



# BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI ILMIY AXBOROTI

Научный вестник Бухарского государственного университета  
Scientific reports of Bukhara State University

## 6/2023



[www.buxdu.uz](http://www.buxdu.uz)

## 6/2023

<https://buxdu.uz>



**BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI ILMIY AXBOROTI**  
**SCIENTIFIC REPORTS OF BUKHARA STATE UNIVERSITY**  
**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК БУХАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Ilmiy-nazariy jurnal**  
**2023, № 6, iyul**

Jurnal 2003-yildan boshlab **filologiya** fanlari bo'yicha, 2015-yildan boshlab **fizika-matematika** fanlari bo'yicha, 2018-yildan boshlab **siyosiy** fanlar bo'yicha O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiya ishlari natijalari yuzasidan ilmiy maqolalar chop etilishi lozim bo'lgan zaruruy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

Jurnal 2000-yilda tashkil etilgan.  
Jurnal 1 yilda 12 marta chiqadi.

Jurnal O'zbekiston matbuot va axborot agentligi Buxoro viloyat matbuot va axborot boshqarmasi tomonidan 2020-yil 24-avgust № 1103-sonli guvohnoma bilan ro'yxatga olingan.

**Muassis: Buxoro davlat universiteti**

**Tahririyat manzili:** 200117, O'zbekiston Respublikasi, Buxoro shahri Muhammad Iqbol ko'chasi, 11-uy.  
**Elektron manzil:** nashriyot\_buxdu@buxdu.uz

**TAHRIR HAY'ATI:**

**Bosh muharrir:** Xamidov Obidjon Xafizovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

**Bosh muharrir o'rinbosari:** Rasulov To'liqin Husenovich, fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

**Mas'ul kotib:** Shirinova Mexrigiyo Shokirovna, filologiya fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

**Kuzmichev Nikolay Dmitriyevich,** fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor (N.P. Ogaryov nomidagi Mordova milliy tadqiqot davlat universiteti, Rossiya)

**Danova M.,** filologiya fanlari doktori, professor (Bolgariya)

**Margianti S.E.,** iqtisodiyot fanlari doktori, professor (Indoneziya)

**Minin V.V.,** kimyo fanlari doktori (Rossiya)

**Tashqarayev R.A.,** texnika fanlari doktori (Qozog'iston)

**Mo'minov M.E.,** fizika-matematika fanlari nomzodi (Malayziya)

**Mengliyev Baxtiyor Rajabovich,** filologiya fanlari doktori, professor

**Adizov Baxtiyor Rahmonovich,** pedagogika fanlari doktori, professor

**Abuzalova Mexriniso Kadirovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Amonov Muxtor Raxmatovich,** texnika fanlari doktori, professor

**Barotov Sharif Ramazonovich,** psixologiya fanlari doktori, professor, xalqaro psixologiya fanlari akademiyasining haqiqiy a'zosi (akademigi)

**Baqoyeva Muhabbat Qayumovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Bo'riyev Sulaymon Bo'riyevich,** biologiya fanlari doktori, professor

**Jumayev Rustam G'aniyevich,** siyosiy fanlar nomzodi, dotsent

**Djurayev Davron Raxmonovich,** fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Durdiyev Durdimurod Qalandarovich,** fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Olimov Shirinboy Sharofovich,** pedagogika fanlari doktori, professor

**Qahhorov Siddiq Qahhorovich,** pedagogika fanlari doktori, professor

**Umarov Baqo Bafoyevich,** kimyo fanlari doktori, professor

**Murodov G'ayrat Nekovich,** filologiya fanlari doktori, professor

**O'rayeva Darmonoy Saidjonovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Navro'z-zoda Baxtiyor Nigmatovich,** iqtisodiyot fanlari doktori, professor

**Hayitov Shodmon Ahmadovich,** tarix fanlari doktori, professor

**To'rayev Halim Hojiyevich,** tarix fanlari doktori, professor

**Rasulov Baxtiyor Mamajonovich,** tarix fanlari doktori, professor

**Eshtayev Alisher Abdug'aniyevich,** iqtisodiyot fanlari doktori, professor

**Quvvatova Dilrabo Habibovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Axmedova Shoiri Nematovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Amonova Zilola Qodirovna,** filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

**Hamroyeva Shahlo Mirjonovna,** filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

**Nigmatova Lola Xamidovna,** filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

**Boboyev Feruz Sayfullayevich,** tarix fanlari doktori

**Jo'rayev Narzulla Qosimovich,** siyosiy fanlar doktori, professor

**Rasulov Zubaydullo Izomovich,** filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

**Qurbonova Gulnoz Negmatovna,** pedagogika fanlari doktori (DSc), professor

**Zaripov Gulmurot Toxirovich,** texnika fanlari nomzodi, dotsent

MUNDARIJA \*\*\* СОДЕРЖАНИЕ \*\*\* CONTENTS

**ANIQ VA TABIIY FANLAR \*\*\* EXACT AND NATURAL SCIENCES \*\*\*  
ТОЧНЫЕ И ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

<b>Hasanov I.I.</b>	Kasr tartibli diffuziya tenglamasi uchun Koshi masalasi	4
<b>Murodova U.M.</b>	Cisco Packet Tracer dasturida IoT qurilmalar tarmog'ini loyihalash	11
<b>Turdiyev H.H., Xidirov U.B., Subhonova N.U.</b>	O'zgarmas koeffitsiyentli tashqi manbaga ega integro-differensial issiqlik tarqalish tenglamasidan xotira funksiyasini aniqlash masalasi	16
<b>Subhonova Z.A., Davlatova D.S.</b>	Ko'p o'lchamli kasr tartibli to'lqin tenglamasi uchun qo'yilgan Koshi masalasining yechiluvchanligi	27
<b>Маликов З.М., Наврузов Д.П., Жумаев Ж.</b>	Численное исследование закрученных струйных течений при различной степени закрутки на основе двух-жидкостной модели турбулентности	32
<b>Раззокова М.Б.</b>	Математическое моделирование переноса тепла в плоском солнечном коллекторе	39
<b>Тураев М.М., Наимова М.Ф.</b>	Развитие прудового рыбоводства и аквакультуры в Узбекистане: рациональное использование водных и земельных ресурсов	46
<b>Шадманов И.У.</b>	Эффективный численный алгоритм для расчёта процессов взаимосвязанного тепло-влажнопереноса в пористых телах	51
<b>Qurbonov H., Vozorova O'.B., Absalamova D.B.</b>	<b>M G 1 N</b> va <b>G J M 1 N-1</b> Ikkilanma xizmat ko'rsatish sistemalari statsionar navbat uzunliklari taqsimotlari uchun asimptotik munosabatlar	60
<b>Хайриева Ш.С.</b>	Математик ҳисоблашларни ўқитишда ахборот технологиялари воситалари ва уларнинг имкониятлари	66
<b>Turayev A.A., Turayev O.G', Raximova S.M.</b>	Application of superconductor materials in medicine	71
<b>Ergashov A.Q.</b>	Taus metodidan foydalangan holda yarimo'tkazgich fotoanod tarkibidagi qatlamlarning taqiqlangan zona kengligini aniqlash	75
<b>TILSHUNOSLIK *** LINGUISTICS *** ЯЗЫКОЗНАНИЕ</b>		
<b>Ahmadova U.Sh.</b>	Hunarmandchilik sohasi perifrazarida milliy-madaniy xususiyatlar	84
<b>Babayev J.S.</b>	Joint stylistic devices	89

**ЭФФЕКТИВНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ РАСЧЁТА ПРОЦЕССОВ  
ВЗАИМОСВЯЗАННОГО ТЕПЛО-ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ**

**Шадманов Истам Уктамович,**  
Бухарский государственный университет,  
PhD, доцент кафедры «Информационные системы и  
цифровые технологии»  
[i.u.shadmanov@buxdu.uz](mailto:i.u.shadmanov@buxdu.uz)

**Аннотация:** Разработана многомерная математическая модель и эффективный численный алгоритм процессов совместного тепло- и влагопереноса при хранении и сушке неоднородных пористых тел с учётом внутреннего тепловыделения, тепловлагообмена с окружающей средой и влияния солнечной радиации.

**Ключевые слова:** математическая модель, тепловыделения, влаговыделения, конечно-разностный схема, пористый тела.

**G'OVAK JISMLARDA O'ZARO BOG'LIQ BO'LGAN ISSIQLIK VA NAMLIKNI  
O'TKAZISH JARAYONLARINI HISOBLASHNING SAMARALI SON ALGORITMI**

**Annotatsiya.** Ichki issiqlik va namlik ajralib chiqish, tashqi muhit bilan issiqlik-namlik almashinuvi va quyosh radiatsiyasi ta'sirini hisobga olgan holda bir jinsli bo'lmagan g'ovak jismlarni saqlash va quritishda birgalikda issiqlik va namlik ko'chishi jarayonlarining ko'p o'lchovli matematik modeli va samarali sonli algoritmi ishlab chiqilgan.

**Kalit so'zlar:** matematik model, issiqlik almashinuvi, namlik almashinuvi, chekli-ayirmali sxema, g'ovak jism.

**EFFECTIVE NUMERICAL ALGORITHM FOR CALCULATION OF PROCESSES OF  
RELATED HEAT AND MOISTURE TRANSFER IN POROUS BODIES**

**Abstract:** A multidimensional mathematical model and effective numerical algorithm has been developed for the processes of joint heat and moisture transfer during storage and drying of heterogeneous porous bodies, taking into account the internal heat and moisture release, heat and moisture exchange with the environment and the influence of solar radiation.

**Keywords:** mathematical model, heat release, moisture release, finite difference scheme, porous body.

**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. Результаты подобных исследований способны обеспечить получение качественно новых знаний об исследуемых процессах; более точные прогнозы изменения показателей сельхозпродуктов, таких как температура и влажность; усовершенствование технологических способов и оборудования с целью оптимизации условий хранения и обработки сельскохозяйственного сырья.

В настоящее время для описания процессов тепловлагопереноса в капиллярно-пористых средах используется несколько моделей, самые широко исследованные из них - модель А.В.Лыкова [1], модель Филиппа и Де Фриза [2], и модель Уитакера [3]. Эти модели были разработаны на основе и принципах сохранения тепла и массы, закона Фурье для теплопроводности, закона Фика и Дарси для диффузии газа и жидкости соответственно. Особенностью этих моделей является выбор управляющих потенциалов, таких как парциальное давление, относительная влажность и содержание воды в пористых телах.

Процессы взаимосвязанного тепло-и влагопереноса внутри влажного пористого тела описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных, предложенных Лыковым А. В., в процессе сушки имеет вид [4]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{11} \nabla^2 u + a_{12} \nabla^2 T; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{22} \nabla^2 T + a_{21} \nabla^2 u, \quad (2)$$

где коэффициенты  $a_{11}, a_{12}, a_{22}, a_{21}$  определяются соотношениями:

$$a_{11} = a_m = \frac{\lambda_2}{\rho c_2} - \text{коэффициент диффузии влажных тел (коэффициент диффузии влаги } a_m \text{ можно}$$

назвать коэффициентом потенциалопроводности переноса влаги);

$$a_{12} = a_m^T = a_m \delta - \text{коэффициент термодиффузии влажных тел;}$$

$$a_{22} = a + a_{m1}^T \frac{r_{12}}{c} = \frac{\lambda_1}{\rho c_1} + a_{m1}^T \frac{r_{12}}{c} - \text{коэффициент диффузии тепла (по физическому смыслу}$$

коэффициент температуропроводности является коэффициентом диффузии тепла);

$$a_{21} = a_{m1} \frac{r_{12}}{c} - \text{коэффициент термодиффузии влажных тел;}$$

$r_{12}$  - радиус капилляра;

$\delta$  - относительный коэффициент термодиффузии влаги, обычно экспериментально определяется по формуле  $\delta = \frac{a_m^T}{a_m}$ .

В работах Jen Y. Liu [5] представлен аналитический метод решения система уравнений тепломассопереноса Лыкова с линейно зависимыми от времени граничными условиями. Решение состоит из суммы решений неоднородных уравнений. Когда граничные условия изменяются, то однородные решения остаются тем же, а изменяются только частные решения. Численные результаты на примере сушки пористого материала показывают, что при одновременном увеличении температуры и уменьшении равновесного потенциала массообмена по времени, время сушки и поглощение тепла могут быть уменьшены до достижения заданной влажности.

В статье [6] для изучения тепло-и влагопереноса в пористых телах разработано двухмерная математическая модель, учитывающая внутренних источников влаги и тепла, влияния изменений температуры и влажности атмосферного воздуха. На основе метода переменных направлений разработан численный алгоритм расчета процессов тепло-и влагопереноса в двухмерной постановке, который обеспечивает второй порядок аппроксимации по координатам и времени.

В статье [7] предложено численное исследование трехмерного тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористых средах с использованием переменного числа фазовых превращений. Влияние учета числа фазовых превращений как переменного параметра на температуру и потенциала влажности искали для различных значений основных безразмерных параметров системы уравнений Лыкова. Установлено, что для более низких значений этих безразмерных параметров предположение о постоянном числе фазовых превращений является логичным, но для более высоких значений  $Lu$ ,  $Ko$  и  $Pn$  требуется более точное моделирование, и можно использовать переменное число фазовых превращений для получения лучшее согласие с экспериментальными данными.

В статье [8] изучается совместный тепломассообмен в пористой среде. Сначала исследуемые материалы были охарактеризованы экспериментально, а затем были оценены их тепловые свойства, а именно теплопроводность и удельная теплоемкость в различных состояниях (сухой-влажный). Представлена математическая модель, описывающая тепломассоперенос в биоматериалах, адекватность которой доказана путем сопоставления с экспериментальными результатами. Свойства материалов, полученные из части описания, используются в качестве входных параметров модели. Кроме того, в лаборатории смонтирована испытательная установка для сравнения численных и экспериментальных данных.

В статье [9] приведена математическая модель на основе теории диффузии Фика, закона теплопроводности Фурье и механики термоупругости для анализа пространственно-временного распределения влажности, температуры и напряжений в процессе высыхания картофеля. Во время высыхания наблюдалась явная деформация пористой среды, а на поверхности также наблюдались складки. Степень деформации не зависит от условий сушки и полностью определяется влажностью конкретной пористой среды.

В статье [10] разработана двумерная модель диффузии жидкости для прогнозирования изменения переходного содержания влаги и распределения температуры в модельных композитных пищевых продуктах. Ломтики картофеля и яблока прямоугольной формы были использованы для формирования модельных композитных образцов для экспериментальных испытаний. Было обнаружено, что влияние контактного сопротивления на теплоперенос на границе раздела композитного продукта незначительно. Эффект переворачивания продукта через различные интервалы времени во время сушки показал значительное положительное влияние на скорость сушки.

В статье [11] представлена двухмерная модель для анализа передачи тепла и влаги через древесные пористые строительные материалы. Представлена нестационарная связанная модель теплопереноса и влагообмена в древесном материале при низких температурах. Полученная связанная модель преобразуется в два нелинейных уравнения в частных производных, которые затем численно решаются с помощью неявной итерационной схемы. Численные результаты изменения температуры и потенциала влажности сравниваются с экспериментальными измерениями, доступными в литературе.

Благодаря усилиям отмеченных и многих других ученых, к настоящему времени, уже получены значительные результаты теоретического и прикладного характера. 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.** Система уравнений (1) и (2) является наиболее общей, она справедлива не только для процессов сушки влажных материалов, но и для любого вида тепло-и влагопереноса.

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 [12]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f; \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \delta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (4)$$

с начальными

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z); u(x, y, z, 0) = u_0(x, y, z) \quad (5)$$

и граничными условиями

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

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

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, 0, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (8)$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (10)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, y, L_z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (11)$$

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

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

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, 0, z, \tau)); \quad (14)$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (16)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_2 (u_{oc} - u(x, y, L_z, \tau)). \quad (17)$$

Здесь  $T$  и  $u$  – значения температуры и влаги пористого тела;  $a(x, y, z)$  – коэффициент теплопроводности;  $\delta(x, y, z)$  – коэффициент влагопроводности;  $f(x, y, z, \tau) = b \cdot e^{-\alpha \tau}$  – интенсивность внутреннего тепловыделения массы ( $K c^{-1}$ );  $b = \frac{u}{c_1}$  – коэффициент тепловыделения;  $c_1$  – удельная теплоёмкость ( $Дж / (кг \cdot K)$ );  $\alpha$  – эмпирический параметр;  $q(x, y, z, \tau) = \rho m_0 e^{-\xi \tau}$  – интенсивность внутренних источников влаги, при постоянных значениях плотности материала  $\rho$  ( $кг / м^3$ );  $\xi$  – коэффициент сушки ( $1 / сек$ );  $m_0$  – максимальная интенсивность испарения ( $кг / м^2 сек$ );  $\beta_1$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_{oc}$  – температура окружающей среды;  $\eta$  – коэффициенты для проведения граничного условия к размерному виду;  $\gamma$  – коэффициент поглощения;  $R(\tau)$  – поток солнечной радиации;  $\beta_2$  – коэффициент влагоотдачи;  $u_{oc}$  – влажность окружающей среды.

Такая математическая модель позволяет провести исследования, мониторинга и прогнозирования процессов тепло- и влагопереноса в пористых средах при хранении и сушки неоднородных телах, где учтены неоднородность среды, тепло и влагообмен с окружающей средой, суточное изменение солнечной радиации, внутреннее собственное тепловлаговыведение материала.

**Метод решения.** Из постановки задача видно, что объект исследования описывается системой дифференциальной уравнений в частных производных с источником тепло-и влаговыведения, следовательно, получить аналитическое решение затруднительно. С учетом сказанной выше для решения задачи (3)–(17) используем конечно-разностный метод, заменяя область непрерывного решения на сеточную.

Введем пространственно-временной сетки:

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

и заменяем дифференциальные операторы уравнения (3) на разностные по  $Ox$  :

$$\frac{1}{2} \frac{T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{i,j,k}^n}{\Delta \tau / 3} + \frac{1}{2} \frac{T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{i+1,j,k}^n}{\Delta \tau / 3} = \frac{a_{i+0.5,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - (a_{i+0.5,j,k} + a_{i-0.5,j,k}) T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + a_{i-0.5,j,k} T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x^2} + \\ + \frac{a_{i,j+0.5,k} T_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0.5,k} + a_{i,j-0.5,k}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j-0.5,k} T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ + \frac{a_{i,j,k+0.5} T_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0.5} + a_{i,j,k-0.5}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0.5} T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \\ + \frac{a_{i+0.5,j,k} u_{i+1,j,k}^n - (a_{i+0.5,j,k} + a_{i-0.5,j,k}) u_{i,j,k}^n + a_{i-0.5,j,k} u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{a_{i,j+0,5,k}u_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k})u_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k}u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\
 & + \frac{a_{i,j,k+0,5}u_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5})u_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5}u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \frac{1}{3}f_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Группируя подобные члены, получим систему трехдиагональных алгебраических уравнений:

$$a_{T,i,j,k}T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{T,i,j,k}T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{T,i,j,k}T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{T,i,j,k}. \tag{19}$$

Где коэффициенты и свободный член 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, граничную условие (6) аппроксимируем по  $Ox$  и получим:

$$\lambda_1 \frac{-3T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 4T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}, \tag{20}$$

где  $\varphi = \eta\gamma R(\tau)$ .

Из системы уравнений (19), когда  $i=1$ , получим:

$$a_{T,1,j,k}T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{T,1,j,k}T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{T,1,j,k}T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{T,1,j,k}. \tag{21}$$

Поставив  $T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  из (21) в (20), найдем  $T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ :

$$T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,0,j,k}T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,0,j,k}, \tag{22}$$

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

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

Аналогично аппроксимируя граничное условие (7) по  $Ox$ , получим:

$$\lambda_1 \frac{T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 4T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 3T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}. \tag{23}$$

где  $\varphi = \eta\gamma R(\tau)$ .

Применяя метод прогонки для последовательности при  $N, N-1$  и  $N-2$ , найдем  $T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  и  $T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ :

$$T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,N-1,j,k}T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,N-1,j,k}; \tag{24}$$

$$T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,N-2,j,k} \alpha_{T,N-1,j,k} T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \alpha_{T,N-2,j,k} \beta_{T,N-1,j,k} + \beta_{T,N-2,j,k}. \quad (25)$$

Поставив  $T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  из (24) и  $T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  из (25) в (23), найдем  $T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ :

$$T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{-\lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \beta_{T,N-1,j,k} - \lambda_1 \beta_{T,N-2,j,k} + 4\lambda_1 \beta_{T,N-1,j,k} - 2\Delta x \beta_1 T_{oc} - 2\Delta x \varphi^{n+\frac{1}{3}}}{3\lambda_1 - 2\Delta x \beta_1 + \lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \alpha_{T,N-1,j,k} - 4\lambda_1 \alpha_{T,N-1,j,k}}. \quad (26)$$

Значения последовательности температуры  $T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}, T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}, \dots, T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  определяются методом обратной прогонки по уменьшению  $i$ :

$$T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,i,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,i,j,k}, \quad i = \overline{N-1,1}, j = \overline{0,M}, k = \overline{0,L}. \quad (27)$$

Аналогично уравнение (4) аппроксимируем по  $Ox$  конечно-разностными соотношениями и группируя подобных членов, получим систему из трехдиагональных алгебраических уравнений относительно искомых переменных:

$$a_{u,i,j,k} u_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{u,i,j,k} u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{u,i,j,k} u_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{u,i,j,k}. \quad (28)$$

Далее, граничную условию (12) аппроксимируем со вторым порядком точности по  $Ox$  и получим:

$$\lambda_2 \frac{-3u_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 4u_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - u_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_2 u_{oc} + \beta_2 u_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}}. \quad (29)$$

Из системы уравнений (28), при  $i=1$ , получим:

$$a_{u,1,j,k} u_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{u,1,j,k} u_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{u,1,j,k} u_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{u,1,j,k}. \quad (30)$$

Поставив  $u_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  из (1.30) в (29), найдем значение  $u_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ :

$$u_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{u,0,j,k} u_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{u,0,j,k}. \quad (31)$$

Из соотношения (31) прогоночные коэффициенты определяются в виде:

$$\alpha_{u,0,j,k} = \frac{\lambda_2 b_{u,1,j,k} - 4\lambda_2 c_{u,1,j,k}}{a_{u,1,j,k} \lambda_2 - 3c_{u,1,j,k} \lambda_2 - 2\Delta x c_{u,1,j,k} \beta_2}; \quad \beta_{u,0,j,k} = \frac{-d_{u,1,j,k} \lambda_2 - 2\Delta x c_{u,1,j,k} \beta_2 u_{oc}}{a_{u,1,j,k} \lambda_2 - 3c_{u,1,j,k} \lambda_2 - 2\Delta x c_{u,1,j,k} \beta_2}.$$

Аналогично аппроксимируя граничному условию (13) по  $Ox$ , получим:

$$\lambda_2 \frac{u_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 4u_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 3u_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_2 u_{oc} + \beta_2 u_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}. \quad (32)$$

Применяя метод прогонки для последовательности  $N, N-1$  и  $N-2$ , найдем  $u_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  и  $u_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ :

$$u_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{u,N-1,j,k} u_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{u,N-1,j,k}; \quad (33)$$

$$u_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{u,N-2,j,k} \alpha_{u,N-1,j,k} u_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \alpha_{u,N-2,j,k} \beta_{u,N-1,j,k} + \beta_{u,N-2,j,k}. \quad (34)$$

Поставив  $u_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  из (33) и  $u_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  из (34) в (32), найдем  $u_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ :

$$u_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{-\lambda_2 \alpha_{u,N-2,j,k} \beta_{u,N-1,j,k} - \lambda_2 \beta_{u,N-2,j,k} + 4\lambda_2 \beta_{u,N-1,j,k} - 2\Delta x \beta_2 u_{oc}}{3\lambda_2 - 2\Delta x \beta_2 + \lambda_2 \alpha_{u,N-2,j,k} \alpha_{u,N-1,j,k} - 4\lambda_2 \alpha_{u,N-1,j,k}}. \quad (35)$$

Значения последовательности влаги  $u_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}, u_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}, \dots, u_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$  определяются методом обратной прогонки по уменьшению  $i$ :

$$u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{u,i,j,k} u_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{u,i,j,k}, \quad \text{где } i = \overline{N-1,1}, j = \overline{0,M}, k = \overline{0,L}. \quad (36)$$

Далее, уравнение (3) аппроксимируем по  $O_y$ , группируя подобных членов, получим систему из трехдиагональных алгебраических уравнений:

$$\bar{a}_{T,i,j,k} T_{i,j-1,k}^{n+\frac{2}{3}} - \bar{b}_{T,i,j,k} T_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} + \bar{c}_{T,i,j,k} T_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} = -\bar{d}_{T,i,j,k}. \quad (37)$$

Далее, граничное условие (8) аппроксимируем по  $O_y$ , получим:

$$\lambda_1 \frac{-3T_{i,0,k}^{n+\frac{2}{3}} + 4T_{i,1,k}^{n+\frac{2}{3}} - T_{i,2,k}^{n+\frac{2}{3}}}{2\Delta y} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{i,0,k}^{n+\frac{2}{3}} - \varphi^{n+\frac{2}{3}}. \quad (38)$$

Из системы уравнений (37), когда  $j=1$ , получим:

$$\bar{a}_{T,i,1,k} T_{i,0,k}^{n+\frac{2}{3}} - \bar{b}_{T,i,1,k} T_{i,1,k}^{n+\frac{2}{3}} + \bar{c}_{T,i,1,k} T_{i,2,k}^{n+\frac{2}{3}} = -\bar{d}_{T,i,1,k}. \quad (39)$$

Поставив  $T_{i,2,k}^{n+\frac{2}{3}}$  из (39) в (38), найдем значение  $T_{i,0,k}^{n+\frac{2}{3}}$ :

$$T_{i,0,k}^{n+\frac{2}{3}} = \bar{\alpha}_{T,i,0,k} T_{i,1,k}^{n+\frac{2}{3}} + \bar{\beta}_{T,i,0,k}, \quad (40)$$

где прогоночные коэффициенты определяются с помощью следующих соотношениях:

$$\bar{\alpha}_{T,i,0,k} = \frac{\lambda_1 \bar{b}_{T,i,1,k} - 4\lambda_1 \bar{c}_{T,i,1,k}}{\bar{a}_{T,i,1,k} \lambda_1 - 3\bar{c}_{T,i,1,k} \lambda_1 - 2\Delta y \bar{c}_{T,i,1,k} \beta_1}; \quad \bar{\beta}_{T,i,0,k} = \frac{-\bar{d}_{T,i,1,k} \lambda_1 - 2\Delta y \bar{c}_{T,i,1,k} \beta_1 T_{oc} - 2\Delta y \bar{c}_{T,i,1,k} \varphi^n}{\bar{a}_{T,i,1,k} \lambda_1 - 3\bar{c}_{T,i,1,k} \lambda_1 - 2\Delta y \bar{c}_{T,i,1,k} \beta_1}.$$

Далее аппроксимируя граничное условие (9) по  $O_y$ , получим:

$$\lambda_1 \frac{T_{i,M-2,k}^{n+\frac{2}{3}} - 4T_{i,M-1,k}^{n+\frac{2}{3}} + 3T_{i,M,k}^{n+\frac{2}{3}}}{2\Delta y} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{i,M,k}^{n+\frac{2}{3}} - \varphi^{n+\frac{2}{3}}. \quad (41)$$

Применяя метод прогонки для последовательности  $M$ ,  $M-1$  и  $M-2$ , найдем  $T_{i,M-1,k}^{n+\frac{2}{3}}$  и  $T_{i,M-2,k}^{n+\frac{2}{3}}$ :

$$T_{i,M-1,k}^{n+\frac{2}{3}} = \bar{\alpha}_{T,i,M-1,k} T_{i,M,k}^{n+\frac{2}{3}} + \bar{\beta}_{T,i,M-1,k}; \quad (42)$$

$$T_{i,M-2,k}^{n+\frac{2}{3}} = \bar{\alpha}_{T,i,M-2,k} \bar{\alpha}_{T,i,M-1,k} T_{i,M,k}^{n+\frac{2}{3}} + \bar{\alpha}_{T,i,M-2,k} \bar{\beta}_{T,i,M-1,k} + \bar{\beta}_{T,i,M-2,k}. \quad (43)$$

Поставив  $T_{i,M-1,k}^{n+\frac{2}{3}}$  из (42) и  $T_{i,M-2,k}^{n+\frac{2}{3}}$  из (43) в (41), найдем  $T_{i,M,k}^{n+\frac{2}{3}}$ :

$$T_{i,M,k}^{n+\frac{2}{3}} = \frac{-\lambda_1 \bar{\alpha}_{T,i,M-2,k} \bar{\beta}_{T,i,M-1,k} - \lambda_1 \bar{\beta}_{T,i,M-2,k} + 4\lambda_1 \bar{\beta}_{T,i,M-1,k} - 2\Delta y \beta_1 T_{oc} - 2\Delta y \varphi^{n+\frac{2}{3}}}{3\lambda_1 - 2\Delta y \beta_1 + \lambda_1 \bar{\alpha}_{T,i,M-2,k} \bar{\alpha}_{T,i,M-1,k} - 4\lambda_1 \bar{\alpha}_{T,i,M-1,k}}. \quad (44)$$

Значения последовательности температуры  $T_{i,M-1,k}^{n+\frac{2}{3}}$ ,  $T_{i,M-2,k}^{n+\frac{2}{3}}$ , ...,  $T_{i,1,k}^{n+\frac{2}{3}}$  определяются методом обратной прогонки по уменьшению  $j$ :

$$T_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} = \bar{\alpha}_{T,i,j,k} T_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} + \bar{\beta}_{T,i,j,k}, \quad \text{где } i = \overline{0, N}, j = \overline{M-1, 1}, k = \overline{0, L}. \quad (45)$$

Далее, аналогично, используя вышеуказанные действия выполняем для уравнение (4) по  $O_y$  и получим:

$$u_{i,M,k}^{n+\frac{2}{3}} = \frac{-\lambda_2 \bar{\alpha}_{u,i,M-2,k} \bar{\beta}_{u,i,M-1,k} - \lambda_2 \bar{\beta}_{u,i,M-2,k} + 4\lambda_2 \bar{\beta}_{u,i,M-1,k} - 2\Delta y \beta_2 u_{oc}}{3\lambda_2 - 2\Delta y \beta_2 + \lambda_2 \bar{\alpha}_{u,i,M-2,k} \bar{\alpha}_{u,i,M-1,k} - 4\lambda_2 \bar{\alpha}_{u,i,M-1,k}}. \quad (46)$$

Значения влаги в последовательности  $u_{i,M-1,k}^{n+\frac{2}{3}}$ ,  $u_{i,M-2,k}^{n+\frac{2}{3}}$ , ...,  $u_{i,1,k}^{n+\frac{2}{3}}$  определяются методом обратной прогонки по уменьшению индекса  $j$ :

$$u_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} = \bar{\alpha}_{u,i,j,k} u_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} + \bar{\beta}_{u,i,j,k}, \quad \text{где } i = \overline{0, N}, j = \overline{M-1, 1}, k = \overline{0, L}. \quad (47)$$

Аналогично уравнение (3) аппроксимируем по  $O_z$  конечно-разностными соотношениями и группируя подобных членов получим систему трехдиагональных алгебраических уравнений:

$$\bar{a}_{T,i,j,k} T_{i,j,k-1}^{n+1} - \bar{b}_{T,i,j,k} T_{i,j,k}^{n+1} + \bar{c}_{T,i,j,k} T_{i,j,k+1}^{n+1} = -\bar{d}_{T,i,j,k}. \quad (48)$$

Далее, граничное условие (10) аппроксимируем по  $O_z$ , и получим:

$$\frac{-3T_{i,j,0}^{n+1} + 4T_{i,j,1}^{n+1} - T_{i,j,2}^{n+1}}{2\Delta z} = 0. \quad (49)$$

Из системы уравнений (48) когда  $z=1$ , получим:

$$\bar{a}_{T,i,j,1} T_{i,j,0}^{n+1} - \bar{b}_{T,i,j,1} T_{i,j,1}^{n+1} + \bar{c}_{T,i,j,1} T_{i,j,2}^{n+1} = -\bar{d}_{T,i,j,1}; \quad (50)$$

Поставив  $T_{i,j,2}^{n+1}$  из (50) в (49), найдем значение  $T_{i,j,0}^{n+1}$ :

$$T_{i,j,0}^{n+1} = \bar{\alpha}_{T,i,j,0} T_{i,j,1}^{n+1} + \bar{\beta}_{T,i,j,0}. \quad (51)$$

Из соотношения (51) следует, что прогоночные коэффициенты  $\bar{\alpha}_{T,i,j,0}$  и  $\bar{\beta}_{T,i,j,0}$  вычисляются как:

$$\bar{\alpha}_{T,i,j,0} = \frac{\bar{b}_{T,i,j,1} - 4\bar{c}_{T,i,j,1}}{\bar{a}_{T,i,j,1} - 3\bar{c}_{T,i,j,1}}; \quad \bar{\beta}_{T,i,j,0} = -\frac{\bar{d}_{T,i,j,1}}{\bar{a}_{T,i,j,1} - 3\bar{c}_{T,i,j,1}}.$$

Аналогично аппроксимируя граничную условие (1) по  $Oz$  со вторым порядком точности, получим:

$$\lambda_1 \frac{T_{i,j,L-2}^{n+1} - 4T_{i,j,L-1}^{n+1} + 3T_{i,j,L}^{n+1}}{2\Delta z} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{i,j,L}^{n+1} - \varphi^{n+1}. \quad (52)$$

Применяя метод прогонки для последовательности  $L, L-1$  и  $L-2$ , найдем  $T_{i,j,L-1}^{n+1}$  и  $T_{i,j,L-2}^{n+1}$ :

$$T_{i,j,L-1}^{n+1} = \bar{\alpha}_{T,i,j,L-1} T_{i,j,L}^{n+1} + \bar{\beta}_{T,i,j,L-1}; \quad (53)$$

$$T_{i,j,L-2}^{n+1} = \bar{\alpha}_{T,i,j,L-2} \bar{\alpha}_{T,i,j,L-1} T_{i,j,L}^{n+1} + \bar{\alpha}_{i,j,L-2} \bar{\beta}_{T,i,j,L-1} + \bar{\beta}_{T,i,j,L-2}. \quad (54)$$

Поставив  $T_{i,j,L-1}^{n+1}$  из (53) и  $T_{i,j,L-2}^{n+1}$  из (54) в (52), найдем  $T_{i,j,L}^{n+1}$ :

$$T_{i,j,L}^{n+1} = \frac{-\lambda_1 \bar{\alpha}_{T,i,j,L-2} \bar{\beta}_{T,i,j,L-1} - \lambda_1 \bar{\beta}_{T,i,j,L-2} + 4\lambda_1 \bar{\beta}_{T,i,j,L-1} - 2\Delta z \beta_1 T_{oc} - 2\Delta z \varphi^{n+1}}{3\lambda_1 - 2\Delta z \beta_1 + \lambda_1 \bar{\alpha}_{T,i,j,L-2} \bar{\alpha}_{T,i,j,L-1} - 4\lambda_1 \bar{\alpha}_{T,i,j,L-1}}.$$

Значения температуры  $T_{i,j,L-1}^{n+1}$ ,  $T_{i,j,L-2}^{n+1}$ , ...,  $T_{i,j,1}^{n+1}$  последовательно определяются методом обратной прогонки по уменьшению значения  $z$ :

$$T_{i,j,k}^{n+1} = \bar{\alpha}_{T,i,j,k} T_{i,j,k+1}^{n+1} + \bar{\beta}_{T,i,j,k}, \text{ где } i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M}, k = \overline{L-1, 1}.$$

Аналогично, используя вышеуказанные действия выполняем для уравнение (4) по  $Oz$ , получим:

$$u_{i,j,L}^{n+1} = \frac{-\lambda_2 \bar{\alpha}_{u,i,j,L-2} \bar{\beta}_{u,i,j,L-1} - \lambda_2 \bar{\beta}_{u,i,j,L-2} + 4\lambda_2 \bar{\beta}_{u,i,j,L-1} - 2\Delta z \beta_2 u_{oc}}{3\lambda_2 - 2\Delta z \beta_2 + \lambda_2 \bar{\alpha}_{u,i,j,L-2} \bar{\alpha}_{u,i,j,L-1} - 4\lambda_2 \bar{\alpha}_{u,i,j,L-1}}.$$

Значения влаги  $u_{i,j,L-1}^{n+1}$ ,  $u_{i,j,L-2}^{n+1}$ , ...,  $u_{i,j,1}^{n+1}$  в узлах определяется последовательно методом обратной прогонки по уменьшению индекса  $k$ :

$$u_{i,j,k}^{n+1} = \bar{\alpha}_{u,i,j,k} u_{i,j,k+1}^{n+1} + \bar{\beta}_{u,i,j,k}, \text{ где } i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M}, k = \overline{L-1, 1}.$$

Итак, разработаны математическая модель и эффективный устойчивый численный алгоритм для исследования, мониторинга и прогнозирования процессов тепло-и влагопереноса в пористых средах при хранении и сушки неоднородных телах, где учитываются неоднородность среды, тепло и влагообмен с окружающей среды, суточное изменение солнечной радиации, внутренних собственное тепловлаговыведение материала.

**Заключение.** Разработана усовершенствованная многомерная математическая модель процессов совместного тепло- и влагопереноса в неоднородных пористых телах с учетом внутреннего тепло-и влаговыведения, тепловлагообмена с окружающей средой.

Разработан численный алгоритм второго порядка точности по времени и пространственных переменных для решения задач совместного тепло- и влагопереноса при хранении и сушки неоднородных пористых тел, которые служат для исследования, прогнозирования и принятия управленческого решения в задачах тепло-и влагопереноса в пористых телах, которые является актуальной проблемой в процессах хранения и переработки сельскохозяйственных продуктов и сырья.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Лыков А.В. Тепло– и массообмен в процессах сушки. Москва: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
2. Philip J.R., De Vries D.A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients // *Trans. Am. Geophys. Union*. 1957. Т. 38, № 2. С. 222.
3. Whitaker S. *Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying*. 1977. С. 119–203.
4. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло– и массопереноса. Москва: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.
5. Liu J.Y., Shun C. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1991. Т. 34, № 7. С. 1747–1754.
6. Ravshanov N., Shadmanov I.U., Kravets O.J. Mathematical model for the study and prediction of a porous body thermal state // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. Т. 537, № 2. С. 022024.
7. Akbari G., Basirat Tabrizi H., Damangir E. Numerical and experimental investigation of variable phase transformation number effect in porous media during freezing process // *Heat Mass Transf.* 2009. Т. 45, № 4. С. 407–416.
8. Asli M. u др. Numerical and experimental investigation of heat and mass transfer within bio-based material // *Therm. Sci.* 2019. Т. 23, № 1. С. 23–31.
9. Wang Huilin, Lu Tao Z.Q. Drying characteristics of biological porous media during convective drying // *Int J Agric Biol Eng.* 2016. Т. 9, № 5. С. 194 –207.
10. Rahman S.M.A., Islam M.R., Mujumdar A.S. A Study of Coupled Heat and Mass Transfer in Composite Food Products during Convective Drying // *Dry. Technol.* 2007. Т. 25, № 7–8. С. 1359–1368.
11. Thi V.D. u др. Finite Element Modeling of Heat and Moisture Transfer in Porous Material // *World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Mater. Metall. Eng.* 2017. Т. 11, № 4. С. 345–351.
12. Равшанов Н., Шадманов И.У. Моделирование и исследование процессов тепловлагодпереноса в пористых средах // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. 2021. Т. 1, № 31. С. 76–90.