

УДК 66.047.45  
DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_5\_162

## ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКИ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА

### HEAT AND MASS TRANSFER PATTERNS OF FILTRATION DRYING OF FIBROUS MATERIAL

*А.Е. ХУСАНОВ<sup>1</sup>, В.М. АТАМАНЮК<sup>2</sup>, З.С. КОБЕЕВА<sup>1</sup>,  
Б.М. КАЛДЫБАЕВА<sup>1</sup>, Д.Ж. ДЖАНАБАЕВ<sup>1</sup>*

*A.YE. KHUSSANOV, V.M. ATAMANYUK, Z.S. KOBEEVA,  
B.M. KALDYBAYEVA, D.ZH. JANABAYEV*

<sup>1</sup>Южно-Казахстанский университет им. М.Ауезова, Республика Казахстан,  
<sup>2</sup>Национальный университет "Львовская политехника", Украина)

(South Kazakhstan University named after M.Auezov, Republic of Kazakhstan,  
Lviv Polytechnic National University, Ukraine)

E-mail: khusanov\_1975@inbox.ru; atamanyuk@ukr.net; kaldybaeva.b@mail.ru; ndg\_89@mail.ru;  
kobeebazagi82@mail.ru

*Одним из высокоинтенсивных методов удаления как свободной, так и связанной влаги является фильтрационная сушка. Это обусловлено тем, что при фильтрационной сушке тепловой агент фильтруется сквозь пористую структуру влажного материала. Скорость движения теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала определяет толщину пограничного слоя (гидродинамического, теплового и диффузионного) и соответственно значения коэффициентов тепло- и массоотдачи. Кроме этого поверхностью тепло- и массообмена является суммарная поверхность пор и каналов, сквозь которые фильтруется тепловой агент. Скорость фильтрации теплового агента определяют исходя из технико-*

*экономических соображений, учитывая то, что ее увеличение влияет на рост потери давления. Причем действительная скорость движения теплового агента относительно элементов слоя значительно выше, чем в случае сушки в кипящем слое, при сушке в пневмотранспортных сушилках и др. Большие поверхности тепло - и массообмена и скорость теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала обеспечивают высокие коэффициенты тепло - и массоотдачи и соответственно интенсивность фильтрационной сушки.*

*One of the high-intensity methods of removing both free and bound moisture is filtration drying. This is due to the fact that during filtration drying, the thermal agent is filtered through the porous structure of the wet material. The speed of movement of the thermal agent in the pores and channels of a stationary layer of wet material determines the thickness of the boundary layer (hydrodynamic, thermal and diffusion) and, accordingly, the values of the heat and mass transfer coefficients. In addition, the surface of heat and mass transfer is the total surface of the pores and channels through which the heat agent is filtered. The filtration rate of the thermal agent is determined based on technical and economic considerations, taking into account the fact that its increase affects the increase in pressure loss. Moreover, the actual speed of movement of the thermal agent relative to the elements of the layer is significantly higher than in the case of drying in a fluidized bed, when drying in pneumatic transport dryers, etc. Large heat and mass transfer surfaces and the speed of the heat agent in the pores and channels of a stationary layer of wet material provide high heat and mass transfer coefficients and, accordingly, the intensity of filtration drying.*

**Ключевые слова:** волокно хлопка, теплообмен, массообмен, фильтрационная сушка, пористость, органические материалы волокнистой структуры, влага, капиллярно-пористые материалы, текстильная отрасль, тепломассообменные закономерности.

**Keywords:** cotton fiber, heat exchange, mass transfer, filtration drying, porosity, organic materials of fibrous structure, moisture, capillary-porous materials, textile industry, heat and mass transfer patterns.

*Введение.* По своему строению хлопко-сырец является неоднородным материалом и состоит из трех основных компонентов – самого хлопкового волокна, кожуры и ядра семян [1]. Хлопковое волокно и кожура семян относятся к капиллярно-пористым материалам [2] и содержат определенное количество влаги [3]. Известно, что процесс удаления влаги из материала сопровождается нарушением связи ее с материалом, на что затрачивается значительное количество энергии. Во время сушки хлопка-сырца важно выбрать оптимальный режим сушки поскольку при несоответствующих параметрах сушки наблюдается обрыв волокна,

уменьшение его длины, в результате чего снижается качество волокна [4].

Изменение влагосодержания и температуры материала определяется тепломассопереносом между поверхностью тела, окружающей средой и внутренней частью высушиваемого материала. Учитывая выше сказанное, важно установить тепломассообменные закономерности фильтрационной сушки в стационарном слое влажного волокна хлопка от фиктивной скорости фильтрации теплового агента, как важного фактора, определяющего интенсивность и экономическую эффективность фильтрационной сушки [5].

*Объект и методы исследования.* Объектом исследований в качестве волокнистого материала мы выбрали хлопок-сырец, который является широко распространенным продуктом сельского хозяйства в Южных регионах Республики Казахстан [6], [7].

Известно [4], что при хранении хлопка-сырца с влажностью более 13...14% и температуре окружающей среды выше 12...14°C температура его повышается до 60...70°C и выше, в семенах происходят биологические процессы. Это может привести к полной потере текстильных качеств волокна [7], [8].

Технологическая влажность хлопка-сырца для первых сортов составляет 7...8%. Высушивать хлопок-сырец до влажности ниже 7% регламентированным технологическим процессом переработки хлопка-сырца не рекомендуется [4], [7], [8].

Чтобы не допустить порчи хлопка-сырца при хранении, необходимо довести его влажность с помощью естественной или искусственной сушки до кондиционной, а чтобы обеспечить выпуск волокна высокого качества, хлопок-сырец следует подсушивать до технологической влажности.

В результате качественного и количественного анализа компонентов нами определены исходные данные для проведения экспериментальных исследований [9], [10]. Эти полученные данные необходимы для установления режима сушки гидродинамических и тепломассообменных параметров процесса. Там же представлена схема экспериментальной установки для проведения исследований тепломассообменных параметров, которая позволяет реализовать процесс фильтрационной сушки волокнистых материалов, и описана методика исследования [9], [10].

*Результаты и обсуждения.* Движение связанной влаги, иногда известное как “перенос жидкой влаги вблизи сухости” или “сорбционная диффузия”, было изучено рядом исследователей [11], [12...14]. Показано, что перенос жидкой влаги все еще су-

ществует в области сорбции и является функцией содержания свободной влаги.

Уитакер и Чжоу [15] изучили конвективный перенос газовой фазы в сухой области, содержащей связанную влагу, и пришли к выводу, что в этой области может существовать поток жидкой влаги. При сушке поверхностной влаги с поверхности частиц волокнистого материала одновременно происходит передача тепла от теплового агента к поверхности высушиваемого материала и испарения влаги с поверхности частиц в тепловой агент [11], [16]. Оба процесса относятся к конвективным: конвективный теплообмен и конвективный массообмен.

Известно [17], что фильтрационная сушка носит зональный характер, поэтому исследование тепло- и массообмена влажного волокнистого материала также проводили в коротком слое для того, чтобы весь слой материала принимал участие в процессе массообмена.

Коэффициент теплоотдачи и массоотдачи при фильтрационной сушке рассчитывали по следующим зависимостям [18]:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} \Gamma = \alpha F \left( \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} - t_{\text{м.т}} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} = \beta F \left( x_{\text{нас}} - \frac{x_{\text{нас}} + x_0}{2} \right) \rho, \quad (2)$$

где  $x_0$ ,  $x_{\text{нас}}$  – соответственно начальное влагосодержание теплового агента и в состоянии насыщения;  $t_{\text{вх}}$ ,  $t_{\text{вых}}$ ,  $t_{\text{м.т}}$  – соответственно температура теплового агента на входе, выходе из слоя и температура мокрого термометра, °C;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м<sup>2</sup>/с;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Рассчитанные нами коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta$  для влажного волокнистого материала по зависимостям (1) и (2) от действительной скорости  $u$  представлены на рис. 1.

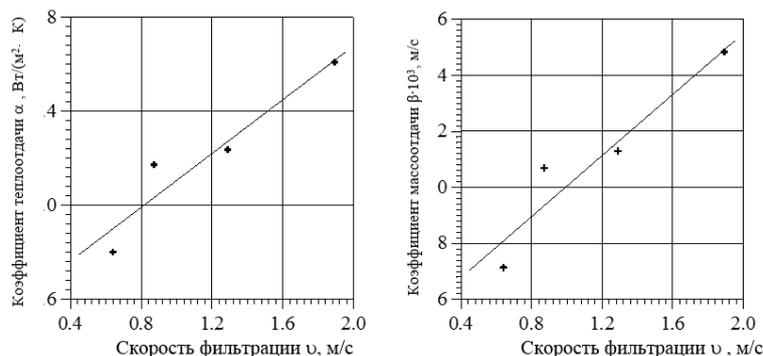


Рис. 1

Аналогично, как и для слоя сухого, так и влажного волокнистого материала, коэффициент теплоотдачи линейно возрастает с ростом действительной скорости движения теплового агента, однако для влажного материала коэффициент теплоотдачи меньше, чем для сухого материала, при одинаковых гидродинамических условиях, что объясняется потерями тепла на удаление влаги.

Коэффициенты конвективного тепло- и массопереноса на поверхности волокнистых материалов являются важными параметрами в процессах сушки, они являются функциями скорости и физических свойств сушильной среды и в общем случае могут быть выражены в виде [11]:

$$Nu = A Re^n Pr^m, \quad (3)$$

$$Sh = A Re_e^n Sc^m, \quad (4)$$

где  $Nu = \frac{\alpha d_e}{\lambda}$  – число Нусельта;  $Re_e = \frac{v d_e}{\nu}$

– число Рейнольдса;  $Pr = \frac{\nu}{a}$  – число Пранд-

тля;  $Sh = \frac{\beta d_e}{D}$  – число Шервуда;  $Sc = \frac{\nu}{D}$  –

число Шмидта;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/s$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/s$ ;  $v$  – действительная скорость фильтрации теплового агента,  $m/s$ ;  $T$  – средняя температура поверхности частицы,  $^{\circ}C$ ;  $D$  – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе,  $m^2/s$ .

Следует отметить, что для полностью увлажненной поверхности области тепло- и массопереноса практически одинаковы, так

что температура поверхности близка к температуре влажного термометра, для частично увлажненной поверхности эффективная площадь массообмена уменьшается с увеличением влажности поверхности [11].

М. Suzuki и S. Maeda [18] предложили модель коэффициента конвективного массопереноса, которая предполагала, что испарение происходит с прерывистой влажной поверхности, состоящей из сухих и влажных участков. Внутренний перенос влаги в основном обусловлен капиллярным потоком свободной влаги через поры. Поэтому скорость сушки определяется только внешними условиями и будет наблюдаться постоянный период скорости сушки. По мере того как сушка продолжается, доля влажной области уменьшается с уменьшением содержания поверхностной влаги, так что коэффициент массопереноса уменьшается. Согласно теории перколяции [19], когда влага проходит через случайно распределенные пути в среде, существует порог перколяции, который обычно соответствует критическому содержанию свободного движения воды. В первом периоде падения скорости на поверхности будет достигнут новый энергетический баланс, "сухие" волокна все еще содержат связанную воду, а давление пара на поверхности определяется уравнением Клаузиуса-Клапейрона [11]. Температура поверхности будет быстро повышаться, сигнализируя о начале второго периода падения скорости, в течение которого часто появляется отступающий фронт испарения, разделяющий систему на две области, влажную область и сорбционную область. Основываясь на

определениях постоянной скорости, первой скорости падения и второй скорости падения периодов, характеристики большинства процессов сушки могут быть описаны математически [20].

Для обобщения тепло- и массообмена результаты экспериментальных исследова-

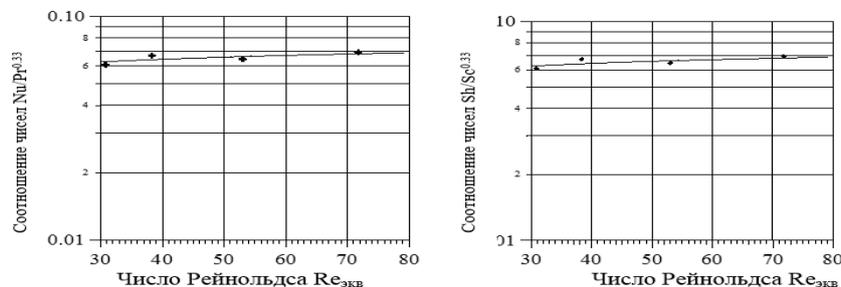


Рис. 2

Неизвестные значения коэффициентов  $A$  и  $n$  определены из графических зависимостей на рис. 2, и они справедливы в пределах числа Рейнольдса  $10 \leq Re \leq 100$ , принимали, что  $Sh \sim Sc^{0.33}$ , а  $Nu \sim Pr^{0.33}$ .

Тогда зависимость (3) для влажного волокнистого материала будет иметь вид:

$$Nu = 4,5 \cdot 10^{-2} \cdot Re_e^{0,1} \cdot Pr^{0,33}, \quad (5)$$

а зависимость (4) для массообмена влажного волокнистого материала будет иметь вид:

$$Sh = 4,5 \cdot 10^{-2} \cdot Re_e^{0,1} \cdot Sc^{0,33}. \quad (6)$$

Как видно из зависимостей (5) и (6), для обоих случаев уравнение в безразмерных комплексах характеризуются одинаковыми показателями степени у числа Рейнольдса, что указывает на одинаковое влияние гидродинамики на эти коэффициенты. Несмотря на различную природу теплообменных и массообменных процессов, которая оценивается числами Прандтля и Шмидта, экспериментально определенные комплексы  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}}$  и  $\frac{Sh}{Sc^{0,33}}$  совпадают между собой для одинаковых чисел Рейнольдса (каждая точка на рис. 2 и 3 получена усред-

ний представим на рис. 2 в виде функциональных зависимостей  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re_e)$  и

$$\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re_e).$$

нением минимум 3-х экспериментов). Это соответствует утверждениям, приведенным в работах [6], [17], [20], и аналогичны уравнениям, полученным этими исследователями.

С целью определения аналогии между этими процессами приравняем эти комплексы между собой:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = \frac{Sh}{Sc^{0,33}},$$

или

$$\frac{\alpha d_e}{\lambda \left(\frac{v}{a}\right)^{0,33}} = \frac{\beta d_e}{D \left(\frac{v}{D}\right)^{0,33}}, \quad (7)$$

откуда

$$\frac{\alpha}{c_p} = \beta \left(\frac{a}{D}\right)^{0,67}. \quad (8)$$

Учитывая то, что число Льюиса  $\frac{D}{a} = Le$ , вышеприведенную зависимость можно представить в виде:

$$\beta = \frac{\alpha}{c_p} Le^{\frac{2}{3}}. \quad (9)$$

Таким образом, для первого периода фильтрационной сушки можем определить  $\beta$ , если известен коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

Максимальное отклонение расчетных значений числа Нуссельта и числа Шервуда от экспериментальных данных не превышает 4%.

Для случая эксперимента, когда тепловой агент не полностью насыщается влагой, вследствие малости толщины слоя (20 мм) уравнение (6) можно записать в виде:

$$\text{Sh} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{Re}_e^{0,95} \text{Sc}^{0,33}. \quad (10)$$

В качестве примера приводим графическую зависимость  $\frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{0,33}} = f(\text{Re})$  и  $\frac{\text{Sh}}{\text{Sc}^{0,33}} = f(\text{Re})$  для исследуемых волокнистых материалов на одном графике (рис. 3: 1 – тепловой агент полностью насыщен влагой, 2 – частично насыщен влагой (для случая эксперимента, когда тепловой агент не полностью насыщается влагой, вследствие малости толщины слоя (20 мм)). Несмотря на разную природу теплообменных и массообменных процессов, которая оценивается числами Прандтля и Шмидта, определенным экспериментальным путем комплексы  $\frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{0,33}}$  и  $\frac{\text{Sh}}{\text{Sc}^{0,33}}$  совпадают между собой при одинаковых числах Рейнольдса [9].

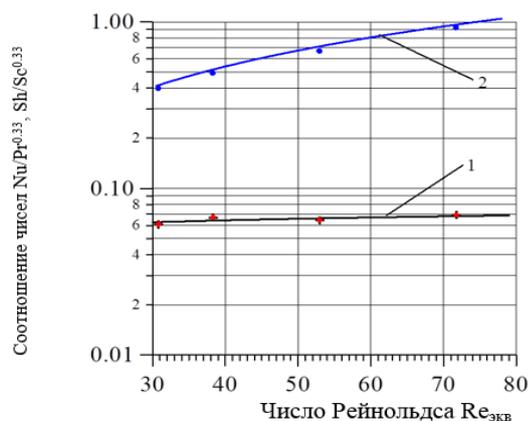


Рис. 3

## ВЫВОДЫ

Приведенные зависимости (5) и (6) позволяют определить коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи при фильтрационной сушке в стационарном слое для волокнистого материала в пределах изменения числа Рейнольдса ( $10 \leq Re \leq 100$ ) и прогнозировать затраты тепловой энергии на

процесс и соответственно эксплуатационные затраты на этапе проектирования и установить экономическую целесообразность метода сушки.

При фильтрационной сушке в первом периоде происходит одновременно передача тепла от теплового агента к поверхности высушиваемого материала и передача влаги с поверхности частиц к теплому агенту. Характерным для обоих процессов является зависимость плотности потока тепла или массы от поверхности высушиваемого материала, разницы температур или концентраций (влагосодержания). Наибольшее влияние на значение коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta$  имеет гидродинамика, которая оценивается числом Рейнольдса. Из приведенных зависимостей видно, что для обоих случаев уравнения, в обобщенных переменных аналогичные между собой, характеризуются одинаковыми показателями степени при числе Рейнольдса, что указывает на одинаковое влияние гидродинамики на коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lv N., Wang X., Peng S., Luo L., Zhou R. Super hydro phobic/super oleophilic cotton-oil absorbent: preparation and its application in oil/water separation // RSC Advances. – №8, 2018. P.30257...30264.
2. Иброгимов Х.И., Алимардонов К.М., Зулъфанов С.З., Бадалов А.Б. Термодинамические характеристики процесса дегидратации хлопка-сырца // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 4. С. 19...22.
3. Болтабоев С.Д., Парниев А.П. Сушка хлопка-сырца. – Ташкент: "Укитувчи", 1980.
4. Шайхов Э. Т., Нормухамедов Н. и др. Пахтачилик. –Ташкент: Мехнат, 1990.
5. Лыков А. В. Теория сушки. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Энергия, 1968.
6. Ажиметова Г.Н. Мировой опыт и обзор развития хлопководства в Казахстане // Современные проблемы науки и образования. – 2011, №1. С.53...58.
7. Автономов А.И., Казиев М.З., Шлейхер А.И. и др. Хлопководство. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Колос, 1983.
8. Максудов И.Т., Нуралиев А.Н. Справочник по первичной обработке хлопка. –Ташкент: НПО "Хлопкопром", 1994.
9. Atamanyuk V., Gnativ Z., Kindzera D., Janabayev D., Khusanov A., Kaldybaeva B. Hydrodynamics of Cotton Filtration Drying // Chemistry & Chemical Technology. – Vol.14, №3, 2020. P. 426...432.

10. Khussanov A.Ye., Atamanyuk V.M., Kaldybaeva B. M., Abilmagzhanov A. Zh., Janabayev D. Zh., Khussanov Zh. Ye. Calculation of Hydraulic Resistance During Filtration Drying of Raw Cotton // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series Chemistry and Technology. – Vol. 3, №441. P.134...141.

11. Hagi A.K., Thomas S., Pothan L.A. Heat and Mass Transfer in Fibrous Materials: Theory and Applications. – New Delhi: Publisher&Distributors.LTD., 2009.

12. Azimov A.M., Zhantasov K.T., Abiyev R.Sh., Satayeva L.M., Khusanov A.E. Modeling of water desalination in the membranes of a coaxial cylindrical Form // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2016, №3. P. 235...241.

13. Rotstein E. and Cornish A.R.H. Influence of Cellular Membrane Permeability on Drying Behavior // J. Food Sci. – Vol. 43, 1978. P. 926...934.

14. Bramhall G. Sorption Diffusion in Wood // Wood Sci. – Vol. 12, 1979. P. 3...13.

15. Whitaker S. and Chou W.T. Drying Granular Porous Media-Theory and Experiment // Drying Tech. Int. J. – Vol.1, 1983. P. 3...5.

16. Mujumdar Arun S. Handbook of Industrial Drying Fourth Edition. – New- York: LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2015.

17. Атаманюк В.М., Гумницький Я.М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2013.

18. Suzuki M., Maeda S. On the Mechanism of Drying of Granular Beds, Mass Transfer from Discontinuous Source // J. Chem. Eng. Japan. – Vol.1, 1968. P.26...31.

19. Larson R.G., Scriven L.E. and Davis H.T. Percolation Theory of Two-Phase Flow in Porous Media // Chem. Engng Sci. – Vol. 36, 1981. P. 57...73.

20. Chen P. and Pei D.C. A Mathematical Model of Drying Processes // Int J. Heat Mass Transfer. – Vol.32(2), 1989. P.297...310.

## REFERENCES

1. Lv N., Wang X., Peng S., Luo L., Zhou R. Super hydro phobic/super oleophilic cotton-oil absorbent: preparation and its application in oil/water separation // RSC Advances. – №8, 2018. R.30257...30264.

2. Ibrogimov Kh.I., Alimardonov K.M., Zul'fanov S.Z., Badalov A.B. Termodinamicheskie kharakteristiki protsessa degidratatsii khlopka-syrtsa // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2007, № 4. S. 19...22.

3. Boltaboev S.D., Parpiev A.P. Sushka khlopka-syrtsa. – Tashkent: "Ukituvchi", 1980.

4. Shaykhov E. T., Normukhamedov N. i dr. Pakhtachilik. – Tashkent: Mekhnat, 1990.

5. Lykov A. V. Teoriya sushki. – Izd. 2-e, pererab. – M.: Energiya, 1968.

6. Azhimetova G.N. Mirovoy opyt i obzor razvitiya khlopkovodstva v Kazakhstane // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2011, №1. S.53...58.

7. Avtonomov A.I., Kaziev M.Z., Shleykher A.I. i dr. Khlopkovodstvo. – Izd. 2-e, pererab. i dop. – M.: Kolos, 1983.

8. Maksudov I.T., Nuraliev A.N. Spravochnik po pervichnoy obrabotke khlopka. – Tashkent: NPO "Khlopkoprom", 1994.

9. Atamanyuk V., Gnativ Z., Kindzera D., Janabayev D., Khusanov A., Kaldybaeva B. Hydrodynamics of Cotton Filtration Drying // Chemistry & Chemical Technology. – Vol.14, №3, 2020. P. 426...432.

10. Khussanov A.Ye., Atamanyuk V. M., Kaldybaeva B. M., Abilmagzhanov A. Zh., Janabayev D. Zh., Khussanov Zh. Ye. Calculation of Hydraulic Resistance During Filtration Drying of Raw Cotton // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series Chemistry and Technology. – Vol. 3, №441. P.134...141.

11. Hagi A.K., Thomas S., Pothan L.A. Heat and Mass Transfer in Fibrous Materials: Theory and Applications. – New Delhi: Publisher&Distributors.LTD., 2009.

12. Azimov A.M., Zhantasov K.T., Abiyev R.Sh., Satayeva L.M., Khusanov A.E. Modeling of water desalination in the membranes of a coaxial cylindrical Form // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2016, №3. R. 235...241.

13. Rotstein E. and Cornish A.R.H. Influence of Cellular Membrane Permeability on Drying Behavior // J. Food Sci. – Vol. 43, 1978. P. 926...934.

14. Bramhall G. Sorption Diffusion in Wood // Wood Sci. – Vol. 12, 1979. P. 3...13.

15. Whitaker S. and Chou W.T. Drying Granular Porous Media-Theory and Experiment // Drying Tech. Int. J. – Vol.1, 1983. P. 3...5.

16. Mujumdar Arun S. Handbook of Industrial Drying Fourth Edition. – New- York: LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2015.

17. Атаманюк В.М., Гумницький Я.М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2013.

18. Suzuki M., Maeda S. On the Mechanism of Drying of Granular Beds, Mass Transfer from Discontinuous Source // J. Chem. Eng. Japan. – Vol.1, 1968. P.26...31.

19. Larson R.G., Scriven L.E. and Davis H.T. Percolation Theory of Two-Phase Flow in Porous Media // Chem. Engng Sci. – Vol. 36, 1981. P. 57...73.

20. Chen P. and Pei D.C. A Mathematical Model of Drying Processes // Int J. Heat Mass Transfer. – Vol.32(2), 1989. P.297...310.

Рекомендована Ученым советом. Поступила 11.10.21.