/33 dated 24.10.1989.
31. Kononov V.M., Kononov M.V., Pulin I.V., et al. *Ustroistvo dlya otzhima soka iz stblei rastenii kormouborochnoi mashiny* [Sap-squeezing device for forage harvesters]. Patent for an invention RU 2070375 C1, 20.12.1996. Application No. 94028117/15 dated 27.07.1994.
32. Adamen' F.F., Luzin V.A. *Ustroistvo dlya plyushcheniya kormovykh materialov* [Feed material conditioner apparatus]. Copyright certificate RU 2064233 C1, 27.07.1996. Application No. 5019932/15 dated 04.11.1991.

33. Ermolaev M.N. *Ustroistvo dlya obrabotki rastenii* [Apparatus for treatment of plants]. Copyright certificate SU 1207421 A1, 30.01.1986 Application No. 3630807 dated 09.08.1983.
34. Ermolaev M.N. *Ustroistvo dlya obrabotki rastenii* [Plant treatment device]. Copyright certificate SU 1678238 A1, 23.09.1991. Application No. 4770752 dated 22.12.1989.
35. Kazakevich P.P., Yakovchik S.G., Labotskii I.M., Trofimovich L.I. *Mekhanizatsiya polevoi sushki: puti sovershenstvovaniya* [Mechanization of grass drying field: ways to improve]. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk*. Minsk. 2018. Vol. 56. No. 4. Pp. 481-491. DOI 10.29235/1817-7204-2018-56-4-481-491.
36. Strechen' M.V., Kokunova I.V. *Obosnovanie konstruktivnykh parametrov plyushchilki stebel'chatykh kormov* [Justification of design parameters conditioners stalked feed]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskii gosudarstvennyi agroinzhenernyi universitet imeni V.P. Goryachkina"*. Moscow. Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. 2012. No. 5 (56). Pp. 38-40.
37. Kokunova I.V., Strechen' M.V., Smirnov R.N. *Mashina dlya plyushcheniya steblei skoshennykh trav* [Machine for flattening the stems of cut grass]. Patent for an invention RU 117772 U1, 10.07.2012. Application No. 2011152362/15 dated 21.12.2011.
38. Kokunova I.V., Strechen' M.V., Titenkova O.S. *Tekhnicheskie sredstva dlya intensifikatsii protsessa sushki trav v pole* [Technical means for intensifying the drying process of herbs in the field]. *Izvestiya Velikolukskoi GSKhA*. 2013. No. 1. Pp. 20-30.
39. Komlach D.I., Bakach N.G., Salapura Yu.L. *Sovremennaya sel'skokhozyaistvennaya tekhnika dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rasteniyevodstve* [Modern agricultural machinery for mechanization of technological processes in crop production]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva*. Minsk. *Belaruskaya navuka* Publ. 2020. Vol. 54. Pp. 3-7.
40. Novoselov Yu.K., Kireev V.N., Kutuzov G.P. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu polevykh opytov s kormovymi kul'turami* [Guidelines for conducting field experiments with fodder crops]. Moscow. *Rossel'khozakademiya* Publ. 1997. 156 p.
41. Otroshko S.A., Sokolov V.M., Shevtsov A.V., Kosolapov V.M. *Sposob opredeleniya ploshchadi isparayushchei poverkhnosti trav* [Method of grass evaporating surface area determining]. Patent for an invention RU 2843628 C1, 17.07.2025. Application No. 2024104991 dated 27.02.2024.
42. *GOST 28722-90. Mashiny sel'skokhozyaistvennye i lesnye. Kosilki-plyushchilki. Metody ispytaniy* [Agricultural and forestry machinery. Mowers-flatteners. Test methods]. Moscow. *Standartinform* Publ. 2005. 6 p.
43. Bondarev V.A., Panov A.A. *Metodika polevykh opytov po provyalivaniyu i sushke trav na seno i senazh* [Methods of field experiments on wilting and drying of grasses for hay and silage]. Moscow. *RASKhN, VIK* Publ. 1994. 11 p.
44. Bondarev V.A., Kosolapov V.M., Pobednov Yu.A., et al. *Provedenie opytov po konservirovaniyu i khraneniyu ob'emistykh kormov* [Conducting experiments on the preservation and storage of bulky feed.] *Metodicheskie rekomendatsii* [Methodological recommendations]. Moscow. *FGU RTsSK* Publ. 2008. 67 p.
45. *GOST 27262-87. Korma rastitel'nogo proiskhozhdeniya. Metody otbora prob* [Plant-based feed. Sampling methods]. Moscow. *Izdatel'stvo standartov* Publ. 1987. 9 p.
46. *GOST 27548-87. Korma rastitel'nye. Metody opredeleniya vlagi*. Moscow. *Izdatel'stvo standartov*. Publ. 1988. 7 p.

УДК 633.31:664.8

DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2-84-105

**ПРОЦЕССЫ СУШКИ ЗЕЛЕННОЙ МАССЫ ЛЮЦЕРНЫ\***

**С. В. Брагинец<sup>1,2</sup>**, доктор технических наук  
**О. Н. Бахчевников<sup>1</sup>**, кандидат технических наук  
**Д. А. Кузьменко<sup>1</sup>**, аспирант  
**Д. А. Максак<sup>1</sup>**, аспирант

<sup>1</sup>*Аграрный научный центр «Донской»*  
347740, Россия, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3  
[oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru)

<sup>2</sup>*Донской государственный технический университет*  
344000, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

**DRYING PROCESSES OF ALFALFA GREEN BIOMASS (REVIEW)**

**S.V. Braginet<sup>1,2</sup>**, Doctor of Engineering Sciences  
**O.N. Bakhchevnikov<sup>1</sup>**, Candidate of Engineering Sciences  
**D.A. Kuzmenko<sup>1</sup>**, Postgraduate  
**D.A. Maksak<sup>1</sup>**, Postgraduate

<sup>1</sup>*Agricultural Research Centre Donskoy*  
347740, Russia, Rostov Region, Zernograd, Nauchnyy Gorodok St., 3  
[oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru)

<sup>2</sup>*Don State Technical University*  
344000, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1

Обзор посвящен исследованию процессов обезвоживания зеленой массы люцерны (*Medicago sativa* L.), обусловленных необходимостью снижения ее начальной влажности (70–80 %) до уровня 12–15 % для предотвращения потерь питательных веществ. Цель работы — обобщение и анализ закономерностей влагопереноса в тканях люцерны для разработки энергоэффективных технологий ее сушки. Методология обзора основана на систематическом анализе научной литературы (2015–2025 гг.) из баз eLIBRARY, Google Scholar, ScienceDirect по протоколу PRISMA-ScR. Рассмотрены формы содержания воды в тканях люцерны: свободная (85–90 %), физико-химически связанная (10–15 %) и химически связанная влага, определяющие энергетику процесса обезвоживания. Проанализированы механизмы влагопереноса на физиологической (до 40 % влажности) и биохимической (40–15 %) стадиях, включая межклеточную, внутриклеточную и трансмембранную диффузию. Выделены три кинетических периода сушки: период постоянной скорости (испарение свободной воды) и два периода падающей скорости (удаление связанной воды). Особое внимание уделено проблеме асинхронной сушки листьев и стеблей, приводящей к пересушиванию листьев

\*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ФБГНУ «Аграрный научный центр «Донской» «Технология получения белково-витаминной диспергированной кормовой добавки из вегетативной массы бобовых культур в ранних фазах созревания» (FNFN-2026-0002).

и разрушению питательных веществ. Решение проблемы требует предварительного механического воздействия на стебли для выравнивания кинетических кривых, а также подбора адаптивных режимов сушки. Проанализировано развитие математического моделирования процесса сушки люцерны — от эмпирических моделей тонкого слоя к комплексным диффузионным моделям сопряженного тепло- и массопереноса, адаптированным для конкретных сушильных аппаратов. Отмечена перспектива интеграции искусственного интеллекта и CFD-моделирования для оптимизации режимов сушки с учетом сохранения качества листовой фракции.

**Ключевые слова:** люцерна (*Medicago sativa* L.), зеленая масса, сушка, обезвоживание, влагоперенос, свободная влага, связанная влага, моделирование, кормопроизводство.

Review examines the dehydration processes of alfalfa (*Medicago sativa* L.) green biomass, driven by the necessity to reduce its initial moisture content (70–80%) to levels 12–15% to prevent nutrient losses. The objective is to summarize and analyze the moisture transfer regularities in alfalfa tissues for the development of energy-efficient drying technologies. The review methodology is based on a systematic analysis of scientific literature (2015–2025) from eLIBRARY, Google Scholar, and ScienceDirect databases following the PRISMA-ScR protocol. The paper discusses the forms of water present in alfalfa: free water (85–90%), physicochemically bound water (10–15%) and chemically bound water, which determine the energy requirements of the dehydration process. The mechanisms of moisture transfer during the physiological (up to 40% moisture) and biochemical (40–15%) stages are analyzed, including intercellular, intracellular, and transmembrane diffusion. Three kinetic drying periods are identified: the constant rate period (free water evaporation) and two falling rate periods (bound water removal). Particular attention is given to the problem of asynchronous drying of leaves and stems, which leads to overdrying of leaves and degradation of nutrients. Addressing this issue requires preliminary mechanical treatment of the stems to equalize drying kinetics, as well as the selection of adaptive drying regimes. The development of mathematical modeling of the drying process is analyzed – from empirical thin-layer models to comprehensive diffusion models of coupled heat and mass transfer adapted for drying equipment. The prospect of integrating artificial intelligence and CFD modeling to optimize drying regimes while preserving leaf fraction quality is highlighted.

**Keywords:** alfalfa (*Medicago sativa* L.), green biomass, drying, dehydration, moisture transfer, free moisture, bound moisture, modeling, feed production.

**Введение.** Люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) является одной из наиболее ценных многолетних бобовых трав, широко распространенной в кормопроизводстве благодаря исключительным кормовым качествам [1]. Зеленая масса люцерны характеризуется высоким содержанием протеина, сбалансированным аминокислотным составом, богатым содержанием витаминов и минеральных элементов, что обеспечивает ее высокую питательную ценность для сельскохозяйственных животных [2; 3].

Ключевой проблемой при заготовке кормов из люцерны является чрезвычай-

но высокая начальная влажность зеленой массы, которая в фазе бутонизации достигает 70–80 % [4; 5]. При такой влажности свежескошенная люцерна непригодна для длительного хранения вследствие интенсивного дыхания тканей, микробиологических процессов гниения и самосогревания, что приводит к катастрофическим потерям питательных веществ [6; 7]. Обеспечение безопасной влажности конечного продукта (12–15 %) требует удаления значительного количества влаги, что обуславливает необходимость применения эффективных технологий сушки [8].

В настоящее время для сушки зеленой массы люцерны применяют различные методы: естественная сушка (провяливание в поле), искусственная сушка горячим воздухом (конвективная), солнечная сушка, микроволновая сушка, сушка с применением систем активной вентиляции и комбинированные технологии [9]. Однако существующие способы обезвоживания обладают существенными недостатками. Традиционная естественная сушка занимает продолжительное время (до двух–трех суток и более), сопровождаясь значительными потерями листьев, содержащих основную массу питательных веществ, и сильно зависит от погодных условий [10]. Искусственная сушка горячим воздухом, несмотря на высокую производительность, характеризуется значительной энергоемкостью и риском разрушения термолабильных питательных веществ [11; 12].

При температуре сушки выше 50–60 °С наблюдается денатурация белков и развитие реакции Майяра, приводящей к снижению доступности аминокислот (особенно лизина) и ухудшению переваримости корма [13]. При нагреве выше 60 °С происходит разрушение термолабильных питательных веществ — витаминов, каротиноидов и антиоксидантов, что приводит к снижению кормовой ценности [14; 15]. Солнечная сушка и сушка с использованием тепловых насосов хотя и обеспечивают экономию энергии (до 25 % по сравнению с традиционными методами), но остаются чувствительными к климатическим факторам и требуют значительных капитальных вложений [16].

Критическим ограничением при разработке новых технологий сушки явля-

ется недостаточный учет механизмов влагопереноса в тканях люцерны. Вода в растительном сырье существует в различных формах: свободная (85–90 % от общей влаги), физико-химически связанная (10–15 %) и химически связанная [9; 17]. Процесс обезвоживания протекает в три стадии: период постоянной скорости (испарение свободной воды), первый период падающей скорости (испарение связанной воды с поверхности) и второй период падающей скорости (удаление глубинной связанной воды), причем каждая стадия характеризуется различными механизмами влагопереноса [18]. Большое значение имеет асинхронность сушки фракций люцерны: листья, имеющие большую поверхность и тонкую структуру, теряют влагу значительно быстрее, чем стебли с восковым кутикулярным слоем, что приводит к чрезмерной сушке листьев и разрушению питательных веществ [19].

Сушка люцерны — это сложный комплекс явлений. Глубокое понимание процессов переноса влаги, тепла и массы, происходящих во время обезвоживания люцерны, имеет решающее значение для улучшения качества кормов и повышения эффективности сушки.

Несмотря на важность проблемы, комплексные научные исследования, посвященные закономерностям процессов обезвоживания зеленой массы люцерны с учетом форм содержания воды в тканях и кинетики влагопереноса, представлены недостаточно полно. Отсутствие систематизированной информации о механизмах дегидратации затрудняет обоснование параметров новых технологий и конструктивных решений сушильных установок, адаптированных к био-

логическим особенностям люцерны. Существующая информация фрагментарна, не позволяет в полной мере обосновать энергоэффективные, ресурсосберегающие и сохраняющие качество технологии, учитывающие специфические физико-химические свойства растения. Это создает значительный научный пробел, препятствующий инновационному развитию отрасли, что и определяет актуальность настоящего исследования.

**Цель исследования** — обобщение и анализ информации о закономерностях процессов, протекающих в зеленой массе люцерны при ее обезвоживании, для последующего использования при разработке новых технологий и технических средств для ее сушки.

**Материалы и методы.** Подготовка настоящего обзора осуществлялась поэтапно и охватывала ряд последовательных процедур: инициация целенаправленного информационного поиска с последующим отбором научных источников, извлечение релевантных сведений из проанализированных материалов, их структурирование, а также критическая оценка и синтез выявленных закономерностей [20; 21].

Информационный поиск проводили в ведущих реферативных базах данных и научных платформах, включая отечественную систему eLIBRARY и международные ресурсы Google Scholar, ScienceDirect, Springer Link, а также на сайтах крупных издательств, в частности MDPI. В поле внимания попадали публикации следующих типов: статьи, содержащие первичные исследовательские данные (Article), аналитические обзоры (Review), а также разделы из научных монографий (Chapter). Для повышения

специфичности и точности результатов поисковые стратегии конструировали с использованием ключевых терминов и их различных лексических сочетаний на русском и английском языках.

Отбор материалов и систематизацию обзорного поля литературы проводили в соответствии с поэтапной схемой, адаптированной из протокола PRISMA-ScR [22]. Непосредственный анализ содержания отобранных публикаций выполняли с применением методологических подходов, предложенных W. Mengist [23], что обеспечило системность и несмещенность исследовательской процедуры.

Критерии включения публикаций в корпус анализа определялись их тематическим соответствием целям исследования и научной ценностью. При ранжировании источников учитывали индекс цитируемости; исключение составляли лишь недавно вышедшие работы, для которых показатель цитирования еще не сформировался. Для максимизации охвата литературы осуществляли анализ библиографических списков уже отобранных статей с целью выявления дополнительных релевантных источников.

Хронологические рамки обзора охватывают период 2015–2025 гг. Однако в анализ включали и более ранние публикации при условии недостаточной или отсутствующей современной научной информации по отдельным аспектам рассматриваемой тематики.

Реализация многоуровневой стратегии поиска, отбора и анализа научной литературы позволила сформировать целостную картину актуального состояния изучаемой проблематики, а также идентифицировать приоритетные тенденции

и векторы развития исследований в данной предметной области.

**Результаты.** *Формы воды в люцерне.* Ткани листьев и стеблей люцерны являются ненасыщенным влагосодержащим материалом с капиллярной структурой. Входящие в ее состав гидрофильные вещества, прежде всего структурные полисахариды (пектины и целлюлоза), позволяют адсорбировать значительные количества воды — до 85 % [24]. Ключевые гидрофильные компоненты распределены по клеточным стенкам.

Распределение влаги в тканях люцерны является неоднородным. Вода, доступная для удаления в процессе сушки, подразделяется на свободную (85–90 %) и связанную (10–15 %) [25]. Свободная вода, находящаяся в макропорах, таких как клеточные полости, межклеточные пространства и сосуды, наиболее легко удаляется при сушке. Она в основном находится внутри клеток, включая вакуоль и цитоплазму, а также в сосудах проводящей системы и межклеточных пространствах [9]. Это наиболее легко удаляемая при сушке влага — ее давление пара практически равно давлению пара чистой воды при тех же температурах, поэтому свободная вода является основным компонентом испарения на начальной стадии сушки [9; 26].

Связанная вода подразделяется на физико-химически связанную и химически связанную [27].

Физико-химически связанная вода — это молекулы воды, прочно связанные с сухим веществом тканей люцерны [26]. Она подразделяется на адсорбционно связанную воду, закрепляющуюся на поверхности частиц и проникающую во внутренние структуры клеток, и осмоти-

чески связанную воду, диффундирующую через клеточные стенки под действием градиентов концентрации. При этом они способны адсорбироваться на поверхностях или проникать через поверхности внутрь. Ее давление пара значительно ниже, чем у чистой воды при той же температуре. По сравнению со свободной водой, удаление физико-химически связанной требует значительно больших энергетических затрат [27].

Химически связанная вода стабилизируется связями с органическими соединениями, поэтому ее удаление требует значительно больше энергии, чем удаление свободной и физико-химически связанной воды [24]. Химически связанная вода представляет собой молекулы, соединенные с органическими веществами внутри тканей люцерны, такими как белки, крахмал и жиры, посредством химических связей и межмолекулярных сил. Молекулы воды в химически связанной форме поддерживают строгое количественное соотношение с сухим веществом и не участвуют в химических реакциях внутри частиц люцерны [24]. Ее удаление может повредить тканевую структуру растения, вызвав денатурацию белков и разрушение клеточных стенок, что нецелесообразно [28]. Следовательно, удаление химически связанной воды в процессе сушки люцерны не требуется.

Классификация форм влаги определяет энергетическую структуру процесса сушки и объясняет нелинейный характер кинетики обезвоживания (табл. 1).

*Процессы влагопереноса в тканях люцерны.* Происходящее при обезвоживании перемещение воды из внутренних тканей люцерны к ее поверхности, где

она затем испаряется в воздух, представляет собой сложный процесс, который

делится на физиологическую и биохимическую стадии.

### 1. Формы воды в тканях люцерны и их технологическое значение при сушке

Форма воды	Доля / характер содержания	Локализация в тканях	Прочность связи	Особенности удаления при сушке	Технологическое значение
Свободная вода	85–90 % от общей влаги	Вакуоли, цитоплазма, сосуды, межклеточные пространства	Слабая	Удаляется на начальной стадии (период постоянной скорости)	Определяет высокую интенсивность начального обезвоживания
Физико-химически связанная вода	10–15%	Клеточные стенки, внутриклеточные структуры	Средняя	Удаляется в период падающей скорости, требует повышенных энергозатрат	Формирует основную долю влаги на поздних стадиях
Адсорбционно связанная вода	Часть физико-химически связанной	Поверхности частиц и клеточных структур	Прочная	Удаляется медленно при снижении влажности	Обуславливает снижение скорости сушки на поздних стадиях
Осмотически связанная вода	Часть физико-химически связанной	Внутренние структуры клеток	Прочная	Требует значительного градиента концентрации	Влияет на продолжительность обезвоживания
Химически связанная вода	Прочно связана с сухим веществом	Связь с белками, углеводами, липидами	Очень высокая	Практически не удаляется без разрушения структуры	Не является объектом удаления при сушке

Физиологическая стадия обезвоживания длится от момента скашивания люцерны до снижения ее влажности примерно до 40 %. При этом клетки растения сохраняют жизнеспособность и метаболическую активность, в которой преобладает катаболизм. Дыхательный метаболизм преобразует крахмал в моно- и дисахариды, одновременно расходуя простые сахара, а белки разлагаются до водорастворимых азотистых соединений [9; 29].

Биохимическая стадия начинается

при снижении влажности до 40 % и продолжается до достижения влажности около 15 % [8; 16]. Эта стадия обезвоживания характеризуется гибелью клеток и прекращением дыхания и транспирации. На этой стадии преобладает ферментативное разложение: ограниченное разрушение макромолекулярных углеводов (крахмала, целлюлозы) и значительное разложение растворимых сахаров, что сопровождается потерей воды и снижением активности ферментов, минимизируя потери питательных веществ [30].

Свободная вода из тканей люцерны в основном испаряется через устьица, сосудистую систему и межклеточные пространства под воздействием градиента водного потенциала, что приводит к относительно высокой скорости обезвоживания [8]. Значительные различия во влажности между внутренними тканями и местами испарения влаги создают значительный градиент водного потенциала от сердцевины к поверхности [8; 31]. Ключевыми факторами сопротивления на этом этапе являются сопротивление клеточной стенки, полупроницаемость клеточных мембран, размер и извилистость межклеточных пространств, восковой кутикулярный слой на эпидермисе стебля и толщина тканей [9; 27].

Пути переноса жидкой воды и пара в тканях люцерны различаются.

При переносе жидкой воды различают межклеточную и внутриклеточную диффузию, сосудистый и трансмембранный транспорт.

В ходе межклеточной диффузии вода диффундирует через пространства между клетками. При внутриклеточной миграции перемещение воды осуществляется посредством цитоплазматического тока и диффузии [24].

Сосудистый транспорт происходит в живых тканях и сразу после скашивания, когда сосуды ксилемы кратковременно поддерживают перемещение воды под действием капиллярных сил, но с ограниченной эффективностью и длительностью (менее 30 мин) [9].

Трансмембранный транспорт влаги осуществляется по трем основным путям (рис. 1): апопластическому, при котором вода движется по клеточным стенкам и межклеточникам; симпластическому, при котором перенос происходит через цитоплазму соседних клеток, соединенных плазмодесмами; и трансцеллюлярному, при котором вода последовательно проходит через клеточные мембраны [9; 25].

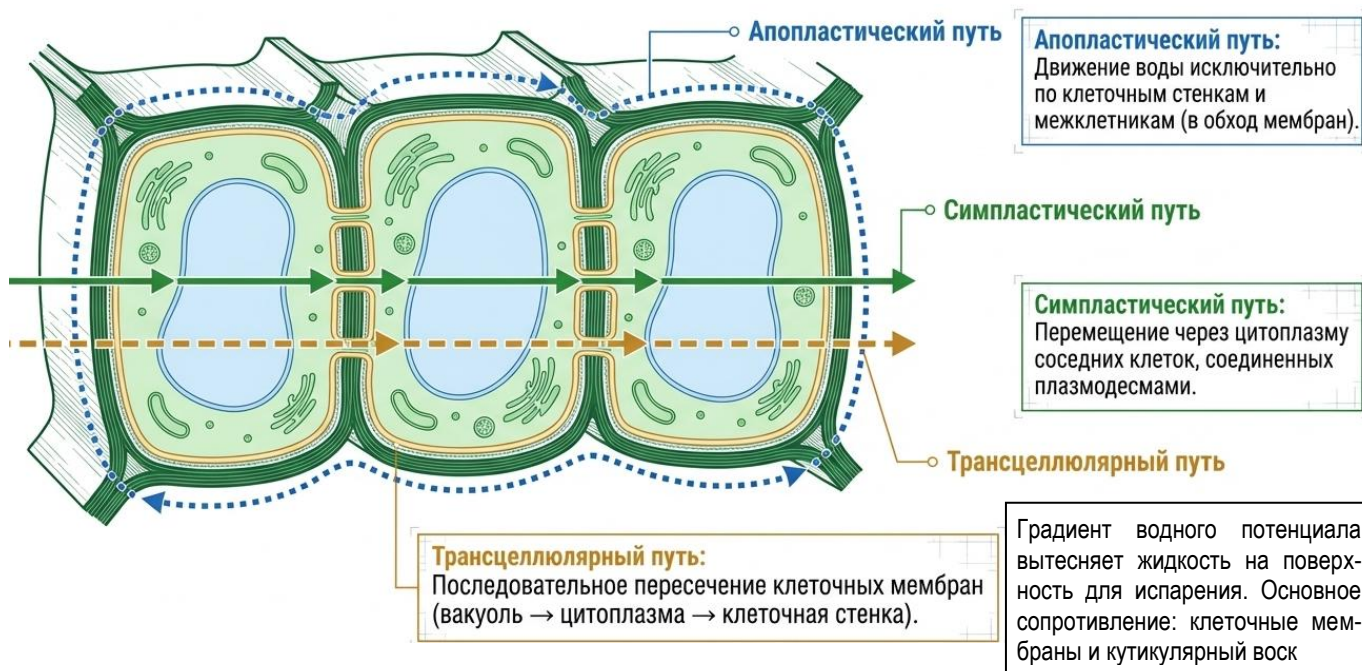


Рис. 1. Пути трансмембранного транспорта воды в растительной ткани

Перенос водяного пара в тканях люцерны происходит двумя путями: внутренняя диффузия и поверхностное испарение [32].

Внутренняя диффузия водяного пара происходит, когда при повышенной температуре внутри тканей и наличии температурного градиента влага может испаряться в более нагретых зонах (более 45 °С) и затем диффундировать в виде пара в более холодные зоны или области с пониженным давлением [25]. Это явление наиболее выражено при высокотемпературной сушке.

Поверхностное испарение происходит на верхнем и нижнем эпидермисе листьев и на поверхности стеблей, контактирующих с воздухом [8; 9]. Оно определяется дефицитом давления пара между поверхностью растения и окружающим воздухом, увеличение которого усиливает движущую силу испарения. На поверхности растения образуется относительно неподвижный аэродинамический пограничный слой, поэтому влага на границе фаз переходит в пар, поглощая скрытую теплоту [27]. Этот пар должен пройти через пограничный слой посредством диффузии и конвективного переноса, прежде чем попасть в основной воздушный поток.

Общий путь влагопереноса в тканях люцерны под действием градиента концентрации следующий: вода в жидкой форме перемещается к поверхности через цитоплазму, мембраны и межклеточные пространства, достигнув поверхности клеток, она поглощает тепловую энергию и испаряется, а образовавшийся водяной пар диффундирует через микроскопические устьица или поры кутикулы через аэродинамический пограничный

слой, затем попадает в основной воздушный поток и уносится им.

*Анализ закономерностей потери влаги в тканях люцерны.* Сушка люцерны удаляет влагу посредством подвода к ней тепла. Будучи пористым материалом с взаимосвязанными порами и капиллярами и влагонепроницаемым кутикулярным слоем, ткань люцерны теряет воду главным образом через устьица, межклеточные пространства и сосудистую систему посредством теплопереноса и конвекции [33]. С точки зрения процессов переноса это представляет собой тепло- и массообмен как внутри материала, так и вне его, что связано с двумя видами сопротивления: тепловое сопротивление и сопротивление массопереносу [8].

Обезвоживание люцерны протекает неравномерно и обычно имеет четко выраженные стадии (по классификации W. Zhang, et al.): период постоянной скорости сушки, первый период снижения скорости и второй период снижения скорости (рис. 2) [9].

Период постоянной скорости в основном связан с испарением свободной воды и характеризуется быстрой и относительно постоянной скоростью дегидратации со стабильной потерей влаги в единицу времени. На этом этапе испарение происходит в основном из свободной воды на поверхности растения и внутренней свободной воды, находящейся очень близко к поверхности [9]. Поверхности люцерны остаются постоянно насыщенными из-за того, что скорость внутренней диффузии жидкости соответствует скорости испарения с поверхности или превышает ее. Преобладает поверхностное испарение, причем скорость высыхания в основном зависит

от внешних условий: температуры окружающей среды, относительной влажности, скорости воздуха и скорости вентиляции. Более высокая температура, более низкая влажность, большая скорость

ветра и интенсивный воздухообмен ускоряют скорость высыхания [25]. Минимальное сопротивление внутреннему транспорту обеспечивает быстрое восполнение влаги на поверхности.

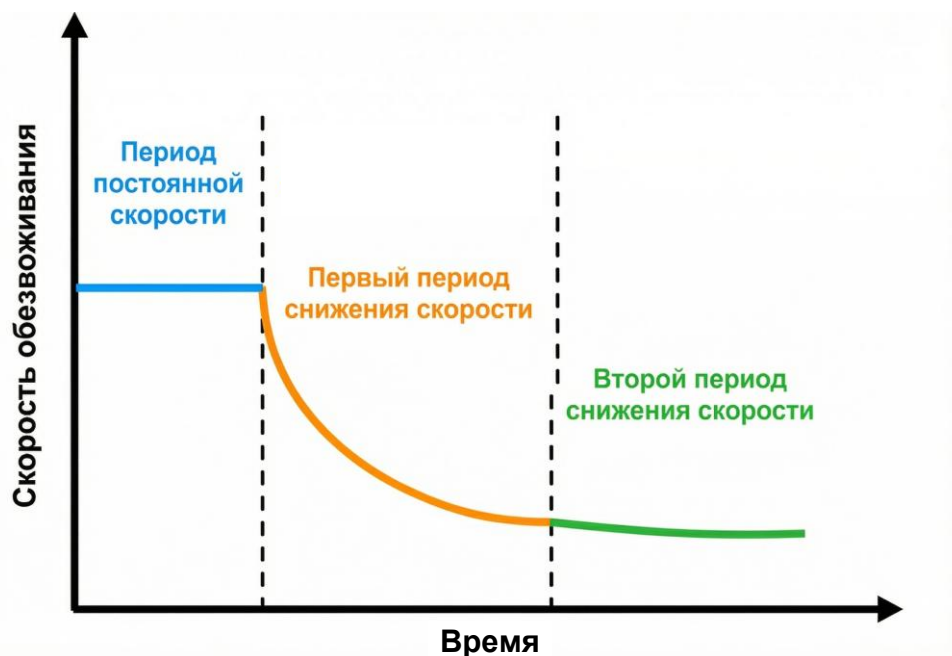


Рис. 2. Изменение скорости обезвоживания люцерны в процессе сушки (по классификации W. Zhang, et al. [9] и A.S. Mujumdar [24])

В первом периоде снижения скорости сушки растения люцерны происходит заметное снижение скорости удаления влаги, которая продолжает уменьшаться с течением времени [9]. К этому моменту свободная вода на поверхности в основном уже испарилась, и поверхность тканей перестает быть полностью влажной. Фронт испарения смещается внутрь материала, и лимитирующим фактором процесса становится внутренняя диффузия влаги, определяемая возрастающим сопротивлением клеточных стенок, клеточных мембран и межклеточных пространств тканей [8]. Влияние внешних условий сушки (температура, влажность, вентиляция, скорость ветра) на скорость обезвоживания ослабевают,

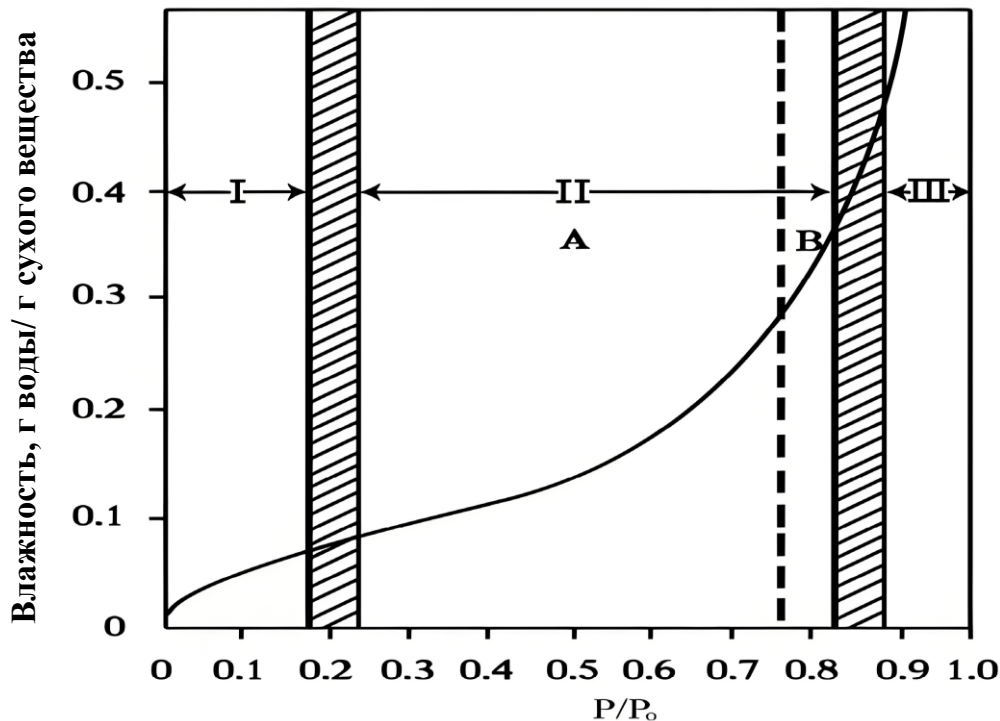
тогда как определяющее значение приобретают физические характеристики растения, такие как строение стеблей и листьев, толщина тканей, наличие воскового слоя и состояние устьиц [34]. Данный этап отличается значительной продолжительностью и составляет основную часть всего процесса сушки. В ходе этого этапа происходит деградация хлорофилла и смена окраски (от темно-зеленой к светло-зеленой), затвердевание стеблей, усиливается ломкость листьев [35].

Во втором периоде скорость обезвоживания асимптотически снижается по мере приближения значения влажности к равновесной. Скорость на данном этапе определяется главным образом свой-

ствами материала по связыванию влаги и равновесной относительной влажностью окружающего воздуха [8]. На этом этапе удаляется преимущественно связанная вода, которая прочно удерживается тканями растения и требует значительно большей энергии для разрушения химических связей, в частности водородных связей между молекулами воды и структурой материала [9]. Одновременно удлиняется путь диффузии влаги и возрастает сопротивление переносу, поскольку вода должна перемещаться из более глубоких, мелких и плотных структур. Внутреннее сопротивление диффузии влаги и сила ее связи с материалом становятся основными факторами, определяющими скорость процесса обезвоживания. Чрезмерно высокая температура на этом этапе может привести к термическим повреждениям, таким как реак-

ция Майяра, обугливание и потеря питательных веществ. В этот период зеленая масса люцерны приобретает типичные свойства сена: желтовато-коричневую или светло-коричневую окраску, хрупкие стебли, склонные к излому, и листья, легко отделяющиеся от стеблей.

Водная активность является ключевым параметром при выборе и обосновании режимов сушки люцерны и представляет собой показатель содержания свободной воды в продукте, отражающий энергетическое состояние воды [24; 36]. Нелинейная зависимость между влагосодержанием и водной активностью, формирующая S-образную изотерму десорбции, указывает на существование различных форм связи воды в растительном сырье при разных уровнях влажности, как показано на рис. 3 [9; 36].



**Рис 3. Обобщенная изотерма десорбции для сегмента продукта с низким содержанием влаги при температуре 20 °C (по W. Zhang, et al. [9]):  $P/P_0$  — отношение парциального давления водяного пара в окружающей среде к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре**

Изотермы десорбции листьев люцерны соответствуют зоне II на рис. 3, в которой вода находится в состоянии многослойной адсорбции, образуя переходную форму между связанной и свободной влагой [9]. Изотермы десорбции верхних, средних и прикорневых частей стебля люцерны имеют сходный характер при различных температурах, при этом отсутствуют выраженные точки перегиба, в которых касательная пересекает саму кривую. Температура существенно влияет на изотермы десорбции: при повышении температуры кривые для стеблей и листьев люцерны последовательно смещаются вправо и вниз, сохраняя при этом сходную форму [9; 26].

Это означает, что в процессе удаления влаги из люцерны основная ее часть находится в форме многослойно адсорбированной воды с умеренной энергией связи, при которой доминируют взаимодействия между молекулами воды, а не с тканями материала [8; 9]. С технологической точки зрения это указывает на то, что сушка протекает с падающей скоростью, ограниченной внутренней диффузией влаги, а не внешними условиями тепло- и массообмена, вследствие чего интенсивность обезвоживания постепенно снижается по мере уменьшения влагосодержания [26]. Требуемые энергозатраты остаются значительными, но ниже, чем при удалении прочно связанной воды. При этом материал становится чувствительным к режимам сушки, поскольку чрезмерное повышение температуры или времени воздействия может привести к деградации термолабильных компонентов (в частности каротиноидов и белков), тогда как недостаточная интенсивность процесса — к сохранению

повышенной активности воды и риску биохимических изменений [37]. Таким образом, для люцерны в зоне II оптимальными являются режимы обезвоживания с контролируемой температурой и интенсификацией внутреннего массопереноса (например, за счет диспергирования, перемешивания или комбинированных методов сушки), обеспечивающие баланс между скоростью удаления влаги и сохранением качества продукта.

*Особенности процесса обезвоживания фракций люцерны.* Следует обязательно учитывать, что зеленая масса люцерны состоит из двух различных фракций. Ее тонкие листья имеют большую площадь поверхности, что приводит к чрезвычайно быстрой потере воды на этапе постоянной скорости [34]. Однако стебли люцерны относительно толстые и обладают восковым кутикулярным слоем, что приводит к очень медленной потере воды на первом и, особенно, втором этапах падающей скорости сушки [34; 35]. Эти особенности фракции люцерны являются основной причиной чрезмерной сушки листьев и потери питательных веществ, что представляет собой ключевую техническую проблему обезвоживания люцерны. Несинхронная сушка стеблей и листьев является критическим фактором, влияющим на качество готового корма из люцерны, включая содержание белка и каротина (табл. 2).

Для повышения эффективности обезвоживания люцерны необходимо обеспечить выравнивание скорости сушки стеблей и листьев, поскольку именно различие в кинетике обезвоживания этих фракций является причиной пересушивания листьев и значительных потерь содержащихся в них питательных ве-

ществ. Механическая обработка (измельчение или плющение) заключается в повреждении стеблей с целью разрушения воскового кутикулярного слоя и частичного разрушения сосудистых тканей, что способствует ускоренному

выходу влаги из внутренних слоев растения. Без механической обработки стеблей листья высыхают значительно быстрее, становятся хрупкими и осыпаются при последующих технологических операциях.

## 2. Сравнительная характеристика свойств листьев и стеблей люцерны и их влияние на процесс сушки

Параметр	Листья люцерны	Стебли люцерны	Влияние на процесс сушки
Морфологические особенности	Тонкие, большая удельная поверхность, тонкая кутикула	Толстые, мощный восковой кутикулярный слой, плотная структура	Основная причина асинхронности сушки
Скорость потери влаги	Очень высокая (превышает скорость сушки стеблей в 3 раза)	Низкая, особенно в первом и втором периодах падающей скорости	Пересушивание листьев при достижении безопасной влажности стеблей; механические потери листовой фракции до 20–30 %
Доминирующий период сушки	Период постоянной скорости (быстрое испарение свободной воды)	1-й и, особенно, 2-й периоды падающей скорости (внутренняя диффузия связанной воды)	Листья достигают равновесной влажности значительно раньше стеблей
Сопротивление массопереносу	Низкое (много устьиц, тонкие ткани)	Высокое (восковой слой, длинный путь диффузии)	Необходимость предварительного плющения/измельчения стеблей для выравнивания кинетики
Содержание питательных веществ	Высокая концентрация протеина, каротиноидов, витаминов, антиоксидантов	Ниже (основная масса питательных веществ в листьях)	Потери листовой фракции → снижение общей кормовой ценности (белок, каротин)
Изменения при пересушивании	Быстрое затвердевание, повышенная ломкость, осыпание	Медленное затвердевание, сохраняют структуру дольше	Пересушивание листьев приводит к реакции Майяра и денатурации белков раньше, чем влажность стеблей достигает 12–18 %
Рекомендуемые меры коррекции	Контроль температуры и времени на поздних этапах	Механическая обработка (плющение, измельчение)	Комбинированные технологии + фракционное разделение

*Моделирование процесса сушки люцерны.* В процессе сушки растительного сырья, такого как люцерна, эффективность сушки и качество конечного про-

дукта тесно связаны с распределением температуры и влаги внутри материала [8]. Процесс тепло- и массообмена при сушке люцерны заключается в удалении

влаги за счет теплового потока и определяется множеством факторов, включая температуру сушки, градиент влажности и конструкцию сушильного оборудования. Изучение механизмов сушки традиционными экспериментальными методами затруднено и не всегда обеспечивает достаточную точность. С развитием вычислительной техники все большее число исследователей применяет численные методы и программное обеспечение для моделирования течения жидкости, теплообмена и массообмена в процессах сушки пищевых продуктов [9]. Численное моделирование позволяет глубже понять распределение температуры и влажности в люцерне при заданных технологических параметрах и тем самым раскрыть механизм переноса влаги.

Моделирование сушки люцерны развивается по нескольким взаимосвязанным направлениям: эмпирическое описание кинетики тонкого слоя, термодинамическое описание равновесной влажности и десорбционных изотерм, механистическое моделирование сопряженного тепло- и массообмена, а также аппаратно-ориентированные модели для конкретных типов сушилок.

Наиболее ранний и до сих пор широко применяемый подход основан на моделях десорбции и равновесной влажности. Это механистические модели, основанные на законах диффузии (в частности, законе Фика) и учитывающие внутреннее сопротивление массопереносу, эффективный коэффициент диффузии влаги и формы связи воды в тканях.

В важной работе А. Arabhosseini десорбционные изотермы листьев и стеблей люцерны были определены отдельно

в диапазоне 25–70 °С при относительной влажности 5–90 %, после чего данные сопоставляли с уравнениями различных моделей, причем наиболее подходящей оказалась модифицированная модель Halsey [26]. А. Arabhosseini математически доказал, что из-за морфологических различий фракций применение единой изотермы для всей зеленой массы приводит к существенным погрешностям в расчетах. Исследование подтвердило различия в поведении стеблей и листьев при сушке. Тем самым было показано, что листья и стебли нельзя рассматривать как единый объект сушки: их сорбционные свойства различаются, а значит, отличаются и условия достижения конечной влажности. Результаты, изложенные в этой статье, стали основой для последующих моделей массопереноса в процессе сушки.

Позднее D. M. Gao продолжил эту линию в исследованиях, уточнив модели десорбции для стеблей и листьев люцерны и оптимизировав параметры описания изотерм [25]. В логике процесса сушки это означает более точное задание равновесной влажности и, следовательно, более надежный расчет конечной стадии обезвоживания. Автор подтвердил влияние температуры на сдвиг изотерм и подчеркнул, что основная влага находится в стадии многослойной адсорбции, что и определяет падающую скорость сушки и необходимость контроля градиентов влажности и температуры.

Следующая группа научных работ посвящена кинетическим моделям тонкого слоя и сопряженному описанию влагосодержания и температуры в процессе сушки. Эмпирические и полуэм-

пирические модели тонкослойной сушки (модели Льюиса, Пейджа, Хендерсона–Пабиса и их модификации) описывают кинетику обезвоживания на основе экспериментальных кривых потери влаги и широко используются для прогнозирования времени сушки и влияния внешних факторов (температуры, скорости воздуха).

В фундаментальном исследовании J. A. Siles кинетику сушки стеблей, листьев и целого растения моделировали одновременно по влажности и температуре в фиксированном слое при конвективной сушке. Его модель учитывает взаимосвязь между температурой материала и скоростью удаления влаги, что позволяет более точно прогнозировать изменение качества корма в процессе сушки. Модель адекватно описывала 94,4 % экспериментальных данных по влажности для стеблей и 70,1 % для листьев в пределах доверительного интервала  $\pm 15$  % [8]. При этом для стеблей наблюдалось лучшее совпадение расчетных и экспериментальных кривых, что объясняется более однородной структурой их ткани по сравнению с листьями. Это важный результат, показывающий, что для моделирования сушки люцерны одной только аппроксимации кривой изменения влажности недостаточно, необходимо учитывать и тепловое состояние материала, иначе модель теряет физическую интерпретируемость.

Сходную по направлению, но более прикладную работу выполнил Н. Darvishi, который математически моделировал тонкослойную сушку люцерны [28]. Его модель позволила рассчитать эффективный коэффициент диффузии и энергозатраты, показав, что микроволновая

сушка ускоряет процесс, но требует тщательного контроля температуры во избежание перегрева термолабильных веществ.

М. Tasova исследовал кинетику сушки люцерны при температуре 50, 60 и 70 °С и на открытом воздухе, подбирая наиболее пригодные модели для описания кинетики обезвоживания тонкого слоя. Было показано, что сортовые различия и температура заметно влияют на длительность сушки и на точность аппроксимации [38]. Его анализ показал, что биологическая вариативность сортов люцерны влияет на профиль сушки: для разных сортов наилучшую сходимость с экспериментом демонстрировали разные модели, что, по его мнению, подчеркивает невозможность создания одной универсальной эмпирической модели сушки.

В более новой работе М. Kaplan сравнительно оценил разные способы сушки люцерны и установил, что ее кинетику лучше всего описывает экспоненциальная модель Jena–Das, а комбинированная сушка (конвективная + микроволновая) обеспечила наиболее благоприятное сочетание качества продукта и энергозатрат [4].

Для промышленной сушки особое значение имеют математические модели, ориентированные на конкретные типы сушильных установок. Х. Zheng использовал улучшенный метод размерностного анализа для моделирования сушки люцерны в барабанной сушилке и показал, что технологические параметры этого процесса могут быть сведены к обобщенным критериальным зависимостям [39]. Им были выведены безразмерные критерии, интегрирующие параметры

процесса, такие как влажность сырья, производительность, частота вращения барабана, температура и скорость нагретого воздуха. Было установлено, что температура сушки является доминирующим фактором, влияющим на скорость обезвоживания и качество продукта. Разработанные эмпирические уравнения с коэффициентами корреляции выше 0,99 позволяют прогнозировать взаимное влияние параметров на характеристики сушки.

Е. Arinze предложил математическую модель фракционной сушки и аэродинамического разделения листьев и стеблей в барабанной сушилке, которая математически описывает не только влагоперенос, но и фракционирование зеленой массы, что важно не только для моделирования кинетики процесса, но и для создания условий для сохранения питательной ценности корма [35]. Он установил, что скорость сушки листьев превышает скорость сушки стеблей более чем в три раза.

Т. Vartzanas применил CFD-подход к сушке зеленой массы люцерны в поле, показав пространственную неоднородность микроклимата и возможность использовать модель как инструмент принятия решений после скашивания [40]. Его двухмерная модель позволила визуализировать распределение влажности внутри валка с учетом солнечной радиации и скорости ветра.

Современный этап развития моделирования сушки люцерны представлен работой D. Friso, который адаптировал дифференциальные уравнения массо- и теплопереноса для создания алгоритмов регулирования параметров в реальном времени. Его модель основана на реше-

нии системы дифференциальных уравнений, описывающих тепло- и массообмен между продуктом и воздухом в двух зонах сушилки: зоне постоянной скорости сушки и зоне падающей скорости. В его работе для барабанной сушилки люцерны построена наиболее полная модель с экспериментальной верификацией, максимальная относительная ошибка которой составила всего 2,4 % [41].

В 2025 г. X. Gao предложил динамическую модель сушки тюков люцерны в подвижном слое солнечно-воздушным тепловым насосом на основе нейронных сетей с использованием модели Пейджа, позволившую точно прогнозировать влажность, время и энергопотребление процесса сушки [6].

В целом эволюция моделей сушки люцерны идет от простых эмпирических моделей к комплексным многомасштабным подходам, т. е. от описания «средней» кривой обезвоживания к многоуровневому расчету, учитывающему морфологическую неоднородность, равновесную влажность, тепловой режим, энергетику и управление процессом. Перспективными направлениями остаются интеграция ИИ (искусственного интеллекта), комбинированные системы с возобновляемыми источниками энергии для промышленных установок. Наиболее перспективными выглядят модели, сочетающие физическую интерпретируемость с возможностью оптимизации режимов сушки и сохранения качества листовой фракции. Для люцерны это принципиально, поскольку практическая задача состоит не только в достижении заданной влажности, но и в минимизации пересушивания листьев, механических потерь и деградации питательных веществ.

В последние годы выявляется тенденция к интеграции традиционных диффузионных моделей с методами искусственного интеллекта. Так, применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования кинетики сушки сельскохозяйственных культур показывает, что алгоритмы машинного обучения способны предсказывать влажность люцерны с меньшей среднеквадратичной ошибкой по сравнению с классическими эмпирическими уравнениями, так как они способны неявно учитывать сложную нелинейную связь между формами воды в тканях [42]. Кроме того, развитие CFD-моделирования позволяет получать трехмерную картину течения сушильного агента вокруг сложных геометрических форм измельченной люцерны, однако применение этих методов к данному конкретному виду сырья пока остается ограниченным из-за высокой вычислительной стоимости и недостатка данных о микроструктуре растительных тканей [43].

Несмотря на значительный прогресс в области моделирования процесса сушки люцерны, существующие подходы имеют ограничения. Большинство моделей не учитывают асинхронность сушки стеблей и листьев в достаточной мере и рассматривают зеленую массу люцерны как гомогенную среду или требуют раздельного ввода значений параметров для стеблей и листьев, что приводит к погрешностям при прогнозировании качества конечного продукта. До сих пор отсутствуют комплексные модели, способные в едином вычислительном пространстве симулировать асинхронный влагоперенос в стеблях и листьях с учетом деградации их структурных свойств

в процессе нагрева. Кроме того, модели энергопотребления часто не интегрированы с моделями качества корма, что затрудняет оптимизацию по нескольким критериям одновременно. Перспективным направлением исследований является разработка комплексных моделей, объединяющих кинетику влагопереноса, термодинамику процесса и биохимические изменения в тканях люцерны.

**Заключение.** Систематический анализ научной литературы позволил структурировать современные знания о механизмах обезвоживания зеленой массы люцерны. Процесс ее сушки представляет собой сложное явление тепло- и массообмена. Его протекание определяется неоднородным распределением влаги в тканях растения.

В тканях люцерны выделяют три формы воды: свободную, физико-химически связанную и химически связанную. Такое разделение объясняет, почему кинетика сушки зеленой массы имеет нелинейный характер. Кроме того, оно обосновывает резкое увеличение энергозатрат на финальных этапах сушки.

В процессе сушки люцерны по мере обезвоживания происходит смена физиологической стадии на биохимическую. При этом механизмы влагопереноса кардинально меняются. На начальном этапе доминирует поверхностное испарение и мембранный транспорт в живых тканях. На поздних стадиях — только диффузионное перемещение прочно связанной влаги через клеточные структуры.

Выявлено ключевое технологическое противоречие процесса сушки: стебли и листья люцерны обезвоживаются асинхронно. Тонкие листья с большой удель-

ной площадью поверхности теряют влагу более чем в три раза быстрее толстых стеблей. Последние защищены восковым кутикулярным слоем, который препятствует испарению. При традиционной сушке, к моменту, когда стебли достигают требуемой влажности, листья уже критически пересушены, из-за чего становятся хрупкими и разрушаются при транспортировке. Поскольку именно в листьях концентрируются каротиноиды и витамины, такая асинхронность снижает питательную ценность корма. Решение проблемы требует предварительного механического воздействия на стебли для выравнивания кинетических кривых сушки фракций, а также подбора адаптивных режимов сушки.

Анализ подходов к математическому моделированию сушки люцерны показывает эволюцию от простых эмпирических уравнений сушки тонкого слоя к сложным механистическим моделям сопряженного тепло- и массопереноса. Современные методы, такие как CFD-моделирование и искусственные нейронные сети, обеспечивают высокую точность прогнозирования для конкретных конструкций сушилок. Однако существует существенный пробел в иссле-

дованиях: большинство моделей рассматривает растительную массу как условно однородную среду. Отсутствуют алгоритмы, способные в едином пространстве моделировать асинхронный влагоперенос стеблей и листьев с одновременным учетом термодеструкции питательных веществ.

Обзор показал необходимость перехода к созданию интегрированных цифровых двойников процесса сушки люцерны. Перспективное развитие кормопроизводства требует многомасштабных моделей, объединяющих термо- и гидродинамику, кинетику асинхронного обезвоживания фракций люцерны, биохимическую деградацию питательных веществ и энергетический баланс оборудования. Сочетание физически обоснованных диффузионных моделей с алгоритмами машинного обучения открывает путь к системам интеллектуального управления сушильными аппаратами. Такие системы смогут в реальном времени оптимизировать параметры процесса, минимизировать потери питательных веществ листовой фракции и находить компромисс между энергоэффективностью и сохранением кормовой ценности люцерны.

## Литература

1. Antoniv S., Kolisnyk S., Zapruta O. Люцерна: історія походження назви, агроекологічне значення, основа високобілкових кормів // Корми и кормовиробництво. – 2023. – Т. 96. – С. 208–214. – EDN DSMZYI. – DOI 10.31073/kormovyrobnytsvo202396-19.
2. Srisaikham S. A comparison of nutritional values, bioactive compounds, amino acids, and antioxidant activities of alfalfa (*Medicago sativa* L.) plant and pellet for use as beneficial material ruminant feed // Walailak Journal of Science and Technology (WJST). – 2021. – Vol. 18. – № 5. – EDN JSYPIG. – DOI 10.48048/wjst.2021.10312.
3. Sustainable biorefinery of alfalfa (*Medicago sativa* L.) / H. El-Ramady, N. Abdalla, S. Kovacs, et al. // Egyptian Journal of Botany. – 2020. – Vol. 60. – № 3. – Pp. 611–629. – DOI 10.21608/ejbo.2020.37749.1532.
4. Comparison of drying methods for biochemical composition, energy aspects, and color properties of alfalfa hay / M. Kaplan, N. Çetin, B. Çiftci, S. Karpuzcu // Biomass Conversion and Biorefinery. –

2025. – Vol. 15. – Pp. 10331–10346. – DOI 10.1007/s13399-024-05920-8.
5. Production of alfalfa hay under different drying methods / M. A. Neres, D. D. Castagnara, E. E. Mesquita, M. A. Zambom // *Revista Brasileira de Zootecnia*. – 2010. – Vol. 39. – № 8. – Pp. 1676–1683. – DOI 10.1590/S1516-35982010000800008.
  6. A dynamic drying process: Mathematical modeling and energy consumption optimization of alfalfa bales using hot air drying / X. Gao, Ch. Xuan, Zh. Tang, et al. // *Renewable Energy*. – 2025. – Vol. 246. – EDN JNAHQU. – DOI 10.1016/j.renene.2025.122961.
  7. Design and analysis of new solar-powered sustainable dryers: Alfalfa crop / M. Koşan, G. Karaca Dolgun, B. Aktekel, et al. // *Journal of Food Process Engineering*. – 2023. – Vol. 46. – № 3. – EDN JMCEOB. – DOI 10.1111/jfpe.14253.
  8. Kinetics of alfalfa drying: simultaneous modelling of moisture content and temperature / J. A. Siles, P. González-Tello, M. A. Martín, A. Martín // *Biosystems Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 185–196. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2014.10.007.
  9. A Review of alfalfa drying technology and equipment throughout the whole process / W. Zhang, H. Cen, W. Guo, P. She // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – № 22. – EDN VIKRAW. – DOI 10.3390/app152212268.
  10. Du J., Sun Z., Chen Z. Design and experiment of drying equipment for alfalfa bales // *Agriculture*. – 2025. – Vol. 15. – № 19. – EDN HEMWXY. – DOI 10.3390/agriculture15192000.
  11. Hot air drying, impact of infrared drying, and combined hot air-infrared drying on alfalfa drying quality and performance / X. Sun, Z. Guo, G. Wang, et al. // *INMATEH-Agricultural Engineering*. – 2023. – Vol. 71. – № 3. – Pp. 441–450. – DOI 10.35633/inmateh-71-38.
  12. Du J., Liu Ch. Experimental study on drying characteristics of alfalfa hay bales using hot air convection // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – № 7. – EDN UZXVDX. – DOI 10.3390/app15073921.
  13. Effects of corn hardness and drying temperature on digestibility of energy and nutrients in diets fed to growing pigs / C. D. Espinosa, J. Cabañas-Ojeda, E. O. Oviedo-Rondón, H. H. Stein // *Journal of Animal Science*. – 2023. – Vol. 101. – EDN PUNZYN. – DOI 10.1093/jas/skad124.
  14. Alfalfa quality improvement and loss reduction technology advances / Si. Yi. Wang, G. L. Yang, Yu. Yu. Jing, et al. // *Frontiers in Animal Science*. – 2025. – Vol. 6. – EDN AAUAOI. – DOI 10.3389/fanim.2025.1550492.
  15. Characterization of forage quality, phenolic profiles, and antioxidant activity in alfalfa (*Medicago sativa* L.) / D. Horvat, M. Viljevac Vuletić, L. Andrić, et al. // *Plants*. – 2022. – Vol. 11. – № 20. – EDN QOPOTE. – DOI 10.3390/plants11202735.
  16. Dynamic drying characteristics of alfalfa under solar energy – heat pump combined drying conditions / W. B. Guo, Sh. Cheng, Z. K. Cui, et al. // *INMATEH-Agricultural Engineering*. – 2024. – Vol. 73. – № 2. – Pp. 569–580. – DOI 10.35633/inmateh-73-48.
  17. Энергетика и кинетика процессов дегидратации растительного сырья / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, А. К. Бурдо, и др. // *Проблемы региональной энергетики*. – 2022. – № 3 (55). – С. 111–129. – EDN MSHZJJ. – DOI 10.52254/1857-0070.2022.3-55.09.
  18. Ertekin C., Firat M. Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2017. – Vol. 57. – № 4. – Pp. 701–717. – DOI 10.1080/10408398.2014.910493.
  19. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models / A. K. Babu, G. Kumaresan, V. A. Aroul, R. Velraj // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 90. – Pp. 536–556. – DOI 10.1016/j.rser.2018.04.002.
  20. Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application / M. D. J. Peters, C. Marnie, H. Colquhoun, et al. // *Systematic Reviews*. – 2021. – Vol. 10. – № 1. – Pp. 1–6. – EDN LKIVHU. – DOI 10.1186/s13643-021-01821-3.
  21. Siddaway A. P., Wood A. M., Hedges L. V. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses // *Annual Review of*

- Psychology. – 2019. – Vol. 70. – Pp. 747–770. – DOI 10.1146/annurev-psych-010418-102803.
22. Mattos S. M., Cestari V. R. F., Moreira T. M. M. Scoping protocol review: PRISMA-ScR guide refinement // *Revista de Enfermagem da UFPI*. – 2023. – Vol. 12. – № 1. – EDN KCSPWW. – DOI 10.26694/reufpi.v12i1.3062.
  23. Mengist W., Soromessa T., Legese G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research // *MethodsX*. – 2020. – Vol. 7. – EDN HGCMGR. – DOI 10.1016/j.mex.2019.100777.
  24. Mujumdar A. S. *Handbook of industrial drying*. 4th ed. – New York : CRC Press, 2015. – P. 1348 – EDN WULFVD. – DOI 10.1201/b17208.
  25. Gao D. M., Huang Z. G., Li J., Wang D. C. Water desorption isotherm models and parameters optimization of Alfalfa (*Medicago sativa* L) stems and leaves // *Acta Agrestia Sinica*. – 2017. – Vol. 25. – № 4. – Pp. 851–856. – DOI 10.11733/j.issn.1007-0435.2017.04.024.
  26. Arabhosseini A., Huisman W., Müller J. Modeling of desorption of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) stems and leaves // *Industrial Crops and Products*. – 2011. – Vol. 34. – Pp. 1550–1555. – DOI 10.1016/j.indcrop.2011.05.018.
  27. Yeşilata B., Aktacir M. A. A simple moisture transfer model for drying of sliced foods // *Applied Thermal Engineering*. – 2009. – Vol. 29. – № 4. – Pp. 748–759. – EDN MTNTWT. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.048.
  28. Darvishi H. Mathematical modeling, moisture diffusion and energy consumption in thin layer drying of alfalfa // *Middle-East Journal of Scientific Research*. – 2012. – Vol. 12. – № 4. – Pp. 511–516. – DOI 10.5829/idosi.mejsr.2012.12.4.1700.
  29. Drying procedures affect non-structural carbohydrates and other nutritive value attributes in forage samples / S. Pelletier, G. F. Tremblay, A. Bertrand, et al. // *Animal Feed Science and Technology*. – 2010. – Vol. 157. – № 3–4. – Pp. 139–150. – DOI 10.1016/j.anifeedsci.2010.02.010.
  30. Andueza D., Delgado I., Muñoz F. Effect of lucerne preservation method on the feed value of forage // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2009. – Vol. 89. – № 12. – Pp. 1991–1996. – DOI 10.1002/jsfa.3676.
  31. Ghorbani Z., Hemmat A., Masoumi A. A. Physical and mechanical properties of alfalfa grind as affected by particle size and moisture content // *Journal of Agricultural Science and Technology*. – 2012. – Vol. 14. – № 1. – Pp. 65–76. URL [https://www.researchgate.net/publication/265877094\\_Physical\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Alfalfa\\_Grind\\_as\\_Affected\\_by\\_Particle\\_Size\\_and\\_Moisture\\_Content](https://www.researchgate.net/publication/265877094_Physical_and_Mechanical_Properties_of_Alfalfa_Grind_as_Affected_by_Particle_Size_and_Moisture_Content).
  32. Khan Md. I. H., Batuwatta-Gamage C. P., Karim M. A., Gu Y. Fundamental understanding of heat and mass transfer processes for physics-informed machine learning-based drying modelling // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – № 24. – EDN SQFVRM. – DOI 10.3390/en15249347.
  33. Effects of drying procedures on chemical composition and nutritive value of alfalfa forage / F. Jančík, P. Kubelková, V. Kubát, et al. // *South African Journal of Animal Science*. – 2017. – Vol. 47. – № 1. – Pp. 96–101. – DOI 10.4314/sajas.v47i1.14.
  34. Adapa P. K., Schoenau G. J., Arinze E. A. Fractionation of alfalfa into leaves and stems using a three pass rotary drum dryer // *Biosystems Engineering*. – 2005. – Vol. 91. – № 4. – Pp. 455–463. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2004.12.003.
  35. Aerodynamic separation and fractional drying of alfalfa leaves and stems — a review and new concept / E. A. Arinze, G. J. Schoenau, S. Sokhansanj, P. Adapa // *Drying Technology*. – 2003. – Vol. 21. – № 9. – Pp. 1669–1698. – DOI 10.1081/DRT-120025503.
  36. Iji S. I., Inyang U. E., Etuk B. R. Models for the development of sorption isotherms: A review // *American Journal of Food Science and Technology*. – 2025. – Vol. 13. – № 2 – Pp. 27–37. – EDN NIUNKL. – DOI 10.12691/ajfst-13-2-2.
  37. Mahmoud A., Arlabosse P., Fernandez A. Application of a thermally assisted mechanical dewatering process to biomass // *Biomass and Bioenergy*. – 2011. – Vol. 35. – № 1. – Pp. 288–297. –

EDN YCAINH. – DOI 10.1016/j.biombioe.2010.08.037.

38. Taşova M., Polatçı H., Özkurt M. Mathematical modelling of thin layer drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties at different temperatures // Turkish Journal of Agriculture — Food Science and Technology. – 2020. – Vol. 8. – Special issue № 1. – Pp. 139–144. – DOI 10.24925/turjaf.v8isp1.139-144.4059.
39. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method / X. Zheng , Y. Lan, J. Wang, H. Dong // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2009. – Vol. 2. – № 3. – Pp. 76–82. – DOI 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082.
40. A numerical modelling approach for biomass field drying / T. Bartzanas, D. D. Bochtis, C. G. Sørensen, et al. // Biosystems Engineering. – 2010. – Vol. 106. – № 4. – Pp. 458–469. – EDN NXBYLR. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2010.05.010.
41. Friso D. Mathematical modelling of rotary drum dryers for alfalfa drying process control // Inventions. – 2023. – Vol. 8. – № 1. – EDN PURCFN. – DOI 10.3390/inventions8010011.
42. Onwude D. I., Hashim N., Chen G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops // Trends in Food Science & Technology. – 2016. – Vol. 57. – Pp. 132–145. – DOI 10.1016/j.tifs.2016.09.012.
43. Defraeye T. Advanced computational modelling for drying processes – A review // Applied Energy. – 2014. – Vol. 131. – Pp. 323–344. – EDN UUJAQT. – DOI 10.1016/j.apenergy.2014.06.027.

## References

1. Antoniv S., Kolisnyk S., Zapruta O. *Lytserna: istoriya pokhodzhennya nazvi, agroekologichne znachennya, osnova visokobilkovikh kormiv* [Alfalfa: history of the name origin, agroecological importance, basis for high-protein feed]. Feeds and Feed Production. 2023. Vol. 96. Pp. 208-214. DOI 10.31073/kormovyrobnytsvo202396-19.
2. Srisaikhram S. A comparison of nutritional values, bioactive compounds, amino acids, and antioxidant activities of alfalfa (*Medicago sativa* L.) plant and pellet for use as beneficial material ruminant feed. Walailak Journal of Science and Technology (WJST). 2021. Vol. 18. No. 5. DOI 10.48048/wjst.2021.10312.
3. El-Ramady H., Abdalla N., Kovacs S., et al. Sustainable biorefinery and production of alfalfa (*Medicago sativa* L.). Egyptian Journal of Botany. 2020. Vol. 60. No. 3. Pp. 621-639. DOI 10.21608/ejbo.2020.37749.1532.
4. Kaplan M., Çetin N., Çiftçi B., Karpuzcu S. Comparison of drying methods for biochemical composition, energy aspects, and color properties of alfalfa hay. Biomass Conversion and Biorefinery. 2025. Vol. 15. Pp. 10331-10346. DOI 10.1007/s13399-024-05920-8.
5. Neres M.A., Castagnara D.D., Mesquita E.E., Zambom M.A. Production of alfalfa hay under different drying methods. Revista Brasileira de Zootecnia. 2010. Vol. 39. No. 8. Pp. 1676-1683. DOI 10.1590/S1516-35982010000800008.
6. Gao X., Xuan C., Tang Z., et al. A dynamic drying process: Mathematical modeling and energy consumption optimization of alfalfa bales using hot air dryin. Renewable Energy. 2025. Vol. 246. DOI 10.1016/j.renene.2025.122961.
7. Koşan M., Karaca Dolgun G., Aktekelî B., et al. Design and analysis of new solar-powered sustainable dryers: Alfalfa crop. Journal of Food Process Engineering. 2023. Vol. 46. No. 3. DOI 10.1111/jfpe.14253.
8. Siles J.A., González-Tello P., Martín M.A., Martín A. Kinetics of alfalfa drying: simultaneous modelling of moisture content and temperature. Biosystems Engineering. 2015. Vol. 129. Pp. 185-196. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2014.10.007.
9. Zhang W., Cen H., Guo W., She P. A Review of alfalfa drying technology and equipment throughout the whole process. Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 22. DOI 10.3390/app152212268.

10. Du J., Sun Z., Chen Z. Design and experiment of drying equipment for alfalfa bales. *Agriculture*. 2025. Vol. 15. DOI 10.3390/agriculture15192000.
11. Sun X., Guo Z., Wang G., et al. Hot air drying, impact of infrared drying, and combined hot air-infrared drying on alfalfa drying quality and performance. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 71. No. 3. Pp. 441-450. DOI 10.35633/inmateh-71-38.
12. Du J., Liu C. Experimental study on drying characteristics of alfalfa hay bales using hot air convection. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 7. DOI 10.3390/app15073921.
13. Espinosa C.D., Cabañas-Ojeda J., Oviedo-Rondón E.O., Stein H.H. Effects of corn hardness and drying temperature on digestibility of energy and nutrients in diets fed to growing pigs. *Journal of Animal Science*. 2023. Vol. 101. DOI 10.1093/jas/skad124.
14. Wang S.Y., Yang G.L., Jing Y.Y., et al. Alfalfa quality improvement and loss reduction technology advances. *Frontiers in Animal Science*. 2025. Vol. 6. DOI 10.3389/fanim.2025.1550492.
15. Horvat D., Viljevac Vuletić M., Andrić L., et al. Characterization of forage quality, phenolic profiles, and antioxidant activity in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plants*. 2022. Vol. 11. No. 20. DOI 10.3390/plants11202735.
16. Guo W.B., Cheng S., Cui Z.K., et al. Dynamic drying characteristics of alfalfa under solar energy-heat pump combined drying conditions. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2024. Vol. 73. No. 2. Pp. 569-580. DOI 10.35633/inmateh-73-48.
17. Burdo O.G., Terziev S.G., Burdo A.K., et al. *Ehnergetika i kinetika processov degidratacii rastitel'nogo syr'ja* [Energetics and kinetics of plant raw material dehydration processes]. *Regional Energetics Problems*. 2022. No. 3. Pp. 111-129. DOI 10.52254/1857-0070.2022.3-55.09.
18. Ertekin C., Firat M.Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. Vol. 57. No. 4. Pp. 701-717. DOI 10.1080/10408398.2014.910493.
19. Babu A.K., Kumaresan G., Aroul V.A., Velraj R. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90. Pp. 536-556. DOI 10.1016/j.rser.2018.04.002.
20. Peters M.D.J., Marnie C., Colquhoun H., et al. Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application. *Systematic Reviews*. 2021. Vol. 10. Pp. 1–6. DOI 10.1186/s13643-021-01821-3.
21. Siddaway A.P., Wood A.M., Hedges L.V. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. *Annual Review of Psychology*. 2019. Vol. 70. Pp. 747-770. DOI 10.1146/annurev-psych-010418-102803.
22. Mattos S.M., Cestari V.R.F., Moreira T.M.M. Scoping protocol review: PRISMA-ScR guide refinement. *Revista de Enfermagem da UFPI*. 2023. Vol. 12. No. 1. DOI 10.26694/reufpi.v12i1.3062.
23. Mengist W., Soromessa T., Legese G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*. 2020. Vol. 7. DOI 10.1016/j.mex.2019.100777.
24. Mujumdar A.S. *Handbook of industrial drying*, 4th ed. New York. CRC Press. 2015. Pp. 45–49. DOI 10.1201/b17208.
25. Gao D.M., Huang Z.G., Li J., Wang D.C. Water desorption isotherm models and parameters optimization of Alfalfa (*Medicago sativa* L) stems and leaves. *Acta Agrestia Sinica*. 2017. Vol. 25. No. 4. Pp. 851–856. DOI 10.11733/j.issn.1007-0435.2017.04.024.
26. Arabhosseini A., Huisman W., Müller J. Modeling of desorption of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) stems and leaves. *Industrial Crops and Products*. 2011. Vol. 34. Pp. 1550-1555. DOI 10.1016/j.indcrop.2011.05.018.
27. Yeşilata B., Aktacir M.A. A simple moisture transfer model for drying of sliced foods. *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29. No. 4. Pp. 748-759. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.048.

28. Darvishi H. Mathematical modeling, moisture diffusion and energy consumption in thin layer drying of alfalfa. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2012. Vol. 12. No. 4. Pp. 511-516. DOI 10.5829/idosi.mejsr.2012.12.4.1700.
29. Pelletier S., Tremblay G. F., Bertrand A., et al. Drying procedures affect non-structural carbohydrates and other nutritive value attributes in forage samples. *Animal Feed Science and Technology*. 2010. Vol. 157. No. 3-4. Pp. 139-150. DOI 10.1016/j.anifeedsci.2010.02.010.
30. Andueza D., Delgado I., Muñoz F. Effect of lucerne preservation method on the feed value of forage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2009. Vol. 89. No. 12. Pp. 1991-1996. DOI 10.1002/jsfa.3676.
31. Ghorbani Z., Hemmat A., Masoumi A.A. Physical and mechanical properties of alfalfa grind as affected by particle size and moisture content. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012. Vol. 14. No. 1. Pp. 65–76. URL [https://www.researchgate.net/publication/265877094\\_Physical\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Alfalfa\\_Grind\\_as\\_Affected\\_by\\_Particle\\_Size\\_and\\_Moisture\\_Content](https://www.researchgate.net/publication/265877094_Physical_and_Mechanical_Properties_of_Alfalfa_Grind_as_Affected_by_Particle_Size_and_Moisture_Content).
32. Khan M.I.H., Batuwatta-Gamage C.P., Karim M.A., Gu Y. Fundamental understanding of heat and mass transfer processes for physics-informed machine learning-based drying modeling. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 23. DOI 10.3390/en15249347.
33. Jančík F., Kubelková P., Kubát V., Koukolová M., Homolka P. Effects of drying procedures on chemical composition and nutritive value of alfalfa forage. *South African Journal of Animal Science*. 2017. Vol. 47. No. 1. Pp. 96-101. DOI 10.4314/sajas.v47i1.14.
34. Adapa P. K., Schoenau G. J., Arinze E. A. Fractionation of alfalfa into leaves and stems using a three pass rotary drum dryer. *Biosystems Engineering*. 2005. Vol. 91. No. 4. Pp. 455-463. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2004.12.003.
35. Arinze E.A., Schoenau G.J., Sokhansanj S., Adapa P. Aerodynamic separation and fractional drying of alfalfa leaves and stems—a review and new concept. *Drying Technology*. 2003. Vol. 21. No. 9. Pp. 1669-1698. DOI 10.1081/DRT-120025503.
36. Iji S. I., Inyang U. E., Etuk B. R. Models for the development of sortpion isotherms: A review. *American Journal of Food Science and Technology*. 2025. Vol. 13. No. 2. Pp. 27–37. DOI 10.12691/ajfst-13-2-2.
37. Mahmoud A., Arlabosse P., Fernandez A. Application of a thermally assisted mechanical dewatering process to biomass. *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35. No. 1. Pp. 288-297. DOI 10.1016/j.biombioe.2010.08.037.
38. Taşova M., Polatçı H., Özkurt M. Mathematical modelling of thin layer drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties at different temperatures. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*. 2020. Vol. 8. Special issue No. 1. Pp. 139-144. DOI 10.24925/turjaf.v8isp1.139-144.4059.
39. Zheng X., Lan Y., Wang J., Dong H. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2. No. 3. Pp. 76-82. DOI 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082.
40. Bartzanas T., Bochtis D.D., Sørensen C.G., et al. A numerical modelling approach for biomass field drying. *Biosystems Engineering*. 2010. Vol. 106. No. 4. Pp. 458-469. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2010.05.010.
41. Friso D. Mathematical modelling of rotary drum dryers for alfalfa drying process control. *Inventions*. 2023. Vol. 8. No. 1. DOI 10.3390/inventions8010011.
42. Onwude D.I., Hashim N., Chen G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*. 2016. Vol. 57. Pp. 132–145. DOI 10.1016/j.tifs.2016.09.012.
43. Defraeye T. Advanced computational modelling for drying processes – A review. *Applied Energy*. 2014. Vol. 131. Pp. 323-344. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.06.027.



## Памяти ученого

*15 марта 2026 г. исполнилось 95 лет со дня рождения выдающегося ученого России в области луговодства, доктора сельскохозяйственных наук, профессора, Заслуженного деятеля науки Российской Федерации Александра Андреевича Зотова.*

**Александр Андреевич Зотов** — известный в нашей стране и за рубежом ученый в области кормопроизводства. Его научная деятельность была связана с разработкой теоретических основ и энергосберегающих, экологически безопасных технологий лугового кормопроизводства применительно к различным типам почв лесной, лесостепной и степной зон страны, а также горных районов Кавказа, Урала, Алтая, Тянь-Шаня, Памиро-Алая.

После окончания Ульяновского СХИ в 50-е годы прошлого века Александр Андреевич работал агрономом в колхозе, главным агрономом машинно-тракторной станции и райсельхозуправления, а с 1961 г. трудился во ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса, где прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего отделом луговодства.

В 1964–1965 гг. он проходил научную стажировку по лугопастбищному хозяйству в ГДР, принимал активное участие в работе XII и XIII Международных конгрессов Европейской Федерации по луговодству (Англия, 1968 г.).

А. А. Зотовым разработаны системы эффективных ресурсосберегающих приемов по созданию и рациональному использованию различных типов высокопродуктивных сенокосов, многоукосных травостоев и специализированных культурных пастбищ. Разработанные адаптивные технологии улучшения при-

родных кормовых угодий позволяют повысить продуктивность угодий в два-четыре раза, питательность кормов на 30–50 %, увеличить экологическую безопасность производства сена и пастбищной травы, предотвратить деградацию фитоценозов, снизить эрозию почвы, сохранить и повысить ее плодородие.

Отличительная черта научных разработок А. А. Зотова — практическая направленность. Много сил и времени он отдавал внедрению результатов научных исследований в производство. Под его научно-методическим руководством и при его непосредственном участии было улучшено свыше 11 тыс. га кормовых угодий.

Весомый вклад А. А. Зотов внес в укрепление научно-технического сотрудничества ученых России, ГДР, Армении, Кыргызстана по вопросам улучшения и рационального использования горных сенокосов и пастбищ.

Много внимания А. А. Зотов уделял подготовке научных кадров, повышению квалификации руководящих работников и специалистов сельского хозяйства. Под его руководством защищены 23 кандидатские и две докторские диссертации. А. А. Зотов — автор (соавтор) 270 научных работ, в том числе 17 книг, 5 брошюр, 37 методик и рекомендаций.

А. А. Зотов внес большой вклад в подготовку национальных кадров по луговому кормопроизводству. Под его на-

учным руководством защитили диссертации аспиранты и соискатели 15 различных национальностей из 8 союзных и 7 автономных республик СССР.

Большую работу А. А. Зотов провел по координации научных исследований по улучшению и рациональному использованию природных кормовых угодий горных районах: в Западной Украине, на Северном Кавказе, в Армении, Азербайджане, Грузии, Казахстане, Киргизии, Таджикистане, на горном Алтае и Урале.

А. А. Зотов широко пропагандировал свои научные разработки, выступая с докладами на международных (ГДР, Англия, Чехословакия) конгрессах, республиканских и региональных совещаниях.

А. А. Зотов был членом секции кормопроизводства Отделения растениеводства РАСХН, членом ученого и диссер-

тационного советов ВНИИ кормов.

За разработку, пропаганду и внедрение высокоэффективных технологий по улучшению и рациональному использованию сенокосов и пастбищ в различных районах страны А. А. Зотов награжден медалями: ВДНХ СССР (серебряной и бронзовой), «В память 850-летия Москвы», «Ветеран труда»; дипломами и Почетными грамотами РАСХН, МСХ СССР, Совета Министров КБ АССР.

Секрет успешной научно-творческой деятельности А. А. Зотова — в его трудолюбии, глубоких знаниях и ответственном подходе к любому делу.

Александр Андреевич Зотов скончался 24 мая 2018 г. на 88-м году жизни.

Светлая память об Александре Андреевиче навсегда сохранится в сердцах его учеников, коллег и друзей.

*Коллектив  
ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»*

## Редакционный совет

<b>Косолапов Владимир Михайлович</b>	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН
<b>Савченко Иван Васильевич</b>	доктор биологических наук, профессор, академик РАН
<b>Жученко-мл. Александр Александрович</b>	доктор биологических наук, профессор, академик РАН
<b>Кашеваров Николай Иванович</b>	доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, Сибирский ФНЦ агробиотехнологий РАН
<b>Шпаков Анатолий Свиридович</b>	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»
<b>Дуборезов Василий Мартынович</b>	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста
<b>Думачева Елена Владимировна</b>	доктор биологических наук, доцент ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»
<b>Косолапова Валентина Геннадьевна</b>	доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры кормления животных ФГБОУ ВО «РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева»
<b>Костенко Сергей Иванович</b>	кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»
<b>Лаптев Георгий Юрьевич</b>	доктор сельскохозяйственных наук, ФГБОУ ВО СПбГАУ, ООО «Биотроф»
<b>Некрасов Роман Владимирович</b>	доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН, ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста
<b>Разин Олег Анатольевич</b>	доктор сельскохозяйственных наук, ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»
<b>Трофимов Илья Александрович</b>	доктор географических наук, ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»
<b>Чернявских Владимир Иванович</b>	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»

## **Editorial Council**

<b>Kosolapov Vladimir Mikhailovich</b>	Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
<b>Savchenko Ivan Vasilievich</b>	Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
<b>Zhuchenko Jr. Alexander Alexandrovich</b>	Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
<b>Kashevarov Nikolay Ivanovich</b>	Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnology RAS
<b>Shpakov Anatoliy Sviridovich</b>	Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology
<b>Duborezov Vasiliy Martynovich</b>	Doctor of Agricultural Sciences, Professor, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry
<b>Dumacheva Elena Vladimirovna</b>	Doctor of Biological Sciences, Assistant Professor, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology
<b>Kosolapova Valentina Gennadievna</b>	Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Animal Feeding, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "RGAU–MSKhA named after K.A. Timiryazev"
<b>Kostenko Sergei Ivanovich</b>	Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology
<b>Laptev Georgiy Yurievich</b>	Doctor of Agricultural Sciences, St. Petersburg State University, Limited Liability Company "Biotrof"
<b>Nekrasov Roman Vladimirovich</b>	Doctor of Agricultural Sciences, Professor of RAS, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry
<b>Razin Oleg Anatolievich</b>	Doctor of Agricultural Sciences, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology
<b>Trofimov Ilya Alexandrovich</b>	Doctor of Geographical Sciences, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology
<b>Chernyavskikh Vladimir Ivanovich</b>	Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology

**№ 2 (июнь) 2026**

**Гарнитура: Times New Roman**

**Размер: 6,1 МВ**



Авторы фотографий на обложке —  
Е. С. Самохина и В. Н. Золотарев