

УДК 66.047:661.728

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ СУШКИ ХЛОПКОВОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

А.А.Липин, А.Г. Липин, В.Н. Исаев, П.Е.Ковалев

*Ивановский государственный химико-технологический университет*

Выполнено экспериментальное исследование влияния остаточного давления и температуры в сушильной камере на кинетику процесса сушки хлопковой целлюлозы, спрессованной в кипы. Определены значения этих параметров, обеспечивающие наиболее энергетически эффективные режимы сушки. Предложена математическая модель процесса сушки кипы хлопковой целлюлозы, имеющей форму параллелепипеда. Такая модель позволяет прогнозировать изменение влажности целлюлозы по объему кипы, среднеобъемную влажность кипы, время процесса. С применением разработанной математической модели рассчитано время сушки до заданной влажности кип хлопковой целлюлозы с разными габаритами. Сделан вывод, что при уменьшении габаритов кипы время, затрачиваемое на ее сушку, уменьшается. Уменьшение высоты кипы позволяет сократить время сушки даже при больших размерах по длине и ширине.

**Ключевые слова:** сушка, кинетика, хлопковая целлюлоза, энергоэффективность, математическое моделирование.

Целлюлозу используют для изготовления пластика, лакокрасочных и строительных материалов, фото- и видео пленки, веществ для пищевой промышленности. Хлопковая целлюлоза является базовым компонентом в производстве карбоксиметилцеллюлозы, в производстве нитроцеллюлозы, ацетилцеллюлозы, медноаммиачного волокна, картона [1]. Для удобства транспортирования хлопковую целлюлозу прессуют в кипы. Во время транспортировки или хранения кип их влажность может увеличиваться до 20 мас. % вследствие поглощения влаги из атмосферного воздуха. Для дальнейшей переработки хлопковой целлюлозы её влажность должна быть снижена до 3-5 мас.%. Существует несколько способов сушки хлопковой целлюлозы: конвективная [2, 3], вакуумная [1], термо-вакуум-импульсная сушка [4, 5].

Данная работа посвящена расчетно-экспериментальному исследованию процесса вакуумной сушки кипы хлопковой целлюлозы, с целью определения влияния параметров сушки на скорость протекания

процесса и установления его наиболее энергетически эффективных режимов.

Экспериментальные исследования выполнялись на лабораторной установке (рис. 1), состоящей из следующих основных элементов: вакуумной сушильной камеры 1 с тепловой изоляцией 6 и конденсатором паров влаги 2, компрессорной холодильной установки 3 и вакуумного насоса 4. Все основные узлы, кроме вакуум-насоса, размещены на подвижном каркасе 5. Стенки сушильной камеры нагреваются при помощи электрического тока. Давление в камере контролируется вакуумметром 7, регулирование величины вакуума осуществляется с помощью игольчатого клапана 8. Измерение температуры материала и воздуха в сушильной камере осуществляется с помощью термомпар, показания которых выводятся на цифровой прибор 9. Регулирование температуры в камере производится измерителем-регулятором ТРМ-1А с релейным выходом 10. Расположение термомпар позволяет проводить измерения распределения температуры по толщине материала

ла на строго определенном расстоянии друг относительно друга, путем их введения в образец. Эксперименты проводились с образцами спрессованной хлопковой целлюлозы прямоугольной формы и

следующими размерами: длина – 260 мм, ширина – 230 мм, толщина – 130 мм. Перед сушкой образцы увлажнялись до относительной влажности (22-28)%.

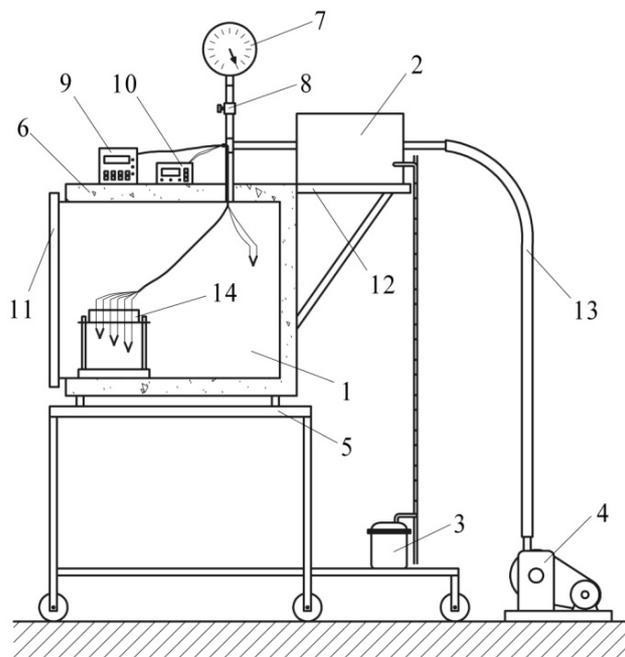


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

При проведении экспериментов, модельный образец помещался в сушильную камеру установки, нагревался до температуры поверхности материала 90-100 °С, после чего включался вакуумнасос и устанавливалось заданное значение величины вакуума. Затем устанавливался заданный температурный режим, и проводился процесс сушки при постоянных температуре и давлении. Сушка проводилась до остаточной влажности материала 4 %. Температура материала измерялась в четырех точках образца с помощью термопар, которые устанавливались на равных расстояниях друг от друга: - на поверхности материала; 2 - 1/3 половины толщины образца; 2 - 2/3 половины толщины образца; 4 – в центре материала.

В ходе экспериментов изучалось влияние величины вакуума и температуры сушки на скорость процесса. В первой серии опытов температура поверхности материала поддерживалась постоянной, равной  $t_1=120$  °С, а величина вакуума изменялась в диапазоне  $P_{\text{вак}}=600-720$  мм рт.ст. В опытах второй серии величина вакуума поддерживалась постоянной, равной  $P_{\text{вак}}=680$  мм рт.ст., а температура поверхностного слоя материала  $t_1$  составляла 100 и 120 °С.

Результаты всех выполненных экспериментов представлены в табл. 1. Анализируя данные таблицы можно сделать вывод, что понижение абсолютного давления (увеличение вакуума) и повышение температуры позволяют интенсифицировать процесс сушки.

фицировать процесс. При этом увеличивается производительность установки по испаренной влаге, уменьшаются энергозатраты и сокращается время сушки. Од-

нако дальнейшее повышение температуры выше 120 °С нежелательно, так как это приводит к деструкции материала.

Таблица 1

## Результаты экспериментов

| № | $T_1, ^\circ\text{C}$ | $P_{\text{абс}}, \text{мм.рт.ст}$ | $\omega, \text{кг влаги/кг материала}$ | $\tau, \text{час}$ | $W, \text{кг влаги}$ | $Z, \text{кВт/кг влаги}$ |
|---|-----------------------|-----------------------------------|--|--------------------|----------------------|--------------------------|
| 1 | 120                   | 30                                | 0,267                                  | 3,5                | 0,482                | 25,56                    |
| 2 | 120                   | 70                                | 0,198                                  | 3,58               | 0,346                | 36,42                    |
| 3 | 120                   | 100                               | 0,235                                  | 4,42               | 0,392                | 39,69                    |
| 4 | 120                   | 150                               | 0,231                                  | 5                  | 0,378                | 46,56                    |
| 5 | 120                   | 150                               | 0,223                                  | 4,5                | 0,358                | 44,26                    |
| 6 | 100                   | 70                                | 0,202                                  | 4,67               | 0,324                | 50,74                    |

Для прогнозирования времени сушки образцов большего размера, чем модельные, была разработана математическая модель процесса сушки хлопковой целлюлозы. В основе модели лежит дифференциальное уравнение влагопровод-

ности, которое описывает нестационарное поле влагосодержания материала в трехмерной области в форме параллелепипеда, на границе которой значения влагосодержания известны:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad 0 < x < L, \quad 0 < y < B, \quad 0 < z < H, \quad (1)$$

с граничным условием:

$$C_{\Gamma} = C_p, \quad (2)$$

и начальным условием:

$$C(x, y, z, 0) = C_0, \quad (3)$$

где  $L$  – длина, м;  $B$  – ширина, м;  $H$  – высота кипы хлопковой целлюлозы, м;  $C_p$ ,  $C_0$  – равновесное и начальное значения влагосодержания.

Решение данного уравнения проводим методом конечных разностей. На

рассматриваемую область накладываем сетку, в узлах которой частные производные заменяем их конечно-разностными аппроксимациями:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx \frac{C_{i,j-1,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j+1,k}}{h_x^2}, \quad j=1, \dots, N-1 \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \approx \frac{C_{i-1,j,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i+1,j,k}}{h_y^2}, \quad i=1, \dots, N-1. \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \approx \frac{C_{i,j,k-1} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j,k+1}}{h_z^2}, \quad k=1, \dots, N-1. \quad (6)$$

Здесь  $h_x = L/N$ ,  $h_y = B/N$ ,  
 $h_z = H/N$  – шаг по координате,  $N$  – число шагов разбиения по координатам.

$$\frac{C_{i,j,k} - \tilde{C}_{i,j,k}}{\Delta\tau} = D \left( \frac{C_{i,j-1,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j+1,k}}{h_x^2} + \frac{C_{i-1,j,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i+1,j,k}}{h_y^2} + \frac{C_{i,j,k-1} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j,k+1}}{h_z^2} \right), \quad (7)$$

где  $\tilde{C}_{i,j,k}$  – значение влагосодержания в узле сетки в предыдущий момент времени,  $C_{i,j,k}$

$C_{i,j,k}$  – значение влагосодержания в узле сетки в текущий момент времени.

Решая систему  $(N-1)^3$  конечно-разностных уравнений, получаем значения температур в узлах расчетной сетки в последующий момент времени  $\tau + \Delta\tau$ . Полученные значения температур становятся

$$a \cdot C_{i+1,j} + b \cdot C_{i-1,j} + c \cdot C_{i,j+1} + d \cdot C_{i,j-1} + e \cdot C_{i,j} = S, \quad (8)$$

где  $a, b, c, d$  и  $e$  – матрицы, которые задают коэффициенты лапласиана (8),  $S$  – источниковый член.

$$a \cdot C_{i+1,j,k} + b \cdot C_{i-1,j,k} + c \cdot C_{i,j+1,k} + d \cdot C_{i,j-1,k} + e \cdot C_{i,j,k} = S. \quad (9)$$

Определяем матрицы аппроксимирующего уравнения (9):

$$a = \frac{D}{h_x^2}, \quad b = \frac{D}{h_x^2}, \quad c = \frac{D}{h_x^2}, \quad d = \frac{D}{h_x^2}, \quad e = -\frac{2 \cdot D}{h_x^2} - \frac{2 \cdot D}{h_y^2} - \frac{2 \cdot D}{h_z^2} - \frac{1}{\Delta\tau}, \quad (10)$$

и источниковый член:

$$S = \frac{-C_{i,j,k}}{\Delta\tau} - (C_{i,j,k-1} + C_{i,j,k+1}) \cdot \frac{D}{h_z^2} \quad (11)$$

Среднеобъемное значение влагосодержания:

$$C_{cp} = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} C_{i,j,k}}{(N-1)^3} \quad (12)$$

Идентификация параметров математической модели осуществлялась путем решения обратной задачи. Эффек-

Конечно-разностный аналог уравнения (1) при использовании неявной схемы запишется в виде:

ся начальным условием для расчета на следующем временном шаге.

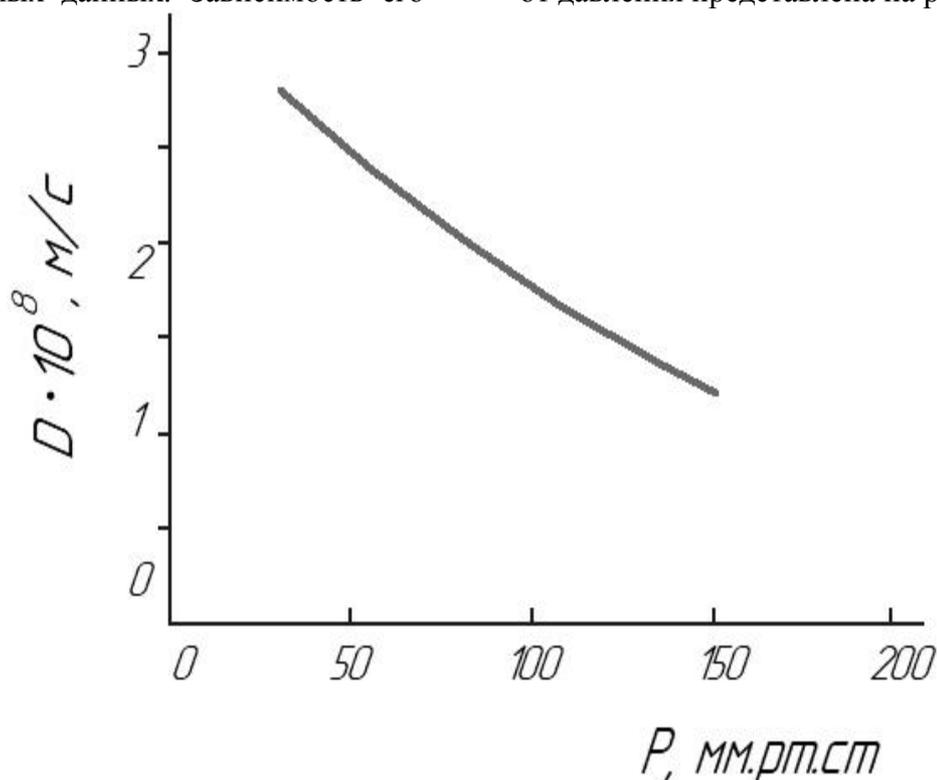
Применим для решения дифференциального уравнения теплопроводности встроенную функцию Mathcad relax (a,b,c,d,e,S,u,rlac) [6], где  $u$  – матрица начальных условий,  $rlac$  – коэффициент релаксации.

Функция Relax решает уравнение Пуассона для двухмерной области. Алгоритм решения подразумевает аппроксимацию этого уравнения линейным лапласианом:

Для трехмерной задачи уравнение (8) примет вид (9):

тивный коэффициент теплопроводности  $D$  подбирался, исходя из обеспечения хорошего соответствия расчетных и экспе-

риментальных данных. Зависимость его от давления представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Зависимость эффективного коэффициента влагопроводности от давления в сушильной камере**

Математическая обработка полученных результатов позволила получить следующую расчетную формулу, спра-

ведливую для исследованного диапазона давлений и температур:

$$D = (-0,013 \cdot P + 3,164) \cdot (1 + 0,01 \cdot (t - 120)) \cdot 10^{-8} \quad (13)$$

С применением разработанной математической модели выполнен численный эксперимент. Исследовалось влияние температуры, абсолютного давления, габаритов кип на кинетику сушки хлопковой целлюлозы. Рис. 3 иллюстрирует зависимость времени сушки от абсолютного давления в сушильной камере при различном начальном влагосодержании хлопковой целлюлозы.

Из графика видно, что увеличение абсолютного давления увеличивает время сушки.

На рис. 4 представлены кривые сушки кипы хлопковой целлюлозы при различных значениях температуры сушки. Можно сделать вывод, что при увеличении температуры уменьшается время сушки кипы. Однако повышение температуры выше  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  не представляется возможным, так как это приводит к деструкции хлопковой целлюлозы.

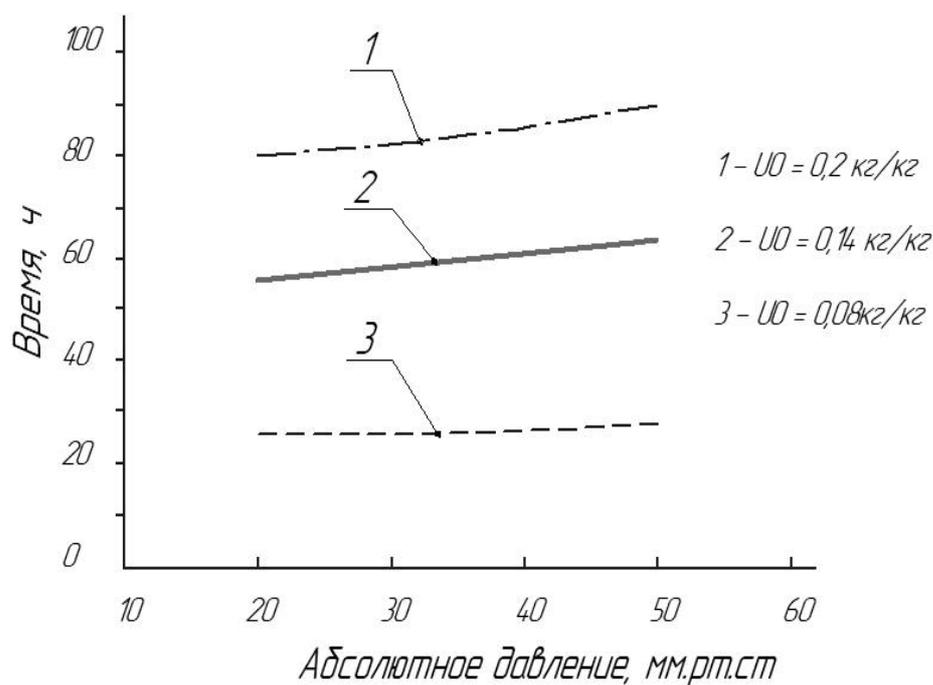


Рис. 3. Зависимость времени сушки от давления в сушильной камере

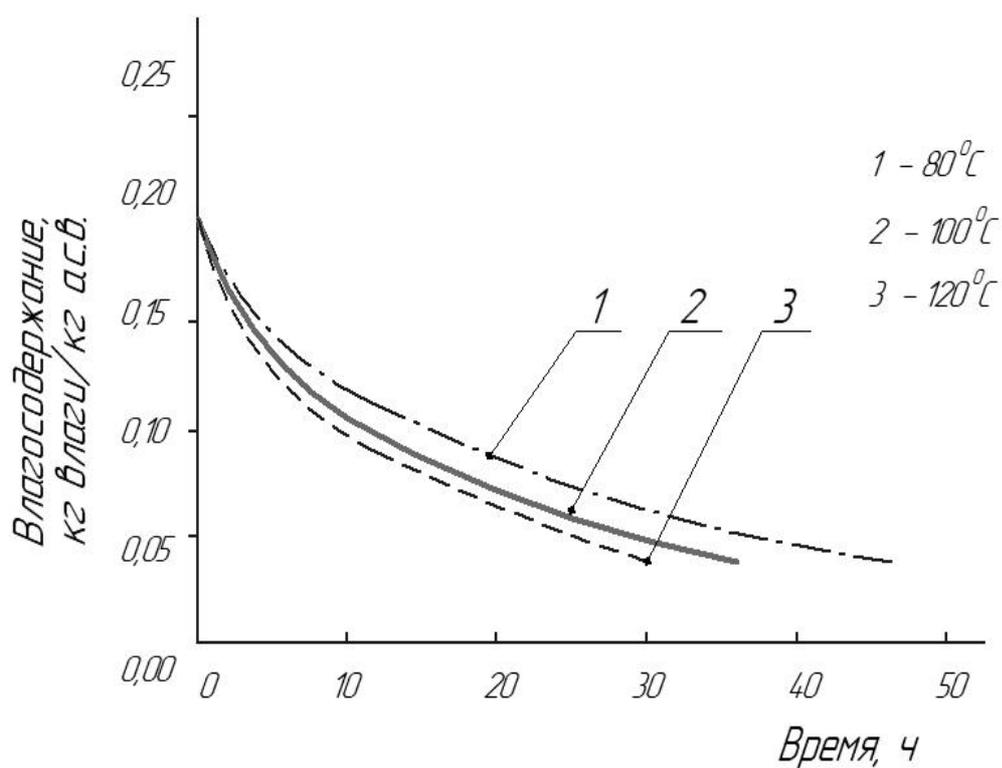


Рис. 4. Кривые сушки хлопковой целлюлозы при различной температуре

Для исследования влияния габаритов кипы на кинетику ее сушки было проделано несколько вычислительных экспериментов. Результаты этих экспериментов представлены в таблице 2. Размеры в таблице: длина×ширина×высота.

Можно сделать вывод, что при уменьшении габаритов кипы время, затрачиваемое на ее сушку, уменьшается.

Сравнение образцов с размерами 0,3×0,3×0,3 м и 0,8×0,7×0,15 м свидетельствует о том, что уменьшение высоты кипы позволяет сократить время сушки даже при больших размерах по длине и ширине.

Таблица 2

**Время сушки кипы с различными габаритами при температуре поверхности кипы  $T_1=120$  °С, абсолютном давлении 30 мм рт.ст.**

| $U_0$<br>кг влаги/кг а.с.в. | t, ч          |               |                |
|-----------------------------|---------------|---------------|----------------|
|                             | 0,8×0,7×0,3 м | 0,3×0,3×0,3 м | 0,8×0,7×0,15 м |
| 0,2                         | 140           | 65            | 42             |
| 0,14                        | 115           | 53            | 33             |
| 0,08                        | 64            | 35            | 20             |

Таким образом, по работе можно сделать следующие выводы:

1. Проведены экспериментальные исследования сушки кип хлопковой целлюлозы с габаритами 260×230×130 мм в вакуумной сушильной камере. Установлено, что понижение давления (увеличение величины вакуума) и повышение температуры позволяют интенсифицировать процесс сушки.
2. Разработана математическая модель процесса сушки хлопковой целлюлозы, позволяющая прогнозировать влияние габаритов кипы, температуры и давления в сушильной камере на продолжительность сушки до заданного влагосодержания.
3. Путём обработки опытных данных идентифицирован эффективный коэффициент влагопроводности, выполнена аппроксимация его от давления и температуры.
4. Установлено, что сушку кип хлопковой целлюлозы следует вести до остаточного среднеобъемного влагосодержания 1,5-2 мас.%. Только в этом случае в объеме кипы не остается областей, в ко-

торых влагосодержание превышает 5 мас.%.

5. Наиболее энергетически эффективными параметрами сушки являются следующие условия: температура поверхности кипы  $t=120$  °С, абсолютное давление в сушильной камере  $P = 20$  мм.рт.ст. Уменьшение толщины кипы позволяет сократить продолжительность сушки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шаров Д.С. Сушка нитратов целлюлозы в вакуумной камере / Д.С. Шаров, В.Ю.Смирнов, Е.В. Шахина, С.Е. Петров, А.И. Хацринов, Р.Ф. Гатина // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 11. С. 237-239.
2. Замятин В.И., Липин А.В. Кинетика сушки микрокристаллической целлюлозы в псевдоожоженном слое // Вестник алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова. 2006. № 2. С. 83-84.
3. Замятин В.И., Липин А.В. Анализ кинетики конвективной сушки гранулированной микрокристаллической целлюлозы в установках с псевдосжиженным слоем // Вестник алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. 2006. № 2. С. 85-88.
4. Игнатьева С.Ю. Термо-вакуум-импульсная сушка модельной композиции на ос-

нове целлюлозы марки Э-2 / С.Ю. Игнатьева, В. Ф. Мадякин, Р.Ф. Гатина, А.Ю. Осипова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 17. С. 144-146.

5. 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. Игнатьева, Р.Ф. Гатина // Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 44. №11. С. 159-165

6. Кирьянов Д.В. Mathcad 15/MathcadPrime 1.0. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 432 с.

*Статья публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках реализации проекта №18-03-20102-г.*

*Рукопись поступила в редакцию 22.10.2018*

## SETTLEMENT-EXPERIMENTAL RESEARCH PROCESS OF VACUUM DRYING OF COTTON CELLULOSE

*A. Lipin, A. Lipin, V. Isaev, P. Kovalev*

Experimental study of the influence of residual pressure and temperature in the dryer on drying kinetics process of cotton cellulose has been accomplished. The values of these parameters providing the most energy efficient drying modes are determined. The mathematical model of process of drying of a bale of the cotton cellulose, having the form of a parallelepiped is offered. Such model allows to predict change of humidity of cellulose on bale volume, the average volume humidity of a bale, process time. With application of the developed mathematical model time of drying to the set humidity of bales of cotton cellulose with different dimensions is calculated. The conclusion is drawn, that at reduction of dimensions of a bale time, spent for its drying, decreases. Reduction of height of a bale allows to reduce drying time even at the big sizes on length and width.

**Key words:** drying, kinetics, cotton cellulose, energy efficiency, mathematical modeling.

### References

1. SHarov D.S. Sushka nitratov cellyulozy v vakuumnoj kamere / D.S. SHarov, V.YU.Smirnov, E.V. SHahmina, S.E. Petrov, A.I. Hacrinov, R.F. Gatina .Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2013. T. 16. № 11. S. 237-239.

2. Zamyatin V.I., Lipin A.V. Kinetika sushki mikrokrystallicheskoj cellyulozy v psevdoozhizhennom sloe. /Vestnik altajskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I.I.Polzunova. 2006. № 2. S. 83-84.

3. Zamyatin V.I., Lipin A.V. Analiz kinetiki konvektivnoj sushki granulirovannoj mikrokrystallicheskoj cellyulozy v ustanovkah s psevdoszhizhennym sloem. Vestnik altajskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I.I. Polzunova. 2006. № 2. S. 85-88.

4. Ignat'eva S.YU. Termo-vakuum-impul'snaya sushka model'noj kompozicii na osnove cellyulozy marki EH-2 / S.YU. Ignat'eva, V. F. Madyakin, R.F. Gatina, A.YU. Osipova. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. T. 17. № 17. S. 144-146.

5. Madyakin V. F. Dinamika termo-vakuum-impul'snoj sushki inertnogo konstrukcionnogo sgorayushchego materiala / V. F. Madyakin, T.A. Enejkina, A. YU. Osipova, S.V. Soldatov, S.YU. Ignat'eva, R.F. Gatina. Butle-rovskie soobshcheniya. 2015. T. 44. №11. S. 159-165

6. Kir'yanov D.V. Mathcad 15/MathcadPrime 1.0. SPb.: BHV-Peterburg, 2012. 432 s.