



В.Е. Никифоров^{1,2}, Л.А. Никитин²

¹Вологодский государственный университет

²Вологодский Научный Центр Российской Академии Наук

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ПРЕССОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлены результаты проектирования и изготовления экспериментальной установки для сушки прессованного сена с использованием вакуума, приведены исследования разработанного метода сушки. Результаты проведенных исследований подтверждают эффективность применения вакуума в процессе удаления влаги для сушки рулонов прессованного сена.

Сушка, прессованное сено, вакуум, теплоноситель, затраты энергии.

Сушка растительных материалов – это важная технологическая операция, обеспечивающая сохранность и получение конечного продукта с высокими качественными показателями. Существующие способы заготовки сена характеризуются большими потерями, которые достигают 55 % [1]. Наиболее сложно заготавливать прессованное сено, льнотресту при неустойчивой влажной погоде, поэтому сельскохозяйственную продукцию, прессованную в кипы или рулоны, подвергают досушиванию [2].

Применение специальных установок активного вентилирования способствует получению более качественной продукции. Существующий конвективный способ сушки растительного сырья относится к категории нормального давления, где в качестве сушильного агента используется нагретый воздух. Основным недостатком применяемого способа сушки являются значительные удельные энергозатраты, которые достигают до 4136 кДж/кг удаленной влаги [3].

Важную роль при сушке играют параметры температуры, толщина высушиваемого материала и его плотность, а существенным недостатком конвективного способа сушки является относительно небольшая величина коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к поверхности материала. Влажные материалы являются капиллярно-пористыми телами. Влага в таких материалах связана различными силами. В процессе сушки от переноса тепла и выделения теплоты зависят скорость трансформации температурного поля, глубина проникновения тепловой зоны, скорость изменения температуры и теплового потока на каждом участке. Развитие указанных процессов определяется теплофизическим свойством материалов – теплопроводностью, которая характеризуется коэффициентом λ и зависит от накопления теплоты и объёмной теплоёмкости. На основании кривых распределения относительной влажности воздуха в пограничном слое при сушке материалов значительным потенциалом влагопереноса является энергия связи влаги с материалом E . Учитывается, что энергия связи влаги с

материалом пропорциональна логарифму относительной влажности воздуха φ [4]

$$E = \left(\frac{dF}{dm} \right)_T = -RT \ln \varphi,$$

где F – сила переноса влаги, T – температура.

Растительные материалы отличаются низкой теплопроводностью, соизмеримой с высококачественными теплоизоляционными материалами. Прессованное сено плотностью 110–150 кг/м³ характеризуется как материал с низким значением коэффициента теплопроводности $\lambda=0,053\pm 0,11$ Вт/(м·°С). Вследствие плохой теплопроводности теплота задерживается в основном в наружных слоях или контактирующих непосредственно с горячей поверхностью сушилки. Во время просушки первыми высыхают слои, которые находятся в области подачи теплого воздуха, происходит постепенное перемещение просушенной зоны с увлажнением других, что вызывает дополнительные энергетические затраты и увеличивает время сушки.

Современные исследования процесса сушки растительного сырья свидетельствуют о том, что массообменные и тепловые процессы зачастую сопровождаются реакцией окисления с изменением структурно-физических свойств, что приводит к частичной потере качества или полной утрате ценности продукта. Поэтому главной целью сушки является как удаление влаги, так и получение качественного сырья при максимальной сохранности биологически активных веществ, органических кислот, витаминов. В то же время при сушке требуется сохранить исходные энергетические показатели кормового продукта, такие как углеводы, сахара и протеин.

Возможность совершенствования послеуборочной обработки сена связана с использованием вакуума и созданием эффективной технологии досушки сена в прессованном виде. Существенное снижение энергопотребления достигается за счет применения способа сушки растительных материалов в вакуумных сушильных камерах. Анализ тенденций развития вакуумной сушки выявил, что процесс сушки объемистого

корма из растительного прессованного материала с использованием вакуумного способа удаления влаги не изучен и не получил практического опыта.

Нами разработан новый способ сушки волокнистых прессованных материалов (патент № 2476085), который основан на формировании специального режима с определенными периодами сушки, включающими нагрев растительного материала в вакууме [5]. Способ определяет основные принципы технологии сушки волокнистых прессованных материалов в вакууме и характеризует конструктивную особенность сушильной установки для создания наиболее экономичного процесса влагоотдачи. Выбор показателей и расчет параметров для разрабатываемой технологии сушки сена основан на создании вакуумметрического давления (например, температура кипения воды при

давлении 0,01 МПа составляет 45,5 °С). Это обеспечивает сокращение продолжительности процесса сушки при относительно незначительных энергетических затратах (0,6 кВт на 1 кг воды) [6, 7].

Исследования по разработке и созданию экспериментальной установки вакуумной сушки прессованных растительных материалов выполнены в результате реализации государственного научного гранта Вологодской области в 2019 г. по теме «Повышение качества заготовки растительного корма путем использования вакуума в процессе удаления влаги».

На рисунке 1 представлена аппаратная схема экспериментальной установки сушки прессованного сена с использованием вакуума, которая содержит необходимое оборудование контроля для управления режимом работы данной технологии.

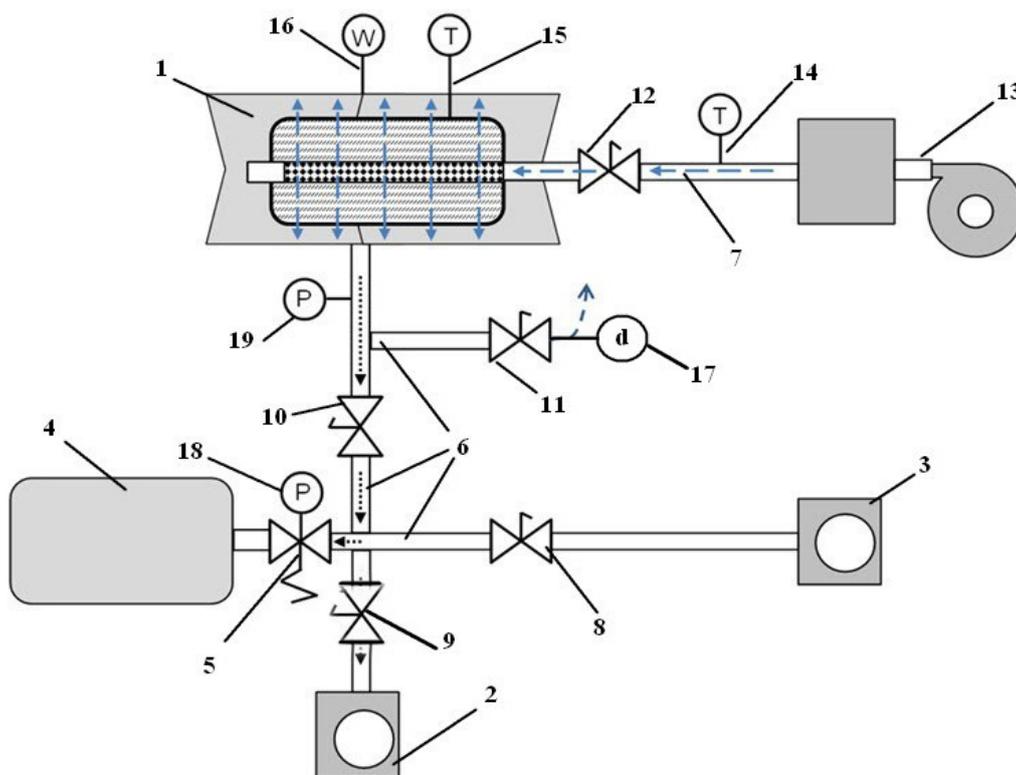


Рис. 1. Аппаратная схема



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Экспериментальная установка для сушки прессованного сена содержит вакуумную камеру (1), вакуумные насосы (2, 3), ресивер (4), предохранительный клапан (5), вакуумные трубопроводы (6), подачи теплоносителя (7), краны (8–12), электрокалорифер (13), систему контроля температуры теплоносителя (14), температуры и влажности материала (15, 16), измеритель относительной влажности воздуха (17), вакуумметры ресивера и сушильной камеры (18, 19).

Компоновка и монтаж основного экспериментального оборудования выполнены в соответствии с аппаратной схемой. На рисунке 2 представлен общий вид экспериментальной установки, где на переднем плане показана вакуумная сушильная камера с системой контроля температуры и влажности материала.

Поступление тепла в вакуумной сушильной камере производится непосредственно в центральную часть рулона с радиальным распределением теплоносителя к наружным слоям. Подача теплого воздуха в камеру осуществляется трубопроводом с диаметром 60 мм. Температура нагрева теплоносителя от тепловой установки устанавливается и поддерживается автоматически с помощью термометрического регулятора.

Экспериментальные исследования разделены по различным условиям протекания процесса с заданным режимом работы оборудования. На первой стадии происходит испарение свободной (капиллярной) влаги, которая удерживается на поверхности материала за счёт механических связей и легко удаляется при обычной сушке. На второй стадии происходит удаление связанной (гигроскопической) влаги, которая удерживается на уровне физико-химических связей. Удаление этого вида влаги из растительного материала затруднено и сопровождается большими затратами энергии. На первой стадии используется конвективная сушка рулонов сена с воздействием вакуума $P=90$ кПа, который создается при работе вакуумного насоса РВН 40/350. Низкий вакуум (10–20 кПа) на второй

стадии сушки обеспечивается включением в работу вакуумного насоса МРВ-5.

Сушка при начальной влажности $w=33,2$ % производилась путем подачи нагретого воздуха от вентиляционно-калориферной установки через центральный воздухопровод при создании дополнительного вакуумметрического давления в камере. В начальный период сушки для эффективного процесса удаления влаги осуществляется периодическая вентиляция камеры и продувка рулона с нагретым материалом до температуры 50–60 °С. Второй этап досушки ($P=10-20$ кПа) происходит с удалением связанной влаги. Таким образом, создаются определенные вакуумные периоды, чтобы максимально выделить влагу из материала. С подачей теплоносителя выделенная влага в виде насыщенного пара принудительно удаляется.

На рисунке 3 представлен график, показывающий зависимость сушки прессованного рулона сена при создании вакуума ($P=90$ кПа и $P=10-20$ кПа).

В начале процесса сушки теплоноситель максимально насыщается влагой за счет поверхностной свободной влаги, которая легко испаряется. Далее относительная влажность отработанного теплоносителя постепенно снижается, он не успевает полностью насыщаться от внутренней связанной влаги, которую удалить значительно труднее. Поэтому для повышения скорости сушки необходимо увеличить вакуум, чтобы обеспечить удаление влаги из внутренних слоев.

Таким образом, метод сушки предусматривает специальный режим работы оборудования и определяет процесс удаления влаги в вакууме:

- при влажности 30–35 % в материале присутствует поверхностная влага, необходимо использовать принудительное удаление испаряемой влаги из сушильной камеры, создаваемый вакуум – 90 кПа;
- при влажности 22 % увеличивается влагоудерживающая сила, для удаления внутренней влаги необходимо обеспечить вакуум – 10–20 кПа.

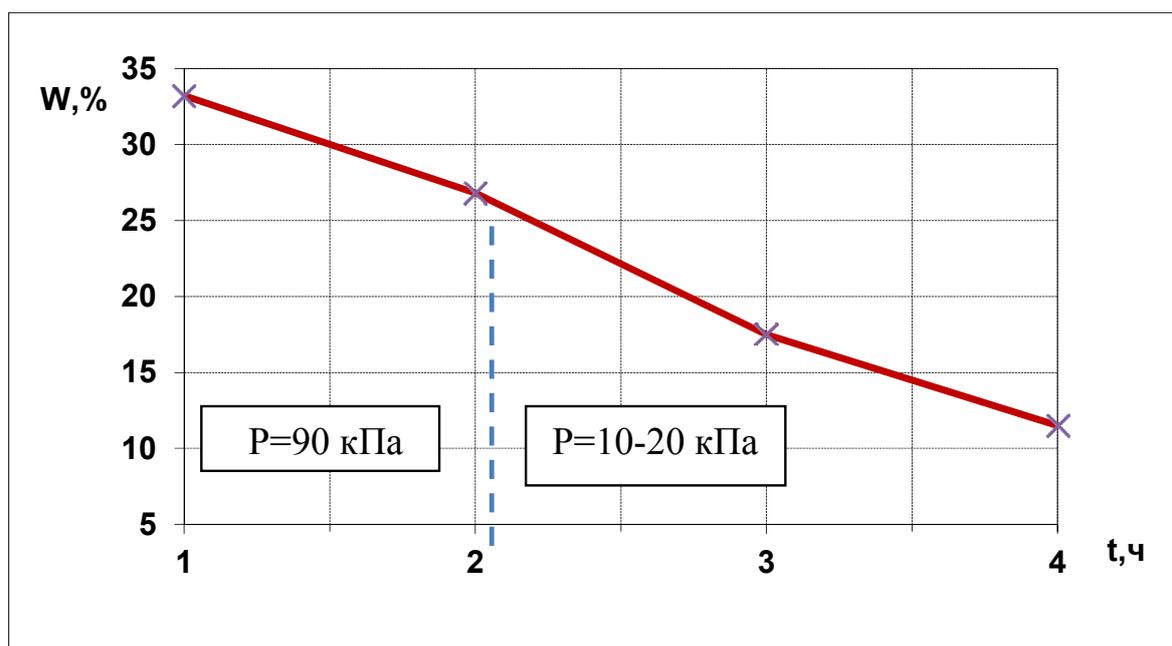


Рис. 3. Процесс сушки в вакуумной камере

Литература

По работе оборудования процесс вакуумного способа удаления влаги представлен в виде последовательности технологических операций:

- нагрев материала, продувка с удалением поверхностной влаги;
- работа вакуумного насоса и создание вакуума в ресивере;
- создание вакуума в камере с удалением внутренней влаги;
- продувка материала в камере с удалением насыщенного пара;
- охлаждение материала, продувка материала холодным воздухом.

Проведены работы по разработке и проектированию экспериментальной установки вакуумной сушки прессованных растительных материалов.

Результаты исследований подтверждают эффективность применения вакуума в процессе удаления влаги для сушки рулонов прессованного сена. Нагрев материала в вакууме характеризует особый режим сушки, при котором удаление влаги протекает более активно, чем при атмосферном давлении. Предложен метод сушки, на первом этапе которого происходит удаление свободной влаги, на втором этапе происходит удаление связанной влаги. Увеличение скорости вакуумной сушки возможно путем повышения температуры теплоносителя и нагрева материала, а также степени вакуумного воздействия.

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

2. Оробинский, Д. Ф. Уборка льна в условиях Северо-Западного региона России : учебное пособие / Д. Ф. Оробинский. – Вологда-Молочное : ИЦ ВГМХА, 2007. – 190 с.

3. Пятрушьявичус, В. И. Активное вентилирование травяных кормов / В. И. Пятрушьявичус, В. М. Любарский. – Ленинград : Агропромиздат, 1986. – 96 с.

4. Лыков, А. В. Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1978. – 480 с.

5. Патент 2476085 Российская Федерация, МПК А23К 3/02, А23В 7/00. Способ сушки волокнистых прессованных материалов : заявл. № 2010154629/13: опубл. 27.02.2013, бюл. № 6. – 3 с. / Углин В. К., Никифоров В. Е., Тяпугин Е. А., Тяпугин С. Е.

6. Никифоров, В. Е. Технология заготовки кормов с досушкой прессованного сена вакуумным способом удаления влаги / В. Е. Никифоров, Л. А. Никитин, В. К. Углин // АгроЗооТехника, 2019. – Т. 2, № 1. – С. 44–50.

7. Маклахов, А. В. Совершенствование технологии заготовки сена в рулонах / А. В. Маклахов, В. К. Углин, В. Е. Никифоров // Владимирский земледелец. – 2017. – № 4. – С. 28–30.

V.E. Nikiforov, L.A. Nikitin

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR VACUUM DRYING OF COMPRESSED VEGETABLE MATERIALS

The article presents the results on the design and manufacture of an experimental plant for drying pressed hay using vacuum, and provides research of the drying method having being developed. The results of this research confirms the effectiveness of applying vacuum in the moisture removal process to dry rolls of pressed hay.

Drying, pressed hay, vacuum, heat carrier, energy consumption.