

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
СУШКИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ©2016 Е.Н. Ахмедьянова¹, С.Н. Редников²¹ Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Статья поступила в редакцию 27.03.2016

В статье рассматриваются вопросы математического моделирования процесса влагоудаления, как при постоянном подводе тепла к высушиваемому материалу, так и при осциллирующем подводе теплоты. Приводится зависимость термоградиентного коэффициента от влажности и температуры.

Ключевые слова: *пеллета, сушка, термодиффузия, осциллирующий и не осциллирующий режимы*

Широкое распространение процесса влагоудаления в различных отраслях химической, пищевой промышленности, металлургии, лесопереработки и сельского хозяйства делает актуальной направления исследования, посвящённые сокращению времени влагоудаления и повышению экономической эффективности процесса сушки. В течение последних 60 лет проводилось интенсивное изучение процессов влагоудаления и разработки теории сушки, значительный вклад в изучение процессов массопереноса внесён работами Лыкова М.В., Сажина Б.С., Лебедева П.Д. и др. Разработаны методики создания аппаратов с кипящим слоем, вихревых сушильных камер, ведутся интенсивные работы по созданию установок комбинированного влагоудаления с использованием теплообмена излучением в микроволновом и инфракрасном диапазоне. [4]. В тоже время большинство авторов разрабатывая установки влагоудаления ориентируется на создание систем с высокой интенсивностью тепло массопереноса или с минимальным временем пребывания объекта сушки в аппарате. Количество работ, посвящённых созданию аппаратов экономически оптимальных невелико. Рассматривать данный процесс влагоудаления необходимо комплексно, не разделяя его отдельных фаз и механизмов, учитывая особенности нагрева, испарения, переноса влаги внутри частицы и обтекания частицы газовым потоком, и уносом влаги с увлажнённым газом из гранулированного слоя. Новым направлением в создании высокоэффективных сушильных установок являются системы, использующие периодический подвод тепла известным как осциллирующий режим влагоудаления. Применение этого способа интенсификации влагоудаления требует разработки уточнённой имитационной математической модели процесса для определения оптимальных режимов.

Цель работы: разработка уточнённой математической модели влагоудаления, получение обобщающей зависимости для определения термоградиентного коэффициента для сушки древесных отходов, определение эффективных режимов осциллирующей сушки.

Методика исследования. Наиболее эффективным методом поиска путей повышения эффективности процесса влагоудаления, на наш взгляд, является математическое моделирование. Рассматривая процесс

влагоудаления из древесной щепы, являющейся отходами переработки древесины, следует заметить, что данный процесс имеет ряд отличий по сравнению с влагоудалением из массива древесины. За счёт повреждённой структуры материала интенсивность внутреннего влагопереноса в продольном и поперечном направлениях значительно отличается от аналогичных параметров у массива соответствующих пород. Без учёта этой особенности математические модели процесса сушки не будут обладать высокой точностью.

Ряд исследователей [1-4] разделяют «активные» и «пассивные» режимы сушки. Основными признаками активных гидродинамических режимов по мнению Сажина [2, 8, 9] являются: развитая поверхность взаимодействия фаз, гидродинамическая устойчивость (стабильность гидродинамической обстановки во времени по всему объёму аппарата), приближение гидродинамической модели потоков в аппарате к модели идеального вытеснения, а также увеличение относительной скорости движения фаз. Повышение активности гидродинамической обстановки в сушильном аппарате связано с увеличением межфазных относительных скоростей, подвижности и столкновения частиц, а соответственно среднего коэффициента теплоотдачи, что интенсифицирует процесс, однако требует роста затрат. За косвенный показатель гидродинамической активности аппарата можно принять коэффициент межфазной теплоотдачи с учетом доли тепла, идущей на испарение влаги. Это так, если речь идёт об этапе сушки с постоянной скоростью влагоудаления.

Рассматривая процессы сушки, необходимо понимать, какие процессы протекают в материале при удалении влаги. При нарушении равномерного распределения влаги по объёму материала, то есть при наличии градиента влажности влага перемещается из мест с большей концентрации влаги в места менее увлажнённые. В процессе сушки происходит испарение влаги с поверхности материала, при этом влажность верхних слоёв уменьшается и за счёт разности концентраций между поверхностными и внутренними слоями возникает внутренняя диффузия. Но нагрев поверхности приводит к изменению направления движения влаги в материале [6]. Процесс удаления влаги нестационарен.

Необходимо выделить несколько этапов сушки. Традиционно выделяют период прогревания материала, при этом на поверхности материала достигается температура влажного термометра. В конце данного периода достигается максимальная скорость сушки.

Ахмедьянова Елена Наильевна, аспирантка. E-mail: Karinlen@mail.ru
Редников Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: srednikov@mail.ru

Она определяется равенством скоростей диффузии влаги к поверхности и скорости испарения. Это характерно для всего второго этапа сушки, когда скорость испарения остаётся постоянной. В этот период удаляется влага намокания, удаляется влага из пор и крупных капилляров, происходит снижение уровня влагосодержания на 70-80%. На этом этапе процесс подчиняется законам испарения жидкости со свободной поверхности, без проникновения границы испарения под поверхность. При стабильных внешних условиях скорость сушки на отрезке постоянна. Когда количество влаги в поверхностном слое материала уменьшается и становится близким к сорбционной емкости, испарение влаги замедляется, так как скорость подачи ее к поверхности меньше, чем скорость испарения. Наступает третий этап сушки – испарение влаги с ненасыщенной поверхности. На этом этапе происходит испарение капиллярной влаги. После испарения всей влаги из макропор и для ряда материалов наступает этап стабилизации скорости сушки.

Наличие того или иного периода сушки обусловлено особенностями структуры и начальной влажностью материала. В коллоидных капиллярно-пористых телах влага может перемещаться в виде жидкости и в виде пара [5]. Основными факторами перемещения влаги в материале является градиент влажности и температуры. Влага находится в равновесном состоянии в материале при условии равенства температур в различных её точках и равномерном её распределении по всему объему материала. При нарушении равенства температур, то есть при наличии градиента температуры, влага перемещается от поверхности с высокой температурой к поверхности с более низкой температурой. При незначительном перепаде температур влага перемещается в виде жидкости, а при большом перепаде – в виде пара. Перемещение влаги по направлению потока тепла обычно называется термодиффузией [7, 9]. При нагревании поверхностное натяжение изменяется. На нагретой поверхности поверхностное натяжение и капиллярное давление уменьшаются, капиллярный потенциал нагретой поверхности уменьшается, и жидкость перемещается от мест более нагретых к местам менее нагретым. То есть на третьем этапе сушки существует механизм обратного переноса влаги от зоны испарения в подповерхностные слои. Поскольку на процессы прогрева и диффузии влаги взаимно связаны и обладают определённой инерционностью то интенсифицировать процесс удаления влаги можно интенсифицировать периодическим нагревом и охлаждением поверхности. При этом можно ожидать наличия оптимальной частоты смены нагрева и охлаждения зависящей от амплитуды температур, влажности материалов, теплоёмкости каркаса тела [5-7].

Рассмотрим наиболее часто применяемые математические модели расчёта тепловых полей и полей влажности материала. Лебедев П.Д. в «Теплообменные сушильные и холодильные установки» воспользовался следующими формулами к изучению процесса сушки.

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_s \rho_0} - \frac{r_s}{c_s} \frac{dU}{d\tau}$$

где q_v – внутренний положительный источник тепла; ρ_0 – плотность сухого материала; c_s – теплоемкость влажного материала; r – теплота парообразования; ε – коэффициент внутреннего испарения влаги; t – температура материал; a – коэффициент температуропроводности материала при его средней влажности.

У Лыкова при $p = \text{const}$ дифференциальное уравнение переноса тепла и массы во влажном теле имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = D \gamma_0 \nabla^2 \omega + D \gamma_0 \delta \nabla^2 \vartheta$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = a \nabla^2 \vartheta + \varepsilon \frac{r}{c} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial \tau}$$

где r – удельная теплота испарения; δ – коэффициент термодиффузии, характеризует относительный массоперенос пара и жидкости; ε – критерий испарения, характеризующий долю переноса влаги в виде пара от общего ее потока, $0 \leq \varepsilon \leq 1$, при $\varepsilon = 0$ перенос влаги происходит в виде жидкости, при $\varepsilon = 1$ за счет диффузии пара.

Процесс сушки, Лыков А.В. разделил на два этапа и кривую скорости во втором этапе заменил прямой линией, геометрическое соотношение выглядит так:

$$-\frac{dw}{d\tau} = N \frac{w - w_p}{w_{к.п.} - w_p} = \kappa N (w - w_p)$$

где N – постоянная скорость сушки в первом периоде; $w_{к.п.}$ – приведенная критическая влажность, которая может быть больше или меньше действительной критической влажности; $\kappa = 1/(w_{к.п.} - w_p)$ – относительный коэффициент сушки, зависящий от характеристики материала и определяемый экспериментально.

После интеграции уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$\kappa = 1/(w_{к.п.} - w_p)$$

где $w_{к.п.}$ – приведенная критическая влажность, которая может быть больше или меньше действительной критической влажности; w_1 и w_2 – начальная и конечная влажность сушеного материал; w_p – равновесная влажность.

Учитывая, многообразие математических моделей процесса сушки приходится учитывать те ограничения, которые накладывает сам объект удаления влаги – щепы. Поскольку в этом случае толщина одиночного элемента древесной щепы много меньше других характерных размеров использование двумерных а тем более трёхмерных моделей вызывает сомнения, учитывая что конечная влажность не должна быть ниже 12-13%, учёт режима с входом границы испарения в массив тела, как минимум, требует проверки. Конечная влажность древесной щепы оценивается в 13,5%, что определяется технологией дальнейшей переработки.

Экспериментальная часть. В ходе расчетов авторами были приняты следующие допущения: предельная температура сушильного агента составляла 140°C (требования пожарной безопасности) при использовании воздуха в качестве сушильного агента, недопущение обугливания поверхностного слоя сушеного материала, что отрицательно сказывается на дальнейшем технологическом процессе. Для решения поставленной задачи была применена система одномерных уравнений:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D \cdot \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + D \cdot \rho \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \cdot \frac{r}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}$$

Масса удаляемой влаги

$$m_B = -D \cdot \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - D \cdot \rho \cdot \delta \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

где T – температура, u – влагосодержание, x – текущая координата a – температуропроводность, D – коэффи-

циент диффузии, γ – скрытая теплота парообразования, ε – критерий испарения $\varepsilon=0$ при диффузии влаги и $\varepsilon=1$ при диффузии пара, τ – время, δ – коэффициент термодиффузии с- теплоёмкость.

Одним из основных коэффициентов переноса массы влаги является D – коэффициент диффузии пара и жидкости, в некоторых случаях его называют коэффициентом потенциалопроводности или влагопроводности, зависит он от влажности и температуры вещества. При этом одной из важнейших задач является определение коэффициента диффузии (потенциалопроводности) и коэффициента термодиффузии. Последний также зависит от температуры и влажности вещества.

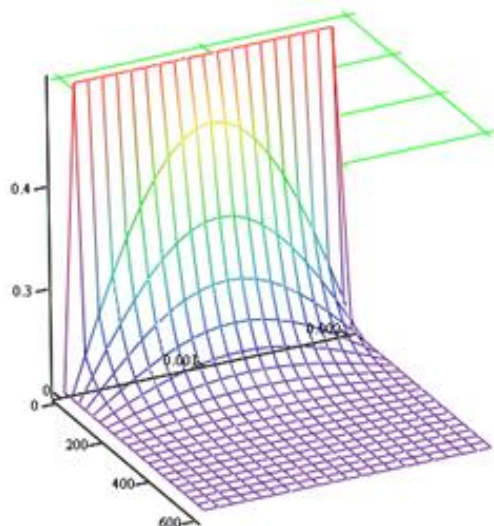


Рис. 1. Трёхмерное представление полученной зависимости изменения влагосодержания

Критическим участком математического моделирования процесса влагоудаления является определение коэффициента диффузии и термоградиентного коэффициента. На основании анализа собственных экспериментальных данных, а также анализа данных по значению коэффициента термодиффузии, приведенных в работах [5-7, 9] авторами была получена зависимость коэффициента термодиффузии:

$$\delta = 0.241 \cdot U - 0.048 \cdot t - 1.412 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot t - 1.188 \cdot 10^{-3} \cdot U^2 + 5.086 \cdot 10^{-4} \cdot t^2$$

где t – температура, u – влагосодержание.

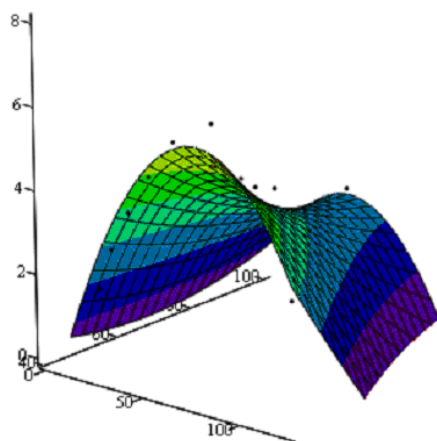


Рис. 2. Зависимость термоградиентного коэффициента от температуры и влагосодержания

Для анализа эффективности осциллирующего режима был поставлен ряд численных экспериментов с использованием модернизированной модели, основной задачей которого, являлось определение режима обеспечивающего одинаковое по сравнению со стационарным время влагоудаления при меньших энергетических затратах. Графики на рис. 3-6 доказывают одинаковое время влагоудаления по объёму с осциллирующим и не с осциллирующим режимах сушки, при этом при осциллирующем режиме потребление тепловой энергии на 20% меньше.

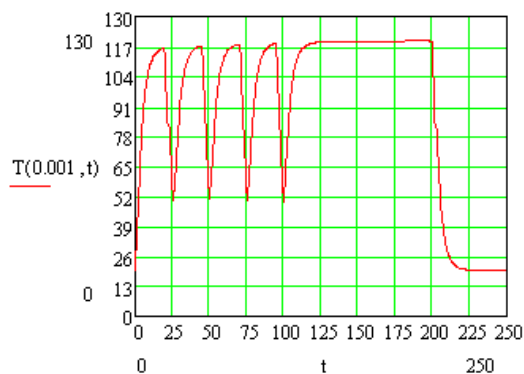


Рис. 3. Изменение температуры в центре исследуемого объекта при осциллирующем режиме подвода тепла

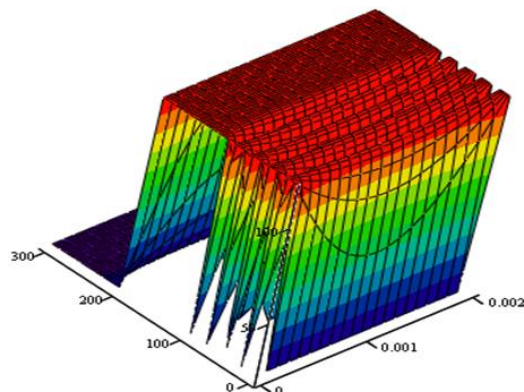


Рис. 4. Графики влагосодержания по сечению тела во времени

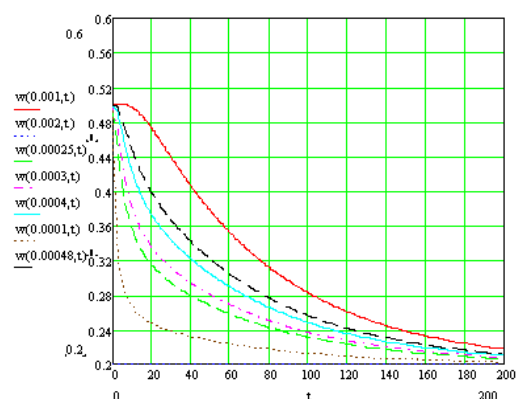


Рис. 5. Осциллирующий режим сушки

Выводы: авторами была разработана математическая модель удаления влаги из щепы с учётом зависимости термоградиентного коэффициента от влажности материала и температуры. Проведя математическую обработку экспериментальных данных методом наименьших квадратов авторами была получена

регрессионная зависимость термоградиентного коэффициента от температуры и влажности, для сушки древесных отходов. Произведена оценка эффективности режимов осциллирующей сушки.

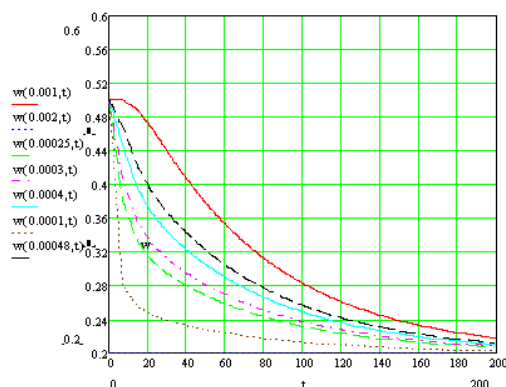


Рис. 6. Стационарный нагрев исследуемого объекта

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ахмедьянова, Е.Н. Увеличение энергоэффективности установок сушки пеллет // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Том 16, № 1(2). С. 352-355.
2. Гальперин, Н.И. Основы техники псевдооживления / Н.И. Гальперин, В.Г. Айништейн, В.Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. 664 с.
3. Ахмедьянова, Е.Н. Нестационарные режимы влагоудаления / Е.Н. Ахмедьянова, О.С. Пташкина-Гирина // В сб.: «Пром-Инжиниринг», труды междунар. науч.-техн. конф. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). – Челябинск, 2015. С. 40-42.
4. Гинзбург, А.С. Технология сушки пищевых продуктов. – М.: «Пищевая промышленность», 1976. 248 с.
5. Гинзбург, А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое / А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков. – М.: «Пищевая промышленность», 1966. 196 с.
6. Лыков, А.В. Тепло- массообмен в процессах сушки. – М.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
7. Кречетов, И.В. Сушка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1987. 440 с.
8. Кречетов, И.В. Сушка древесины – М.: Бриз, 1992. 449 с.
9. Куталадзе, С.С. Основы теории теплообмена. – Л.: Машгиз, 1968. 456 с.

MATHEMATICAL MODELING OF WOOD WASTE DRYING PROCESS

© 2016 E.N. Akhmedyanova¹, S.N. Rednikov²

¹ South Ural State Agricultural University, Chelyabinsk

² South Ural State University, Chelyabinsk

In article the question of mathematical modeling and graphic comparison of wood waste drying process is considered.

Key words: pellet, drying, thermal diffusion, oscillating mode, not oscillating the mode

Elena Akhmedyanova, Post-graduate Student.

E-mail: Karinlen@mail.ru

Sergey Rednikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: srednikov@mail.ru