

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМО-ВАКУУМ-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

© 2022 Ю. И. Федоров, С. Ю. Федорова, В. Ф. Мадякин

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский университет» (Казань, Россия)

Основной задачей данной работы являлось определение оптимального режима термо-вакуум-импульсной (ТВИ) сушки целлюлозного материала, полученного методом фильтрации (72-73 % относительной влажности). Проведенные исследования по определению возможности удаления влаги в режиме импульсного вакуумирования показали, что данный вид воздействия позволяет удалять за один цикл от 6,0 до 16,5 % влаги. Определено, что время поддержания вакуума в данном режиме воздействия на материал должно быть не более 60 с. Оптимальным температурным режимом для удаления влаги из волокнистого материала является температура 70°C. Показано, что наиболее эффективным циклом ТВИ-сушки, позволяющим интенсифицировать влагоудаление, является комбинирование импульсного вакуумирования с постоянным отводом среды (паров воды и воздуха) из объема камеры в течение 10 – 60 с и термо-вакуумно-импульсного прососа в течении 180 – 300 с при температуре сушащего агента 70°C.

Ключевые слова: импульс, термо-вакуум-импульсная сушка, цикл, режим, волокнистый материал.

Введение

Для выбора оптимального режима термо-вакуум-импульсной (ТВИ) сушки проводилась предварительная оценка факторов и их влияния на эффективность процесса.

К техническим параметрам, влияющим на эффективность применения ТВИ-режимов в импульсной установке в первую очередь, относятся: конструктивные параметры [1-6]:

– отношения объема ресивера к объему сушильной камеры не менее 10/1 (в том числе и к объему свободного от материала пространства сушильной камеры. Определенная экспериментально оптимальная загрузка материала в ТВИ-установку составляет 0,3-0,6 V_{камеры});

– отношение минимальной площади вакуумпровода к площади поперечного сечения сушильной камеры;

– равномерность распределения потока воздуха по объему материала (отношение высоты и поперечного размера сушильной камеры не должно быть более 1,5/1,0);

– наличие защиты от уноса материала (установка защитной сетки); использование водокольцевых насосов (это позволяет избежать загрязнения материала парами масла) и др.

Основными технологическими факторами, влияющими на скорость влагоудаления для ТВИ-сушки являются [1-4, 7]:

– параметры сушащего агента (температура, расход агента, влажность);

– параметры высушиваемого материала (теплопроводность, теплоемкость, влажность, удельная поверхность и др.);

– глубина вакуумирования (минимальное давление в сушильной камере);

– время импульсного воздействия (при перепаде давления);

– организация цикла «вакуумирование-нагрев» (время вакуумирования, время подачи нагретого сушащего агента, наличие кондуктивного нагрева материала).

В данной работе производится оптимизация параметров вакуумирования и импульсного воздействия сушки на волокнистый материал на основе целлюлозы.

Экспериментальная часть

Выбор оптимального режима складывается из параметров двух процессов: вакуумирования и сушки теплоносителем. В свою очередь для оценки оптимального режима

Федоров Юрий Иванович – ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский университет», канд. техн. наук, доцент, e-mail: snchar@yandex.ru.

Федорова Светлана Юрьевна – ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский университет», канд.

техн. наук, научный сотрудник, e-mail: ignatyeva_svt@mail.ru.

Мадякин Владимир Федорович – ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский университет», канд. техн. наук, доцент, e-mail: madyakin_vf@mail.ru.

процесса вакуумирования необходимо оценить следующие параметры: импульсное воздействие, продолжительность вакуумирования; для сушки: способ её организации (конвективная, кондуктивная, термо-вакуумный просос), импульсное воздействие, расход теплоносителя и его температура.

Оценка эффективности импульсного воздействия проводилась на лабораторной установке в циклических режимах:

– цикл сушки состоит из фазы вакуумирования материала – 5 мин., температура теплоносителя 20°C, относительная влажность воздуха $\omega = 40-45\%$. Шифр режима – ТВИС (5) 20.

– цикл сушки состоит из фазы вакуумирования материала – 5 мин. и фазы конвективной сушки при атмосферном давлении с расходом воздуха 275 дм³/мин. – 5 мин., температура теплоносителя 70°C, начальная относительная влажность воздуха при 20°C $\omega = 40-45\%$. Шифр режима – КС + ТВИС (5+5) 70 (КС – указывает на применение конвективного режима сушки).

Давление при вакуумировании для обоих режимов – 10 кПа.

На рисунке 1 показано сравнение динамики удаления влаги при сушке волокнистого материала с начальной относительной влажностью ($w_{отн}$) 72-73 %.

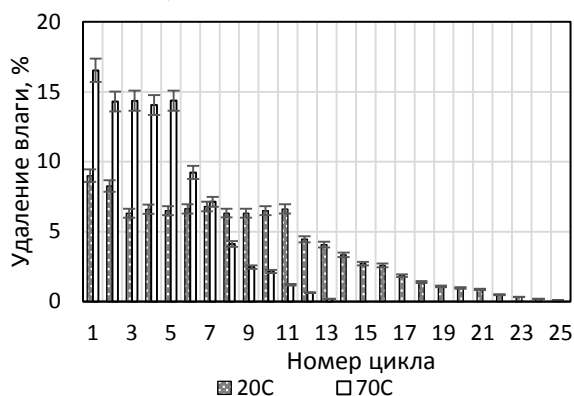


Рисунок 1. Влагоудаление из материала в режиме импульсного вакуумирования

Приведенные данные говорят о том, что применение импульсного вакуумирования позволяет удалять (на первом цикле сушки – до 13,0-16,5 % воды в режиме КС + ТВИС (5+5) 70, для ТВИС (5) 20 – 8,5-9,5 %) за один цикл от 6 до 16,5% влаги.

Применение импульсного вакуумирования даже при 20°C (ТВИС (5) 20) показало высокую эффективность процесса влагоудаления. Время сушки в режимах КС + ТВИС

(5+5) 70 мин., для ТВИС (5) 20 равны 130 мин.

Оптимизация остаточного давления в сушильной камере. Проведенные исследования по влиянию величины вакуумирования в процессе сушки на её скорость показали, что наиболее эффективен процесс влагоудаления в условиях кипения жидкости в объеме. По этой причине глубину вакуума (давления) следует выбирать исходя из температуры вещества по эмпирической зависимости $P = 1,2252e^{0,0451T} - n$, где Т – температура материала в процессе сушки (можно использовать температуру теплоносителя), n - поправочный коэффициент, учитывающий изменения температуры кипения связанной влаги, кПа (1-10 кПа). Применение давления ниже 6-10 кПа – экономически не выгодно из-за необходимости использования двух насосов и увеличения толщины стенок сосудов, и коммуникаций.

Оптимизация времени цикла вакуумирования. Для этой цели проведена оценка изменения массы удаленной воды при вакуумировании, давления в вакуумной сушильной камере. Эксперимент заключался в следующем. В вакуумную сушильную камеру помещался сосуд с водой (200 мл, площадь поверхности 78,5 см²), далее проводилось вакуумирование до рабочего давления (5,4 кПа) и перекрытием клапанов, фиксировалось изменение давления по вакуумметру за период от 5 до 300 с. По окончании времени выдержки давление в камере выравнивалось с атмосферным и производилось взвешивание сосуда и расчет влагоудаления. Та же последовательность действий повторялась с нагретой до 50– 70°C водой.

На рисунке 2 приведены данные по влиянию времени вакуумирования на скорость влагоудаления. Наиболее интенсивен данный процесс на начальном участке 10-60 с. Снижение эффективности сушки связано с двумя обстоятельствами: насыщением водными парами объема камеры, снижением температуры материала (приближению системы к равновесию).

Рассмотрим два режима вакуумирования:

– начальное вакуумирование с последующим повышением давления в камере до равновесного (ниже атмосферного); вакуумный насос выключен (давление возрастает из-за испарения воды, насыщения водными парами объема камеры и ресивера).

– постоянный отвод среды из объема сушилки (поддерживается постоянное давление 5,4-10 кПа, в процессе вакуумирования вакуумный насос постоянно включен);

Проведенные опыты в первом режиме показали неэффективность данного процесса, т. к. установление равновесия в системе и отсутствие отвода водяных паров приводит к низкой скорости влагоудаления. Повышение давления при испарении влаги в объем камеры сушки и ресивера приводит к установлению равновесия на 5-10 с. Постоянное вакуумирование эффективно при времени действия не более 60 с (рис. 2). В данном случае уменьшение скорости влагоудаления по времени связано с падением температуры воды из-за снижения температуры кипения в условиях пониженного давления (при давлении 5 кПа $t_{кип} = 32,9^{\circ}\text{C}$).

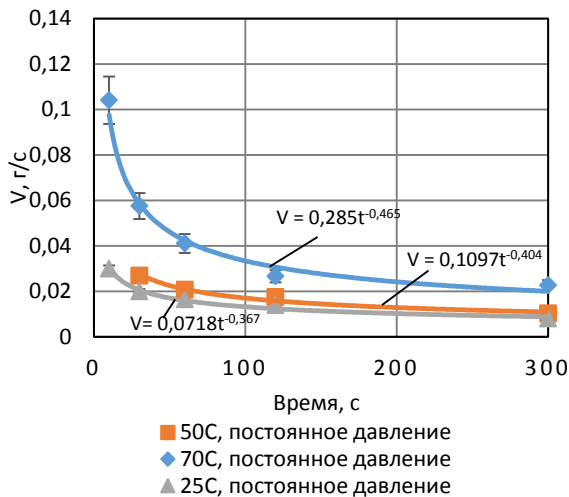


Рисунок 2. Зависимость скорости влагоудаления от времени вакуумирования

Организация процесса подвода тепла. Наиболее простое решение для нагрева материала – кондуктивный теплообмен, т. к. он эффективен при пониженных давлениях среды, но его применение не позволяет осуществить равномерный прогрев. По этой причине необходимо применение конвективных методов подвода тепла. Для того, чтобы определить оптимальный режим необходимо произвести оценку влияния теплового потока с помощью регулирования параметров теплового агента и объема его подачи. Для этого используются режим термо-вакуумно-импульсного прососа с шифром ТВИП (5): прокачка теплового агента осуществляется через объем материала за счет разности давлений, создаваемых вакуумным насосом, расход

нагретого воздуха $275 \div 475 \text{ дм}^3/\text{мин}$, температура воздуха $50\text{--}70^{\circ}\text{C}$, продолжительность одного цикла 5 мин. На рисунке 3 приведены зависимости времени сушки, конечной влажности материала от температуры теплоносителя (воздуха, $V_{\text{тепл}} = 275 \text{ дм}^3/\text{мин}$).

На рисунке 4 приведены зависимости времени сушки, конечной влажности материала от суммарного расхода теплоносителя (воздуха при температуре 70°C).

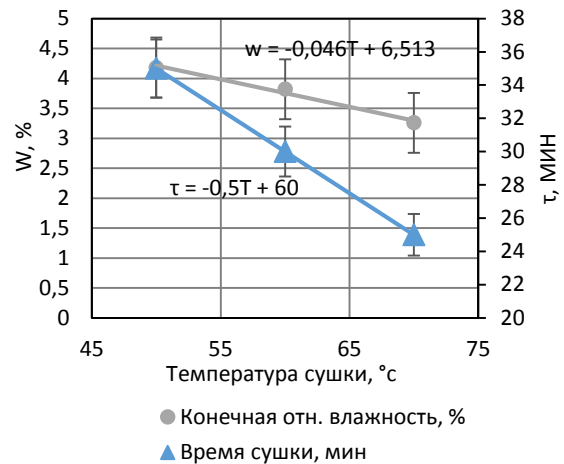


Рисунок 3. Влияние температуры сушащего агента на основные характеристики процесса сушки методом ТВИП

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что для увеличения интенсивности влагоудаления требуется обеспечить нагрев материала до $60\text{--}70^{\circ}\text{C}$.

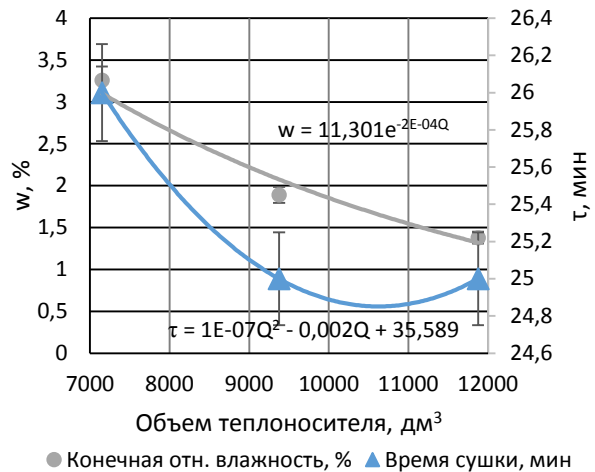


Рисунок 4. Влияние расхода сушащего агента на основные характеристики процесса сушки методом ТВИП

Оптимизация времени подачи теплоносителя. Определение времени подачи теплоносителя производилось экспериментально. На рисунке 5 приведены зависимости температуры

поверхности волокнистого материала от времени нагрева.

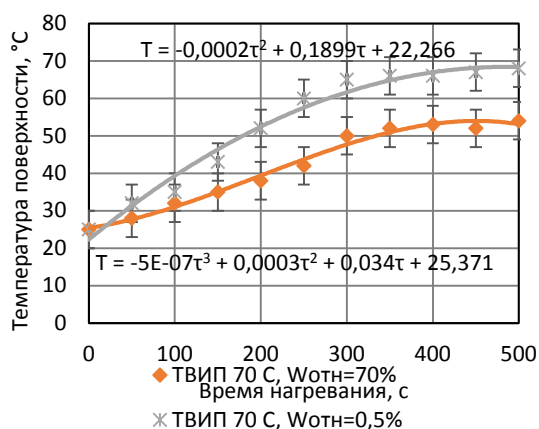


Рисунок 5. Влияние времени прокачки сушащего агента на температуру поверхности

Показано, что оптимальное время нагрева модельной заготовки 200-450 с, в зависимости от влажности материала. Обобщение всех экспериментальных данных позволяет принять 300 с – как оптимальное время процесса нагревания.

Вывод

Проведенные исследования позволили определить оптимальный режим сушки волокнистого материала – ТВИП + ТВИС (5+1) при температуре теплоносителя 60-70°C. При увеличении габаритов изделия и для повышения интенсивности необходимо применять кондуктивный подвода тепла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Игнатъева С. Ю. Оптимизация технологии ТВИ-сушки аммиачной селитры различных марок / С. Ю. Игнатъева, В.Я. Базотов, В. Ф. Мадякин, Д. А. Захаров // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – Вып. 15. – С. 130-131.

2. Мадякин В. Ф. Динамика термо-вакуум-импульсной сушки инертного конструкционного сгорающего материала / В. Ф. Мадякин, Т. А. Енейкина, А.Ю. Осипова, С. В. Солдатов, С. Ю. Игнатъева, Р. Ф. Гатина // Бутлеровские сообщения. – 2015. – Т. 44. – Вып. 11. – С. 159-165.

3. Игнатъева С. Ю. Термо-вакуум-импульсная сушка модельной композиции на основе целлюлозы марки Э-2 / С. Ю. Игнатъева, В. Ф. Мадякин, Р. Ф. Гатина, А. Ю. Осипова // Вестник технологического университета. – 2014. – Т. 17. – Вып. 17. – С. 144-147.

4. Игнатъева С. Ю. Влияние технологии ТВИ-сушки на дисперсность аммиачной селитры различных марок / С. Ю. Игнатъева, В. Я. Базотов, В. Ф. Мадякин, Д. А. Захаров // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – Вып. 15. – С. 135-136.

5. Быкова Е. Л. Теоретическое исследование сушки дубовых пиломатериалов вакуум-импульсным и конвективным способами / Е. Л. Быкова, Ю. И. Тракало // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 331.

6. Иванова И. В. Условия комбинированной конвективной вакуум-импульсной сушки растительных продуктов / И. В. Иванова, А. А. Горелова, Е. С. Соколова, Н. А. Кондаков, К. И. Черемисина // Сборник научных трудов всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства. – 2016. – Т. 1. – № 9. – С. 57-60.

7. Мазуркин П. М. Факторный анализ процесса осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов / П. М. Мазуркин, Р. Р. Сафин, Ш. Р. Мухаметзянов, В. В. Губернаторов // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – Вып. 7. – С. 80-83.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL MODES OF A THERMO-VACUUM PULSE DRYING CELLULAR FIBER MATERIAL

© 2022 Yu. I. Fedorov, S. Yu. Fedorova, V. F. Madyakin

Kazan National Research University (Kazan, Russia)

The main objective of this work was to determine the optimal mode of thermal vacuum pulse (TVI) drying of cellulose material obtained by filtration (72-73% relative humidity). The studies carried out to determine the possibility of removing moisture in the pulsed vacuum mode showed that this type of exposure allows you to remove in one cycle from 6.0 to 16.5 % of moisture. It is determined that the vacuum maintenance time in this mode of exposure to the material should be no more than 60 s. The optimal temperature regime for removing moisture from the fibrous material is a temperature of 70°C (a temperature above 70°C is not considered due to process safety requirements). It is shown that the most effective TWI-drying cycle, which makes it possible to intensify dehumidification, is the combination of pulsed evacuation with constant removal of the medium (water and air vapor) from the chamber volume for 10 – 60 s. and thermal-vacuum-impulse suction during 180 – 300 s. at a drying agent temperature of 70°C.

Keywords: pulse, thermo-vacuum-pulse drying, cycle, mode, fibrous material.