

# **O‘ZBEKISTON AGRAR FANI XABARNOMASI**

№ 2 (8/2) 2023  
*(maxsus son)*



**ВЕСТНИК АГРАРНОЙ НАУКИ  
УЗБЕКИСТАНА**

**BULLETIN OF THE AGRARIAN SCIENCE OF  
UZBEKISTAN**



**LOYIHA RAHBARI VA  
TASHABBUSKORI:**

O'zbekiston Respublikasi  
Qishloq xo'jaligi vazirligi  
Toshkent davlat agrar universiteti

**BOSH MUHARRIR:**

Kamolitdin SULTONOV  
Bosh muharrir o'rinbosari:  
Laziza G'OFUROVA

**IJROCHI DIRECTOR:**

Baxtiyor NURMATOV

**MAS'UL KOTIB:**

Ubaydullo RAHMONOV

**DIZAYNER-SAHIFALOVCHI:**

Denislam ALIMKULOV

Nashr O'zbekiston Respublikasi  
Oliy attestatsiya komissiyasining  
ilmiy jurnallar ro'yhatiga olingan.

O'zbekiston Respublikasi  
Prezidenti huzuridagi Axborot va  
ommaviy kommunikatsiyalar  
agentligi tomonidan 2022-yil 25  
fevralda 1548-sonli guvohnoma  
bilan qayta ro'yxatga olingan.

Jurnal 2000 yil aprel oyidan tashkil topgan jurnal  
bir yilda 6 marta chop etiladi.

Bosishga ruxsat etildi: 15.05.2023.  
Qog'oz bichimi 60x84<sup>1/8</sup>

Offset usulida cosildi. Biyurtma №  
Adadi: 100 nusxa.

«Agrar fani xabarnomasi» MCHJ bosmaxonasida  
chop etildi.

Korxonalar manzili: Toshkent viloyati, Qibray  
tumani. Universitet ko'chasi, 2-uy

# O'ZBEKISTON AGRAR FANI XABARNOMASI

№ 2 (8/2) 2023

Ilmiy-amaliy jurnal

**Tahrir hay'ati raisi:**

**Воитов Азиз Ботирович**  
O'zbekiston Respublikasi  
Qishloq xo'jaligi vaziri

**Tahrir hay'ati a'zolari:**

<b>Sh.Teshaev</b>	<b>M.Mazirov</b>
<b>K.Sultonov</b>	<b>Sh.Nurmatov</b>
<b>S.Islamov</b>	<b>U.Norqulov</b>
<b>A.Abduvasikov</b>	<b>N.Noraliev</b>
<b>X.Mardonov</b>	<b>E.Berdiev</b>
<b>A.Xasanov</b>	<b>S.Sharipov</b>
<b>S.Yuldasheva</b>	<b>T.Shamsiddinov</b>
<b>X.Bo'riev</b>	<b>Y.Yuldashev</b>
<b>I.Vasenov</b>	<b>U.Ballasov</b>
<b>R.Dustmuratov</b>	<b>K.Buxorov</b>
<b>A.Qayumov</b>	<b>S.Jo'raev</b>
<b>I.Karabaev</b>	<b>M.Odinaev</b>
<b>S.Yunusov</b>	<b>Ch.Begimqulov</b>
<b>I.Rustamova</b>	<b>B.Kamoliv</b>
<b>N.Rajabov</b>	<b>B.Qaxramonov</b>
<b>M.Yuldashov</b>	<b>S.Isamuxamedov</b>

**Ta'sischi:**

**Agrar fani xabarnomasi MCHJ**

**Manzil:** 100164, Toshkent, Universitet ko'chasi 2-uy,  
ToshDAU.

**Tel:** (+99871) 260-44-95. Faks: 260-38-60.

**e-mail:** [nurmatovbaxtiyor868@gmail.com](mailto:nurmatovbaxtiyor868@gmail.com)

Maqolada keltirilgan fakt va raqamlar uchun  
mualliflar javobgardir.

**ВЕСТНИК АГРАРНОЙ НАУКИ  
УЗБЕКИСТАНА**

**BULLETIN OF THE AGRARIAN  
SCIENCE OF UZBEKISTAN**

## МУНДАРИЖА

### I - sho'ba

#### Aqlli qishloq xo'jaligi asosiy yo'nalishlari va boshqaruv jarayonlarini elektron tashkil etishning konseptual asoslari

Noraliev N.X., Sultonov K.S. Aqlli qishloq xo'jaligi texnologiyalari. Muammolar va yechimlar.....	6
Каршиев З.А., Рахманов Х. Э. Анализ временных рядов индексов растительности для мониторинга сельскохозяйственных культур на облачной платформе Google Earth Engine.....	9
Nuraliyev F.M., Modullayev J.S. Video oqimidagi obyektarni aniqlash usullari va algoritmi taxlili.....	12
Nuraliyev F. M., Alisher Z. Q. Dorivor va qishloq xo'jaligi o'simliklarini kosmosda va yerda rivojlanish jarayonini vizual tahlil qilish usullari va vositalari.....	15
Тошпўлатов Д.Ш., Маматкулов Қ.Э. Қишлоқ хўжалиги корхоналарида рақамли технологиялардан самарали фойдаланиш тизимини такомиллаштириш.....	19
Qurbonova M.F., Sultonov G.Sh. Ta'lim samaradorligini oshirishda elektron o'quv resurslarining roli.....	22
Хантбоев К. Некоторые проблемы обеспечения сельского хозяйства ит-специалистами и рекомендации по их решению.....	25
Норалиев Н.Х., Кудяева Ф.Х. Технические и программные средства умного сельского хозяйства.....	28
Ходжакулов М. Интернет вещей как инструмент оптимизации процессов в сельском хозяйстве.....	31
Орифжонова У., Қорабошев О.З. Қишлоқ хўжалигида сунъий интеллект ва <i>machine learning</i> алгоритмларидан фойдаланиш.....	35
Жуманазаров С.С., Юсупова Ф.Э. Мўминова Д.Т. Талабаларнинг рақамли саводхонлигини шакллантириш масалалари.....	37
Саидов М.Х., Султонов.К.С., Саидова Д.Н. Ўзбекистонда дуал олий таълим: ташкил этиш имкониятлари ва истиқболлари.....	39
Садикова Г.Ш. Қишлоқ хўжалиги йўналиши талабалари когнитив компетентлигини интегратив ёндашув асосида такомиллаштириш методикаси.....	42
Rasulov S.Sh. Talabalarining mustaqil ta'lim faoliyatini rivojlantirishda axborot kommunikatsion texnologiyalarning o'rni..	44
Buribayeva G.N., Tojiboyeva D.Sh. Qishloq xo'jaligida raqamli texnologiyalar.....	46

### II-sho'ba

#### Qishloq xo'jaligi iqtisodiy jarayonlarni raqamlash- tirish, ishlab chiqarish va boshqaruv jarayonlarida matematik, statistik va taxlil usullari

Равшанов Н., Аминов С.М. Кўп қатламли ғовак мухитда деформацияланишни ҳисобга олган ҳолда нефт фильтрация жараёнини математик моделлаштириш.....	49
Shadmanova G., Xabibullaeva U. O'zbekistonda sitrus mevalarini yetishtirish va rivojlantirish muammolarini hal qilish yo'llarini ekonometrik tahlil qilish.....	55
Файзиев А.А., Фарманов Т.Х. Статистический анализ и прогнозирование динамика заготовлене кокона в республике Узбекистан.....	57
Равшанов Н., Набиева И., Насруллаев П. А. Исследование процесса деградации акватории аральского моря и его влияния на окружающую среду.....	62
Рузметов К., Тургунов Т. Агроиктисодий прогноз муаммоларини ҳал этишда математик моделлар.....	67
Muradov F.A., Kucharov O.R., Karshiyev D.A., Eshboyeva N.F. Atmosferada zararli moddalarning atmosferada tarqalishini ifodalovchi modelni zichliklarni hisobga olgan holda sonli yechish.....	70
Muradov F.A., Kucharov O.R., Karshiyev D.A., Eshboyeva N.F. Zararli moddalarning atmosferada ko'chish va tarqalish jarayonlarini issiqlik energiyani hisobga olgan holda ishlab chiqilgan modelning sonli algoritmi.....	74
Turgunov T., Murodov J. Mamlakat rivojlanish strategiyasining asosiy omili - raqamli iqtisodiyotdir.....	78
Холиков А.А., Жумаев Ж. Математическое моделирование сушки лука с использованием метода полного факторного эксперимента.....	80
Egamberganov J.Q., Ismoilov D.A. Investitsiya faoliyatini moliyaviy boshqarish mexanizmini takomillashtirish yo'nalishlari.....	85
Mengnorov A., Turgunov T., Abduraximova M. Iqtisodiyotni raqamlashtirish sharoitida meva-sabzavotchilik tarmog'ini rivojlanishining ekonometrik tahlili.....	87
Авазов Б.М. Номаълум параметрларни статистик баҳолашда архимед копула функциялари.....	89
Rakhimboev M. Hausdorf o'lchami ma'nosida lebeg $\beta$ -nuqtalari va uning yordamida mukammal to'plamlarning miqdorini baholash.....	92
Kurbonbekova O.D. Matematik usullar yordamida fermer xo'jaliklarining iqtisodiy natijalarini tahlil qilish.....	97

Худоёрв З.Ж., Джианов М.Р., Халмуродов Т.Н., Маматқулов У.Қ., Умарова Ф.Ф. Қишлоқ хўжалик маҳсулотларини ташиш ишларини математик моделлаштириш.....	99
Одилова Ш.С., Захидов Д. Метод максимального правдоподобия для идентификации сообществ в сети на графах.....	103
Raxmonov S.R., Uskanov Sh.Q. <i>Chlorella Vulgaris</i> mikroalglarini yetishtirish texnologik jarayonining matematik modellashirish.....	107
Safarov.O.A. О некоторых обобщениях леммы бореля-контелли.....	113
Рахманова Ш.Ш. Хеджирование денежных потоков как потенциальный инструмент влияния на доходов хозяйствующих субъектов.....	114
Шадманов И.У. Моделирование и исследования взаимосвязанного тепло- и влагопереноса при хранении и сушке хлопка-сырца в бунтах.....	116

### III-sho‘ba

#### Sug‘orma dehqonchilik, o‘simliklarni yetishtirish agrotexnikasi hamda selektsiya va urug‘chilikni rivojlantirishda raqamli texnologiyalar

Axmurzayev Sh., Shodmanov M., To‘xtashev B., Eshonqulov J. Soya dalasidagi zarpechakka qarshi qo‘llanilgan pilot 10 % s.e.k. gerbitsidining iqtisodiy samaradorligi.....	122
Shamsiyev A., Norqulov U., Sheraliyev X., Eshonqulov J. Soya va kungaboqar navlarining sug‘orish tartiblari bo‘yicha iqtisodiy samaradorlik ko‘rsatkichlari.....	124
Abdalova G.N., Pirmetova S.A. Foydalanishdan chiqib ketgan hamda eroziyaga uchragan yerlar unumdorligini tiklashda soyaning o‘sishi va rivojlanishi.....	126
Азизов Б.М., Шукуруллаева Ф.М. Влияние сроков посева на рост и развитие озимой ржи в фазу кущения до зимовки.....	128
Saydullayev N.B. Bo‘yoqdor ro‘yan ( <i>Rubia tinctorum L.</i> ) o‘simligini yetishtirish agrotexnologiyasi.....	131
Begmatov A.M., Xaydarov M.B. Steviya ( <i>Stevia rebaudiana bertonii L.</i> )ni yetishtirish texnologiyasi va dorivorlik hususiyati.....	134
Saydullayev N.B. Goji ( <i>Lycium barbarum</i> ) o‘simligini yetishtirish texnologiyasi.....	136
Abdalova G.N., Shimbergenova G.J. Qoraqalpoqiston Respublikasi sho‘rlangan yerlarida yem-xashak ekinlarining su‘g‘orish tartibini o‘rganish.....	139
Charshanbiyev U.Yu., Odinayev O‘. Biogumus kam xarajat – yuqori daromad.....	141
Якубов Ш.М., Ахмедов Э.Т., Эргашева И.Т. <i>Allium Tschimganicum b. Fedtsch</i> (мадор) ўсимлигини биолоэкологик хусусиятлари.....	143
Mamedova V.N. In-vitro usulida ko‘chat yetishtirishning afzalliklari.....	146
Торениязов Т.Е. Данакли мева боғларида ширалар ривожини башорат қилиш ва қарши қурашни ташкиллаштириш.....	149
Торениязов Т.Е., Аннакулов Б.К. Қорақалпоғистон агробиоценози абиотик омиллар ўзгаришининг каналар турлари ривожига таъсирини белгилаш.....	152
Каримов Б.Т. Озеленение и благоустройство городской среды.....	154
Норқулов У., Низамова М., Эшонқулов Ж. Гидропоника усули билан помидор етиштиришда томчилатиб суғориш технологик жараёнларини автоматлаштириш модели.....	157

### IV-sho‘ba

#### Qishloq xo‘jaligida raqamli innovatsion texnika va texnologiyalardan foydalanish

Эшпулатов Д.Б. Технология цифровых двойников: перспективы внедрения в животноводстве.....	160
Утепбергенова В.М. Маданий яйловларни ривожлантиришда рақамли инновацион технологиялардан фойдаланиш.....	163
Нуриев К. К., Нуриев М.К. Применение цифровых технологий при определении тяговых сопротивлений рабочих органов.....	165
Халмуродов Т.Н., Исмоилов О.И. Қайта тикланувчи энергия манбаларининг ривожланиш истиқболлари.....	169
Худоёрв З. Ж., Алланазаров М.А., Халмуродов Т.Н. Ёмғирлатиш интенсивлигининг тупрок структурасига таъсири.....	173
Худоёрв З.Ж. Ёмғирлатиш суғориш қурималари дефлекторли насадқасида сунъий ёмғир томқиси ҳосил бўлиши ва сув сарфи таққикотлари.....	176
Воқіуев А.А., Botirov A.N. Agrar soha elektr ta‘minotida kombinatsiyalashgan mobil elektr stansiyasidan foydalanish.....	180
Норов С.Н., Баёзов Р.Р. Электр юритмали тракторларнинг иш унумдорлиги трансмиссиянинг автоматик уланишларга боғлиқлиги.....	184
Хазиев С.А., Горлова И.Г. Качества среза пустынных кормовых растений роторным режущим аппаратом косилки-копнителя.....	186
Таджибекова И.Э. Преимущество применения технологии обработки озонем продукции в различных отраслях сельского хозяйства.....	190
Mirzaxodjayev Sh.Sh., Xaytmatov Sh.M., Mamasov A.A., Shodiev X.B. Sabzovot ko‘chatlarini ekish uchun taklif etilayotgan yangi texnologiyani asoslash.....	193

хеджирования потоков денежных средств:

— хеджирование процентных инструментов с плавающей ставкой процента при помощи процентного свопа;

— хеджирование процентных инструментов с плавающей ставкой процента при помощи «кэпа» (фиксирующего максимальный уровень ставки процента) или «коллара» (фиксирующего как минимальный, так и максимальный уровень ставки процента);

— хеджирование против валютного риска будущих платежей в иностранной валюте по договорам операционной аренды;

— хеджирование прогнозируемых сделок с высокой вероятностью осуществления.

Если инструмент хеджирования является производным инструментом, то он оценивается по

справедливой стоимости, причем изменения справедливой стоимости в той части, где инструмент хеджирования является эффективным, отражаются непосредственно в составе собственного капитала как отдельный компонент, называемый, как правило, резервом хеджирования. В случае, когда этот инструмент был неэффективным, соответствующие изменения сразу признаются в составе прибыли или убытка за отчетный период.

Если инструмент хеджирования является производным монетарным объектом, что разрешено только для операций хеджирования против валютного риска, то прибыли и убытки от изменения обменных курсов в отношении указанного инструмента хеджирования также признаются непосредственно в составе собственного капитала.

## Литература

1. Национальный стандарт бухгалтерского учета Республики Узбекистан (НСБУ) N 9 "Отчет о денежных потоках" (Зарегистрирован МЮ 04.11.1998 г. N 519, утвержден МФ 16.10.1998 г.)

2. Национальный стандарт бухгалтерского учета Республики Узбекистан (НСБУ N 21) "План счетов бухгалтерского учета финансово-хозяйственной деятельности хозяйствующих субъектов и Инструкция по его применению" (Утвержден Приказом министра финансов от 09.09.2002 г. N 103, зарегистрированным МЮ 23.10.2002 г. N 1181).

3. Приказ Министра Финансов Республики Узбекистан. Об утверждении «Форм финансовой отчетности и правил по их заполнению» [Зарегистрирован Министерством юстиции Республики Узбекистан от 24 января 2003 г. Регистрационный № 1209]

4. Хахонова Н.Н. Концепция формирования системы учета денежных потоков коммерческих организаций: теория и практика. Ростов-на-Дону: РГЭУ «РИНХ», 2005. 248 с.

УДК 519.637

Шадманов И.У.

БГУ

## МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННОГО ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА ПРИ ХРАНЕНИИ И СУШКЕ ХЛОПКА-СЫРЦА В БУНТАХ

**Аннотация.** В статье приводятся многомерная математическая модель и численный алгоритм для решения совместного тепло- и влагопереноса при хранении хлопка-сырца в бунте в условиях собственного тепловлаговыведения, солнечной радиации и тепловлагообмена с окружающим воздухом. разработано программное обеспечение для исследования процессов тепло- и влагопереноса при хранении хлопка-сырца с учетом изменений интенсивности солнечной радиации, температуры и влажности окружающей среды. Приведены результаты вычислительных экспериментов, а также сопоставление расчетных и эмпирических данных.

**Ключевые слова:** математическая модель, программное обеспечение, температура, влажность, теплоперенос, влагоперенос, солнечная радиация, хлопка-сырца.

**Annotation.** The article presents a multidimensional mathematical model and a numerical algorithm for solving the joint heat and moisture transfer during storage of raw cotton in a riot under conditions of its own heat and moisture release, solar radiation and heat and moisture exchange with the surrounding air. software was developed to study the processes of heat and moisture transfer during the storage of raw cotton, taking into account changes in the intensity of solar radiation, temperature and humidity of the environment. The results of computational experiments are presented, as well as a comparison of calculated and empirical data.



**Keywords:** mathematical model, software, temperature, humidity, heat transfer, moisture transfer, solar radiation, raw cotton.

**Annottatsiya.** Ushbu maqolada ichki issiqlik va namlikning ajralib chiqishi, quyosh radiatsiyasi va atrof-muhit bilan issiqlik va namlik almashinuvi sharoitida paxta xomashyosi g'aramini saqlashda issiqlik va namlikning birgalikda ko'chishining ko'p o'lchovli matematik modeli va masalalarni yechishning sonli algoritmi keltirilgan. Quyosh radiatsiyasi kattaligi, tashqi muhit harorati va namligi o'zgarishlarini hisobga olgan holda paxta xomashyosini saqlashda issiqlik va namlik ko'chishi jarayonlarini tadqiq qilish uchun dasturiy ta'minot ishlab chiqilgan. Hisoblash tajribalari natijalari keltirilgan, bundan tashqari hisoblash natijalarini empirik natijalar bilan qiyosiy solishtirish o'tkazilgan.

**Kalit so'zlar:** matematik model, dasturiy ta'minot, harorat, namlik, issiqlik uzatish, namlik o'tkazish, quyosh radiatsiyasi, paxta xom ashyosi.

## Введение

В мире успешно реализуются научные изыскания в области математического моделирования, численных методов и разработки программно-инструментальных средств для решения задач анализа, мониторинга и прогнозирования процессов внутреннего тепло- и влагопереноса в пористых материалах. Проблемам развития теоретических основ и методологии моделирования сложных процессов тепло- и массопереноса посвящены работы целого ряда выдающихся ученых, таких как А.Н. Тихонов, А.А. Самарский, А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов, В.П. Исаченко и других. Задачи математического моделирования процессов сушки и хранения различных материалов рассмотрены в работах М.В. Алексева, В.И. Жидко, А.З. Маматов, А.П. Парпиев, Ж.И. Хужаев и др.

Однако, многие вопросы разработки и

усовершенствования математических моделей, обеспечивающих учет таких внешних и внутренних факторов, как самонагрев, температура окружающей среды и солнечная радиация, значительно влияющих на процессы тепло- и влагообмена в сельскохозяйственных продуктах, до сих пор изучены недостаточно полно.

## Постановка задачи

Учитывая переменность основных теплофизических показателей процесса сушки и хранения неоднородных пористых тел, в качестве математической модели тепло-и влагопереноса предложена следующая система дифференциальных уравнений, где учитываются влаго-и теплообмен с окружающей средой, источники выделения тепла и влаги внутри неоднородной пористой среды и инсоляции потока солнечной радиации [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q. \quad (2)$$

с начальными

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z); \quad u(x, y, z, 0) = u_0(x, y, z) \quad (3)$$

и граничными условия

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T(0, y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_1 (T_{oc} - T(L_x, y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, 0, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, L_y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (8)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, y, L_z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (9)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(0, y, z, \tau)); \quad (10)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_2 (u_{oc} - u(L_x, y, z, \tau)); \quad (11)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, 0, z, \tau)); \quad (12)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, L_y, z, \tau)); \quad (13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (14)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, y, L_z, \tau)). \quad (15)$$

Здесь  $T$  и  $u$  – изменение температуры и влаги пористого тела;  $a(x, y, z)$  – коэффициент теплопроводности;  $\delta(x, y, z)$  – коэффициент влагопроводности;  $f = b \cdot e^{-\alpha r}$  – интенсивность внутренних источников тепла;  $b = \frac{u}{c}$  – коэффициент тепловыделения;  $c$  – удельная теплоемкость;

$c_2$  – удельная влагоемкость,  $\rho$  – плотность материала;  $\alpha$  – эмпирический параметр;  $q = \rho m_0 e^{-\xi \tau}$  – интенсивность внутренних источников влаги;  $m_0$  – максимальная интенсивность испарения;  $\xi$  – коэффициент сушки (1/сек);  $\gamma$  – коэффициент поглощения;  $R(t)$  – инсоляция потока солнечной радиации;  $\beta_1$  – коэффициент теплоотдачи;  $\beta_2$  – коэффициент влагоотдачи;  $T_{oc}$  – температура окружающей среды;  $u_{oc}$  – влажность окружающей среды.

Внешняя форма бунта хлопка-сырца близка к прямоугольному параллелепипеду. Параллелепипед расположен в первом октанте декартовой системы координат и размеры его по координатам составляют  $L_x, L_y, L_z$ .

Метод решения. Введем пространственно-временную сетку:

$$\Omega_{xyz\tau} = \left\{ (x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_k = k\Delta z, \tau_n = n \Delta \tau); \right. \\ \left. i = \overline{1, N_x}; j = \overline{1, M_y}, k = \overline{1, L_z}, n = \overline{0, N_\tau}, \Delta \tau = 1 / N_\tau \right\}.$$

Уравнение (1) аппроксимируем по  $Ox$  и, группируя подобные члены, получим систему трехдиагональных алгебраических уравнений:

$$a_{T,i,j,k} T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{T,i,j,k} T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{T,i,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{T,i,j,k}, \quad (16)$$

где коэффициенты и свободный член уравнения определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned}
 a_{T,i,j,k} &= \frac{a_{i-0,5,j,k}}{\Delta x^2}, \quad b_{T,i,j,k} = \frac{3}{2\Delta\tau} + \frac{a_{i+0,5,j,k} + a_{i-0,5,j,k}}{\Delta x^2}, \quad c_{T,i,j,k} = -\frac{3}{2\Delta\tau} + \frac{a_{i+0,5,j,k}}{\Delta x^2}, \\
 d_{T,i,j,k} &= \frac{3}{2\Delta\tau} T_{i,j,k}^n + \frac{3}{2\Delta\tau} T_{i+1,j,k}^n + \\
 &+ \frac{a_{i,j+0,5,k} T_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k} T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\
 &+ \frac{a_{i,j,k+0,5} T_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5} T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \\
 &+ \frac{a_{i+0,5,j,k} u_{i+1,j,k}^n - (a_{i+0,5,j,k} + a_{i-0,5,j,k}) u_{i,j,k}^n + a_{i-0,5,j,k} u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\
 &+ \frac{a_{i,j+0,5,k} u_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k}) u_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k} u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\
 &+ \frac{a_{i,j,k+0,5} u_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5}) u_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5} u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \frac{1}{3} f_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}.
 \end{aligned}$$

Далее, нижеследующее граничное условие аппроксимируем по  $Ox$  и при  $x=0$  получим:

$$\lambda_1 \frac{-3T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 4T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}, \tag{17}$$

где  $\varphi = \eta\rho\gamma R(\tau)$ .

Из системы уравнений (25) при  $i=1$  находим  $T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  и, поставив в (17), найдем  $T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ :

$$T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,0,j,k} T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,0,j,k},$$

где прогоночные коэффициенты  $\alpha_{T,0,j,k}, \beta_{T,0,j,k}$  вычисляются с помощью:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{T,0,j,k} &= \frac{\lambda_1 b_{T,1,j,k} - 4\lambda_1 c_{T,1,j,k}}{a_{T,1,j,k} \lambda_1 - 3c_{T,1,j,k} \lambda_1 - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \beta_1}, \\
 \beta_{T,0,j,k} &= \frac{-d_{T,1,j,k} \lambda_1 - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \beta_1 T_{oc} - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \varphi^{n+\frac{1}{3}}}{a_{T,1,j,k} \lambda_1 - 3c_{T,1,j,k} \lambda_1 - 2\Delta x c_{T,1,j,k} \beta_1}.
 \end{aligned}$$

Аналогично аппроксимируя граничное условие при  $x = L_x$  по  $Ox$  получим:

$$\lambda_1 \frac{T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 4T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 3T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}.$$

Значения последовательности температуры определяются методом обратной прогонки:



$$T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{-\lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \beta_{T,N-1,j,k} - \lambda_1 \beta_{T,N-2,j,k} + 4\lambda_1 \beta_{T,N-1,j,k} - 2\Delta x \beta_1 T_{oc} - 2\Delta x \varphi^{n+\frac{1}{3}}}{3\lambda_1 - 2\Delta x \beta_1 + \lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \alpha_{T,N-1,j,k} - 4\lambda_1 \alpha_{T,N-1,j,k}},$$

$$T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,i,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,i,j,k}, \quad i = \overline{N-1,1}, \quad j = \overline{0,M}, \quad k = \overline{0,L}.$$

Далее уравнение (2) аппроксимируем по  $Ox$  используя неявную конечно-разностную схему со вторым порядком аппроксимации по времени и пространственным переменным. В результате получаем формулы для вычисления значений влаги в пористой теле.

Аналогично, вышеуказанные действия выполняем для направлений  $Oy$  и  $Oz$ . Таким образом, получим пространственно-временные зависимости распределения температуры и влаги внутри пористой среды.

### Вычислительные эксперименты

Для мониторинга и прогнозирования процессов тепло-и влагопереноса в пористых средах на основе разработанных математических моделей и численных алгоритмов создан программный комплекс «НМТ-Calcul» на объектно-ориентированном языке C#. Для наглядного представления изменений температуры и влаги в бунтах хлопка-сырца, результаты проведенных численных расчетов на ЭВМ приведены по слоям на рисунках 1-2.

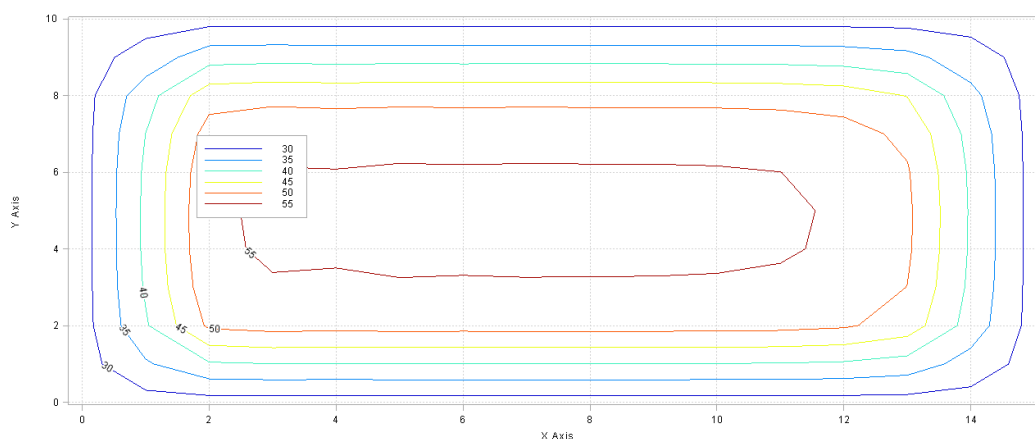


Рис. 1. Изменение влажности в бунте хлопка-сырца после 60 дней хранения в сечении  $z=5$  м.

$$T_{oc} = 30^0 C; \quad T(x, y, z, 0) = 42^0 C; \quad u_{oc} = 30\%; \quad u(x, y, z, 0) = 55\%$$

С увеличением влагосодержания хлопка-сырца значения коэффициента температуропроводности и интенсивности тепловыделения увеличиваются. Это приводит к более интенсивному нагреванию внутренней части бунта (до  $80 - 90^0 C$  и выше).

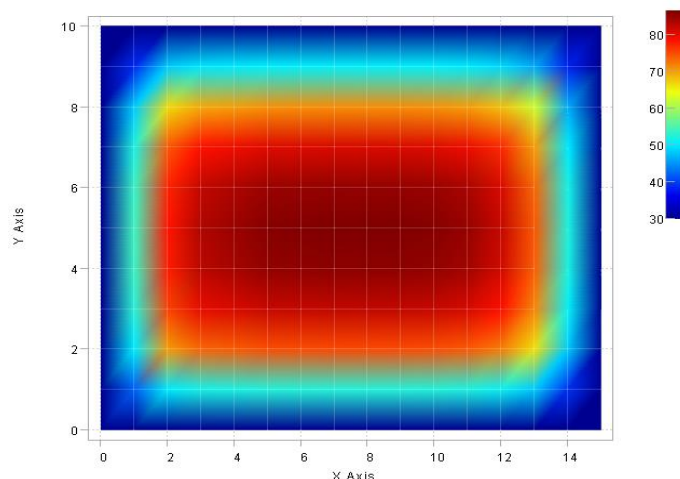


Рис. 2. Изменение наибольшей температуры в бунте хлопка-сырца после 60 дней хранения в сечении  $z=5$  м.

$$T_{oc} = 30^0 C; T(x, y, z, 0) = 42^0 C; u_{oc} = 30\%; u(x, y, z, 0) = 55\%$$

### Выводы.

Разработана многомерная математическая модель и программное обеспечение для исследования процессов взаимосвязанного тепло- и влагопереноса

при хранении и сушке хлопка-сырца в бунтах, основанный на применении неявной конечно-разностной схемы со вторым порядком точности по времени и пространственным переменным.

### Литература

1. Равшанов Н., Шадманов И.У. Математическая модель и эффективный численный алгоритм для исследования процессов тепло-влагопереноса в неоднородных пористых средах // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2021. – № 6/1(37). – С. 75-89.