

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНО-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ ПРЕССОВАННОГО СЕНА

© Никифоров В.Е.,
Никитин Л.А.



Владислав Евгеньевич Никифоров

Вологодский научный центр Российской академии наук
г. Вологда, Российская Федерация
e-mail: nfrv_123@mail.ru



Леонид Алексеевич Никитин

Вологодский научный центр Российской академии наук
г. Вологда, Российская Федерация
e-mail: nikitin.l.2010@mail.ru

В статье описана новая технология сушки прессованного сена и представлена экспериментальная установка для вакуумно-импульсного удаления влаги. Значительному снижению потерь и повышению качества сена способствует прессование. Это эффективная высокопроизводительная технология заготовки кормов. Результаты исследований разработанного метода сушки подтверждают эффективность применения вакуума в процессе удаления влаги для сушки прессованного сена. Такая технология обеспечивает возможность внедрения данного способа сушки прессованного сена путем совершенствования технических средств и процессов послеуборочной обработки на уровне современных требований. Разработка подтверждена полученным патентом на изобретение «Способ сушки волокнистых прессованных материалов». Новизна работы заключается в создании устройства на основе вакуумно-импульсного метода удаления влаги для прессованного сена, обеспечивающего высокую сохранность. Основным отличием указанного способа от стандартных и применяемых в настоящее время установок является ускоренный процесс влагоотдачи за счет создания вакуума и равномерного нагрева материала по всему объему сушильной камеры. Технология сушки рулонов сена в вакуумной сушильной камере позволит сократить время сушки, снизить энергетические затраты, а также получить высококачественное сено. Целью проведенных исследований выступает разработка ресурсосберегающей технологии сушки, обеспечивающей высокую сохранность сена и экономию энергоресурсов на 10–15%.

Сушка, прессованное сено, вакуум, теплоноситель, эффективность.

Наряду с увеличением общего объема производства кормов для интенсификации животноводства не менее значимы резкое снижение потерь и повышение качества корма. На практике доказано, что только благодаря использованию высококачественных кормов можно на 25–35% увеличить производство молока и мяса. Особенно важно улучшение качества сена, заготовка которого в наибольшей степени зависит от погодных условий и нередко сопровождается большими потерями питательных веществ. Увеличение производства высококачественного сена может быть достигнуто путем повышения урожайности, а также применения прогрессивных технологий заготовки и хранения.

В условиях Вологодской области сезонная уборка кормов проходит в ограниченные сроки и, как правило, в сложных погодных условиях. Существующие способы заготовки сена характеризуются большими количественными и качественными потерями. От воздействия неблагоприятных природных факторов механические и биологические потери при заготовке сена в рассыпном виде и полевой сушке достигают 55%. В связи с этим разработка технологий заготовки сена и его сушки, обеспечивающей получение конечного продукта с высокими качественными показателями, является важнейшей задачей в кормопроизводстве [1; 2].

Для сокращения периода полевой сушки и снижения потерь сено повышенной влажности рекомендуют убирать с последующим досушиванием с помощью активного вентилирования или обработки химическими консервантами. На основе обобщения применяемых технологий и анализа имеющихся данных можно сделать вывод о больших резервах в ускорении сушки трав в поле. Широкое использование способов и приемов, способствующих ускорению сушки сена, является важной предпосылкой заготовки

корма высокого качества с небольшими потерями.

Одним из методов заготовки корма из зеленой массы является метод искусственной или естественной сушки. Естественная сушка более длительна и зависит от погодных условий. Продолжительность сушки в поле влияет на качество и питательность сена, поэтому для сохранения качества корма необходимо производить искусственное досушивание подвяленной травы (влажность 35–45%). Досушивание активным вентилированием характеризуется увеличенным периодом времени, большей трудоемкостью и требует высоких энергетических затрат.

Существенно повысить качество и сохранность сена можно за счет более широкого применения технологий его приготовления в прессованном виде. При заготовке прессованного сена снижаются механические потери. Прессованное сено занимает в 1,5–2,5 раза меньше объема при перевозке и хранении. Сдерживающий фактор применения рулонной технологии заготовки сена – относительно узкий диапазон влажности прессуемой массы (18–22%), который не всегда удается выдержать даже при благоприятных погодных условиях. При более высокой влажности корм портится.

В Северо-Западном регионе активно используется технология заготовки сена, прессованного в крупногабаритные рулоны, с использованием российских рулонных пресс-подборщиков ПРП-1,6, ПРФ-110 (145,180) (рис. 1) и машин зарубежных фирм KRONE, SIRMA и др. [3].

На сегодняшний день существует несколько способов заготовки сена повышенной влажности в рулонах: с использованием химических консервантов, досушка активным вентилированием или герметизация рулонов полиэтиленовой пленкой. В России широко применяются химические консерванты. За рубежом ру-



Рис. 1. Пресс-подборщик ПРФ

Источник: Ахламов Ю. Заготовка кормов в рулонах // Животноводство России. 2003. № 6. С. 40–41.



Рис. 2. Системы активного вентилирования прессованного сена

Источник: Заготовка корма в рулонах. URL: <https://fermer.ru/sovet/kormovye-rasteniya/42623>

лоны с повышенной влажностью заготавливают путем активного вентилирования или с помощью специального приспособления помещают каждый рулон в отдельный полиэтиленовый мешок. Оба приема имеют определенные недостатки, поэтому не нашли широкого применения [4].

На сегодняшний день отсутствуют предложения по коренному изменению технологии заготовки кормов, например сушки свежескошенной травы и прессо-

ванного сена. В связи с этим разработка более совершенных технологий заготовки сена и его сушки на специализированных сушильных установках обеспечивает получение конечного продукта с высокими качественными показателями и является важнейшей задачей в кормопроизводстве.

Особенно эффективно прессование подвяленной массы с последующим активным вентилированием (рис. 2). По данным ВИК, заготовка сена с применением ак-

тивного вентилирования сокращает потери и повышает питательность корма на 20–30%, снижает затраты труда на 10–15%.

Для повышения качества сена важно максимально сокращать продолжительность досушивания за счет увеличения поглотительной способности воздухом влаги. Подогрев воздуха позволяет высушивать массу в более короткие сроки. Однако чрезмерное повышение температуры воздуха приводит к интенсивному нагреванию массы, снижению качества и связано со значительным расходом энергии.

Совершенствование технологий сушки на современном этапе может быть обеспечено также снижением относительной влажности сушильного агента, увеличением поверхности материала, комбинированным подводом тепла, повышением скорости подачи агента сушки, вакуумированием и т. п. [5; 6].

Современные исследования процесса сушки свидетельствуют о том, что одним из способов улучшения теплообмена является сочетание сушки и вакуумного воздействия. Именно технологии сушки с применением вакуума считаются достаточно новыми и находят применение в промышленности. Ее преимущество заключается в повышении интенсивности сушки при низких температурах. Кроме того при низких температурах предотвращаются нежелательные последствия чрезмерного нагрева материала, его разложение и окисление, а сам процесс происходит при относительно незначительных энергозатратах [7].

В связи с этим для роста эффективности досушивания прессованного сена предложена технология искусственной сушки в вакуумной сушильной камере с конвективным подводом нагретого воздуха и периодической принудительной вентиляции. Технология основана на новом способе сушки волокнистых прессованных материалов, на который получен патент на изобретение [8; 9]. Преимуществом ее реализации является равномерная сушка рулона сена с высоким качеством [10; 11]. В состав необходимого оборудования для вакуумного способа удаления влаги входят сушильная камера, система создания вакуума, нагреватель, вентиляционное устройство. Технологическая схема, показывающая последовательность процесса сушки, представлена на *рис. 3*.

Для изучения вакуумной сушки растительного сырья разработано экспериментальное оборудование, которое позволило определить режимы и параметры протекания процесса. Работа данной технической системы характеризуется определенными физическими и эксплуатационными показателями.

Оборудование для осуществления технологического процесса получения качественного корма с использованием вакуумно-импульсного способа удаления влаги представлено в *таблице*.

Процесс вакуумного удаления влаги происходит благодаря последовательности проведения технологических операций:

- нагрев материала;
- продувка материала в камере с удалением поверхностной влаги;



Рис. 3. Технологическая схема процесса сушки

Источник: собственные исследования авторов.

Таблица. Используемое оборудование

Обозначение	Наименование	Кол-во	Назначение
ВЭ-1	Весы	1	Определение массы рулона сена
ТК	Влагомер сена	1	Определение влажности сена
СФО	Электрокалорифер	1	Нагрев подаваемого воздуха
–	Сушильная камера	1	Для сушки рулона сена
–	Ресивер	1	Запас вакуума
РВН	Вакуумный насос	1	Создание вакуума
МПЗ-У1	Вакуумметр	2	Измерение и контроль вакуума
ПР-4	Термометр (термопара)	2	Контроль температуры
Источник: собственные исследования авторов.			

- работа вакуумного насоса и создание вакуума в ресивере;
- создание вакуума в рабочей зоне камеры и материала;
- вторичная продувка материала с дополнительным удалением влаги;
- охлаждение материала, продувка материала холодным воздухом.

Применяемое оборудование обеспечивает заданные режимы работы данной технологии. Механизм для осуществления процесса может иметь периодичность циклических операций на создание вакуума в рабочей зоне камеры и включать вторичную продувку материала для удаления влаги в зависимости от продолжительности сушки.

В соответствии с рабочим процессом сушки основной интенсивный нагрев обеспечивается конвективным способом. При этом на первой стадии происходит удаление свободной (капиллярной) влаги. На второй стадии удаляется связанная (гигроскопическая) влага, которая удерживается на уровне физико-химических связей. Ее удаление из объемной массы травы весьма затруднено и связано с большими затратами энергии.

Исследовано использование вакуума в сочетании с конвективной сушкой рулонов сена. Рулоны сена плотностью 100 кг/м³ имеют низкий коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,053 \text{ Вт / (м}^\circ\text{С)}$ для сухого

и $0,11 \text{ Вт / (м}^\circ\text{С)}$ для влажного сена. Сушка осуществляется при подаче теплоносителя с температурой 50–70 °С. Определено, что эффективность влияния низкого вакуума (порядка 20–30 кПа) на процесс сушки рулонов сена ярко выражен для стадии удаления связанной влаги. В результате опытной проверки сравнивались различные варианты сушки прессованного сена в рулонах.

В первом варианте проводился нагрев материала при создании периодического вакуума в сушильной камере ($P = 20 \text{ кПа}$) с периодической продувкой нагретым воздухом от подачи теплоносителя для отвода влаги (метод вакуумно-конвективной сушки – опыт № 1). Во втором варианте происходили нагрев материала и продувка (конвективная сушка – опыт № 2).

На *рис. 4* представлен общий вид экспериментальной установки (на переднем плане – вакуумная сушильная камера с системой контроля температуры и влажности материала). Компоновка и монтаж основного экспериментального оборудования выполнены в соответствии с приведенной технологической схемой.

Установка для сушки прессованного сена содержит вакуумную камеру 1, вакуумный насос 2, ресивер и тепловую установку, имеется система контроля температуры и влажности материала, а также вакуумметры.



Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки

Источник: собственные исследования авторов.

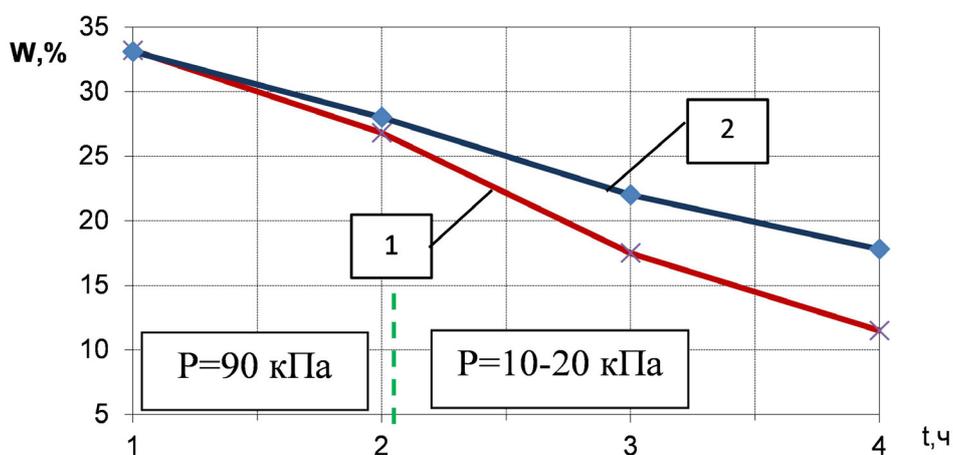


Рис. 5. Экспериментальные кривые (w – влажность материала, %; 1 – опыт № 1; 2 – опыт № 2)

Источник: собственные исследования авторов.

Нагрев теплоносителя устанавливается и поддерживается автоматически с помощью термометрического регулятора. Вакуум в камере создается при помощи насоса РВН 40/350.

По результатам исследований проведено сравнение процесса при вакуумном удалении влаги с конвективной сушкой нагретым воздухом, который принят в

качестве базового. На рис. 5 приведены экспериментальные кривые, которые отражают процесс удаления влаги при воздействии вакуума – опыт № 1 и обычной конвективной сушке – опыт № 2 при температуре 60 °С. Для эффективного процесса удаления влаги после сброса вакуума происходит периодическая принудительная вентиляция рулона сена. Таким

образом, создаются периоды вакуумного воздействия. Они повторяются с выдержкой времени, чтобы выделить влагу из материала с нагревом до 60 °С.

Для эффективного процесса сушки прессованного сена и удаления поверхностной влаги материала целесообразно применять нагрев при незначительном вакууме путем конвективной сушки, а внутреннюю влагу удалять при высоком вакууме. Необходимый уровень создаваемого вакуума и нагрев материала характеризуют особый режим сушки, параметры которого являются основным критерием для определения эффективности всего процесса и зависят от условия вакуумного воздействия на влажный материал и температуры нагрева. Сушка в вакууме снижает потери тепла с отработанным сушильным агентом, поскольку позволяет лучше уловить пары, выделяющиеся из материала. Благодаря применению вакуума процесс сушки проходит более интенсивно, чем при атмосферном давлении, так как содержание влаги в воздухе возрастает с понижением давления. Влага активно удаляется в первый период сушки, когда температура материала близка к температуре насыщения при данном разрежении.

Увеличить скорость испарения влаги в вакуумной сушке можно с помощью повышения температуры теплоносителя, используемого для нагрева материала, а также увеличения степени разрежения. Как видно из графиков, процесс удаления влаги за счет вакуума с воздействующим нагревом материала происходит более интенсивно.

Метод досушки сена в рулонах предусматривает режим работы оборудования и определяет процесс удаления влаги в вакууме:

– при влажности 30–35% в сене присутствует поверхностная влага, необходимо использовать продувку для удаления испаряемой влаги из открытого пространства сушильной камеры или на выходе создавать вакуум порядка 90 кПа;

– при влажности 22% увеличивается сила, удерживающая влагу; для удаления внутренней влаги необходимо обеспечить повышенный вакуум в замкнутом пространстве камеры $P = 20$ кПа.

Для досушивания рулонов прессованного сена из провяленной травы нагрев должен соответствовать значениям температуры, при которой активно протекает процесс удаления влаги. Установлено, что в начале процесса сушки при наличии поверхностной, наружной влаги 30–35% можно повышать температуру теплоносителя до 70 °С, причем с интенсивной продувкой температура материала от удаления влаги снижается, дополнительно охлаждая материал не более чем на 10 °С.

Выводы

Скорость удаления влаги во многом зависит от того, насколько теплоноситель в объемном пространстве камеры насыщен в данный момент влагой. При создании вакуума в камере влага из материала в виде насыщенного пара выделяется более интенсивно. Процесс удаления влаги за счет вакуума с предварительным нагревом материала происходит почти в 1,5–2 раза быстрее, чем при конвективной сушке. Это поможет сократить общее время на сушку и снизить потребление электроэнергии.

В результате внедрения в производство данная технология досушки рулонов позволит получать высококачественный объемистый корм в условиях Европейского Севера Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кормопроизводство Вологодской области: современное состояние и перспективы развития / А.В. Маклахов [и др.] // Вестн. АПК Верхневолжья. 2016. № 1 (33). С. 60–68.
2. Состояние и перспективы развития кормопроизводства Вологодской области / А.В. Маклахов [и др.] // Адаптивное кормопроизводство. 2016. № 1. С. 6–16.
3. Ахламов Ю. Заготовка кормов в рулонах // Животноводство России. 2003. № 6. С. 40–41.
4. Заготовка корма в рулонах. URL: <https://fermer.ru/sovet/kormovye-rasteniya/42623>
5. Активное вентилирование сена. URL: <http://neznaniya.net/zooinzhenerija/kormoproizvodstvo/283-aktivnoe-ventilirovanie-sena.html>
6. Пятрушавичус В.И., Любарский В.М. Активное вентилирование травяных кормов. Л.: Агропромиздат, 1986. 96 с.
7. Гареев Ф.Х. Нетрадиционная сушка древесины: вакуумная и СВЧ // Лесная промышленность ЛПИ. 2004. № 5 (18). С. 62–65.
8. Способ сушки волокнистых прессованных материалов: патент № 2476085 Рос. Федерация / В.К. Углин, В.Е. Никифоров, Е.А. Тяпугин, С.Е. Тяпугин № 2010154629/13; заявл. 30.12.2010; опубл. 27.02.2013, бюл. № 6. 3 с.
9. Маклахов А.В., Углин В.К., Никифоров В.Е. Совершенствование технологии заготовки сена в рулонах // Владимир. земледелец. 2017. № 4 (82). С. 28–30.
10. Технология заготовки высококачественного сена вне зависимости от погодных условий / Г.А. Симонов [и др.] // АгроФорум. 2020. № 4. С. 66–70.
11. Как заготовить сено высокого качества при неблагоприятных погодных условиях / Г.А. Симонов [и др.] // АгроФорум. 2020. № 6. С. 76–77.

Сведения об авторах

Владислав Евгеньевич Никифоров – старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Вологодский научный центр Российской академии наук». Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Ленина, д. 14; e-mail: nfrv_123@mail.ru

Леонид Алексеевич Никитин – кандидат технических наук, доцент, заведующий технологическим отделом, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Вологодский научный центр Российской академии наук». Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Ленина, д. 14; e-mail: nikitin.l.2010@mail.ru

EXPERIMENTAL INSTALLATION DEVELOPMENT FOR THE TECHNOLOGY OF VACUUM-PULSE DRYING OF BALED HAY

Nikiforov V.E., Nikitin L.A.

The article describes a new technology for drying baled hay and presents an experimental installation for vacuum-pulse moisture removal. Baling significantly reduces losses and improves the quality of hay. This is an efficient, high-performance forage conservation technology. The research results of the developed drying method confirm the effectiveness of using vacuum in the moisture removal process for drying baled hay. This technology makes it possible to implement this method of drying baled hay by improving the technical resources and post-harvesting processes at the level of modern requirements. The development is confirmed by the patent for the invention "Method for drying fiber baled materials". The novelty of the work is the creation of a device based on the vacuum-pulse method of moisture removal for baled hay which provides high safety. The main difference between this method and standard and currently used installations is the accelerated process of moisture loss due to the vacuum and material uniform heating throughout the entire volume of the drying chamber. The technology of drying hay rolls in a vacuum drying chamber will decrease the drying time, reduce energy costs, and get high-quality hay. The purpose of the research is to develop a resource-saving drying technology that ensures high hay preservation and energy savings of 10–15%.

Drying, baled hay, vacuum, heat conductor, effectiveness.

REFERENCES

1. Maklakhov A.V. et al. Forage production in Vologda region: a current state and development prospects. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya=Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*, 2016, no. 1 (33), pp. 60–68 (in Russian).
2. Maklakhov A.V. et al. The state and prospects of development of forage production Vologda region. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo=Adaptive Fodder Production*, 2016, no. 1, pp. 6–16 (in Russian).
3. Akhlamov Yu. Fodder conservation in rolls. *Zhivotnovodstvo Rossii =Livestock in Russia*, 2003, no. 6, pp. 40–41 (in Russian).
4. Fodder conservation in rolls. Available at: <https://fermer.ru/soviet/kormovye-rasteniya/42623> (in Russian).
5. Active hay ventilation. Available at <http://neznaniya.net/zooinzhenerija/kormoproizvodstvo/283-aktivnoe-ventilirovanie-sena.html> (in Russian).
6. Pyatrushyavichus V.I., Lyubarskii V.M. *Aktivnoe ventilirovanie travyanykh kormov* [Active Ventilation of Grass Forage]. Leningrad: Agropromizdat, 1986. 96 p.
7. Gareev F.Kh. Non-traditional Wood Drying: Vacuum and Microwave. *Lesnaya promyshlennost' LPI=Lesprom Inform*, 2004, no. 5 (18), pp. 62–65 (in Russian).
8. Uglin V.K., Nikiforov E.A., Tyapugin E.A., Tyapugin S.E. No. 2010154629/13. *Sposob sushki voloknistykh pressovannykh materialov: patent* [Drying Method for Fiber Pressed Materials]. Patent no. 2476085 Russian Federation, dated December 30, 2010. Published February 27, 2013, bulletin no. 6, 3 p.
9. Maklakhov A.V., Uglin V.K., Nikiforov V.E. Technology improvement of haying in rolls. *Vladimirskii zemledelets=Vladimirsky Farmer*, 2017, no. 4 (82), pp. 28–30 (in Russian).

10. Simonov G.A. et al. High quality hay harvesting technology regardless of weather conditions. *Agroforum=AgroForum*, 2020, no. 4, pp. 66–70 (in Russian).
11. Simonov G.A. et al. How to prepare high quality hay under severe weather conditions. *Agroforum=AgroForum*, 2020, no. 6, pp. 76–77 (in Russian).

Information about the authors

Vladislav E. Nikiforov – Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”. 14, Lenin Street, Molochnoye Rural Settlement, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: nfrv_123@mail.ru

Leonid A. Nikitin – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of Engineering Department, Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”. 14, Lenin Street, Molochnoye Rural Settlement, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: nikitin.l.2010@mail.ru