



В.Е. Никифоров^{1,2}, Л.А. Никитин²

¹Вологодский государственный университет

²Вологодский научный центр Российской академии наук

УПРАВЛЕНИЕ И РЕЖИМ ВАКУУМНО-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ ПРЕССОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлен механизм управления технологическим оборудованием для вакуумно-импульсной сушки прессованных растительных материалов. Дано теоретическое обоснование влияния показателей температуры и давления относительно процесса удаления влаги, который требует значительных затрат тепловой энергии и определенным образом влияет на скорость и продолжительность сушки. Использование вакуума для удаления влаги из материалов с низкой теплопроводностью позволяет сократить процесс сушки при снижении энергетических затрат.

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

В технологическом процессе предварительной обработки растительных материалов сушка имеет особое значение. В современных условиях интенсификации на основе комплексной механизации за счет строительства и модернизации производственных комплексов возрастают мощности сушильных установок. Различные технологические процессы сушки имеют особую специфику и сложность применяемого оборудования, поэтому необходимо учитывать внедрение оптимальных режимов управления сушкой при достаточном уровне автоматизации.

Существующий конвективный способ сушки относится к категории нормального давления, отличается простотой применяемого оборудования с возможностью регулирования температуры теплоносителя для нагрева материала. В качестве сушильного агента используется теплый воздух, топочные газы и пр., испарение влаги из материала происходит также за счет тепловой энергии. Все процессы сушки проходят при давлении, близком к атмосферному или барометрическому, давление подаваемого сушильного агента считается постоянной и равной технической атмосфере 0,1 МПа. Сушка сопровождается большими потерями тепла, поскольку применяемые установки имеют высокие удельные энергозатраты на удаление влаги (от 1,6 до 3,32 кВт ч/кг) [1]. Важную роль при конвективной сушке играют физические параметры теплоносителя, толщина слоя высушиваемого материала и его плотность. Существенным недостатком конвективного способа сушки является относительно небольшая величина коэффициента теплоотдачи сушильного агента с увлажнением поверхности материала. От этого возникает неравномерность сушки, требуются дополнительные затраты тепловой энергии.

Современные исследования по сушке растительных материалов свидетельствуют о том, что массообменные и тепловые процессы зачастую сопровождаются реакцией окисления, изменением структурно-физических свойств. Например, процесс сушки расти-

тельных материалов, не вызывающий денатурацию исходных характеристик, протекает при температуре до 60 °С [1]. Поэтому главной целью сушки одновременно является как удаление влаги, так и сохранение качества, биологически активных веществ исходного сырья. Поэтому в отраслях АПК необходимо использовать энергосберегающие технологии, которые позволяют сократить продолжительность сушки при сохранении качества объемистого корма, исключить потери при длительном хранении. Возможность совершенствования процесса сушки связана с использованием вакуума и создания новой технологии досушки растительных материалов, в частности прессованного сена.

При определении количества испарившейся влаги за некоторый период времени существуют условия по скорости сушки, которые зависят только от температуры поверхности и свойств данного вещества. Скорость испарения (U), т.е. количество жидкости, переходящей в пар, также зависит от внешнего давления и движения газообразной фазы от свободной поверхности жидкости:

$$U = C \frac{S}{p_0} (p_n - p),$$

где C – постоянный коэффициент – материал;

S – площадь свободной поверхности испарения;

p_n – давление насыщенного пара;

p – давление паров жидкости над свободной поверхностью;

p_0 – внешнее барометрическое давление.

На практике также необходимо учитывать процессы, сопутствующие основным свойствам удаления влаги по основным показателям, которые требуют значительных затрат тепла и определенным образом влияют на скорость и продолжительность сушки:

1. Скорость циркуляции воды в значительной степени зависит от температуры сушки – экспоненциальная зависимость (табл. 1).

Таблица 1
Зависимость скорости циркуляции воды от температуры

№ пп.	Влажность %	Температура, °С	Коэффициент циркуляции, 10^{-5} см/сек
1	-	25	0,257
2	-	40	0,398
3	50	50	0,558
4	-	60	0,729
5	-	80	1,315

2. Скорость циркуляции воды зависит от уровня вакуума в сушильной камере (табл. 2).

Таблица 2
Зависимость циркуляции воды от давления

№ пп.	Температура °С	Давление, мм Hg	Коэффициент циркуляции 10^{-5} см/сек
1	-	760	0,38
2	-	480	0,41
3	40	240	0,60
4	-	120	0,83
5	-	62	1,315

При снижении давления испарение воды начинается при низкой температуре (температура кипения воды при давлении 0,01 МПа составляет всего 45,5 °С) [2]. Установлено, что вакуумная сушка является наиболее перспективной и экономически обоснованной. Технология вакуумной сушки применяется во многих областях пищевой промышленности, используется для различных пищевых продуктов, пиломатериалов, минеральных удобрений, лекарственных растений.

Разработан способ сушки для волокнистого растительного материала в прессованном виде, в котором производят нагрев и удаление влаги из материала в виде насыщенного пара под действием вакуума [3]. Обеспечивается повышение скорости сушки при низкой температуре нагрева, поскольку растительные материалы отличаются низкой теплопроводностью,

соизмеримой с высококачественными теплоизоляционными материалами. Прессованное сено плотностью 110–150 кг/м³ характеризуются как материал с низким значением коэффициента теплопроводности $\lambda=0,053\pm 0,11$ Вт/(м·°С). Вследствие плохой теплопроводности тепло задерживается в основном в слоях, контактирующих непосредственно с горячей поверхностью сушилки. Исследования по разработке и созданию экспериментальной установки вакуумной сушки прессованных растительных материалов выполнены в результате реализации государственного научно-го гранта Вологодской области в 2019 г. [4].

Способ сушки волокнистых прессованных материалов определяет основные принципы управления работы оборудования, условия и режимы выполнения данного процесса. Управление режимом вакуумно-импульсной сушки включает определенную последовательность вакуумных периодов и интенсивный нагрев растительного материала в сушильной камере [5].

В состав оборудования входит: сушильная камера, вакуумная система, нагреватель, вентиляционное устройство, приборы контроля и автоматика управления работы установки. На рисунке 1 представлена функциональная схема применяемого оборудования для установки в технологии вакуумно-импульсного способа удаления влаги.

Создание и накопление вакуума производится в ресивере (1) с помощью вакуумного насоса (2). Ресивер связан с вакуумной камерой (3) системой трубопровода через клапан (4). Нагрев прессованного материала (5), находящегося в объеме вакуумной камеры, осуществляется за счет внешнего теплового блока (6). Выход отработанного теплоносителя из пространства камеры осуществляется выпускным клапаном (7).

Работа оборудования обеспечивает заданные режимы данной технологии. Процесс имеет необходимую последовательность операций создания вакуума и удаления влаги из рабочей камеры, которые повторяются неоднократно в зависимости от продолжительности сушки. Общий механизм управления работой оборудования по технологии вакуумно-импульсного удаления влаги представлен на рисунке 2.

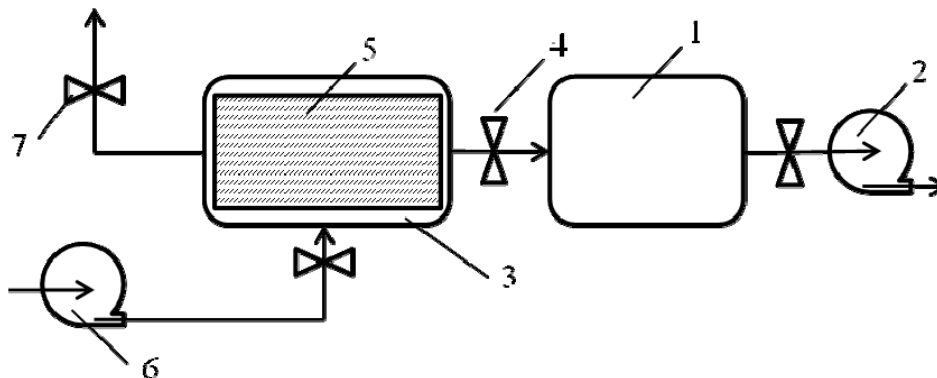


Рис. 1. Функциональная схема

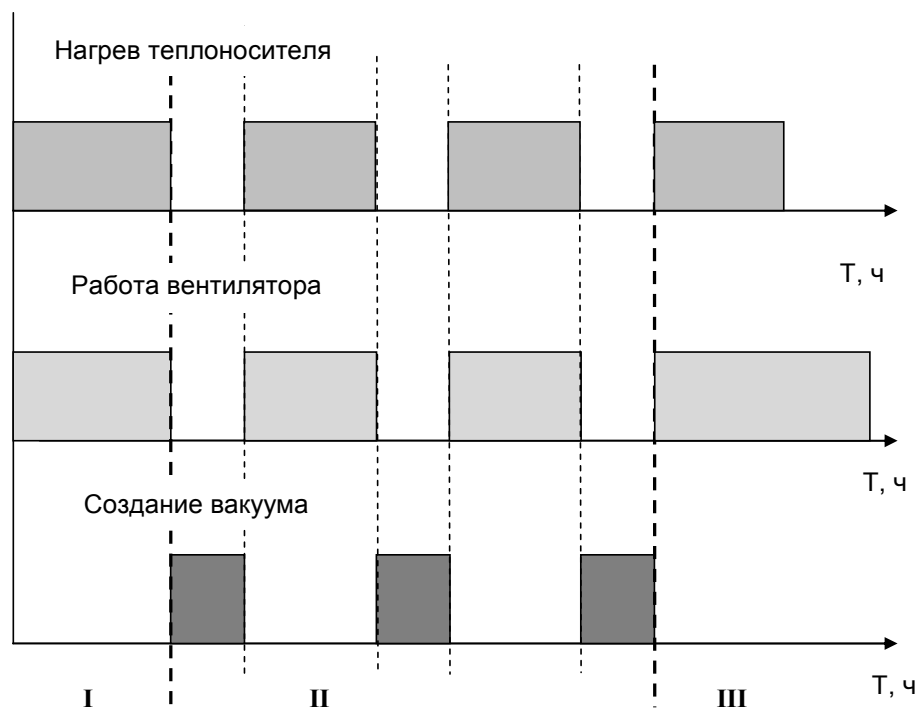


Рис. 2. Диаграмма работы оборудования

На диаграмме показаны временные участки, которые отдельно характеризуют основные периоды процесса сушки и управление работой оборудования:

I – начальный этап, предварительный прогрев материала;

II – формирование периодов вакуумного воздействия, интенсивное удаление влаги из материала;

III – продувка, охлаждение материала, этап завершения сушки.

Необходим предварительный нагрев материала с принудительной вентиляцией, когда теплоноситель нужно подавать под давлением, поскольку прессованное сено имеет высокую плотность, практически не сохнет в обычных условиях, влага не удаляется из-за плотной многослойной структуры волокнистого материала. При работе установки производится предварительный нагрев материала до необходимой температуры, затем включается вакуумный насос РВН-40/350 для создания требуемого вакуумметрического давления. Контроль создаваемого вакуума в камере осуществляется с помощью измерительного вакуумметра МПЗ-У1. Сырье под вакуумом выдерживается определенный период времени (20–30 минут), после этого давление повышается до атмосферного и включается в работу установка нагревателя ЭКОЦ-10. Подача и интенсивная продувка с поступлением нагретого воздуха под давлением 1000 Па обеспечивается центробежным вентилятором ВЦ-14 производительностью 1000–2000 м³/ч. Для повышения скорости сушки материала неоднократно проводится периодическое вакуумное воздействие в виде вакуумных импульсов: 3–5 раз в зависимости от материала.

Использование вакуума позволяет сократить процесс сушки по сравнению с конвективным методом.

Для интенсивного удаления влаги из материала производится управляющее воздействие для работы оборудования в виде формирования вакуумных периодов, которые существенно позволяют ускорить удаление влаги из материала без высокотемпературного нагрева при снижении энергетических затрат.

Литература

1. Пятрушявичус, В. И. Активное вентилирование травяных кормов / В. И. Пятрушявичус, В. М. Любарский. – Ленинград : Агропромиздат, 1986. – 96 с.
2. Лыков, А. В. Тепломассообмен: справочник / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1978. – 480 с.
3. Патент 2476085 РФ. МПК А23К 3/02, А23В 7/00. Способ сушки волокнистых прессованных материалов : заявка № 2010154629/13 : опубл. 27.02.2013, бюл. № 6 / В. К. Углин, В. Е. Никифоров, Е. А. Тяпугин, С. Е. Тяпугин. – 3 с.
4. 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.
5. Никифоров, В. Е. Разработка экспериментальной установки вакуумной сушки прессованных растительных материалов / В. Е. Никифоров, Л. А. Никитин // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2020. – № 1 (7). – С. 23–26.

V.E. Nikiforov^{1,2}, L.A. Nikitin²

¹Vologda State University

²Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences

CONTROL AND MODE OF PULSED VACUUM DRYING OF PRESSED PLANT MATERIALS

The article presents the mechanism of control of technological equipment for pulsed vacuum drying of pressed plant materials. A theoretical justification for the influence of temperature and pressure indicators regarding the process of removing moisture, which requires significant heat energy consumption and in a certain way affects the speed and duration of drying was given. Using vacuum to remove moisture from materials with low thermal conductivity reduces the drying process while reducing energy consumption.

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