

СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОН ШЕРСТИ РАЗЛИЧНОГО КАЧЕСТВА

SORPTION CHARACTERISTICS OF WOOL FIBERS OF VARIOUS QUALITY

М.К. КОШЕЛЕВА¹, О.Р. ДОРНЯК², К.Э. РАЗУМЕЕВ¹, М.В. ИСАЕВ¹

M.K. KOSHELEVA¹, O.R. DORNYAK², K.E. RAZUMEEV¹, M.V. ISAEV¹

¹Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
²Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова)

¹The Kosygin State University of Russia,
²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov)

E-mail: oxtpaxt@yandex.ru

Приводятся результаты экспериментального исследования сорбционных свойств шерстяных волокон различного качества и рассчитанные на их основе сорбционно-структурные характеристики. Изотермы сорбции-десорбции получены на вакуумной сорбционной установке с весами Мак-Бена-Бакра. Приведены рассчитанные по изотермам десорбции объемы пор, их радиусы, удельная поверхность и суммарный сорбционный объем пор, дифференциальная пористость, емкость монослоя. Проведен сравнительный анализ сорбционно-структурных характеристик. Показана возможность описания сорбционных свойств изученных шерстяных волокон различного вида уравнением Цимерманиса для капиллярно-пористых материалов. Получены коэффициенты уравнения для аппроксимации всех рассмотренных изотерм десорбции выбранным уравнением.

The results of an experimental study of the sorption properties of wool fibers of various qualities and the sorption and structural characteristics calculated on their basis are presented. Sorption-desorption isotherms were obtained using a vacuum sorption unit with McBean-Bakr balance. The pore volumes, pore radii, specific surface area and total sorption pore volume, differential porosity, and monolayer capacity calculated from the desorption isotherms are presented. A comparative analysis of sorption-structural characteristics is carried out. The possibility of describing the sorption properties of the studied wool fibers of various types using the Zimermanis equation for capillary-porous materials is shown. The coefficients of the equation for the approximation of all considered desorption isotherms by the selected equation are obtained.

Ключевые слова: шерстяные волокна, изотермы сорбции, сорбционно-структурные характеристики, аппроксимация.

Keywords: wool fibers, sorption isotherms, sorption-structural characteristics, approximation.

Изучение свойств шерстяных волокон является особенно актуальным в настоящее время, когда остро стоит задача возрожде-

ния и развития отечественной шерстяной промышленности [1...3].

Совершенствование технологических процессов, их расчет невозможен без изучения свойств объектов технологической обработки. Важной характеристикой материала являются изотермы сорбции-десорбции. По изотермам могут рассчитываться такие сорбционно-структурные характеристики, как радиусы и объем пор, интегральная и дифференциальная пористость.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций показывает, что имеются работы по изучению сорбционных свойств растительных, пищевых, древесных материалов, тогда как работы по сорбционным свойствам текстильных материалов проводятся реже [4...9].

Сорбционные свойства тканей во многом определяются свойствами волокон, из которых ткань изготовлена, поэтому в работе исследовались сорбционные свойства шерстяных волокон.

Целью работы является анализ сорбционно-структурных характеристик шерстяных волокон разного вида и аппроксимация экспериментальных изотерм десорбции.

В работе исследовались: помесная шерсть качества Пт/П26 из группы полутонкой шерсти, помесная шерсть качеств Т/П24, Т/П22 и Т/П21, мериносовая шерсть качеств М22 и М21 из группы тонкой однородной шерсти [1, 2].

В табл. 1...6 приведены данные по десорбции паров воды объектами исследования, полученные на вакуумной сорбционной установке с весами Мак-Бена-Бакра, и сорбционно-структурные характеристики, рассчитанные по десорбционной ветви изотермы: табл. 1 – Пт/П26, табл. 2 – Т/П24, табл. 3 – Т/П21, табл. 4 – Т/П22, табл. 5 – М22, табл. 6 – М21.

Т а б л и ц а 1

Относительная влажность воздуха (ϕ), в долях	Влагосодержание материала (U), %	Радиус пор (R), м	Объем пор (V), м ³ /кг	Дифференциальная пористость (DV/DR), м ³ /(кг×м)
0,980	28,10	122,3×10 ⁻⁹	2,81×10 ⁻⁴	0,188×10 ³
0,940	26,55	39,9×10 ⁻⁹	2,65×10 ⁻⁴	1,55×10 ³
0,900	24,00	23,5×10 ⁻⁹	2,40×10 ⁻⁴	2,47×10 ³
0,790	20,80	10,5×10 ⁻⁹	2,08×10 ⁻⁴	9,56×10 ³
0,720	17,97	7,5×10 ⁻⁹	1,80×10 ⁻⁴	6,59×10 ³
0,600	16,20	4,8×10 ⁻⁹	1,62×10 ⁻⁴	8,25×10 ³
0,500	15,15	3,6×10 ⁻⁹	1,52×10 ⁻⁴	53,90×10 ³
0,400	10,47	2,7×10 ⁻⁹	1,05×10 ⁻⁴	12,83×10 ³
0,280	9,50	1,9×10 ⁻⁹	0,95×10 ⁻⁴	48,20×10 ³
0,120	5,76	1,2×10 ⁻⁹	0,58×10 ⁻⁴	58,22×10 ³
0,025	2,874	0,7×10 ⁻⁹	0,29×10 ⁻⁴	0
Емкость монослоя (A _∞), моль/кг	Удельная поверхность (S _{уд}), м ² /кг	Суммарный сорбционный объем пор (V _{max}), м ³ /кг		Средний радиус пор (R̄), м
0,765	52533	2,81×10 ⁻⁴		10,69×10 ⁻⁹

Т а б л и ц а 2

Относительная влажность воздуха (ϕ), в долях	Влагосодержание материала (U), %	Радиус пор (R), м	Объем пор (V), м ³ /кг	Дифференциальная пористость (DV/DR), м ³ /(кг×м)
0,980	26,23	122,3×10 ⁻⁹	2,62×10 ⁻⁴	0,052×10 ³
0,940	25,80	39,9×10 ⁻⁹	2,58×10 ⁻⁴	1,82×10 ³
0,900	22,80	23,5×10 ⁻⁹	2,28×10 ⁻⁴	2,08×10 ³
0,790	20,10	10,5×10 ⁻⁹	2,01×10 ⁻⁴	8,78×10 ³
0,720	17,50	7,5×10 ⁻⁹	1,75×10 ⁻⁴	5,59×10 ³
0,600	16,00	4,8×10 ⁻⁹	1,60×10 ⁻⁴	5,58×10 ³
0,500	15,29	3,6×10 ⁻⁹	1,53×10 ⁻⁴	20,84×10 ³
0,400	13,48	2,7×10 ⁻⁹	1,35×10 ⁻⁴	27,92×10 ³
0,280	11,37	1,9×10 ⁻⁹	1,14×10 ⁻⁴	54,26×10 ³
0,120	7,16	1,2×10 ⁻⁹	0,72×10 ⁻⁴	87,25×10 ³
0,025	2,835	0,7×10 ⁻⁹	0,28×10 ⁻⁴	0
Емкость монослоя (A _∞), моль/кг	Удельная поверхность (S _{уд}), м ² /кг	Суммарный сорбционный объем пор (V _{max}), м ³ /кг		Средний радиус пор (R̄), м
0,724	49683	2,62×10 ⁻⁴		10,56×10 ⁻⁹

Таблица 3

Относительная влажность воздуха (φ), в долях	Влагосодержание материала (U), %	Радиус пор (R), м	Объем пор (V), м ³ /кг	Дифференциальная пористость (DV/DR), м ³ /(кг×м)
0,980	26,52	122,3×10 ⁻⁹	2,65×10 ⁻⁴	0,22×10 ³
0,940	24,70	39,9×10 ⁻⁹	2,47×10 ⁻⁴	1,58×10 ³
0,900	22,10	23,5×10 ⁻⁹	2,21×10 ⁻⁴	1,75×10 ³
0,790	19,83	10,5×10 ⁻⁹	1,98×10 ⁻⁴	7,73×10 ³
0,720	17,54	7,5×10 ⁻⁹	1,75×10 ⁻⁴	4,62×10 ³
0,600	16,30	4,8×10 ⁻⁹	1,63×10 ⁻⁴	12,57×10 ³
0,500	14,70	3,6×10 ⁻⁹	1,47×10 ⁻⁴	48,14×10 ³
0,400	10,52	2,7×10 ⁻⁹	1,05×10 ⁻⁴	22,36×10 ³
0,280	8,83	1,9×10 ⁻⁹	0,88×10 ⁻⁴	38,41×10 ³
0,120	5,85	1,2×10 ⁻⁹	0,59×10 ⁻⁴	66,37×10 ³
0,025	2,56	0,7×10 ⁻⁹	0,26×10 ⁻⁴	0
Емкость монослоя (A _∞), моль/кг	Удельная поверхность (S _{уд}), м ² /кг	Суммарный сорбционный объем пор (V _{max}), м ³ /кг		Средний радиус пор (R̄), м
0,720	49422	2,65×10 ⁻⁴		10,73×10 ⁻⁹

Таблица 4

Относительная влажность воздуха (φ), в долях	Влагосодержание материала (U), %	Радиус пор (R), м	Объем пор (V), м ³ /кг	Дифференциальная пористость (DV/DR), м ³ /(кг×м)
0,980	25,87	122,3×10 ⁻⁹	2,59×10 ⁻⁴	0,135×10 ³
0,940	24,75	39,9×10 ⁻⁹	2,48×10 ⁻⁴	1,75×10 ³
0,900	21,87	23,5×10 ⁻⁹	2,19×10 ⁻⁴	1,50×10 ³
0,790	19,92	10,5×10 ⁻⁹	1,99×10 ⁻⁴	7,37×10 ³
0,720	17,75	7,5×10 ⁻⁹	1,78×10 ⁻⁴	14,11×10 ³
0,600	13,96	4,8×10 ⁻⁹	1,40×10 ⁻⁴	6,44×10 ³
0,500	13,14	3,6×10 ⁻⁹	1,31×10 ⁻⁴	6,45×10 ³
0,400	12,58	2,7×10 ⁻⁹	1,26×10 ⁻⁴	26,33×10 ³
0,280	10,59	1,9×10 ⁻⁹	1,06×10 ⁻⁴	64,83×10 ³
0,120	5,56	1,2×10 ⁻⁹	0,56×10 ⁻⁴	55,38×10 ³
0,025	2,82	0,7×10 ⁻⁹	0,28×10 ⁻⁴	0
Емкость монослоя (A _∞), моль/кг	Удельная поверхность (S _{уд}), м ² /кг	Суммарный сорбционный объем пор (V _{max}), м ³ /кг		Средний радиус пор (R̄), м
0,707	48546	2,59×10 ⁻⁴		10,66×10 ⁻⁹

Таблица 5

Относительная влажность воздуха (φ), в долях	Влагосодержание материала (U), %	Радиус пор (R), м	Объем пор (V), м ³ /кг	Дифференциальная пористость (DV/DR), м ³ /(кг×м)
0,980	25,51	122,3×10 ⁻⁹	2,55×10 ⁻⁴	0,146×10 ³
0,940	24,30	39,9×10 ⁻⁹	2,43×10 ⁻⁴	1,52×10 ³
0,900	21,80	23,5×10 ⁻⁹	2,18×10 ⁻⁴	1,23×10 ³
0,790	20,21	10,5×10 ⁻⁹	2,02×10 ⁻⁴	7,29×10 ³
0,720	18,05	7,5×10 ⁻⁹	1,81×10 ⁻⁴	7,71×10 ³
0,600	15,98	4,8×10 ⁻⁹	1,60×10 ⁻⁴	11,87×10 ³
0,500	14,47	3,6×10 ⁻⁹	1,45×10 ⁻⁴	41,34×10 ³
0,400	10,88	2,7×10 ⁻⁹	1,09×10 ⁻⁴	19,05×10 ³
0,280	9,44	1,9×10 ⁻⁹	0,94×10 ⁻⁴	51,94×10 ³
0,120	5,41	1,2×10 ⁻⁹	0,54×10 ⁻⁴	55,78×10 ³
0,025	2,65	0,7×10 ⁻⁹	0,26×10 ⁻⁴	0
Емкость монослоя (A _∞), моль/кг	Удельная поверхность (S _{уд}), м ² /кг	Суммарный сорбционный объем пор (V _{max}), м ³ /кг		Средний радиус пор (R̄), м
0,701	48112	2,55×10 ⁻⁴		10,60×10 ⁻⁹

Относительная влажность воздуха (ϕ), в долях	Влагосодержание материала (U), %	Радиус пор (R), м	Объем пор (V), м ³ /кг	Дифференциальная пористость (DV/DR), м ³ /(кг×м)
0,980	24,07	122,3×10 ⁻⁹	2,41×10 ⁻⁴	0,136×10 ³
0,940	22,95	39,9×10 ⁻⁹	2,30×10 ⁻⁴	1,08×10 ³
0,900	21,17	23,5×10 ⁻⁹	2,12×10 ⁻⁴	1,50×10 ³
0,790	19,22	10,5×10 ⁻⁹	1,92×10 ⁻⁴	6,55×10 ³
0,720	17,28	7,5×10 ⁻⁹	1,73×10 ⁻⁴	4,62×10 ³
0,600	16,04	4,8×10 ⁻⁹	1,60×10 ⁻⁴	12,49×10 ³
0,500	14,45	3,6×10 ⁻⁹	1,45×10 ⁻⁴	19,00×10 ³
0,400	12,80	2,7×10 ⁻⁹	1,28×10 ⁻⁴	46,97×10 ³
0,280	9,25	1,9×10 ⁻⁹	0,93×10 ⁻⁴	49,88×10 ³
0,120	5,38	1,2×10 ⁻⁹	0,54×10 ⁻⁴	58,10×10 ³
0,025	2,50	0,7×10 ⁻⁹	0,25×10 ⁻⁴	0
Емкость монослоя (A _∞), моль/кг	Удельная поверхность (S _{уд}), м ² /кг	Суммарный сорбционный объем пор (V _{max}), м ³ /кг		Средний радиус пор (\bar{R}), м
0,665	45643	2,41×10 ⁻⁴		10,55×10 ⁻⁹

Как видно из табл. 1...6, сорбционная способность волокон помесной шерсти Пт/П26 выше, чем у других волокон, а наименьшей сорбционной способностью обладает меринсовая шерсть М21. Неодинаковые сорбционные свойства волокон разного качества можно объяснить различием их пористой структуры.

Расчет радиусов пор проводился по известному уравнению Томсона-Кельвина [5]. По изотермам десорбции рассчитаны объемы пор, удельная поверхность и суммарный сорбционный объем пор, дифференциальная пористость, емкость монослоя, приведенные в табл. 1...6. Удельная поверхность пор волокна Пт/П26 больше, чем у волокон М22 и М21. Чем тоньше волокно, тем меньше оно содержит крупных пор.

Рассмотрены возможности описания сорбционных свойств волокон на основе

ряда уравнений, приведенных в работах [5, 7...10], и установлено, что модель Ци-мерманиса [10] может быть использована при определении значений равновесного влагосодержания текстильных материалов во всем диапазоне изменения относительной влажности воздуха.

Проведена аппроксимация изотерм десорбции рассматриваемых шерстяных волокон на основе уравнения Ци-мерманиса для капиллярно-пористых материалов [10]:

$$U = U_{MG} \phi^{a_0 k^\phi}, \quad (1)$$

где a_0 и k – безразмерные постоянные, называемые соответственно структурной активностью капиллярно-пористого материала и коэффициентом приращения активности связи; U_{MG} – максимальное гигроскопическое влагосодержание.

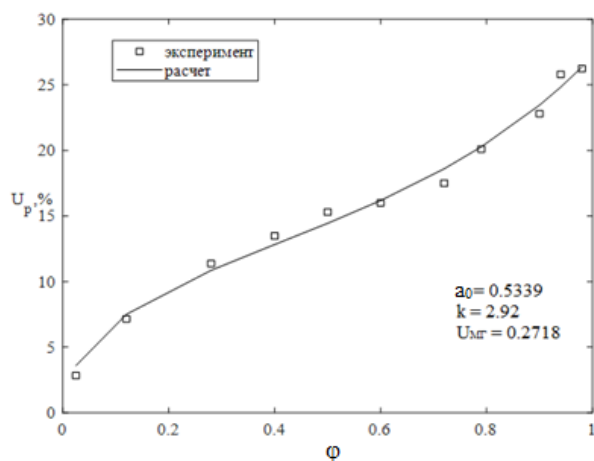


Рис. 1

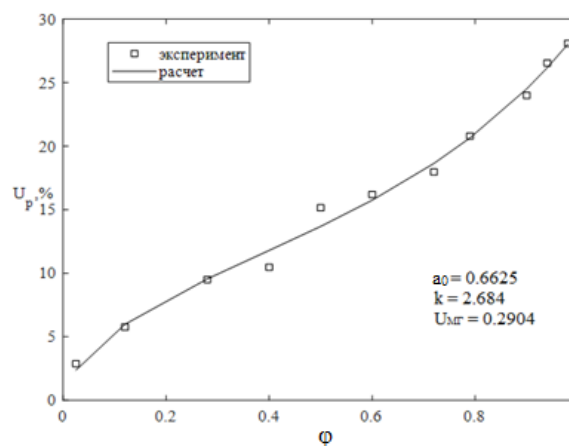


Рис. 2

Экспериментальные и расчетные зависимости равновесного влагосодержания U (%) от относительной влажности воздуха ϕ для шерстяных волокон представлены на рис. 1...6, где сплошной линией отмечены

данные эксперимента, точками – данные, рассчитанные по уравнению Цимерманиса: рис. 1 – Пт/П26, рис. 2 – Т/П24, рис. 3 – Т/П21, рис. 4 – Т/П22, рис. 5 – М22, рис. 6 – М21.

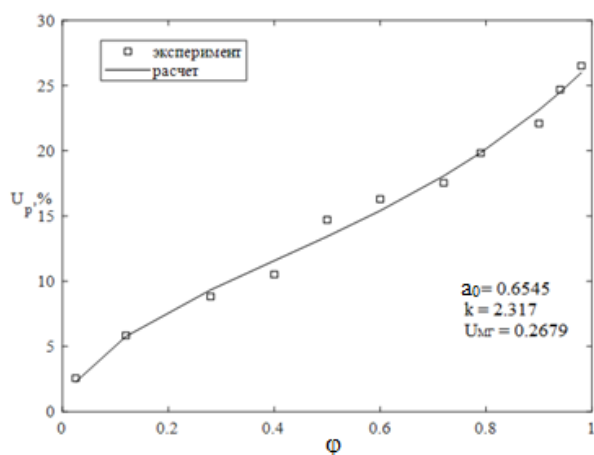


Рис. 3

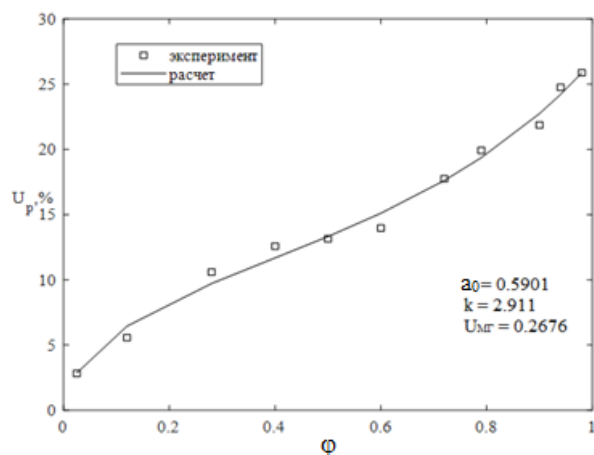


Рис. 4

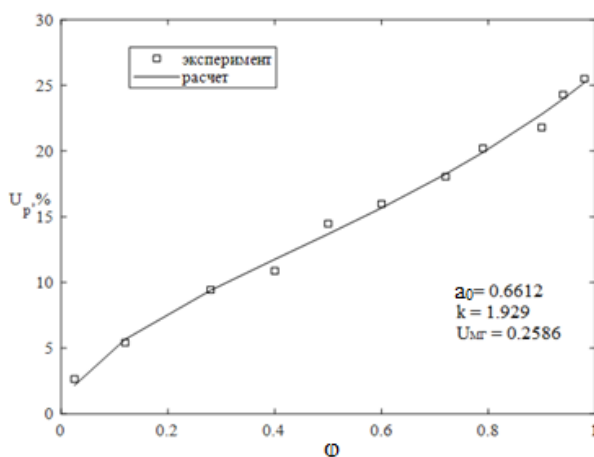


Рис. 5

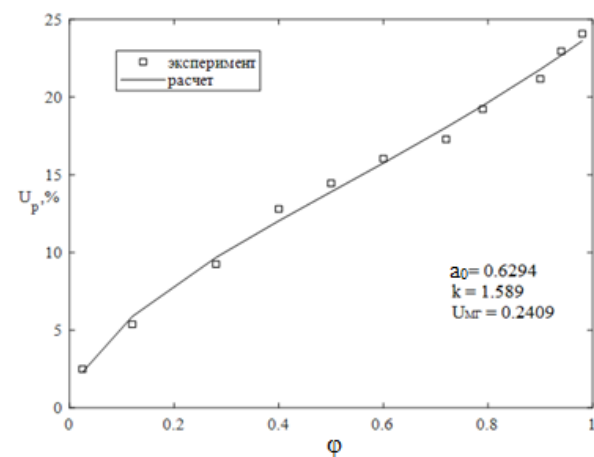


Рис. 6

На рис. 1...6 приведены необходимые для расчета по уравнению (1) значения безразмерных постоянных a_0 и k и максимального гигроскопического влагосодержания U_{MG} для каждого из изученных видов волокна.

В Ы В О Д Ы

Для разных видов шерстяного волокна приведены рассчитанные по экспериментальным изотермам десорбции паров воды объемы пор, их радиусы, удельная поверхность и суммарный сорбционный объем пор, дифференциальная пористость, емкость монослоя. Проведен сравнительный анализ сорбционно-структурных характеристик.

Изотермы сорбции шерстяных волокон разного качества принадлежат к одному типу.

Показана возможность описания сорбционных свойств изученных шерстяных волокон уравнением Цимерманиса для капиллярно-пористых материалов. Получены коэффициенты уравнения для аппроксимации всех рассмотренных изотерм десорбции выбранным уравнением.

Уравнение Цимерманиса для капиллярно-пористых материалов дает наилучшую точность аппроксимации изотерм для шерстяных волокон. Данное уравнение может использоваться при анализе сорбционных характеристик шерстяных волокон разного вида и аппроксимации экспериментальных изотерм десорбции.

1. *Разумеев К.Э. и др.* Повышение качества продукции овцеводства и звероводства: монография. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. 280 с.

2. *Разумеев К.Э., Пашин Е.Л., Плеханов А.Ф.* Классификация и методы испытаний отечественного натурального текстильного сырья: учеб. пособие. Одинцово: Одинцовский гуманитарный институт, 2013. 375 с.

3. *Сажин Б.С., Федосов С.В., Кошелева М.К.* Формирование научных направлений и отражение научных достижений в области повышения эффективности теплообменных процессов, экологической и производственной безопасности текстильных производств в разделе «Экологическая и производственная безопасность. Промтеплоэнергетика» // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 4 (376). С. 116...122.

4. *Akulich P.V., Slizhuk D.S.* Heat and mass transfer in a dense layer during dehydration of colloidal and sorption capillary-porous materials under conditions of unsteady radiation-convective energy supply // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2022. Т. 56. № 2. С. 152...161.

5. *Рудобахта С.П., Бабичева Е.Л.* Фазовое концентрационное равновесие при сушке коллоидного капиллярно-пористого материала – гороха // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. № 2. С. 104...110.

6. *Рудобахта С.П., Дмитриев В.М.* Массопроводность при сушке капиллярно-пористого коллоидного материала, подверженного усадке // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97. № 5. С. 1195...1200.

7. *Рудобахта С.П., Муравлева Е.А., Зуева Г.А.* Равновесное влагосодержание семян кукурузы // Наука в центральной России. 2017. № 6 (30). С. 70...78.

8. *Akulich P.V., Slizhuk D.S., Akulich A.V.* Heat and mass transfer in a vibrofluidized bed of vegetable materials with radiative-convective power input // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2024. Т. 97. № 7. P. 1808...1813.

9. *Wang Wei, Chen Guohua, Mujumdar A.S.* Physical Interpretation of Solids Drying: An Overview on Mathematical Modeling Research // Drying Technology. 2007. V. 25. №4. P. 659...668.

10. *Цимерманис Л.-Х.Б.* Сорбция, структурообразование, массоперенос (термодинамика влажного тела). М.: Алекс, 2006. 232 с. – ISBN 5-9618-0025-3.

1. *Razumeev K.E. and others.* Improving the quality of sheep and animal husbandry products: monograph. Moscow: RGAU–Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2021. 280 p.

2. *Razumeev K.E., Pashin E.L., Plekhanov A.F.* Classification and test methods of domestic natural textile raw materials: a textbook (electronic edition) // Odintsovo: Odintsovo Humanitarian Institute, 2013. 375 p.

3. *Sazhin B.S., Fedosov S.V., Kosheleva M.K.* Formation of scientific directions and reflection of scientific achievements in the field of increasing efficiency of thermal-mass-exchange processes, environmental and production security of textile production in section "Ecological and industrial safety. Heat engineering" // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018. № 4 (376). P. 116...122.

4. *Akulich P.V., Slizhuk D.S.* Heat and mass transfer in a dense layer during dehydration of colloidal and sorption capillary-porous materials under conditions of unsteady radiation-convective energy supply // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2022. Т. 56. № 2. pp. 152...161.

5. *Rudobashta S.P., Babicheva E.L.* Phase concentration equilibrium during drying of colloidal capillary-porous material - peas // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chemistry and Chemical Technology series. 2024. Vol. 67. No. 2. pp. 104...110.

6. *Rudobashta S.P., Dmitriev V.M.* Mass conductivity during drying of capillary-porous colloidal material subject to shrinkage // Engineering Physics Journal. 2024. Vol. 97. No. 5. pp. 1195...1200.

7. *Rudobashta S.P., Muravleva E.A., Zueva G.A.* Equilibrium moisture content of corn seeds // Science in central Russia. 2017. No. 6 (30). pp. 70...78.

8. *Akulich P.V., Slizhuk D.S., Akulich A.V.* Heat and mass transfer in a vibro-liquid layer of plant materials with radiation-convective energy supply // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2024. Vol. 97. No. 7. pp. 1808...1813.

9. *Wang Wei, Chen Guohua, Mujumdar A.S.* Physical Interpretation of Solids Drying: An Overview on Mathematical Modeling Research // Drying Technology. 2007. V. 25. №4. P. 659...668.

10. *Zimmermanis L.-H.B.* Sorption, structure formation, mass transfer (thermodynamics of a wet body). Moscow: Alex, 2006. 232 p. – ISBN 5-9618-0025-3.

Рекомендована кафедрой энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 03.02.25.