

УДК 004.94:519.637+536.24

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА С УЧЁТОМ ДАВЛЕНИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ

⁺ *Равшанов Н.¹, Шадманов И.У.²*

¹ Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта, Ташкент, Узбекистан

² Бухарский государственный университет, Бухара, Узбекистан

⁺ ravshanzade-09@mail.ru

Аннотация. В статье разработана модель и численный алгоритм второго порядка точности по времени и пространственным переменным для решения задач совместного тепло- и влагопереноса при хранении и сушки неоднородных пористых тел, которые служат для исследования, прогнозирования и принятия управленческого решения, которые являются актуальной проблемой в процессах хранения и переработки сельскохозяйственных продуктов и сырья. Получены пространственно-временные зависимости распределения температуры, влаги и давления внутри неоднородного пористого тела. Приведены результаты численных экспериментов на вычислительной системе, что повышение влажности пористого тела существенно влияет на изменение внутренней температуры, что приводит к значительным потерям качества. Разработанный математический инструмент служит для исследования процессов теплообмена в материалах, находящихся под солнечной радиацией.

Ключевые слова: математическая модель, теплоперенос, влагоперенос, внутреннее тепловлаговыделение, давление, неоднородное пористое тело.

1 ВВЕДЕНИЕ

Изучение совместного переноса тепла и влаги в неоднородных пористых телах, особенно в условиях переменного давления, имеет важное значение для понимания многих практических приложений, включая строительные материалы, сельскохозяйственную продукцию и переработку отходов. Недавние достижения в математическом моделировании и численном моделировании представили существенные знания об этих связанных явлениях.

Авторы [1,2] улучшают понимание основных физических явлений, сравнивая различные численные модели переноса тепла и влаги. Где в работе [2] подчеркиваются расхождения, когда численное моделирование опирается исключительно на предположения о диффузии, подчеркивая необходимость моделей, включающих конвективные и кондуктивные процессы, как это рассматривали в [1], которые сосредоточились на термической гомогенизации в ненасыщенных пористых материалах. Вместе эти работы подразумевают, что точное представление динамики тепла и влаги требует рассмотрения множественных механизмов переноса, которые могут включать эффекты сжимаемости, как описано в работе [3].

Основные уравнения, описывающие процессы внутреннего тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористом теле, получили название уравнений Лыкова А.В. В монографии Лыкова А.В., Михайлова Ю.А. «Теория тепло- и массопереноса» [4] установлено, что при интенсивном нагреве капиллярно пористого тела кинетика сушки может зависеть не только от градиента потенциала переноса влаги, но и от градиента температуры и градиента внутреннего давления. По теории Лыкова А.В. система дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, описывающие процессы тепло- и массопереноса внутри влажного тела в процессе сушки [5].

Появление нового поколения вычислительных систем и их программных обеспечения дало импульс в области математического моделирования сложных задач массо- и теплопереноса в неоднородных пористых средах которые учитывают сложные взаимодействия между теплом, влагой и изменением давления в пористых средах. Например, [6] представили комплексную модель, которая включает внутреннее выделение тепла и влаги, а также обмены с окружающей средой, используя неявную конечно-разностную схему. Эта модель позволяет прогнозировать изменения температуры и влажности в различных точках пористой среды, что необходимо для оптимизации процессов сушки

и предотвращения деградации материала. Аналогичным образом в работе [7] расширили это, рассмотрев влияние изменений температуры и влажности окружающей среды на хранение и сушку пористых сельскохозяйственных продуктов, подчеркнув важность точного моделирования для сохранения качества материала. Вводятся дополнительные функции источников:

$$T_{oc} = B \cdot \cos(\omega \cdot \tau), \quad M_{oc} = A \cdot \sin(\omega \cdot \tau), \quad (1)$$

где T_{oc} – температура окружающей среды; M_{oc} – влажность окружающей среды; τ – время; коэффициенты A и B соответственно амплитуда наибольшего изменения температуры и влажности.

Уравнения (1) позволяют учитывать суточные колебания температуры и влажности, а в уравнении (2) определяется связь между влажностью (M) и температурой (T) в виде:

$$M(T) = M_0 + k \cdot T, \quad (2)$$

где M_0 – начальная влажность, k – коэффициент влияния температуры на влажность.

Если зависимость нелинейна, например, связана с фазовыми переходами или физико-химическими процессами, можно использовать модифицированную формулу:

$$M(T) = M_0 \cdot e^{\xi \cdot T} + k \cdot T, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент сушки (1/сек).

Более того, связь переноса тепла и влаги с динамикой жидкости изучалась в различных исследованиях. Например, в работе [8] подтвердили связанную модель переноса тепла, пара и жидкой влаги, реализованную в вычислительной гидродинамике, продемонстрировав эффективность объединения моделей переноса тепла и влаги с реализованную в вычислительной гидродинамике для захвата конвективного переноса тепла и влаги. Этот подход имеет решающее значение для точного моделирования реальных сценариев, в которых пористые материалы взаимодействуют с воздухом и влагой, как обсуждалось в работе [9], которые отметили, что градиенты температуры часто возникают из-за явлений массопереноса.

В дополнение к этим теоретическим достижениям, практическое применение этих моделей очевидно в секторе пищевой инженерии, где авторы [10] разработали сопряженный жидкостно-пористый подход для анализа конвективного тепло- и массопереноса во время сушки пищевых продуктов. Их модель охватывает основные взаимодействия между твердой и жидкой фазами, что имеет жизненно важное значение для оптимизации процессов сушки и обеспечения качества продукции.

Физические характеристики пористой среды, такие как пористость и структура пор, существенно влияют на перенос тепла и влаги. Авторы работы [11] утверждают, что традиционные модели часто чрезмерно упрощают характеристику пористой среды, сосредотачиваясь исключительно на пористости, пренебрегая другими критическими параметрами, которые влияют на процессы переноса. Это подтверждают в работе [12], которые используют вычислительные методы для моделирования межфазного теплообмена в пористых средах со сложной структурой пор, иллюстрируя необходимость детального понимания микроструктуры для точного прогнозирования поведения теплопередачи.

Более того, взаимодействие между градиентами давления и потоком жидкости в пористых средах имеет решающее значение для понимания миграции влаги. В работе [13], как градиенты давления управляют движением жидкости внутри пористых структур, подчеркивая роль проницаемости и вязкости в определении скоростей потока. Это взаимодействие далее исследуется в работе [14], которые изучают конденсацию теплового потока в пористых средах, подчеркивая двойные механизмы проводимости и конвекции, которые действуют одновременно во время процессов теплопередачи.

Перенос тепла и влаги в неоднородных пористых телах представляет собой сложный процесс, на который влияют термодинамические принципы, микроструктурные характеристики и динамика жидкости. Интеграция этих факторов имеет важное значение для разработки точных моделей, которые могут предсказывать поведение пористых материалов в различных условиях. Будущие исследования должны продолжить совершенствование этих моделей, включая передовые вычислительные методы и экспериментальные проверки для улучшения нашего понимания переноса тепла и влаги в неоднородных пористых средах.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Система уравнений (1-3) 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 [15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{11}(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{11}(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{11}(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{12}(x, y, z) \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{12}(x, y, z) \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{12}(x, y, z) \frac{\partial M}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{13}(x, y, z) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{13}(x, y, z) \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{13}(x, y, z) \frac{\partial P}{\partial z} \right) + f; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial \tau} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{21}(x, y, z) \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{21}(x, y, z) \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{21}(x, y, z) \frac{\partial M}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{22}(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{22}(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{22}(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{23}(x, y, z) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{23}(x, y, z) \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{23}(x, y, z) \frac{\partial P}{\partial z} \right) + q; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \tau} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{31}(x, y, z) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{31}(x, y, z) \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{31}(x, y, z) \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{32}(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{32}(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{32}(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{33}(x, y, z) \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{33}(x, y, z) \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{33}(x, y, z) \frac{\partial M}{\partial z} \right); \end{aligned} \quad (6)$$

с начальными

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z); \quad (7)$$

$$M(x, y, z, 0) = M_0(x, y, z); \quad (8)$$

$$P(x, y, z, 0) = P_0(x, y, z); \quad (9)$$

и граничными условиями

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T(0, y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (10)$$

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

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, 0, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (12)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, L_y, z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (13)$$

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

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_1 (T_{oc} - T(x, y, L_z, \tau)) - \eta \rho \gamma R(\tau); \quad (15)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_2 (M_{oc} - M(0, y, z, \tau)); \quad (16)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_2 (M_{oc} - M(L_x, y, z, \tau)); \quad (17)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial M}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_2 (M_{oc} - M(x, 0, z, \tau)); \quad (18)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial M}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_2 (M_{oc} - M(x, L_y, z, \tau)); \quad (19)$$

$$\frac{\partial M}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (20)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial M}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_2 (M_{oc} - M(x, y, L_z, \tau)). \quad (21)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\beta_3 (P_{am} - P(0, y, z, \tau)); \quad (22)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = -\beta_3 (P_{am} - P(L_x, y, z, \tau)); \quad (23)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\beta_3 (P_{am} - P(x, 0, z, \tau)); \quad (24)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = -\beta_3 (P_{am} - P(x, L_y, z, \tau)); \quad (25)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (26)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = -\beta_3 (P_{am} - P(x, y, L_z, \tau)). \quad (27)$$

Здесь T – изменение температуры, M – изменение влаги и P – изменение давление пористого тела; a_{11}, a_{22}, a_{32} - коэффициенты температуропроводности; a_{12}, a_{21}, a_{33} - коэффициенты влагопроводности; a_{13}, a_{23}, a_{31} - коэффициенты потенциалопроводности диффузии; $f(x, y, z, \tau) = b \cdot e^{-\alpha \tau}$ – интенсивность внутреннего тепловыделения массы ($K c^{-1}$); $b = \frac{M}{c_1}$ - коэффициент тепловыделения, который зависит от влажность пористых тел, значить $b = f(M(x, y, z, \tau))$; удельных теплоемкости c_1 , α - эмпирический параметр; $q(x, y, z, \tau) = \rho m_0 e^{-\xi \tau}$ – интенсивность внутренних источников влаги; ρ - плотность тела ($кг / м^3$); m_0 - максимальная интенсивность испарения ($кг / м^2 сек$); β_1 - коэффициент теплоотдачи между массой и окружающим его воздухом; β_2 - коэффициент влагоотдачи между массой и окружающим его воздухом; β_3 - коэффициент давление отдачи паров; P_{am} – атмосферное давление; η - коэффициенты для проведения граничного условия к размерному виду; γ - коэффициент поглощения солнечных лучей материалом; $R(\tau)$ - инсоляция

потока солнечной радиации на поверхности хранимого материала; λ_1 – коэффициент теплопроводности; λ_2 – коэффициент массопроводности; λ_3 – коэффициент потенциалопроводности.

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

3 МЕТОД РЕШЕНИЯ

Из постановки задача видно, что объект исследования описывается системой дифференциальной уравнений в частных производных с источником тепло-и влаговыделения, следовательно получить аналитическое решение затруднительно. С учетом сказанной выше для решения задачи (4)–(27) используем конечно-разностный метод, заменяя область непрерывного решения на сеточную.

Введем пространственно-временной сетки:

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

и заменяем дифференциальные операторы уравнения (4) на разностные по Ox и получим:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{i,j,k}^n}{\Delta\tau/3} + \frac{1}{2} \frac{T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{i+1,j,k}^n}{\Delta\tau/3} = \\ & = \frac{a_{i+0,5,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - (a_{i+0,5,j,k} + a_{i-0,5,j,k}) T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + a_{i-0,5,j,k} T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x^2} + \\ & + \frac{a_{i,j+0,5,k} T_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k} T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ & + \frac{a_{i,j,k+0,5} T_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5}) T_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5} T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \\ & + \frac{a_{i+0,5,j,k} M_{i+1,j,k}^n - (a_{i+0,5,j,k} + a_{i-0,5,j,k}) M_{i,j,k}^n + a_{i-0,5,j,k} M_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ & + \frac{a_{i,j+0,5,k} M_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k}) M_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k} M_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ & + \frac{a_{i,j,k+0,5} M_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5}) M_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5} M_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \\ & + \frac{a_{i+0,5,j,k} P_{i+1,j,k}^n - (a_{i+0,5,j,k} + a_{i-0,5,j,k}) P_{i,j,k}^n + a_{i-0,5,j,k} P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ & + \frac{a_{i,j+0,5,k} P_{i,j+1,k}^n - (a_{i,j+0,5,k} + a_{i,j-0,5,k}) P_{i,j,k}^n + a_{i,j-0,5,k} P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ & + \frac{a_{i,j,k+0,5} P_{i,j,k+1}^n - (a_{i,j,k+0,5} + a_{i,j,k-0,5}) P_{i,j,k}^n + a_{i,j,k-0,5} P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \frac{1}{3} f_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Группируя подобные члены, получим систему трехдиагональных алгебраических уравнений:

$$a_{T,i,j,k} T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{T,i,j,k} T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{T,i,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{T,i,j,k}. \quad (29)$$

Где коэффициенты и свободный член определяются с помощью следующих выражений:

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

Далее, граничную условие (10) аппроксимируем по Ox и получим:

$$\lambda_1 \frac{-3T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 4T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}, \quad (30)$$

где $\varphi = \eta\gamma R(\tau)$.

Из системы уравнений (29), когда $i=1$, получим:

$$a_{T,1,j,k} T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{T,1,j,k} T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{T,1,j,k} T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{T,1,j,k}. \quad (31)$$

Поставив $T_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ из (31) в (30), найдем $T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$:

$$T_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,0,j,k} T_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,0,j,k}, \quad (32)$$

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

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

Аналогично аппроксимируя граничное условие (11) по Ox , получим:

$$\lambda_1 \frac{T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 4T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 3T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_1 T_{oc} + \beta_1 T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - \varphi^{n+\frac{1}{3}}, \quad (33)$$

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 $T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$:

$$T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,N-1,j,k} T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,N-1,j,k}; \quad (34)$$

$$T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,N-2,j,k} \alpha_{T,N-1,j,k} T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \alpha_{T,N-2,j,k} \beta_{T,N-1,j,k} + \beta_{T,N-2,j,k}. \quad (35)$$

Поставив $T_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ из (34) и $T_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ из (35) в (33), найдем $T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$:

$$T_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{-\lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \beta_{T,N-1,j,k} - \lambda_1 \beta_{T,N-2,j,k} + 4\lambda_1 \beta_{T,N-1,j,k} - 2\Delta x \beta_1 T_{oc} - 2\Delta x \varphi^{n+\frac{1}{3}}}{3\lambda_1 - 2\Delta x \beta_1 + \lambda_1 \alpha_{T,N-2,j,k} \alpha_{T,N-1,j,k} - 4\lambda_1 \alpha_{T,N-1,j,k}}. \quad (36)$$

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

$$T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{T,i,j,k} T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{T,i,j,k}, \quad i = \overline{N-1, 1}, j = \overline{0, M}, k = \overline{0, L}. \quad (37)$$

Аналогично уравнение (5) аппроксимируем по Ox конечно-разностными соотношениями и группируя подобных членов, получим систему из трехдиагональных алгебраических уравнений относительно искомого переменных:

$$a_{M,i,j,k} M_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{M,i,j,k} M_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{M,i,j,k} M_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{M,i,j,k}. \quad (38)$$

Где коэффициенты определяются с помощью следующих выражений:

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

Далее, граничную условие (16) аппроксимируем со вторым порядком точности по Ox и получим:

$$\lambda_2 \frac{-3M_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 4M_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - M_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_2 M_{oc} + \beta_2 M_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}}. \quad (39)$$

Из системы уравнений (38), при $i=1$, получим:

$$a_{M,1,j,k} M_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - b_{M,1,j,k} M_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + c_{M,1,j,k} M_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = -d_{M,1,j,k}. \quad (40)$$

Поставив $M_{2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ из (40) в (39), найдем значение $M_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$:

$$M_{0,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{M,0,j,k} M_{1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{M,0,j,k}. \quad (41)$$

Из соотношения (41) прогоночные коэффициенты определяются в виде:

$$\alpha_{M,0,j,k} = \frac{\lambda_2 b_{M,1,j,k} - 4\lambda_2 c_{M,1,j,k}}{a_{M,1,j,k} \lambda_2 - 3c_{M,1,j,k} \lambda_2 - 2\Delta x c_{M,1,j,k} \beta_2};$$

$$\beta_{M,0,j,k} = \frac{-d_{M,1,j,k} \lambda_2 - 2\Delta x c_{M,1,j,k} \beta_2 M_{oc}}{a_{M,1,j,k} \lambda_2 - 3c_{M,1,j,k} \lambda_2 - 2\Delta x c_{M,1,j,k} \beta_2}.$$

Аналогично аппроксимируя граничному условию (17) по Ox , получим:

$$\lambda_2 \frac{M_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 4M_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + 3M_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2\Delta x} = -\beta_2 M_{oc} + \beta_2 M_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}. \quad (42)$$

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

$$M_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{M,N-1,j,k} M_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{M,N-1,j,k}; \quad (43)$$

$$M_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{M,N-2,j,k} \alpha_{M,N-1,j,k} M_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \alpha_{M,N-2,j,k} \beta_{M,N-1,j,k} + \beta_{M,N-2,j,k}. \quad (44)$$

Поставив $M_{N-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ из (43) и $M_{N-2,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ из (44) в (42), найдем $M_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$:

$$M_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{-\lambda_2 \alpha_{M,N-2,j,k} \beta_{M,N-1,j,k} - \lambda_2 \beta_{M,N-2,j,k} + 4\lambda_2 \beta_{M,N-1,j,k} - 2\Delta x \beta_2 M_{oc}}{3\lambda_2 - 2\Delta x \beta_2 + \lambda_2 \alpha_{M,N-2,j,k} \alpha_{M,N-1,j,k} - 4\lambda_2 \alpha_{M,N-1,j,k}}.$$

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

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

Аналогично уравнение (6) аппроксимируем по Ox конечно-разностными соотношениями, изменение давления:

$$P_{N,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \frac{-\lambda_3 \alpha_{P,N-2,j,k} \beta_{P,N-1,j,k} - \lambda_3 \beta_{P,N-2,j,k} + 4\lambda_3 \beta_{P,N-1,j,k} - 2\Delta x \beta_3 P_{am}}{3\lambda_3 - 2\Delta x \beta_3 + \lambda_3 \alpha_{P,N-2,j,k} \alpha_{P,N-1,j,k} - 4\lambda_3 \alpha_{P,N-1,j,k}}.$$

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

$$P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = \alpha_{P,i,j,k} P_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_{P,i,j,k}, \text{ где } i = \overline{N-1,1}, j = \overline{0,M}, k = \overline{0,L}.$$

Далее выполняя аналогично действия по Oy и по Oz , для уравнений (4-6), получим изменение температуры:

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

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

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

Изменение влажности:

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

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

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

Следственно, изменение давление:

$$P_{i,j,L}^{n+1} = \frac{-\lambda_3 \overline{\alpha}_{P,i,j,L-2} \overline{\beta}_{P,i,j,L-1} - \lambda_3 \overline{\beta}_{P,i,j,L-2} + 4\lambda_3 \overline{\beta}_{P,i,j,L-1} - 2\Delta z \beta_3 P_{am}}{3\lambda_3 - 2\Delta z \beta_3 + \lambda_3 \overline{\alpha}_{P,i,j,L-2} \overline{\alpha}_{P,i,j,L-1} - 4\lambda_3 \overline{\alpha}_{P,i,j,L-1}}.$$

Значения давление $P_{i,j,L-1}^{n+1}, P_{i,j,L-2}^{n+1}, \dots, P_{i,j,1}^{n+1}$ в узлах определяется последовательно методом обратной прогонки по уменьшению индекса k :

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

Итак, разработан эффективный устойчивый численный алгоритм на основе конечно-разностного метода высокого порядка точности, который служит для решения трехмерной задачи совместного тепло- и влагопереноса при хранении и сушки неоднородных пористых тел.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

Для численного исследования процессов тепло-и влагопереноса в неоднородных пористых средах для прогнозирования изменений температуры и влаги натурального продукта, на примере хлопка-сырца, путем проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ, использованы следующие данные:

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,04 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$;
- плотность хлопка-сырца $\rho = 320 \text{ кг м}^{-3}$;
- удельная теплоёмкость $c = 1000 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$;
- коэффициент температуропроводности $\frac{\lambda}{c\rho} = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$;
- коэффициент тепловыделения $b = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ К с}^{-1}$;

- коэффициент в экспоненте тепловыделения $\alpha = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$;
- отношение коэффициента теплоотдачи к коэффициенту теплопроводности $k = 1 \text{ c}^{-1}$;
- размер бунта хлопка-сырца взято как $L_x = 12 \text{ м}$; $L_y = 15 \text{ м}$; $L_z = 8 \text{ м}$.

Результаты проведенных численных расчетов в программном комплексе “НМТmodel” приведены на рис.1-7.

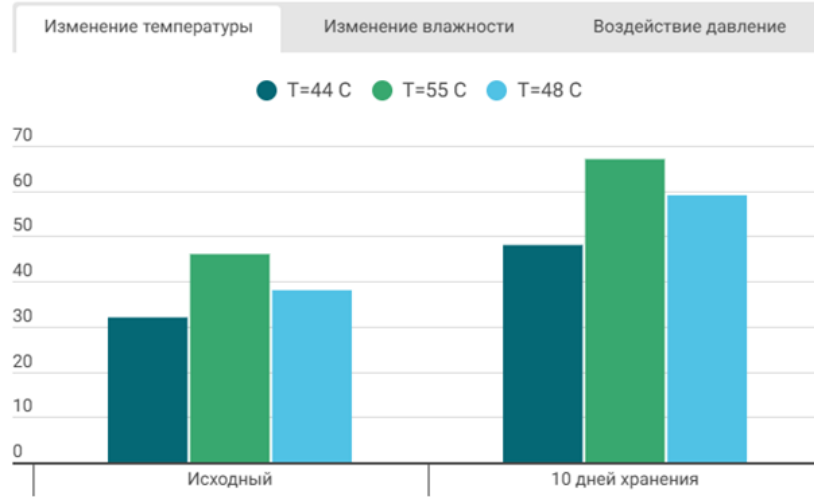


Рис. 1. Изменение температуры хлопка-сырца в бунте после 10-и дней хранения

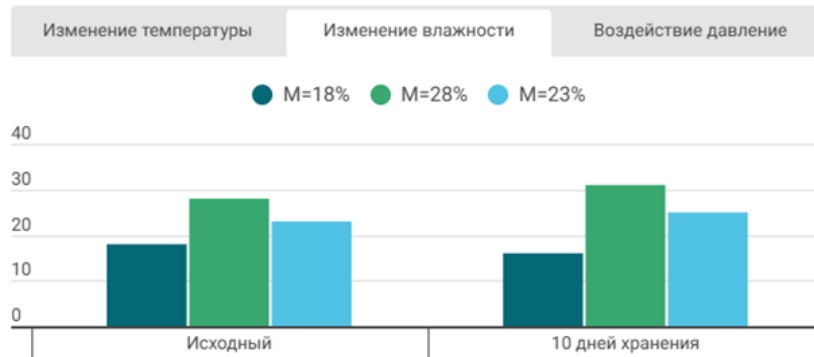


Рис. 2. Изменение влажности внутри бунта хлопка-сырца после 10-и дней хранения

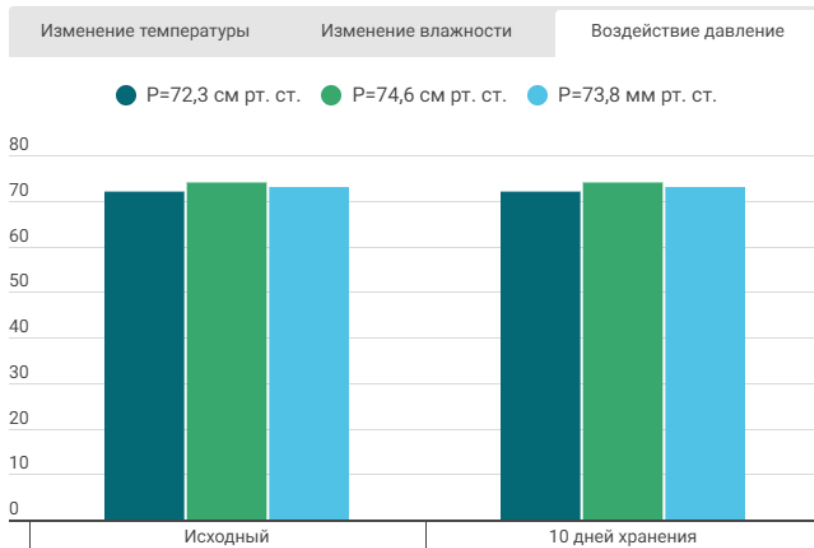


Рис. 3. Изменение давление бунта хлопка-сырца после 10-и дней хранения

На рис. 1-3 показаны результаты ВЭ по изменению температуры, влаги и давление по различным исходным данным, где температура со временем возрастает до 68°C , относительно от влажности внутри бунта, а давления незначительно меняется.

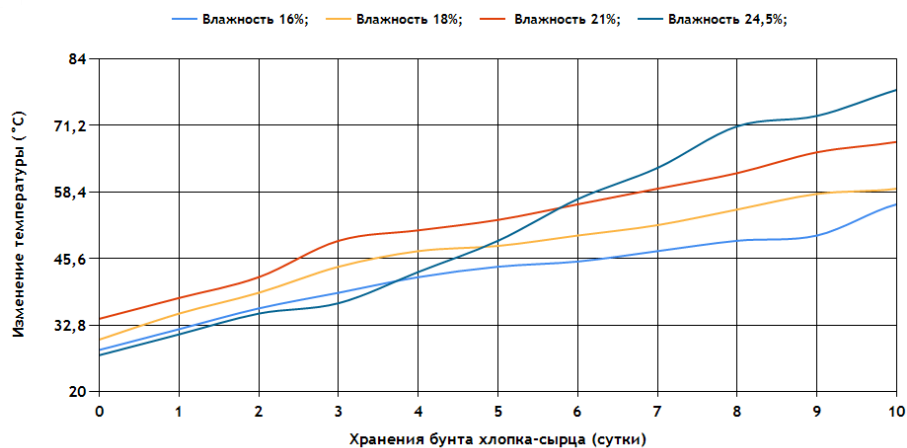


Рис. 4. Изменение температуры относительно от влажности хлопко-сырца в бунте после 10-и дней хранения

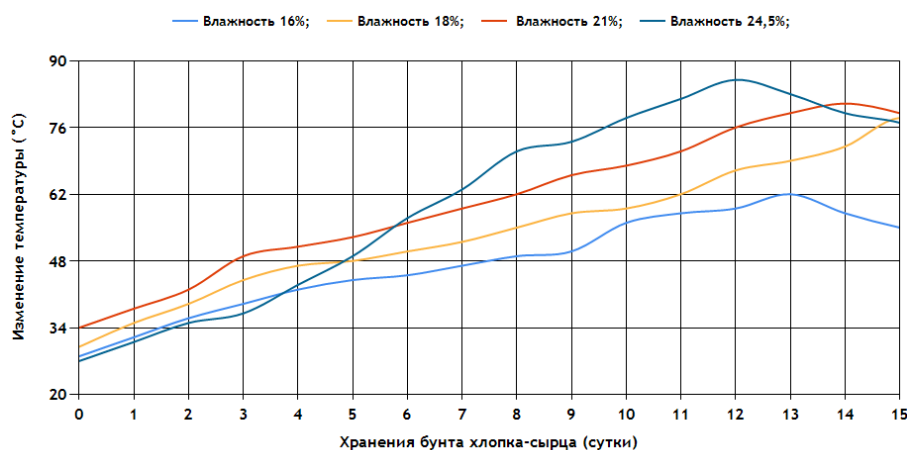


Рис. 5. Изменение температуры относительно от влажности хлопко-сырца в бунте после 15-и дней хранения

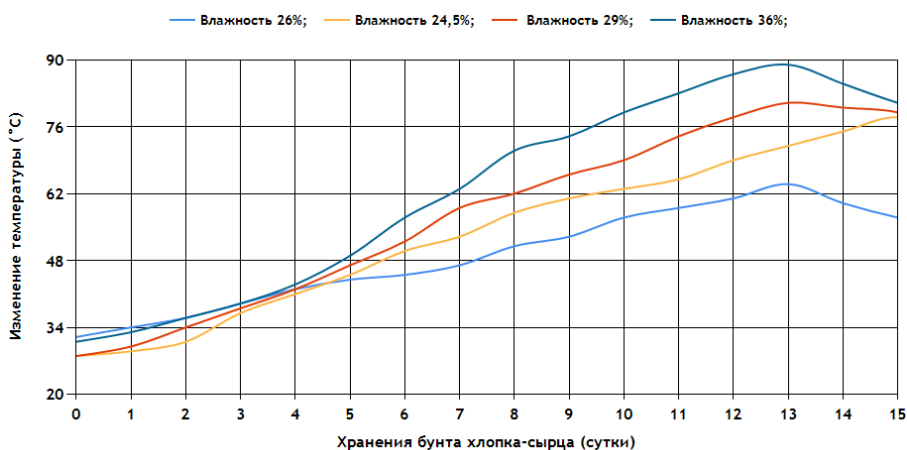


Рис. 6. Изменение температуры относительно от влажности хлопко-сырца в бунте после 15-и дней хранения

На рис. 4-6 показаны результаты ВЭ по изменению температуры по различным исходным данным влаги. Основываясь на результаты ВЭ, можно сказать, что относительного влажности при 21% и более, внутри бунта температура возрастет, где после 15-х суток хранения достигает до 90°C .

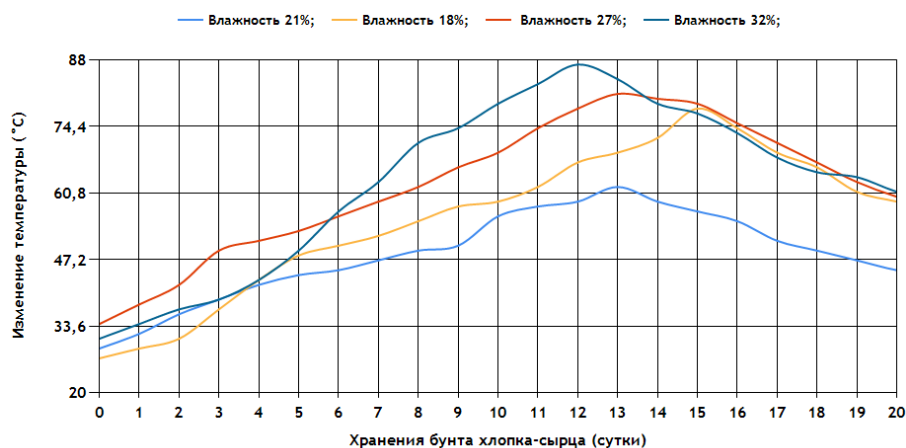


Рис. 7. Изменение температуры относительно от влажности хлопка-сырца в бунте после 20-и дней хранения

При влажности 32% и начальной температуре 30°C через 12 дней хранения внутренняя часть бунта нагревается до 90°C, что может привести к критическому состоянию, прению или потере качества (рис. 7). После этого применяется вентилирование влажности, и температура внутри бунта снижается до 58°C.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Экспериментальные исследования показали, что ухудшение качества хлопкового волокна начинает происходить при условиях, когда значения температуры и относительной влажности бунта хлопка-сырца превышают 75°C и 24% соответственно. Результаты показали, что при высокой начальной влажности массы хлопка-сырца и длительности его хранения, нельзя игнорировать значимость внутреннего тепловлаговыделения, за счет которого возникают эффекты прения и самовоспламенения, что приводит к значительным потерям качества хлопкового волокна.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Bennai F. et al.* Convective and conductive thermal homogenization for non-saturated porous building materials: Application on the thermal conductivity tensor // *Therm. Sci.* 2018. Vol. 22, № 6 Part A. P. 2367–2378.
- [2] *Berger J. et al.* On the Solution of Coupled Heat and Moisture Transport in Porous Material // *Transp. Porous Media.* 2018. Vol. 121, № 3. P. 665–702.
- [3] *Li P. et al.* A Review: Study on the Enhancement Mechanism of Heat and Moisture Transfer in Deformable Porous Media // *Processes.* 2023. Vol. 11, № 9. P. 2699.
- [4] *Лыков А.В., Михайлов Ю.А.* Теория тепло- и массопереноса. Москва: Госэнергоиздат, 1963. 536 p.
- [5] *Лыков А.В.* Теория сушки. Москва: Энергия, 1968. 472 p.
- [6] *Ravshanov N., Shadmanov I.U.* Multidimensional model of heat-moisture transport in porous media // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1546. P. 012098.
- [7] *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. Vol. 537, № 2. P. 022024.
- [8] *Van Belleghem M. et al.* Validation of a coupled heat, vapour and liquid moisture transport model for porous materials implemented in CFD // *Build. Environ.* 2014. Vol. 81. P. 340–353.
- [9] *Kjelstrup S. et al.* Non-isothermal Transport of Multi-phase Fluids in Porous Media. The Entropy Production // *Front. Phys.* 2018. Vol. 6.
- [10] *Khan F.A., Straatman A.G.* A conjugate fluid-porous approach to convective heat and mass transfer with application to produce drying // *J. Food Eng.* 2016. Vol. 179. P. 55–67.

- [11] Zheng J. *et al.* Pore structure reconstruction and moisture migration in porous media // *Fractals*. 2014. Vol. 22, № 03. P. 1440007.
- [12] Sabet S. *et al.* Numerical determination of interfacial heat transfer coefficient for an aligned dual scale porous medium // *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*. 2018. Vol. 28, № 11. P. 2716–2733.
- [13] Chen X. *et al.* A new matrix for multiphase couplings in a membrane porous medium // *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech*. 2018. Vol. 42, № 10. P. 1144–1153.
- [14] Praswanto D.H. *et al.* Heat Flux Condensation on Coconut Shell Activated Charcoal Porous Media // *J. Sci. Appl. Eng.* 2020. Vol. 3, № 2.
- [15] Шадманов И.У. Численный алгоритм решения многомерной математической модели процессов тепло- и влагопереноса в неоднородных пористых тел с учетом давления // *Международный Журнал Теоретических и Прикладных Вопросы Цифровых Технологий*. 2025. Vol. 8, № 1. P. 58–78.

Поступила в редакцию 26.06.2025

Цитирование: Равшанов Н., Шадманов И.У. (2025). Численное исследование совместного тепло- и влагопереноса с учётом давления в неоднородных пористых телах. *Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий*, 8(4), –С. 58-70. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v8i4.303>.

NUMERICAL STUDY OF JOINT HEAT AND MOISTURE TRANSFER TAKING INTO ACCOUNT PRESSURE IN HETEROGENEOUS POROUS BODIES

+ Ravshanov N.¹, Shadmanov I.U.²

¹ Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute,
Tashkent, Uzbekistan

² Bukhara State University, Bukhara, Uzbekistan

+ ravshanzade-09@mail.ru

Abstract. This article develops a model and numerical algorithm with second-order accuracy in time and spatial variables for solving problems of combined heat and moisture transfer during the storage and drying of heterogeneous porous materials. These algorithms are used for research, forecasting, and management decision-making, a pressing issue in the storage and processing of agricultural products and raw materials. The spatial-temporal dependences of the temperature, moisture, and pressure distributions within the heterogeneous porous material are obtained. The results of numerical experiments on a computing system demonstrate that increasing the humidity of the porous material significantly affects the internal temperature, leading to significant quality losses. The developed mathematical tool is used to study heat transfer processes in materials exposed to solar radiation.

Keywords: mathematical model, heat transfer, moisture transfer, internal heat and moisture release, pressure, heterogeneous porous body.