С О Д Е Р Ж А Н И Е

C O N T E N T S

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №6

МАТЕМАТИКА

УДК 511.5
Специальность: 1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика

Академик НАН Таджикистана М.Илолов, Ш.М.Зулфонов

ДВУМЕРНОЕ ИНТЕГРАЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАПЛАСА-КАРСОНА И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ

Национальная академия наук Таджикистана,
Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана,
Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни

В статье приведены две теоремы с их доказательствами. Применение теорем 1,2 к решениям телеграфного уравнения, интегро-дифференциального телеграфного уравнение, уравнения транспорта играет важный роль в приложениях.

***Ключевые слова**: преобразования Лапласа-Карсона, дифференциальные уравнения, изображение, оригинал.*

Преобразования вида

$$F(p)=p\int_0^{\infty}e^{-px}f(x)dx \tag{1}$$

и

$$F(p,q)=pq\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}e^{-px-qx}f(x,y)dxdy, \tag{2}$$

называются соответственно одномерными и двухмерными интегральными преобразованиями Лапласа-Карсона с символическими записями

$$F(p)\doteq f(x) \text{ и } F(p,q)\doteq\doteq f(x,y).$$

При этом функции $F(p)$ и $F(p,q)$ в (1) и (2) называются изображениями, а функции $f(x)$ и $f(x,y)$ – оригиналами.

Теорема 1. *Пусть* $a(t)$, $f(x,t)$ *– непрерывные функции. Если* $a(t)\to A(q)$ *и* $f(x,t)\rightrightarrows F(p;q)$, *то*

***Адрес для корреспонденции:** Илолов Мамадшо. 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Рудаки, 33 а, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАНТ. E-mail: ilolov.mamadsho@gmail.com.*

$$\int_0^{\min(x,t)_{t-s}} \int_0^{} a(t-s-\tau)\, f(x-s;\tau) e^{-a_1 s} ds d\tau \rightrightarrows \frac{A(q)F(p;q)}{q(p+q+a_1)} \tag{3}$$

где $A(q)$ *– изображение для* $a(t)$, $F(p;q)$ *– изображение для функции оригинала* $f(x,t)$ *и* $x>0,\ t>0.$

Доказательство. Пользуемся преобразованием Лапласа-Карсона и получим

$$pq\int_0^{\infty}\int_0^{\infty} e^{-px-qt}\left(\int_0^{\min(x,t)_{t-s}} \int_0^{} a(t-s-\tau)\, f(x-s;\tau) e^{-a_1 s} ds d\tau\right) dxdt.$$

Сделаем замену переменной интегрирования во внутреннем интеграле $x-s=t-s=v$ и получим

$$pq\int_0^{\infty}\int_0^{\infty} e^{-pu-qv}\left(\int_0^{v} a(v-\tau)\, f(u;\tau) d\tau\right) dudv \int_0^{\infty} e^{-(p+q+a_1)s} ds.$$

Хорошо известно (см. [1,2]), что

$$\int_0^{v} a(v-\tau)\, f(u;\tau) d\tau \rightrightarrows \frac{1}{q} A(q)F(p,q).$$

Тогда мы получим

$$\frac{1}{q} A(q)F(p,q)\cdot \lim_{R\to\infty}\left(-\frac{e^{-(p+q+a_1)s}}{p+q+a_1}\Bigg|_0^R\right) = \frac{1}{q} A(q)F(p,q)\cdot \frac{1}{p+q+a_1}.$$

Таким образом,

$$\int_0^{\min(x,t)_{t-s}} \int_0^{} a(t-s-\tau)\, f(x-s;\tau) e^{-a_1 s} ds d\tau \rightrightarrows \frac{A(q)F(p;q)}{q(p+q+a_1)}. \tag{4}$$

Теорема 2. *Изображение интеграла вида*

$$\int_0^{min(x,t)} e^{-a_0(t-s)} \cdot e^{-a_1 s} \cdot f(x-s;t-s) ds \tag{5}$$

равно произведению изображений подынтегральных функций:

$$\int_0^{min(x,t)} e^{-a_0(t-s)} \cdot e^{-a_1 s} \cdot f(x-s;t-s) ds \rightrightarrows \frac{qF(p;q+a_0)}{(p+q+a_1)(q+a_0)}.$$

Доказательство. Пределы интегрирования зависят от переменных и интеграл является параметрическим. В случае $a_0=0$,$a_1=0$ изображение интеграла (5) хорошо известно (см $[5]$). В случае $a_0\neq 0$ и $a_1\neq 0$ найдем изображение интеграла (5) с помощью преобразования Лапласа-Карсона

$$pq\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-px-qt}\left(\int_0^{\min(x,t)} e^{-a_0(t-s)}\cdot e^{-a_1 s}\cdot f\left(x-s;t-s\right)ds\right)dxdt.$$

Вновь сделаем замену переменной интегрирования во внутреннем интеграле $x-s=u, t-s=v$ и получим

$$pq\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-p(u+s)-q(v+s)}\left(\int_0^\infty e^{-a_0 v}\cdot e^{-a_1 s}\cdot f\left(u;v\right)ds\right)dudv=$$

$$\frac{q}{q+a_0}\cdot\left(p\left(q+a_0\right)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-pu-(q+a_0)v} f\left(u;v\right)dudv\right)\cdot\left(\int_0^\infty e^{-(p+q+a_1)s}ds\right)=$$

$$\frac{q}{q+a_0}\cdot F\left(p;q+a_0\right)\cdot\lim_{R\to\infty}\left(-\frac{e^{-(p+q+a_1)s}}{p+q+a_1}\Bigg|_0^R\right)=$$

$$=\frac{q}{q+a_0}\cdot F\left(p;q+a_0\right)\cdot\frac{1}{p+q+a_1}=\frac{qF\left(p;q+a_0\right)}{\left(p+q+a_1\right)\left(q+a_0\right)}. \tag{6}$$

Применение теорем 1 и 2 к решениям телеграфного уравнения, интегро-дифференциального телеграфного уравнения, уравнения транспорта приведено в работах [3-5].

Пример: Рассмотрим уравнение

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+\left(2b+1\right)\frac{\partial u}{\partial t}+b^2 u=\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\int_0^t a\left(t-\tau\right)\frac{\partial^2 u\left(x,\tau\right)}{\partial x^2}d\tau+f\left(t\right) \tag{7}$$

с начальными условиями

$$\begin{cases} u\left(x,0\right)=0 \\ u_t'\left(x,0\right)=0 \end{cases} \tag{8}$$

и граничными условиями

$$\begin{cases} u\left(0,t\right)=\varphi_1\left(t\right) \\ u_x'\left(0,t\right)=\varphi_2\left(t\right) \end{cases} \tag{9}$$

Общее решение задачи (7)-(9) для ядра $a\left(t\right)=b^2t+2b+1$ имеет следующий вид: (см. [3])

$$u\left(x;t\right)=\varphi_1\left(t-x\right)-$$

$$-\int_0^{\min(x,t)_{t-s}}\int_0^{\left(\frac{b+\frac{1}{2}-\sqrt{b+\frac{1}{4}}}{2\sqrt{b+\frac{1}{4}}}\right)} e^{-\left(b+\frac{1}{2}-\sqrt{b+\frac{1}{4}}\right)(t-s-\tau)}h\left(x-s\right)f\left(\tau\right)dsd\tau+$$

$$+\int_0^{\min(x,t)_{t-s}}\int_0^{}\left(\frac{b+\frac{1}{2}+\sqrt{b+\frac{1}{4}}}{2\sqrt{b+\frac{1}{4}}}\right)e^{-\left(b+\frac{1}{2}+\sqrt{b+\frac{1}{4}}\right)(t-s-\tau)}h(x-s)\,f(\tau)\,ds\,d\tau$$

где $h(x)$ – функции Хевисайд.

С помощью равенства (4) и (6) составим таблицу изображений некоторых интегралов.

Таблица

Изображения некоторых интегралов

1	$\int_0^t\left(\delta(t-s)+bh(t-s)\right)e^{-bs}f\left(\lvert x-s\rvert\right)ds$	$\frac{pF(q+b)+(q+b)F(p)}{p+q+b}$
2	$\int_0^{\min(x,t)_{t-s}}\int_0^{}a(t-s-\tau)\,f(x-s;\tau)e^{-a_1 s}ds\,d\tau$	$\frac{A(q)F(p;q)}{q(p+q+a_1)}$
3	$\int_0^t a(t-\tau)e^{-b\tau}u_1(x+\tau)\partial\tau$	$\frac{A(q)}{q+b}\cdot\frac{pF(q+b)-(q+b)F(p)}{p-(q+b)}$
4	$\int_0^t a(t-\tau)e^{-b\tau}u_1\left(\lvert x-\tau\rvert\right)\partial\tau$	$\frac{A(q)}{q+b}\cdot\frac{pF(q+b)+(q+b)F(p)}{p+(q+b)}$
5	$\int_0^t a(t-\tau)e^{-b\tau}\left(u_1(x+\tau)+u_1\left(\lvert x-\tau\rvert\right)\right)\partial\tau$	$\frac{2A(q)}{q+b}\cdot\frac{p^2F(q+b)-(q+b)^2F(p)}{p^2-(q+b)^2}$
6	$\int_0^{\min(x,t)}e^{-a_0(t-s)}\cdot e^{-a_1 s}\cdot f(x-s;t-s)\,ds$	$\frac{qF(p;q+a_0)}{(p+q+a_1)(q+a_0)}$
7	$\int_0^t e^{-a_0(t-s)}\cdot e^{-a_1 s}\cdot\delta(x-s)u_0(t-s)\,ds;\ \ x>t$	$\frac{q}{q+a_0}\cdot\frac{pU_0(q+a_0)}{p+q+a_1}$
8	$\int_0^{\min(x,t)}e^{-a_1 t}\cdot u_0(x+t-2s)\,ds$	$\frac{q}{q+a_1}\cdot\frac{pU_0(q+a_1)-(q+a_1)U_0(p)}{p^2-(q+a_1)^2}$
9	$\int_0^{\min(x,t)_{t-s}}\int_0^{}a(t-s-\tau)\cdot e^{-a_1 s}\cdot f_1(x-s)\,f_2(\tau)\,ds\,d\tau$	$\frac{F_1(p)F_2(q)A(q)}{q(p+q+a_1)}$
10	$\int_0^t e^{-b(t-s)}\varphi_2(s)\,ds - \int_0^{min(x;t)}e^{-bs}h(x-s)\varphi_2(t-s)\,ds$	$\frac{p\Phi_2(q)}{(q+b)(p+q+b)}$

Поступило 14.05.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Зулфонов Ш.М. Применение преобразования Лапласа-Карсона к решению начально-краевой задачи для интегро-дифференциальных уравнений. – Доклады НАН Таджикистана, т. 64, №3-4, с. 135-141.

2. Зулфонов Ш.М. Решение начально-краевой задачи для телеграфного уравнения. – Доклады НАН Таджикистана, т. 66, № 1-2, с. 28-32.
3. Илолов М.И., Зулфонов Ш.М. Решение интегро-дифференциального телеграфного уравнения методом преобразования Лапласа-Карсона. – Известия НАН Таджикистана, 2023, №1 (190), с. 7-14
4. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление по двум переменным и его приложения. – М., 1958.
5. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю. Применение интегрального преобразования Лапласа-Карсона для решения краевых задач математической физики. – Известия Тульского государственного университета. Естественные науки, 2011, Вып. 1, с. 51-60

М.И.Илолов, Ш.М.Зулфонов

ТАБДИЛОТИ ИНТЕГРАЛИИ ДУЧЕНАКАИ ЛАПЛАС-КАРСОН ВА ТАТБИҚИ ОН

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои нави АМИ Тоҷикистон,
Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи С.Айнӣ

Дар ин мақола дуто теорема бо исботаш оварда шудааст. Теоремаҳои мазкур барои ҳалли муодилаи дифференсиалии телеграф, муодилаи интегро-дифференсиалии телеграф ва муодилаи транспорт бо манбаи хаттӣ нақши муҳим мебозанд.

Калимаҳои калиди: *табдилоти Лаплас-Карсон, муодилаи дифференсиалӣ, тасвир, ҳақиқӣ.*

M.I.Ilolov, Sh.M.Zulfonov

TWO-DIMENSIONAL INTEGRAL LAPLACE-CARSON TRANSFORM AND ITS APPLICATION

National Academy of Sciences of Tajikistan,
Center of Innovative development of science and new technologies, NAS Tajikistan,
Tajik State Pedagogical University S.Ayni

In this paper, two theorems with their proofs are given. The application of Theorems 1,2 to solutions of the telegraph equation, the integro-differential telegraph equation, and the transportation equation plays an important role in applications.

Key words: *Laplace-Carson transform, differential equations, image, original.*

Сведения об авторах:

1. **Илолов Мамадшо** – доктор физико-математических наук, профессор, академик НАНТ, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАНТ, заведующий отделом математического моделирования динамических процессов. E-mail: ilolov.mamadsho@gmail.com;
2. **Зулфонов Шахриёр Мулозулфонович** – Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни, ассистент кафедры математического анализа. E-mail: Zulfonov.Shakhrier@mail.ru.

МАТЕМАТИКА

УДК 517.948
Специальность:1.1.1. Вещественный, комплексный и функциональный анализ

О.Х.Каримов, Дж.И.Набиев

КОЭРЦИТИВНЫЕ ОЦЕНКИ И РАЗДЕЛИМОСТЬ ДЛЯ ОПЕРАТОРА ЧЕТВЁРТОГО ПОРЯДКА В ВЕСОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Национальная Академия наук Таджикистана,
Институт математики им. А.Джураева НАН Таджикистана

(Представлено членом-корреспонтентом НАН Таджикистана С.А. Исхоковым 24.02.2025г.)

В работе исследованы коэрцитивные свойства оператора четвертого порядка в весовом пространстве $L_{2,\rho}(R^n)$. На основе коэрцитивных неравенств получены новые достаточные условия разделимости этого оператора.

Ключевые слова: *разделимость, коэрцитивные свойства, коэрцитивные оценки, операторы четв порядка, весовое пространство.*

1. Введём весовое пространство $L_{2,\rho}(R^n)$ с конечной нормой

$$\| u; L_{2,\rho}(R^n) \| = \left\{ \int\limits_{R^n} \rho(x) \, | u(x) |^2 \, dx \right\}^{\frac{1}{2}},$$

где $\rho(x) \in C^2(R^n)$ – положительная функция. Пространство $L_{2,\rho}(R^n)$ является гильбертовым пространством, и в нём скалярное произведение определяется с помощью равенства

$$\langle u, \upsilon \rangle_\rho = \int\limits_{R^n} \rho(x) u(x) \overline{\upsilon(x)} dx \ .$$

В пространстве $L_{2,\rho}(R^n)$ рассмотрим дифференциальное уравнение

$$L[u] = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial^4 u(x)}{\partial x_i^4} + V(x) \cdot u(x) = f(x), \tag{1}$$

где $V(x)$ – положительная функция.

Адрес для корреспонденции: *Каримов Олимджон Худойбердиевич.734063, Республика Таджикистан, г.Душанбе, ул. Айни, 299/4, Институт математики им. А. Джураева НАН Таджикистана. E-mail: karimov_olim@mail.ru.*

Определение 1. *Уравнение (1) и соответствующий ему дифференциальный оператор называются разделимыми в* $L_{2,\rho}(R^n)$, *если* $\frac{\partial^4 u(x)}{\partial x_i^4}, V(x)\cdot u(x) \in L_{2,\rho}(R^n)$ *для всех* $u(x) \in L_{2,\rho}(R^n) \cap W^4_{2,loc}(R^n)$ *таких, что* $f(x) \in L_{2,\rho}(R^n)$.

Разделимость дифференциальных выражений и соответствующие неравенства коэрцитивности исследованы во многих работах (см. [1-4] и имеющиеся там ссылки). Коэрцитивные оценки и разделимость для эллиптических дифференциальных уравнений второго порядка изучались в работе [5]. В работах [6] и [7] исследовалась разделимость бигармонического оператора с матричным потенциалом. Статья [8] посвящена исследованию нелинейных эллиптических дифференциальных операторов недивергентного вида в весовом пространстве. В данной работе рассматривается оператор четвёртого порядка в весовом пространстве $L_{2,\rho}(R^n)$, устанавливаются соответствующие коэрцитивные неравенства и на основе этих неравенств получены новые достаточные условия резделимости для указанного оператора.

2. ***Определение 2.*** *Будем говорить, что функция* $V(x)$ *принадлежит классу* T_{σ_1,σ_2}, *если выполняются следующие условия для всех* $x \in R^n$ *:*

$$\sum_{i=1}^{n} \left\| V^{-\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial^2 V(x)}{\partial x_i^2} V^{-1}(x) \right\| \le \sigma_1, \tag{2}$$

$$\left\| V^{-\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial V(x)}{\partial x_i} \frac{\partial u}{\partial x_i} \right\| \le \sigma_2 \left\| V^{\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right\|, \tag{3}$$

Сформулируем основной результат работы. Справедлива следующая

Теорема. *Пусть функция* $V(x)$ *принадлежит классу* $T^{\delta_1,\delta_2}_{\sigma_1,\sigma_2}$. *Пусть весовая функция* $\rho(x)$ *принадлежит классу* $C^2(R^n)$, *и для всех* $x \in R^n$ *выполняются неравенства:*

$$\left\| \rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} V^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x_i} \right\| \le \sigma_3 \| V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \|, \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \left\| \rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} V^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial V(x)}{\partial x_i} V^{-1} \right\| \le \sigma_4, \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \left\| \rho^{-1} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} V^{-\frac{1}{2}} \right\| \le \delta_1, \tag{6}$$

$$\left\| \rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \frac{\partial u}{\partial x_i} \right\| \le \delta_2 \left| \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right|. \tag{7}$$

Тогда при выполнении условий

$$\delta_1^2 < 4(1-2\delta_2),\ \delta_1+\sigma_1+2\sigma_4 < 2\sqrt{1-2\sigma_2-2\sigma_3}\ , \tag{8}$$

уравнение (1) разделяется в пространстве $L_{2,\rho}(R^n)$*, и для всех решений* $u(x)\in L_{2,\rho}(R^n)\cap W_{2,loc}^4(R^n)$ *уравнения*

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial^4 u(x)}{\partial x_i^4}+V(x)u(x)=f(x)$$

с правой частью $f(x)\in L_{2,\rho}(R^n)$ *выполняется следующее коэрцитивное неравенство:*

$$\left\|\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial^4 u(x)}{\partial x_i^4};L_{2,\rho}(R^n)\right\|+\left\|V(x)u(x);L_{2,\rho}(R^n)\right\|+$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\left\|V^{\frac{1}{2}}(x)\frac{\partial u^2(x)}{\partial x_i^2};L_{2,\rho}(R^n)\right\|\le M\left\|f(x);L_{2,\rho}(R^n)\right\|, \tag{9}$$

где положительное число M не зависит от $u(x)$, $f(x)$.

Вспомогательные леммы.

Далее мы часто используем следующую лемму, которая доказывается интегрированием по частям.

Лемма 1. *Пусть* $\psi(x)\in C_0^\infty(R)$. *Тогда для любых двух функций* $u(x)$, $\vartheta(x)\in W_{2,loc}^1(R^n)$ *выполняется равенство*

$$\langle\omega_1',\psi\omega_2\rangle=-\langle\omega_1,\psi'\omega_2\rangle-\langle\omega_1,\psi\omega_2'\rangle,(\omega_1,\omega_2\in W_{2,loc}^1(R),\psi\in C_0^\infty(R^n)). \tag{10}$$

Лемма 2. *Пусть в уравнении (1) функция* $f(x)$ *принадлежит пространству* $L_{2,\rho}(R^n)$, *функция* $u(x)$ *принадлежит классу* $L_{2,\rho}(R^n)\cap W_{2,loc}^4(R^n)$. *Тогда функции* $V^{\frac{1}{2}}(x)u(x)$, $\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}$, $i=\overline{1,n}$ *принадлежат пространству* $L_{2,\rho}(R^n)$.

Доказательство. Пусть $\varphi(x)\in C_0^\infty(R^n)$ – фиксированная неотрицательная функция, обращающаяся в единицу при $|x|<1$. Для любого положительного числа ε положим $\varphi_\varepsilon(x)=\varphi(\varepsilon x)$.

Имеет место равенство

$$\left\langle f(x),\rho\varphi_\varepsilon(x)u(x)\right\rangle=\sum_{i=1}^{n}\left\langle\frac{\partial^4 u(x)}{\partial x_i^4},\rho\varphi_\varepsilon u(x)\right\rangle+\left\langle V(x)u(x),\rho\varphi_\varepsilon u(x)\right\rangle, \tag{11}$$

где $\langle,\rangle$ – скалярное произведение в пространстве $L_{2,\rho}(R^n)$.

Далее, несколько раз применяя лемму 0, из равенства (11) получим

$$\langle f(x), \rho\varphi_\varepsilon(x)u(x)\rangle = \sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2}\varphi_\varepsilon u(x)\right\rangle + \sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \rho\frac{\partial^2 \varphi_\varepsilon}{\partial x_i^2}u(x)\right\rangle +$$

$$+ \sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \rho\varphi_\varepsilon\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}\right\rangle + 2\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \frac{\partial\rho}{\partial x_i}\frac{\partial\varphi_\varepsilon}{\partial x_i}u(x)\right\rangle +$$

$$+2\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \frac{\partial\rho}{\partial x_i}\varphi_\varepsilon\frac{\partial u(x)}{\partial x_i}\right\rangle + 2\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \rho\frac{\partial\varphi_\varepsilon}{\partial x_i}\frac{\partial u(x)}{\partial x_i}\right\rangle$$

$$+\left\langle V(x,u(x))u(x), \varphi_\varepsilon(x)\rho u(x)\right\rangle. \qquad (12)$$

Приравнивая реальные части этого равенства, имеем

$$Re\langle f(x), \rho\varphi_\varepsilon(x)u(x)\rangle = \sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \rho\varphi_\varepsilon\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}\right\rangle + \langle V(x,u(x))u(x), \varphi_\varepsilon(x)\rho u(x)\rangle +$$

$$+A_{1,\varepsilon}(u) + A_{2,\varepsilon}(u) + 2A_{3,\varepsilon}(u) + 2A_{4,\varepsilon}(u) + 2A_{5,\varepsilon}(u), \qquad (13)$$

где

$$A_{1,\varepsilon}(u) = Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2}\varphi_\varepsilon u(x)\right\rangle,$$

$$A_{2,\varepsilon}(u) = Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \rho\frac{\partial^2 \varphi_\varepsilon}{\partial x_i^2}u(x)\right\rangle,$$

$$A_{3,\varepsilon}(u) = Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \frac{\partial\rho}{\partial x_i}\frac{\partial\varphi_\varepsilon}{\partial x_i}u(x)\right\rangle,$$

$$A_{4,\varepsilon}(u) = Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \frac{\partial\rho}{\partial x_i}\varphi_\varepsilon\frac{\partial u(x)}{\partial x_i}\right\rangle,$$

$$A_{5,\varepsilon}(u) = Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i^2}, \rho\frac{\partial\varphi_\varepsilon}{\partial x_i}\frac{\partial u(x)}{\partial x_i}\right\rangle.$$

Теперь поочередно оцениваем абсолютные значения функционалов $A_j(u), j = \overline{1,5}$.

Так как функция $\varphi_\varepsilon(x)$ вещественнозначная, и

$$\left|\frac{\partial\varphi_\varepsilon}{\partial x_i}\right| \le M_0\varepsilon, \quad \left|\frac{\partial^2\varphi_\varepsilon}{\partial x_i^2}\right| \le M_1\varepsilon^2, \quad \forall x \in R^n,$$

где

$$M_0 = \sup\left|\frac{\partial\varphi_\varepsilon}{\partial x_i}\right|, M_1 = \sup\left|\frac{\partial^2\varphi_\varepsilon}{\partial x_i^2}\right|,$$

то $A_{2,\varepsilon}(u), A_{3,\varepsilon}(u)$ и $A_{5,\varepsilon}(u)$ стремятся к нулю при $\varepsilon \to 0$. Для оценки $A_{1,\varepsilon}(u), A_{4,\varepsilon}(u)$, применяя неравенство

$$y_1 y_2 \le \frac{\alpha}{2}|y_1|^2 + \frac{1}{2\alpha}|y_2|^2, \tag{14}$$

справедливое для любого $\alpha > 0$ и всех y_1 и y_2, ввиду неравенств (6) и (7) находим следующие оценки:

$$|A_{1,\varepsilon}(u)| \ge -\frac{\alpha\delta_1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}; L_{2,\rho}(R^n)\right\|^2 - \frac{\delta_1}{2\alpha}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}}V^{\frac{1}{2}}u; L_{2,\rho}(R^n)\right\|^2, \tag{15}$$

$$|A_{4,\varepsilon}(u)| \ge -\delta_2\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}; L_{2,\rho}(R^n)\right\|^2, \tag{16}$$

Переходя в равенстве (13) к пределу при $\varepsilon \to 0$, используя неравенство Коши-Буняковского, при α – произвольном положительном числе и δ_1, δ_2 – константах из условий (8),(9), находим

$$\| f(x); L_{2,\rho}(R^n)\| \|u(x); L_{2,\rho}(R^n)\| \ge \mathrm{Re}\langle f(x), u(x)\rangle \ge$$

$$\ge (1 - \frac{\delta_1\alpha}{2} - 2\delta_2)\sum_{i=1}^{n}\left\|\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}; L_{2,\rho}(R^n)\right\|^2 + (1 - \frac{\delta_1}{2\alpha})\left\|V^{\frac{1}{2}}u; L_{2,\rho}(R^n)\right\|^2,$$

что и доказывает лемму 0.

Доказательство теоремы 1. Для любого $\nu > 0$ выполняется равенство

$$\langle f(x), \varphi_\varepsilon\rho f(x)\rangle = \langle Vu(x), \varphi_\varepsilon\rho Vu(x)\rangle + \nu\left\langle\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}, \varphi_\varepsilon\rho\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}\right\rangle + A_1^\varepsilon(u) - A_2^\varepsilon(u), \tag{17}$$

где

$$A_1^\varepsilon(u) = -(1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}, \varphi_\varepsilon\rho Vu\right\rangle,$$

$$A_2^\varepsilon(u) = (1-\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}, \varphi_\varepsilon\rho f(x)\right\rangle.$$

Для любого $\alpha_1 > 0$ справедливо неравенство

$$|A_2^\varepsilon(u)| \le \frac{\alpha_1|1-\nu|}{2}\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}}(x)\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}\right\|^2 + \frac{|1-\nu|}{2\alpha_1}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}}(x)f(x)\right\|^2,$$

где $\|,\|$ – норма в пространстве $L_{2,\rho}(R^n)$.

Далее имеем

$$A_1^{\varepsilon}(u) = -(1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^3 u}{\partial x_i^3}, \frac{\partial \varphi_{\varepsilon}}{\partial x_i}\rho V u(x)\right\rangle - (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^3 u}{\partial x_i^3}, \varphi_{\varepsilon}(x)\frac{\partial \rho}{\partial x_i}Vu(x)\right\rangle -$$

$$-(1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^3 u}{\partial x_i^3}, \varphi_{\varepsilon}(x)\rho\frac{\partial V}{\partial x_i}u(x)\right\rangle - (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^3 u}{\partial x_i^3}, \varphi_{\varepsilon}(x)\rho V\frac{\partial u(x)}{\partial x_i}\right\rangle.$$

Используя лемму 0, после несложных преобразований находим

$$A_1^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}(x)\rho V(x)\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}(x)\right\rangle + B_1^{\varepsilon}(u) +$$

$$+B_2^{\varepsilon}(u) + B_3^{\varepsilon}(u) + 2B_4^{\varepsilon}(u) + 2B_5^{\varepsilon}(u) +$$

$$+2B_6^{\varepsilon}(u) + 2B_7(\varepsilon) + 2B_8^{\varepsilon}(u) + 2B_9^{\varepsilon}(u), \qquad (18)$$

где

$$B_1^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \frac{\partial^2 \varphi_{\varepsilon}}{\partial x_i^2}\rho V(x)u(x)\right\rangle,$$

$$B_2^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}(x)\frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2}V(x)u(x)\right\rangle,$$

$$B_3^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}(x)\rho\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x_i^2}u(x)\right\rangle,$$

$$B_4^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \frac{\partial \varphi_{\varepsilon}}{\partial x_i}\frac{\partial \rho}{\partial x_i}V(x)u(x)\right\rangle,$$

$$B_5^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \frac{\partial \varphi_{\varepsilon}}{\partial x_i}\rho\frac{\partial V}{\partial x_i}(x)u(x)\right\rangle,$$

$$B_6^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \frac{\partial \varphi_{\varepsilon}}{\partial x_i}\rho V(x)\frac{\partial u(x)}{\partial x_i}\right\rangle,$$

$$B_7^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}(x)\rho\frac{\partial V(x)}{\partial x_i}\frac{\partial u(x)}{\partial x_i}\right\rangle,$$

$$B_8^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}(x)\frac{\partial \rho}{\partial x_i}V(x)\frac{\partial u(x)}{\partial x_i}\right\rangle,$$

$$B_9^{\varepsilon}(u) = (1+\nu)Re\sum_{i=1}^{n}\left\langle \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}(x)\frac{\partial \rho}{\partial x_i}\frac{\partial V(x)}{\partial x_i}u(x)\right\rangle.$$

Оцениваем поочередно $B_j^{\varepsilon}(u)$, $j=\overline{1,9}$. Функционалы $B_1^{\varepsilon}(u)$, $B_4^{\varepsilon}(u)$, $B_5^{\varepsilon}(u)$ и $B_6^{\varepsilon}(u)$ в силу леммы 0 стремятся к нулю при $\varepsilon \to 0$.

При оценке функционалов $B_2^{\varepsilon}(u)$, $B_3^{\varepsilon}(u)$, $B_7^{\varepsilon}(u)$, $B_8^{\varepsilon}(u)$ и $B_9^{\varepsilon}(u)$ для любого $u(x) \in L_{2,\rho}(R^n)$, применяя неравенства (14), получим следующие оценки:

$$|B_2^{\varepsilon}(u)| \le \frac{\beta\delta_1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left\langle V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}\rho V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right\rangle + \frac{\delta_1}{2\beta}(Vu, \varphi_{\varepsilon}\rho Vu), \tag{19}$$

$$|B_3^{\varepsilon}(u)| \le \frac{\beta\sigma_1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left\langle V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}\rho V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right\rangle + \frac{\sigma_1}{2\beta}(Vu, \varphi_{\varepsilon}\rho Vu), \tag{20}$$

$$|B_7^{\varepsilon}(u)| \le \sigma_2\sum_{i=1}^{n}\left\langle V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}\rho V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right\rangle, \tag{21}$$

$$|B_8^{\varepsilon}(u)| \le \sigma_3\sum_{i=1}^{n}\left\langle V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}\rho V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right\rangle, \tag{22}$$

$$|B_9^{\varepsilon}(u)| \le \frac{\beta\sigma_4}{2}\sum_{i=1}^{n}\left\langle V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \varphi_{\varepsilon}\rho V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right\rangle + \frac{\sigma_4}{2\beta}(Vu, \varphi_{\varepsilon}\rho Vu). \tag{23}$$

Здесь β – произвольное положительное число, $\delta_1, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и σ_4 – константы из условий (6), (2), (3), (4) и (5), соответственно.

На основе полученных оценок из равенства (17), учитывая неравенство

$$-|Z| \le ReZ \le |Z|,$$

переходим к неравенству

$$\left\|\varphi_{\varepsilon}^{\frac{1}{2}} f(x))\right\|^2 \ge \left\|\varphi_{\varepsilon}^{\frac{1}{2}} Vu(x)\right\|^2 + \nu\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_{\varepsilon}^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}\right\|^2 +$$

$$-\frac{\alpha_1|1-\nu|}{2}\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_{\varepsilon}^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}\right\|^2 - \frac{|1-\nu|}{2\alpha_1}\left\|\varphi_{\varepsilon}^{\frac{1}{2}} f(x)\right\|^2 +$$

$$+(1+\nu)\left\{\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_{\varepsilon}^{\frac{1}{2}} V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right\|^2 - |B_2(\varepsilon)| - |B_3(\varepsilon)| - 2|B_7(\varepsilon) - 2|B_8(\varepsilon)| - 2|B_9(\varepsilon)|\right\},$$

где $\nu, \beta > 0, \alpha_1$ – любые положительные числа.

Далее, имея ввиду неравенства (20)-(23) при любых $\nu, \alpha_1, \alpha > 0$ получим неравенство

$$\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} f(x))\right\|^2 \geq \left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} Vu(x)\right\|^2 + \nu\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}\right\|^2 -$$

$$-\frac{\alpha_1|1-\nu|}{2}\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}\right\|^2 - \frac{|1-\nu|}{2\alpha_1}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} f(x)\right\|^2 +$$

$$+(1+\nu)\left\{\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right\|^2 -\right.$$

$$\left.-\left(\frac{\beta(\delta_1+\sigma_1+2\sigma_4)+4\sigma_2+4\sigma_3}{2}\right)\sum_{i=1}^{n}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right\|^2 - \frac{\delta_1+\sigma_1+2\sigma_4}{2\beta}\left\|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} Vu(x)\right\|^2\right\}.$$

Переходя к пределу при $\varepsilon \to 0$, получим

$$\left(1+\frac{|1-\nu|}{2\alpha_1}\right)\|f(x))\|^2 \geq \left(1-\frac{(1+\nu)(\delta_1+\sigma_1+2\sigma_4)}{2\beta}\right)\|Vu(x)\|^2 +$$

$$+\left(\nu-\frac{\alpha_1|1-\nu|}{2}\right)\sum_{i=1}^{n}\left\|\frac{\partial^4 u}{\partial x_i^4}\right\|^2 +$$

$$+(1+\nu)\left(1-\frac{\beta(\delta_1+\sigma_1+2\sigma_4)+4\sigma_2+4\sigma_3}{2}\right)\sum_{i=1}^{n}\left\|V^{\frac{1}{2}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right\|^2.$$

Отсюда очевидно следующее: если $|1-\nu|<2\alpha_1$, $\alpha_1|1-\nu|<2\nu$, $(1+\nu)(\delta_1+\sigma_1+2\sigma_4)<2\beta$ и $\beta(\delta_1+\sigma_1+2\sigma_4)+4\sigma_2+4\sigma_3<2$, то коэрцитивная оценка (6) имеет место. Существование чисел $\alpha_1, \beta, \nu > 0$ выводится из неравенства (8).

Разделимость нелинейного оператора (1) в пространстве $L_{2,\rho}(R^n)$ следует из коэрцитивного неравенства (9).

Теорема 1 доказана.

Поступило 24.02.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Everitt W.N., Gierz M. On some properties of the powers of a family self-adjoint differential expressions. – Proc. London Math. Soc., 1972, v.24, pp.149-170.
2. Everitt W.N., Gierz M. Inequalities and separation for Schrodinger type operators in $L_2(R^n)$. – Proc. Roy. Soc. Edinburg Sect A, 1977, v.79 pp.149-170.
3. Бойматов К.Х. Теоремы разделимости, весовые пространства и их приложения.- Труды МИАН СССР, 1984, т.170, с.37-76.
4. Отелбаев М. Коэрцитивные оценки и теоремы разделимости для эллиптических уравнений в R^n. – Труды Математического института им. В.А.Стеклова АН СССР, 1983, т. 161, с. 195-217.
5. Zayed E.M.E. Separation for an elliptic differential operators in a weighted Hilbert space with its application to an existence and uniqueness theorem. – Mathematical Analysis, No. 22, 2015, pp. 409-421.

6. Каримов О.Х. О коэрцитивных свойствах и разделимости бигармонического оператора с матричным потенциалом. – Уфимский математический журнал, 2017, 1(9), с.55-62.
7. Каримов О.Х. Хакимова З.Дж. Коэрцитивные оценки, разделимость и коэрцитивная разрешимость нелинейных эллиптических дифференциальных уравнений недивергентного вида. – Чебышевский сборник, 2023, 24(2), с.197-213.
8. Каримов О.Х., Набиев Дж.И. Разделимость для бигармонического оператора с матричным потенциалом в весовом пространстве. – Известия Национальной академии наук Таджикистана, 2024, №4 (197), стр.44-50.

О.Х.Каримов, Ҷ.И.Набиев

БАҲОҲОИ КОЭРСИТИВӢ ВА ҶУДОШАВАНДАГИ БАРОИ ОПЕРАТОРИ ТАРТИБИ ЧОРУМ ДАР ФАЗОИ ВАЗНДОР

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
Институти математикаи ба номи А.Ҷураеви АМИ Тоҷикистон

Дар кор хосиятҳои коэрситивии оператори тартиби чорум дар фазои вазндор $L_{2,\rho}(R^n)$ татқиқ карда шудааст. Дар асоси нобаробариҳои коэрситивӣ шартҳои нави кофӣ барои ҷудошавандагии оператор гирифта шудааст.

Калимаҳои калидӣ: *ҷудошавандагӣ , хосиятҳои коэрситивӣ, нобаробариҳои коэртситивӣ, оператори тартиби чорум, фазои вазндор.*

O.Kh.Karimov, J.I.Nabiev

COERCIVE ESTIMATES AND SEPARABILITY FOR A FOURTH-ORDER OPERATOR IN A WEIGHT SPACE

National Academy of Sciences of Tajikistan,
A.Juraev Institute of Mathematics, NAN of Tajikistan

The paper examines the coercive properties of the fourth-order operator in the weight space $L_{2,\rho}(R^n)$. Based on coercive inequalities, new sufficient conditions for the separability of this operator are obtained.

Key words: *separability, coercive properties, coercive estimates, fourth-order operators, weight space.*

Сведения об авторах:

1. **Каримов Олимджон Худойбердиевич** – доктор физ.-мат. наук, Институт математики им. А.Джураева НАН Таджикистана, заместитель директора по науке и образованию. E-mail: karimov_olim@mail.ru;
2. **Набиев Джурабек Игамович** – докторант PhD Института математики им. А.Джураева НАНТ. E-mail: nabiev_j@mail.ru.

МАТЕМАТИКА

УДК 517.955
Специальность:1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика

Ф.М.Шамсудинов, С.Хомиддин*

ОБ ОДНОЙ ПЕРЕОПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА С СИНГУЛЯРНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Бохтарский государственный университет имени Носира Хусрава
****Академия государственного управления при Президенте Республики Таджикистан***

(Представлено академиком НАН Таджикистана Н.Р.Раджабовым 27.03.2025г.)

В работе для одной переопределённой системы дифференциальных уравнений второго порядка с сингулярными коэффициентами получены представления многообразия решений при помощи одной произвольной постоянной. Изучены свойства полученных решений, а также рассмотрены задачи с начальными данными.

Ключевые слова: *переопределённая система, многообразия решений, прямоугольник, сингулярный коэффициент, свойства решений, задача с начальными данными.*

Пусть D прямоугольник

$$D=\{(x,y):0<x<\delta_1,0<y<\delta_2\}.$$

Далее обозначим

$$\Gamma_1=\{y=0,0<x<\delta_1\},\Gamma_2=\{x=0,0<y<\delta_2\}.$$

В области D рассмотрим систему дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} u_{xy}+a_1(x,y)r^{-\alpha}u_x+b_1(x,y)r^{-\beta}u_y+c_1(x,y)r^{-(\alpha+\beta)}u=f_1(x,y)r^{-(\alpha+\beta)}, \\ u_x+a_1(x,y)x^{-\gamma}u=f_2(x,y)x^{-\gamma}, \\ u_y+b_2(x,y)y^{-\delta}u=f_3(x,y)y^{-\delta}, \end{cases} \tag{1}$$

где $r^2=x^2+y^2$, $a_i(x,y)$, $b_i(x,y)$, $c_1(x,y)$, $f_j(x,y)$, $i=\overline{1,2}$; $j=\overline{1,3}$ – заданные функции в области $D,\alpha=\beta=\gamma=\delta=1$, $u(x,y)$ – искомая функция.

Следует отметить, что исследованию уравнений и переопределённых систем дифференциальных уравнений с сингулярными и суперсингулярными коэффициентами посвящено много работ [1-10].

Адрес для корреспонденции: *Сайфуллои Хомиддин. 734025, Республика Таджикистан, г.Душанбе, ул. С.Носирова, 33. E-mail: smpk1992@mail.ru.*

В данной работе, используя методику, разработанную в работах [2] и [3], для системы уравнений (1), получены представления многообразия решений при помощи одной произвольной постоянной.

Далее, мы будем использовать обозначение $C_2(D)$, под которым будем понимать класс функций, имеющих непрерывные производные первого порядка в D, такие что $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \in C_2(D)$.

Случай 1. Предположим, что первое уравнение системы (1) является основным (базовым), тогда имеет место следующее утверждение.

Теорема 1. *Пусть в системе уравнений* (1) $\alpha = \beta = \gamma = \delta = 1$ *коэффициенты и правые части уравнений удовлетворяют следующим условиям:*

$$1) a_1(x,y) \in C_x^1(\bar{D}), a_2(x,y) \in C_y^1(\bar{D}), f_2(x,y) \in C_y^1(\bar{D}),$$

$$b_1(x,y), b_2(x,y), f_1(x,y), f_3(x,y), c_1(x,y) \in C(\bar{D});$$

$$2) c_1(x,y) = r^2 \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{a_1(x,y)}{r}\right) + a_1(x,y) b_1(x,y);$$

$$3) \left|a_1(x,y) - a_1(0,0)\right| \le H_1 r^{\alpha_1},\ H_2 = const, 0 < \alpha_1 < 1,$$

$$\left|b_1(x,y) - b_1(0,0)\right| \le H_2 r^{\beta_1}, H_2 = const, 0 < \beta_1 < 1,$$

$$\left|a_2(x,0) - a_2(0,0)\right| \le H_3 x^{\lambda_1}, H_3 = const, 0 < \lambda_1 < 1;$$

$$4) a_1(0,0) < 0,\ b_1(0,0) > 0,\ a_2(0,0) > 0;$$

$$5) a) \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{a_1(x,y)}{r}\right) = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{a_2(x,y)}{x}\right) \text{ в D},$$

$$b) xr^2 \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{f_2(x,y)}{x}\right) + r a_1(x,y) f_2(x,y) = x f_1(x,y) в\, D$$

при $r a_2(x,y) = x b_1(x,y),$

$$c) y exp\left[-W_{b_1}^1(x,y) + b_1(0,0)\ln\frac{y}{x+r}\right] \times$$

$$\times\left(\psi_1(y) + \int_0^x \frac{f_1(t,y)}{t^2+y^2} exp\left[W_{b_1}^1(x,y) + b_1(0,0)\ln\frac{t+\sqrt{t^2+y^2}}{y}\right] dt\right) =$$

$$= f_3(x,y) в\, D,$$

при $rb_2(x,y) = ya_1(x,y)$;

Тогда любое решение системы уравнений (1) из класса $C_2(D)$ *можно представить в виде*

$$u(x,y) = exp\left[-W_{a_1}^1(x,y)\right]\left(\frac{x}{y+r}\right)^{a_1(0,0)}\left\{\varphi_1(x) + \int_0^y \exp[W_{a_1}^1(x,s)\right.$$

$$\left.-W_{b_1}^1(x,y)]\left(\frac{s+\sqrt{x^2+s^2}}{x}\right)^{a_1(0,0)}\left(\frac{s}{x+\sqrt{x^2+s^2}}\right)^{b_1(0,0)}\times\right.$$

$$\left.\times\left(\psi_1(s) + \int_0^x \frac{f_1(t,s)}{t^2+s^2} exp\left[W_{b_1}^1(t,s)\right]\left(\frac{t+\sqrt{t^2+s^2}}{s}\right)^{b_1(0,0)} dt\right) ds\right\} \equiv$$

$$\equiv \mathrm{T}_1\left(\varphi_1(x), \psi_1(y), f_1(x,y)\right), \tag{2}$$

$$\varphi_1(x) = x^{-a_2(0,0)} \exp\left[-W_{a_2}^1(x,0)\right]\left(c_1 + \int_0^x \frac{f_2(t,0)}{t^{1-a_2(0,0)}} \exp\left[W_{a_2}^1(t,0)\right] dt\right) \equiv$$

$$\equiv N_1\left(c_1, f_2(x,0)\right) \tag{3}$$

$$\psi_1(y) = \frac{f_3(0,y)}{y}, \tag{4}$$

где

$$W_{a_1}^1(x,y) = \int_0^y \frac{a_1(x,s) - a_1(0,0)}{\sqrt{x^2+s^2}} ds, \quad W_{b_1}^2(x,y) = \int_0^x \frac{b_1(t,y) - b_1(0,0)}{\sqrt{t^2+y^2}} dt,$$

$$W_{a_2}^1(x,0) = \int_0^x \frac{a_2(t,0) - a_2(0,0)}{t} dt,$$

c_1 – *произвольная постоянная.*

Нетрудно заметить, что полученное решение обладает следующими свойствами:

1^0. Если $y \to 0$, то

$\lim\limits_{y\to 0} u(x,y) = \varphi_1(x)$.

2^0. Если $y \to 0$ и $x \to 0$, то

$\lim\limits_{x\to 0}\left\{\lim\limits_{y\to 0} u(x,y)\right\} = o\left(x^{-a_2(0,0)}\right)$.

3^0. $\lim\limits_{x\to 0}\left\{x^{a_2(0,0)} \lim\limits_{y\to 0} u(x,y)\right\} = c_1$.

4^0. Если $x \to 0$ и y ≠ 0, то

$$u(x,y) = O\left((\frac{x}{y+r})^{a_1(0,0)} \right).$$

Случай 2. Предположим, что второе уравнение системы (1) является исходным. В этом случае получим следующее утверждение.

Теорема 2. *Предположим, что в системе уравнений* (1) $\alpha = \beta = \gamma = \delta = 1$, *коэффициенты и правые части удовлетворяют следующим условиям:*

$$1) a_1(x,y) \in C_x^1(\bar{D}), a_2(x,y) \in C_y^1(\bar{D}), f_2(x,y) \in C_y^1(\bar{D}),$$

$$f_3(x,y) \in C_x^1(\bar{D}), b_1(x,y), c_1(x,y), f_1(x,y) \in C(\bar{D});$$

$$2)\ c_1(x,y) = r^2 \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{a_1(x,y)}{r} \right) + a_1(x,y) b_1(x,y);$$

$$3) \left| a_2(x,y) - a_2(0,0) \right| \le H_1 x^{\lambda_1}, H_1 = const, 0 < \lambda_1 < 1,$$

$$\left| b_2(0,y) - b_2(0,0) \right| \le H_2 y^{\nu_1}, H_2 = const, 0 < \nu_1 < 1;.$$

$$4) a_2(0,0) > 0, b_2(0,0) > 0;$$

$$5)a) \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{b_2(x,y)}{y} \right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{a_1(x,y)}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{a_2(x,y)}{x} \right) в\ \mathrm{D},$$

при $r a_2(x,y) = x b_1(x,y),$

$$c) xy \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{f_3(x,y)}{y} \right) + a_2(x,y) f_3(x,y) =$$

$$= xy \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{f_2(x,y)}{x} \right) + b_2(x,y) f_2(x,y) \text{ в } D.$$

6) Кроме того, пусть существует предел

$$\lim_{x \to 0} (x^{a_2(0,0)} f_3(x,y)) = f_3^1(y).$$

Тогда любое решение системы уравнений (1), *принадлежащее классу* $C_2(D)$, *можно найти по формуле*

$$u(x,y) = x^{-a_2(0,0)} exp\left[-W_{a_2}^1(x,y) \right] \left(\psi_2(y) + \int_0^x \frac{f_2(t,y) exp\left[W_{a_2}^1(t,y) \right]}{t^{1-a_2(0,0)}} dt \right) \equiv$$

$$\equiv \mathrm{T}_2\left(\psi_2(y),\, f_2(x,y)\right), (5)$$

$$\psi_2(y) = y^{-b_2(0,0)} exp\left[-W_{b_2}^1(0,y)\right]\left(c_2 + \int_0^y \frac{f_3^1(s)\, exp\left[W_{b_2}^1(0,s)\right]}{s^{1-b_2(0,0)}}\, ds\right), (6)$$

где

$$W_{a_2}^1(x,y) = \int_0^x \frac{a_2(t,y) - a_2(0,0)}{t}\, dt,\; W_{b_2}^1(0,y) = \int_0^y \frac{b_2(0,s) - b_2(0,0)}{s}\, ds,$$

c_2 *– произвольная постоянная.*

Найденное решение имеет следующие свойства:

1^0. Если $x \to 0,$ то

$\lim\limits_{x\to 0} u(x,y) = O\left(x^{-a_2(0,0)}\right).$

$2^0.\ \lim\limits_{x\to 0}\left\{x^{a_2(0,0)}\, u(x,y)\right\} = \psi_2(y).$

3^0. Если $x \to 0$ и $y \to 0, mo$

$\lim\limits_{y\to 0}\left\{\lim\limits_{x\to 0}(x^{a_2(0,0)}\, u(x,y))\right\} = O\left(y^{-b_2(0,0)}\right).$

$4^0.\ \lim\limits_{y\to 0}\left\{y^{b_2(0,0)}\ \lim\limits_{x\to 0}(x^{a_2(0,0)}\, u(x,y))\right\} = c_2.$

Случай 3. Предположим, что третье уравнение системы (1) является главным. Имеет место следующая

Теорема 3. *Предположим, что в системе уравнений* $(1)\alpha = \beta = \gamma = \delta = 1,$ *коэффициенты и правые части удовлетворяют следующим условиям*

$a_1(x,y) \in C_x^1(\bar{D}),\ a_2(x,y) \in C_y^1(\bar{D}),\ f_2(x,y) \in C_y^1(\bar{D}),$

$b_2(x,y) \in C_x^1(\bar{D}),\ f_3(x,y) \in C_x^1(\bar{D}),\ f_1(x,y) \in C(\bar{D});$

$2)\ c_1(x,y) = r^2 \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{a_1(x,y)}{r}\right) + a_1(x,y) b_1(x,y);$

$3)\left|b_2(x,y) - b_2(0,0)\right| \le H_1 y^{\mu_1}, H_1 = const, 0 < \mu_1 < 1,$

$\left|a_2(x,0) - a_2(0,0)\right| \le H_2 x^{\lambda_1}, H_2 = const, 0 < \lambda_1 < 1,$

$4) b_2(0,0) > 0,\ a_2(0,0) > 0;$

$$5)a)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{b_2(x,y)}{y}\right)=\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{a_2(x,y)}{x}\right) в\ \mathrm{D},$$

$$b)\ yexp\left[-W_{b_1}^1(x,y)+b_1(0,0)\ln\frac{y}{x+r}\right]\times$$

$$\times\left(\psi_1(y)+\int_0^x\frac{f_1(t,y)}{t^2+y^2}exp\left[W_{b_1}^1(x,y)+b_1(0,0)\ln\frac{t+\sqrt{t^2+y^2}}{y}\right]dt\right)=f_3(x,y)$$

при $rb_2(x,y)=ya_1(x,y)$ в D,

$$c)xy\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{f_3(x,y)}{y}\right)+a_2(x,y)\,f_3(x,y)=$$

$$=xy\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{f_2(x,y)}{x}\right)+b_2(x,y)\,f_2(x,y)\ в\ D.$$

6) Требуем, что существует предел

$$\lim_{y\to0}(y^{b_2(0,0)}\ f_2(x,y))=f_2^1(y).$$

Тогда всякое решение системы уравнений (1), принадлежащее классу $C_2(D)$, *можно найти по формуле*

$$u(x,y)=y^{-b_2(0,0)}exp\left[-W_{b_2}^1(x,y)\right]\left(\varphi_2(x)+\int_0^y\frac{f_3(x,s)exp\left[W_{b_2}^1(x,s)\right]}{s^{1-b_2(0,0)}}ds\right)\equiv$$

$$\equiv T_3\left(\varphi_2(x),\ f_3(x,y)\right),\tag{7}$$

$$\varphi_2(x)=x^{-a_2(0,0)}exp\left[-W_{a_2}^1(x,0)\right]\left(c_3+\int_0^x\frac{f_2^1(t)exp\left[W_{a_2}^1(t,0)\right]}{t^{1-a_2(0,0)}}ds\right),\tag{8}$$

$$W_{b_2}^1(x,y)=\int_0^y\frac{b_2(x,s)-b_2(0,0)}{s}ds,\ W_{a_2}^1(x,0)=\int_0^x\frac{a_2(t,0)-a_2(0,0)}{t}dt,$$

c_3 *– произвольная постоянная.*

Приведённое решение подчинено свойствам

1^0. Если $y\to0,$ то

$$\lim_{y\to0}u(x,y)=O\left(y^{-b_2(0,0)}\right).$$

$$2^0.\ \lim_{x\to0}\left\{y^{b_2(0,0)}\lim_{y\to0}u(x,y)\right\}=O\left(x^{-a_2(0,0)}\right).$$

$3^0.\ \lim\limits_{x\to 0}\left\{x^{a_2(0,0)}\lim\limits_{y\to 0}(y^{b_2(0,0)}u(x,y))\right\}=c_3.$

4^0. Если $x\to 0$ и y ≠ 0, то

$u(x,y)=O\left(x^{-a_2(0,0)}\right).$

Ниже используются найденные интегральные представления для постановки и решения следующих задач с начальными данными.

Задача A_1. Найти решение системы уравнений (1) из класса $C_2(D)$, удовлетворяющее начальному условию

$$\lim_{x\to 0}\left\{x^{a_2(0,0)}\lim_{y\to 0}u(x,y)\right\}=p_1,$$

где p_1- заданная известная постоянная.

Задача A_2. Найти решение системы уравнений (1) из класса $C_2(D)$, которое удовлетворяет начальному условию

$$\lim_{y\to 0}\left\{y^{b_2(0,0)}\ \lim_{x\to 0}(x^{a_2(0,0)}u(x,y))\right\}=p_2,$$

где p_2- заданная известная постоянная.

Задача A_3. Найти решение системы уравнений (1) из класса $C_2(D)$ по начальному условию

$$\lim_{x\to 0}\left\{x^{a_2(0,0)}\lim_{y\to 0}(y^{b_2(0,0)}u(x,y))\right\}=p_3,$$

где p_3- заданная известная постоянная.

Решение задачи A_1. Чтобы решить задачу A_1 будем использовать интегральные представления (2), (3), (4) и условие задачи A_1. Нетрудно показать, что $c_1 = p_1$.

Таким образом, доказана

Теорема 4. *Предположим, что выполнены все условия теоремы 1. Тогда единственное решение задачи* A_1 *определяется формулами (2), (3), (4), где* $c_1 = p_1$.

Об однозначной разрешимости задач A_2 и A_3 доказаны следующие утверждения

Теорема 5. *Предположим, что коэффициенты и правые части системы уравнений* (1) *удовлетворяют всем условиям теоремы 2. Тогда единственное решение задачи* A_2 *выражается формулами* (5), (6), *где* $c_2 = p_2$.

Теорема 6. *Предположим, что коэффициенты и правые части системы уравнений* (1) *удовлетворяют всем условиям теоремы 3. Тогда единственное решение задачи* A_3 *выражается формулами* (7), (8), *где* $c_3 = p_3$.

Поступило 27.03.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Михайлов Л.Г. Некоторые переопределенные системы дифференциальных уравнений в частных производных с двумя неизвестными функциями. – Душанбе: Дониш, 1986, 115 с.
2. Раджабов, Н. Введение в теорию дифференциальных уравнений в частных производных со сверхсингулярными коэффициентами. – Душанбе: изд. ТГУ, 1992, 236 с.
3. Раджабов Н., Махаммед А.А. Переопределеная линейная система второго порядка с сингулярными и сверхсингулярными линиями. – Lap Lambert Academic Publishing, Germany, 2011, 234 с.
4. Исхоков С.А. Вариационная задача Дирехле для вырождающихся эллиптических уравнений в полупрастанстве. – Доклады РАН, 1995, №2 (345), с. 164-167.
5. Хасанов А.Х. Краевые задачи для обобщенного осесимметрического уравнения Гельмгольца. – Материалы международной научно-практической конференции "Информационное технологии: иновации в науке и образовании", г. Актобе, 2015, с. 242-247.
6. Тасмамбетов Ж.Н. Построение нормальных и нормально-регулярных решений специальных систем дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. – Актобе, 2015, 463 с.
7. Шамсудинов Ф.М. Интегральные представления решений для одной переопределенной системы уравнений второго порядка с сингулярными коэффициентами. Материалы международной конференции "Нелокальные краевые задачи и родственные проблемы математической биологии, информатики и физики". – Нальчик: КБНЦ РАН, 2013, с. 282-286.
8. Шамсуддинов Ф.М. Об одной переопределенной системе дифференциальных уравнений второго порядка с сильной особенностю. – Доклады Адыгской (Черкеской) Международной академии наук, 2014, т.16, №1, с. 40-46.
9. Шамсуддинов Ф.М. Об одной переопределенной системе дифферен-циальных уравнений второго порядка с сингулярной точкой. - Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. Мат. Физ., 2016., №6(37), с. 99-107.
10. Хомиддин С. Об одной переопределенной системе дифференциальных уравнений второго порядка с осбыми коэффициетами. – Вестник филиала Московского университета имени М.В.Ломоносова в городе Душанбе, 2022, с. 32-39.

Ф.М.Шамсуддинов, С.Хомиддин*

ОИД БА ЯК СИСТЕМАИ БАРЗИЁДМУАЙЯНШУДАИ МУОДИЛАҲОИ ДИФФЕРЕНСИАЛИИ ТАРТИБИ ДУЮМ БО КОЭФФИТСИЕНТҲОИ СИНГУЛЯРӢ

Донишгоҳи давлатии Бохтар ба номи Н.Хусрав,

****Академияи идоракунии давлатии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон***

Дар кор тасвирҳои интегралии ҳал барои як системаи барзиёдмуайяншудаи муодилаҳои дифференсиалии тартиби дуюм бо коэффисиентҳои сингулярӣ, бо ёрии як доимии ихтиёрӣ ёфта шудааст. Хосиятҳои тасвирҳои интегралии ҳалҳои ёфташуда омӯхташуда, масъала бо шартҳои аввала дида баромада шудааст.

Калимаҳои калидӣ: *системаи барзиёдмуайяншуда, бисёршаклаи ҳал, росткунҷа, коэффисиенти сингулярӣ, хосиятҳои ҳал, масъала бо шартҳои аввала.*

F.M.Shamsuddinov, S.Khomiddin

ON A REDEFINED SYSTEM OF SECOND-ORDER DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH SINGULAR COEFFICIENTS

Bokhtar State University named after Nosir Khusrav,

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Tajikistan

In the work for one redefined system of second-order differential equations with singular coefficients, representations of the manifold of solutions using one arbitrary constant are obtained. The properties of the obtained solutions are studied, and problems with initial data are considered.

Key words: *overdetermined system, manifolds of solutions, rectangle, singular coefitsients, properties of solutions, a problems with initial data.*

Сведения об авторах:

1. **Шамсудинов Файзулло Мамадуллоевич** – д.ф.-м.н., Бох.ГУ имени Носира Хусрава, профессор кафедры математического анализа и дифференциальных уравнений. E-mail: faizullo100@yahoo.com;
2. **Сайфуллои Хомиддин** – Академия государственного управления при Президенте Республики Таджикистан, старший преподаватель кафедры естественно-научных дисциплин. E-mail: smpk1992@mail.ru.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №6

МАТЕМАТИКА

УДК 519.87
Специальность: 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Р.Н.Одинаев, С.С.Мусоев

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ БАХЧЕВЫХ КУЛЬТУР ОТ ВРЕДИТЕЛЕЙ В АГРОПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Научно-исследовательский институт Таджикского национального университета

(Представлено академиком НАН Таджикистана М.И.Илоловым 23.04.2025 г.)

В статье представлено математическое моделирование защиты бахчевых культур от вредителей в агропроизводственных системах Республики Таджикистан. Рассматривается динамика взаимодействия популяций вредных насекомых и сельскохозяйственных растений с учётом адаптивного поведения вредителей. На основе экспоненциальных функций насыщения и дифференциальных уравнений предложена модель, позволяющая прогнозировать эффективность различных стратегий защиты урожая. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации систем защиты бахчевых культур в условиях Таджикистана, снижения экономических потерь и минимизации экологического ущерба.

Ключевые слова: *математическое моделирование, бахчевые культуры, защита растений, вредители, адаптивное поведение, агропроизводственные системы.*

Введение. Математическое моделирование является важным инструментом для оптимизации процессов в агропроизводственных системах, позволяя эффективно решать задачи прогнозирования, планирования и управления производственными процессами. Одной из актуальных проблем агропроизводства Республики Таджикистан является защита бахчевых культур от вредителей, что имеет значительное влияние на урожайность и качество продукции. Бахчевые культуры, являются важными сельскохозяйственными культурами, с которых работники сельского хозяйства получают значительную часть своих доходов. В последние десятилетия наблюдается рост численности вредителей, что требует разработки эффективных методов защиты, в том числе с применением математических моделей.

Математическое моделирование позволяет исследовать взаимодействие между различными компонентами агроэкосистемы, учитывать влияние климатических факторов, агротехнических мероприятий и эффективности применения средств защиты растений. В данной статье будет представлено математическое моделирование защиты бахчевых культур от вредителей в агропроизводственных системах Республики Таджикистан на примере арбуза, дыни и тыквы. В отличие от хлопководства и

Адрес для корреспонденции: *Одинаев Раим Назарович, Мусоев Сухайли Сайвалиевич. 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17. E-mail: raim_odinaev@mail.ru, suhaily94@mail.ru.*

других традиционных сельскохозяйственных культур, возделывание бахчевых (таких как дыни, арбузы и тыквы) имеет ряд особенностей, связанных с биологией растений, уязвимостью к специфическим вредителям и агротехническими методами защиты. В то время как хлопчатник требует интенсивного применения химических средств защиты из-за высокой подверженности вредителям (например, хлопковой совке), бахчевые культуры обладают большей адаптивностью к местным условиям, но при этом сильнее страдают от почвенных вредителей и болезней, распространяемых насекомыми. Преимущества бахчеводства включают более короткий вегетационный период, меньшую зависимость от орошения (по сравнению с хлопком) и высокую рентабельность на внутреннем и экспортном рынках. Однако эффективная защита этих культур требует разработки специализированных математических моделей, учитывающих их специфику, что и является целью данного исследования.

Бахчевые культуры являются одними из самых широко распространенных и востребованных сельскохозяйственных культур, выращиваемых человеком. Их способность давать высокие урожаи в засушливых районах, где другие растения трудно культивировать, обеспечила им большую популярность и экономическое значение. Сегодня бахчевые культуры возделываются в более чем 130 странах мира, а общая площадь их посевов превышает 3.5 миллиона гектаров, при этом средняя урожайность составляет 29.3 тонны с гектара. Стоит отметить, что во всем мире наблюдается стабильный рост показателей производства бахчевых культур. За последние два десятилетия мировое потребление бахчевых культур, овощей и фруктов увеличивается в среднем на 5-7% ежегодно. Республика Таджикистан не только полностью покрывает внутренние потребности в этих продуктах, но и активно занимается их экспортом, что подтверждает наличие большого потенциала в агропроизводственном секторе страны.

Для более глубокого понимания воздействия вредителей на бахчевые культуры и методов их контроля, важно рассмотреть как роль вредных, так и полезных насекомых в агроэкосистемах. Вредные насекомые, такие как бахчевая коровка и листоеды, могут существенно ухудшать здоровье растений, снижая их фотосинтетическую активность и качество плодов. Однако, в экосистемах, где предусмотрено правильное взаимодействие с природными врагами вредителей, полезные насекомые, такие как божьи коровки и пауки, могут эффективно регулировать их численность. Это, в свою очередь, помогает снизить потребность в химических обработках, что делает систему более устойчивой и экологически безопасной.

Чтобы более точно прогнозировать и управлять численностью вредных насекомых, эффективным инструментом является математическое моделирование, которое позволяет учитывать динамику численности, как вредителей, так и полезных насекомых в агроценозах.

Защита бахчевых культур от вредителей является важной задачей в агропроизводстве, особенно в условиях Республики Таджикистан. В последние десятилетия наблюдается рост численности вредителей, что вызывает значительные потери урожая и снижение качества продукции. Для решения этой проблемы активно исследуются различные методы защиты, включая химические, биологические и агротехнические подходы.

Г.И.Баздырев в своих работах подчеркивает важность интегрированной защиты растений, сочетающей химические, биологические и агротехнические методы, что способствует повышению

устойчивости культур и снижению воздействия химических веществ на окружающую среду [1]. Для биологического контроля активно используются природные враги вредителей, такие как божьи коровки. Как показывают исследования, в Северном Узбекистане массовое распространение таких вредителей, как белокрылка *(Bemisia tabaci Genn.)* и дынная муха *(Carpomya pardalina Bigot)*, приводит к значительным потерям урожая бахчевых культур – до 90–95% [2]. Аналогичные проблемы наблюдаются и в агросистемах Республики Таджикистан, что требует разработки адаптивных моделей защиты.

В соответствии с работой Т.А.Ахмедова [3], актуальной задачей аграрной науки в условиях орошаемого земледелия Таджикистана является разработка технологий для получения стабильного, высококачественного и экологически чистого урожая овощных и бахчевых культур, независимо от погодных условий и организационно-хозяйственных факторов. В работе И.И.Исмаилова отмечается, что обработка почвы является важным этапом в возделывании бахчевых культур, и ее эффективность зависит от соблюдения сроков и качества работ. Современные технологии не обеспечивают подготовку почвы к посеву в оптимальные сроки, что снижает урожайность [4,5].

Математическое моделирование защиты бахчевых культур

В современных агроэкосистемах, где вредоносные насекомые представляют серьёзную угрозу урожайности бахчевых культур, применение математического моделирования позволяет прогнозировать динамику их популяций и оптимизировать стратегии защиты. Предлагаемая модель описывает взаимодействие между растениями (бахчевыми культурами), вредителями и их естественными врагами (энтомофагами), учитывая ключевые биологические процессы: размножение, трофические взаимодействия и естественную смертность.

Математическая модель защиты бахчевых культур задаётся системой дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \dfrac{dN_0}{dt} = Q - \alpha_0 N_0 N_1, \;\; N_i\big|_{t=0} = N_i^0, \;\; i = \overline{0,3}, \\ \dfrac{dN_1}{dt} = k_0 \alpha_0 N_0 - \alpha_1 N_1 N_2 - m_1 N_1, \\ \dfrac{dN_2}{dt} = k_1 \alpha_1 N_1 \left(1 - e^{-\lambda_1 N_2}\right) - \alpha_2 N_2 N_3 \left(1 - e^{-\lambda_2 N_2}\right) - m_2 N_2, \\ \dfrac{dN_3}{dt} = k_2 \alpha_2 N_2 \left(1 - e^{-\lambda_3 N_2}\right) - \varepsilon N_3 - m_3 N_3, \end{cases} \tag{1}$$

где $N_0(t)$ – внешний ресурс (вода, питательные вещества) в момент времени *t*. $N_1(t)$ – биомасса бахчевых культур в момент времени *t*, $N_2(t)$ – численность вредителей в момент времени *t*, $N_3(t)$ – численность полезных насекомых в момент времени t, Q – скорость поступления внешнего ресурса, α_0 – коэффициент потребления ресурса растениями, k_0 – коэффициент преобразования ресурса в биомассу культур, α_1 – скорость уничтожения растений вредителями, k_1 – скорость размножения вредителей, α_2 – скорость уничтожения вредителей полезными насекомыми, k_2 – скорость размножения полезных насекомых, m_1, m_2, m_3 – естественная смертность растений, вредителей, хищников

соответственно, ε – потери численности полезных насекомых из-за нехватки пищи, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коэффициенты насыщения для адаптивного поведения насекомых. Функция $1-e^{-\lambda_i N_2}$, $i=\overline{1,3}$ – это экспоненциальная функция насыщения, которая характеризует адаптивное поведение вредных насекомых. Учёт адаптивного поведения позволяет отразить более реалистичную модель взаимодействия видов в биологической системе. Эта модификация выделяет модель среди классических экосистем Вольтеры и делает её применимой для прогнозирования оптимальных стратегий защиты бахчевых культур.

Определение. Средней биомассой биологических видов в момент времени τ назовём величину:

$$N_i^\tau = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau N_i(\xi)d\xi\,,\ \tau>0,\ i=1,2,3. \tag{2}$$

где N_1^τ – средняя биомасса бахчевых культур (дынь, арбузов, тыкв), N_2^τ – средняя биомасса вредителей бахчевых культур, N_3^τ – средняя биомасса полезных насекомых.

Для модельного агроценоза бахчевых культур, описываемого системой (1), сформулируем следующие условия:

Требование к урожайности бахчевых культур: средняя биомасса бахчевых культур N_1^τ должна достигать заданного уровня N_1^p, обеспечивающего экономически значимую урожайность, то есть

$$N_1^\tau \geq N_1^p,\quad N_1^p \in \left[N_1^{\min},\ N_1^{\max}\right], \tag{3}$$

где $N_1^{\min}$, $N_1^{\max}$ – минимально допустимый и максимально возможный уровни биомассы бахчевых культур.

Условия регуляции вредителей и энтомофагов для бахчевых культур: средняя биомасса вредителей N_2^τ не должна превышать критического значения:

$$N_2^\tau \leq N_2^p. \tag{4}$$

Средняя биомасса полезных насекомых N_3^τ должна поддерживаться на уровне, достаточном для подавления вредителей бахчевых культур:

$$N_3^\tau \geq N_3^p. \tag{5}$$

N_1^p – плановый показатель урожайности бахчевых культур, N_2^p – порог вредоносности вредителей, N_3^p – уровень эффективности энтомофагов.

Теорема. *Пусть динамика агроценоза бахчевых культур описывается системой дифференциальных уравнений (1). Тогда для выполнения целевого условия защиты бахчевых культур* $N_1^\tau \geq N_1^p$, $N_1^p \in \left[N_1^{\min},\ N_1^{\max}\right]$, *необходимо и достаточно, чтобы выполнялись следующие неравенства:*

$$\begin{cases} N_0(t) \le \dfrac{Q}{\alpha_0 N_1^P}, \\ N_2^\tau \le N_2^p, \;\; N_2^p = \dfrac{1}{\alpha_1 \tau} \ln \dfrac{N_1(\tau)}{N_1(0)} \left(\dfrac{k_0 Q}{N_1^P} - 1 \right) - \dfrac{m_1}{\alpha_1}, \\ N_3^\tau \le N_3^p, \;\; N_3^p = \dfrac{k_1 \alpha_1 \lambda_1}{\alpha_2 \tau \lambda_2} N_1^P - \dfrac{m_2}{\lambda_2} - \dfrac{1}{\lambda_2 \tau} \ln \dfrac{N_2(\tau)}{N_2(0)}. \end{cases} \tag{6}$$

Необходимость. Пусть имеет место условие теоремы

$$N_1^\tau \ge N_1^p, \;\; N_1^p \in \left[N_1^{\min}, N_1^{\max} \right].$$

В силу первого уравнения системы (1) имеем:

$$\frac{dN_0}{dt} = Q - \alpha_0 N_0 N_1$$

$$N_0(t) = N_0(0) \exp(-\alpha_0 \int_0^\tau N_1(\xi) d\xi) + Q \int_0^t \exp(-\alpha_0 \int_\tau^t N_1(\xi) d\xi) d\tau \le$$

$$\le \left[N_0(0) - \frac{Q}{\alpha_0 N_0^p} \right] \exp(-\alpha_0 N_1^t) + \frac{Q}{\alpha_0 N_0^p} \le \frac{Q}{\alpha_0 N_0^p}.$$

Используя второе уравнение системы (1), докажем второе неравенство системы (6).

$$\frac{dN_1}{dt} = k_0 \alpha_0 N_0 - \alpha_1 N_1 N_2 - m_1 N_1, \;\; \left(N_0(t) \le \frac{Q}{\alpha_0 N_1^P} \right)$$

$$\alpha_1 N_1 N_2 \le \frac{k_0 Q}{N_1^P} - m_1 N_1 - \frac{dN_1}{dt},$$

Обе стороны неравенства делим на N_1 и получим:

$$N_2 \le \frac{k_0 Q}{\alpha_1 N_1 N_1^P} - \frac{m_1 N_1}{\alpha_1 N_1} - \frac{1}{\alpha_1 N_1} \frac{dN_1}{dt},$$

Проинтегрируем последнее неравенство по *t* от 0 до τ :

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau N_2(t) dt \le \frac{k_0 Q}{\alpha_1 N_1^P} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{dt}{N_1(t)} - \frac{m_1}{\alpha_1 \tau} \int_0^\tau dt - \frac{1}{\alpha_1 \tau} \int_0^\tau \frac{1}{N_1(t)} \frac{dN_1}{dt} dt,$$

$$N_2^\tau \le \frac{k_0 Q}{\alpha_1 \tau N_1^P} \frac{\ln N_1(\tau)}{N_1(0)} - \frac{m_1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_1 \tau} \ln \frac{N_1(\tau)}{N_1(0)},$$

$$N_2^\tau \le \frac{1}{\alpha_1 \tau} \ln \frac{N_1(\tau)}{N_1(0)} \left(\frac{k_0 Q}{N_1^P} - 1 \right) - \frac{m_1}{\alpha_1} = N_2^P,$$

следовательно, $N_2^{\tau} \le N_2^{p}$.

Используя третье уравнение системы (1), докажем третье неравенство системы (6).

$$\frac{dN_2}{dt} = k_1\alpha_1 N_1\left(1-e^{-\lambda_1 N_2}\right) - \alpha_2 N_2 N_3\left(1-e^{-\lambda_2 N_2}\right) - m_2 N_2,$$

используем линеаризацию

$$1-e^{-\lambda_1 N_2} \approx \lambda_1 N_2,\ 1-e^{-\lambda_2 N_2} \approx \lambda_2 N_2,$$

тогда

$$\frac{dN_2}{dt} = k_1\alpha_1 N_1\lambda_1 N_2 - \alpha_2 N_3\lambda_2 N_2 - m_2 N_2.$$

Обе стороны уравнения разделим на N_2 и получим:

$$\frac{1}{N_2}\frac{dN_2}{dt} = k_1\alpha_1 N_1\lambda_1 - \alpha_2 N_3\lambda_2 - m_2$$

$$N_3 \ge \frac{k_1\alpha_1\lambda_1 N_1}{\alpha_2\lambda_2} - \frac{m_2}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2}\frac{dN_2}{N_2 dt}$$

Проинтегрируем последнее неравенство по *t* от 0 до τ :

$$\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} N_3(t)\,dt \ge \frac{k_1\alpha_1\lambda_1}{\alpha_2\lambda_2}N_1^{P}\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} dt - \frac{m_2}{\lambda_2}\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} dt - \frac{1}{\lambda_2}\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau}\frac{dN_2}{N_2 dt}dt,$$

$$N_3^{\tau} = \frac{k_1\alpha_1\lambda_1}{\alpha_2\tau\lambda_2}N_1^{P} - \frac{m_2}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2\tau}\ln\frac{N_2(\tau)}{N_2(0)} = N_3^{P},$$

$$N_3^{\tau} \ge N_3^{P}.$$

Теперь оценим $maxN_3$.

Из четвёртого уравнения системы (1) имеем:

$$\frac{dN_3}{dt} = k_2\alpha_2 N_2\left(1-e^{-\lambda_3 N_2}\right) - \varepsilon N_3 - m_3 N_3,\quad N_3(0) = N_3^0,$$

$$1-e^{-\lambda_3 N2} \approx \lambda_3 N_2,$$

$$\frac{dN_3}{dt} = k_2\alpha_2\lambda_3 N_2^2 - (\varepsilon + m_3)N_3.$$

Это линейное дифференциальное уравнение первого порядка. Решаем его с использованием интегрирующего множителя:

$$\mu(t) = e^{(\varepsilon+m_3)t}$$

Умножаем обе стороны на $\mu(t)$

$$e^{(\varepsilon+m_3)t}\frac{dN_3}{dt} + (\varepsilon+m_3)e^{(\varepsilon+m_3)t}N_3 = k_2\alpha_2\lambda_3 N_2^2 e^{(\varepsilon+m_3)t}.$$

Левая часть является производной от $N_3 e^{(\varepsilon+m)t}$:

$$\frac{d}{dt}N_3\left({}^{(\varepsilon+m)t}\right) = k_2\alpha_2\lambda_3 N_2^2 e^{(\varepsilon+m_3)t}$$

Интегрируем обе стороны

$$N_3 e^{(\varepsilon+m)t} = \frac{k_2\alpha_2\lambda_3 N_2^2}{\varepsilon+m_3}e^{(\varepsilon+m)t} + C$$

Используем начальное условие для нахождения *C*:

$$N_3^0 = \frac{k_2\alpha_2\lambda_3 N_2^2}{\varepsilon+m_3} + C \Rightarrow C = N_3^0 - \frac{k_2\alpha_2\lambda_3 N_2^2}{\varepsilon+m_3}$$

Таким образом, получим:

$$N_3(t) = \frac{k_2\alpha_2\lambda_3 N_2^2}{\varepsilon+m_3}\left(1-e^{-(\varepsilon+m_3)t}\right) + N_3^0 e^{-(\varepsilon+m_3)t}$$

Достаточность. Пусть неравенства системы (6) выполняются.

Докажем, что $N_1^\tau \geq N_1^p, \quad N_1^p \in \left[N_1^{\min}, N_1^{\max}\right]$.

Из первого уравнения (1) имеем

$$\frac{dN_0}{dt} = Q - \alpha_0 N_0 N_1 \geq Q - \alpha_0 N_0 \frac{Q}{\alpha_0 N_1^p}, \quad \frac{Q}{N_1^p}N_1 \geq Q - \frac{dN_0}{dt},$$

Интегрируя по *t* от 0 до τ получим:

$$\frac{QN_1^\tau}{N_1^p} \geq Q + \frac{1}{\tau}\left[N_0(0) - N_0(\tau)\right] \geq Q + \frac{1}{\tau}\left[N_0(0) - \frac{Q}{\alpha_0 N_1^p}\right] = Q,$$

Следовательно, $N_1^\tau \geq N_1^p$. Так как $N_2^p, N_3^p - const > 0,$ имеет место $N_1^p \in \left[N_1^{\min}, N_1^{\max}\right]$.

Заключение. Разработанная модель защиты бахчевых культур от вредителей на основе математического моделирования может быть использована для оптимизации методов защиты растений в агропроизводственных системах Республики Таджикистан.

Поступило 23.04.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Баздырев Г.И, Третьяков Н.Н, Белошапкина О.О. Интегрированная защита растений от вредных организмов. – Учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2014, 302 с.
2. Торениязов Е.Ш., Кутлымуратов А.М., Тохтабаев Р.З. Опасные вредители бахчевых культур. – Защита и карантин растений, 2011, №8, с. 49-50.
3. Ахмедов Т.А. Оптимизация минерального питания, продуктивности и качества бахчевых и овощных культур в Таджикистане – Дисс…. доктора с.-х. наук: Душанбе, 2004, 308 с.
4. Исмаилов И.И., Алдошин Н.В. Разработка технологии подготовки почвы к посеву бахчевых культур – Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина», 2018, №6, с. 17-23.
5. Исмаилов И.И., Алдошин Н.В. Обоснование технологических приемов подготовки почвы при возделывании бахчевых культур. – Доклады ТСХА: Сборник статей. Вып. 291, ч. II. - М.: Изд-во: РГАУ – МСХА, 2019, с. 364-366.
6. Одинаев Р.Н. Необходимое и достаточное условие существования решения задачи защиты растений. – ДАН РТ, 2015, т. 58, №10, с. 879-886. – EDN: XTLGRV.
7. Одинаев Р.Н., Нарзуллоев П.Л., Ғафоров А.Б. Моделсозии компютерии масъалаи муҳофизати растанӣ бо назардошти сину сол ва тақсимоти фазоӣ бо дилхоҳ функсияҳои графикӣ [Матн] – Паёми Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. Бахши илмҳои табиӣ, 2020, №2, с. 19-25. EDN: PZDDGD.
8. Одинаев Р. Н. Математическая модель задачи защиты растений в биосистеме типа "вредные насекомые – полезные насекомые" с произвольными трофическими функциями. – Системы и средства информатики, 2019, т.29, №1, с. 96-108. – DOI 10.14357/08696527190109. – EDN BDQEJR.
9. Одинаев Р.Н., Назруллоев П.Л., Раимзода Ф. Оптимизационный процесс интегрированного метода защиты растений для точечных моделей. – Системы и средства информатики, 2021, т.32, №4, с. 134-144. – DOI: 10.14357/08696527220413 – EDN: UBHFTL.

Р.Н.Одинаев, С.С.Мусоев

МОДЕЛСОЗИИ МАТЕМАТИКИИ МУҲОФИЗАТИ ЗИРОАТҲОИ ПОЛЕЗӢ АЗ ҲАШАРОТИ ЗАРАРРАСОН ДАР СИСТЕМАҲОИ ИСТЕҲСОЛИИ ХОҶАГИИ ҚИШЛОҚИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Институти илмию таҳқиқотии Донишгоҳи миллии Тоҷикистон

Дар мақола модели математикии муҳофизати зироатҳои полезӣ аз ҳашароти зараррасон дар системаҳои истеҳсолии хаҷагии қишлоқи Ҷумҳурии Тоҷикистон оварда шудааст. Динамикаи боҳамтаъсиррасони популятсияҳои ҳашароти зараровар ва растаниҳои кишоварзӣ бо назардошти рафтори мутобиқшавии ҳашаротҳои зараррасон баррасӣ карда мешавад. Дар асоси функсияҳои экспоненсиалии сершавӣ ва муодилаҳои дифференсиалӣ моделе пешниҳод карда шудааст, ки ба пешгӯии самаранокии стратегияҳои гуногуни ҳифзи ҳосил имкон медиҳад. Натиҷаҳои таҳқиқот метавонанд барои оптимизатсияи системаҳои муҳофизати зироатҳои полезӣ дар шароити Тоҷикистон, кам кардани талафоти иқтисодӣ ва кам кардани зарари экологӣ истифода шаванд.

Калимаҳои калидӣ: *моделсозии математикӣ, зироатҳои полезӣ, ҳифзи растаниҳо, ҳашароти зараррасон, рафтори мутобиқшавӣ, системаҳои истеҳсолии хаҷагии қишлоқ.*

R.N.Odinaev, S.S.Musoev

MATHEMATICAL MODELING OF PROTECTION OF MELON CROPS FROM PESTS IN AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS OF THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

Research Institute, Tajik National University

The article presents mathematical modeling of the protection of melon crops from pests in agricultural production systems of the Republic of Tajikistan. The dynamics of interaction between populations of harmful insects and agricultural plants is considered, taking into account the adaptive behavior of pests. Based on exponential saturation functions and differential equations, a model is proposed that makes it possible to predict the effectiveness of various crop protection strategies. The results of the study can be used to optimize melon crop protection systems in Tajikistan, reduce economic losses and minimize environmental damage.

Key words: *mathematical modeling, melon crops, plant protection, pests, adaptive behavior, agricultural production systems.*

Сведения об авторах:

1. **Одинаев Раим Назарович** – доктор физико-математических наук, профессор, Научно-исследовательский институт Таджикского национального университета, директор. E-mail: raim_odinaev@mail.ru;
2. **Мусоев Сухайли Сайвалиевич** – Таджикский национальный университет, ассистент кафедры информационные и коммуникационные технологии механико-математического факультета. E-mail: suhaily94@mail.ru.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 551.555.4
Специальность: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Член-корреспондент НАН Таджикистана У.Мадвалиев,
Н.И.Усмонзода[*], А.Р.Рустамзода, М.А.Кудусов

ОЦЕНКА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В ТАДЖИКИСТАНЕ ПО ДАННЫМ METAR

Национальная академия наук Таджикистана,
Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана,
[*]Худжандский государственный университет имени академика Б.Гафурова

Данная работа посвящена комплексной оценке сезонных характеристик приземной скорости ветра на территории аэропорта Худжанд (Таджикистан) с использованием алгоритма обработки данных METAR. Расчёт проведён методом экстраполяции скорости ветра на высоте ступицы восьми типов ветрогенераторов, выполнена аппроксимация эмпирических данных распределениями Вейбулла, логнормальным и гамма-распределением. На основе подогнанных распределений вычислены сезонные и среднегодовые коэффициенты использования, интегральная плотность мощности, а также приведённая стоимость выработки электроэнергии. Представлены доверительные интервалы мощности, проведён анализ чувствительности к шероховатости подстилающей поверхности. Полученные результаты свидетельствуют о том, что ветроэнергетический ресурс данного региона (≤200 Вт/м²) относится к низкому классу потенциала ветра.

Ключевые слова: *скорость ветра, распределение Вейбулла, плотность мощности, коэффициент использования, чувствительность к шероховатости, METAR, Таджикистан.*

Глобальный переход к низкоуглеродной экономике становится определяющим вектором развития энергетики XXI века, обусловленным необходимостью смягчения последствий изменения климата, обеспечения устойчивого роста и повышения энергетической безопасности. Одним из ключевых направлений данного перехода выступает ветровая энергетика. По данным Global Wind Energy Council, в 2023 году установленная мощность ветровой генерации превысила 1 ТВт, обеспечивая около 7.8 % мирового потребления электроэнергии [1].

Особенно интенсивно развитие ветроэнергетики наблюдается в развивающихся странах, где она способствует диверсификации источников энергии, снижению зависимости от импорта топлива и расширению доступа к энергии в отдалённых районах [2-3]. Вместе с тем, практическая реализация ветровых проектов в таких регионах сталкивается с рядом ограничений, включая высокую стоимость предварительных измерений, необходимость долгосрочного мониторинга и нехватку инфраструктуры. Традиционно для оценки ветрового ресурса применяются данные анемометрических мачт или

Адрес для корреспонденции: *Мадвалиев Умархон. 734024, Таджикистан, 734063, Душанбе, проспект Айни, 299/1, Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана. E-mail: umarkhon@mail.ru.*

лида́рных систем, однако их использование в условиях Центральной Азии сопряжено с существенными техническими и экономическими трудностями.

Таджикистан, расположенный в Центральной Азии, является примером страны с высоким потенциалом возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [4]. Однако в последние годы становится очевидной потребность в диверсификации энергобаланса: генерация ГЭС подвержена сезонным колебаниям, а доступ к энергии в ряде регионов ограничен [5]. В рамках стратегии устойчивого развития поставлены цели по увеличению доли ВИЭ до 10% к 2030 году [6], но ветровая энергетика в республике остаётся слабо изученной.

Существующие научные исследования по ветровой энергетике в регионе преимущественно охватывают территории Узбекистана, Казахстана и Туркменистана. Так, в работе [7] проведён технический и экономический анализ потенциала ветра в Узбекистане на основе данных метеостанций. Анализ ограничен временным масштабом сроком один год и использует только распределение Вейбулла, без применения формальных методов оценки качества подгонки. В исследовании [8] оценивается ветровой ресурс Туркменистана на основе данных реанализа ERA5, однако также отсутствует анализ сезонности и альтернативных моделей распределения.

В отличие от вышеуказанных исследований, охватывающих страны Центральной Азии, в Таджикистане впервые была реализована комплексная оценка ветрового потенциала с использованием мультикритериального подхода, сочетающего геоинформационный анализ, картографию ресурсов и технико-экономические ограничения. Согласно результатам этого исследования, технический ветровой потенциал Таджикистана составляет 15 557 МВт, а экономически обоснованный — 4 485 МВт [4]. Методология включает интеграцию данных Глобального атласа ветра, фильтрацию территорий по уклону, высоте, доступности и эколого-правовым ограничениям, а также учёт коэффициента мощности (CF) на уровне не ниже 35%. Основные перспективные зоны для развития ветроэнергетики выявлены в Согдийской и Хатлонской областях, а также в ограниченном масштабе — в районах республиканского подчинения. Данные значительно уточняют предыдущие, более условные оценки, в которых ветровой потенциал Таджикистана определялся на основе теоретических допущений без пространственной детализации и без применения методов валидации плотности ресурса. Впервые была осуществлена формализация зональной классификации ветрового ресурса с учётом реальных инженерных ограничений, что позволяет использовать полученные данные для стратегического планирования и инвестиционного анализа в секторе ВИЭ.

В то же время данные METAR (Meteorological Aerodrome Reports), представляющие собой стандартизированные почасовые метеорологические сводки, регулярно публикуемые аэропортами, остаются недооценёнными в контексте ветроэнергетики. Их потенциал продемонстрирован в ряде зарубежных работ. Так, в [9] описано применение METAR для оценки ветрового ресурса в удалённых районах Канады, а в [10] – возможность восстановления параметров ветра на основе аэропортов США. Несмотря на это, в Центральной Азии отсутствуют исследования, систематически использующие METAR-данные для анализа потенциала ветра.

Кроме того, большинство существующих работ игнорирует важный практический аспект – потенциал маломощных турбин (до 100 кВт), особенно актуальных для децентрализованных решений в

горных или труднодоступных районах. Не менее значимо и отсутствие анализа сезонной и суточной изменчивости ветрового ресурса, что крайне важно для планирования гибридных решений на базе ВИЭ.

В этих условиях возникает необходимость в проведении комплексного анализа ветрового потенциала на основе доступных источников данных. Цель настоящего исследования – восполнение этого пробела путём оценки ветрового ресурса в районе аэропорта Худжанд (Таджикистан) с использованием архивных METAR-данных.

Задачи включают:

- обработку и статистическое моделирование данных о скорости ветра;
- сравнение распределений Вейбулла, логнормального и гамма-распределения с применением КС-теста;
- расчёт коэффициента использования мощности (CF) и приведённой стоимости энергии (LCOE) для восьми турбин различной мощности;
- анализ сезонной и почасовой изменчивости ветровой генерации;
- оценку чувствительности модели к параметру шероховатости поверхности;
- обоснование применимости подхода к другим регионам с ограниченной инфраструктурой мониторинга.

Настоящее исследование предлагает универсальный подход для оценки ветрового потенциала в условиях ограниченного доступа к специализированным измерениям.

Материалы и методы

В настоящем исследовании была разработана методика оценки сезонной и экономической эффективности ветроэнергетических установок на основе многолетних метеорологических данных формата METAR, с фокусом на аэропорт Худжанд (Таджикистан). В качестве исходных данных использовались погодные наблюдения, включающие скорость ветра в узлах, температуру воздуха, атмосферное давление и временные метки в формате UTC. Рассматривался десятилетний период наиболее актуальных наблюдений.

Перед обработкой данные были очищены от недостоверных значений: символы «M» заменялись на пропуски, следовые значения «T» – на случайные величины в диапазоне от 0 до 0.5 узлов, а пропущенные значения заполнялись с помощью линейной интерполяции. Скорости ветра переводились в метры в секунду по формуле:

$$\vartheta_{\frac{м}{с}} = \vartheta_{узлы} \times 0.51444$$

При этом значения, превышающие 50 м/с, исключались как физически маловероятные. Плотность воздуха из-за отсутствия температурных и барометрических данных принималась по умолчанию ρ=1.2 кг/м^3. Для моделирования ветрового режима на высотах ступиц турбин была проведена экстраполяция скоростей ветра с измеренной высоты 10 м к расчётной высоте с использованием логарифмического профиля:

$$\vartheta(h) = \vartheta(h_{изм}) \cdot \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{изм}}{z_0}\right)}$$

где z_0= 0.03 м – длина шероховатости поверхности. В расчетах использовались восемь моделей турбин (табл. 1), охватывающих широкий диапазон установленных мощностей (от 10 до 2300 кВт) и высот установки (от 20 до 100 м).

Таблица 1

Технические параметры ветровых турбин

Турбина	$P_{ном}$ (кВт)	$\vartheta_{вкл}$, м/с	$\vartheta_{откл,}$ м/с	$\vartheta_{откл}$, м/с	Высота ступицы (м)	Кап. затраты (USD)	Опер. затраты (USD/год)
Малая турбина 1	10	2.0	10.0	20.0	20	20 000	1 000
Малая турбина 2	50	2.5	11.0	22.0	30	80 000	3 000
Малая турбина 3	100	3.0	12.0	25.0	40	150 000	5 000
Enercon E-33	330	2.5	12.0	25.0	65	500 000	20 000
Vestas V47	660	3.5	13.0	25.0	60	800 000	30 000
Vestas V52	850	4.0	14.0	25.0	80	1 000 000	40 000
GE 1.5sl	1500	3.0	12.5	25.0	80	1 500 000	50 000
Siemens 2.3-93	2300	3.5	13.0	25.0	100	2 000 000	60 000

Для каждой ветротурбины задавались следующие параметры: скорость запуска, номинальная скорость ветра и скорость останова. Мощностная характеристика турбины моделировалась в виде кусочно-линейной кривой, отражающей поведение установки в различных режимах работы — от пуска до номинальной генерации и последующего отключения при высоких скоростях ветра.

$$P(\vartheta) = \begin{cases} 0, \vartheta < \vartheta_{\text{вкл}} \text{ или } \vartheta \geq \vartheta_{\text{откл,}} \\ P_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{\vartheta - \vartheta_{\text{вкл}}}{\vartheta_{\text{ном}} - \vartheta_{\text{вкл}}}\right)^3, \vartheta_{\text{вкл}} \leq \vartheta < \vartheta_{\text{ном}} \\ P_{\text{ном}}\ \vartheta_{\text{ном}} \leq \vartheta < \vartheta_{\text{откл}} \end{cases}$$

Для оценки статистических характеристик скорости ветра по сезонам использовались три распределения: Вейбулла, логнормальное и гамма-распределение. Подбор параметров осуществлялся методом максимального правдоподобия, а качество аппроксимации проверялось с помощью критерия Колмогорова–Смирнова и информационного критерия Акаике:

$$AIC = 2k - 2\ln(L)$$

Удаление выбросов проводилось по правилу межквартильного размаха:

$$x > Q_3 + 1.5 \cdot (Q_3 - Q_1)$$

Средняя выходная мощность за сезон рассчитывалась путём интегрирования кривой мощности по плотности распределения Вейбулла:

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(\vartheta) \cdot f(\vartheta; c; \lambda) d\vartheta$$

Полученное значение средней мощности использовалось для расчёта коэффициента использования установленной мощности:

$$CF = \frac{\bar{P}}{P_{\text{ном}}}$$

Для оценки ресурса ветра вычислялась его удельная энергетическая плотность (Вт/м²):

$$PD(\vartheta) = \frac{1}{2}\rho\vartheta^3 f(\vartheta)$$

Для оценки доверительного интервала плотности мощности использовался бутстрэп-анализ (100 реализаций), в ходе которого вычислялись 2,5% и 97,5% квантили. Для оценки устойчивости результатов был проведён анализ чувствительности CF к изменению длины шероховатости z_0 в диапазоне от 0,01 до 0,1 м.

Экономическая эффективность оценивалась с помощью приведённой стоимости электроэнергии, рассчитываемой по формуле:

$$\text{LCOE} = \frac{C_{кап} + \sum_{t=1}^{T} \frac{C_{оп}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{T} E_t}$$

где $C_{кап}$ и $C_{оп}$ – капитальные и операционные затраты, r =0.05 – ставка дисконтирования, T=20 лет, $E_t = P_{\text{ном}} \cdot 8760 \cdot CF$ – годовой объём генерации электроэнергии.

Данная методика учитывает как физические, так и статистические и экономические аспекты работы ветровых установок, обеспечивая комплексную оценку потенциала ветроэнергетики в условиях континентального климата.

Р е з у л ь т а т ы

В рамках проведённого исследования были получены численные и визуальные результаты, отражающие сезонную и годовую изменчивость ветрового потенциала аэропорта Худжанд, эффективность различных моделей турбин, пригодность статистических распределений и экономические параметры генерации электроэнергии. Анализ пригодности статистических распределений скорости ветра показал, что модель Вейбулла обладает наилучшим соответствием эмпирическим данным, что подтверждается минимальными значениями статистики Колмогорова–Смирнова (до 0.095). Эти результаты согласуются с выводами [11, 12, 13] о применимости распределения Вейбулла для оценки ветрового потенциала в широком спектре климатических условий.

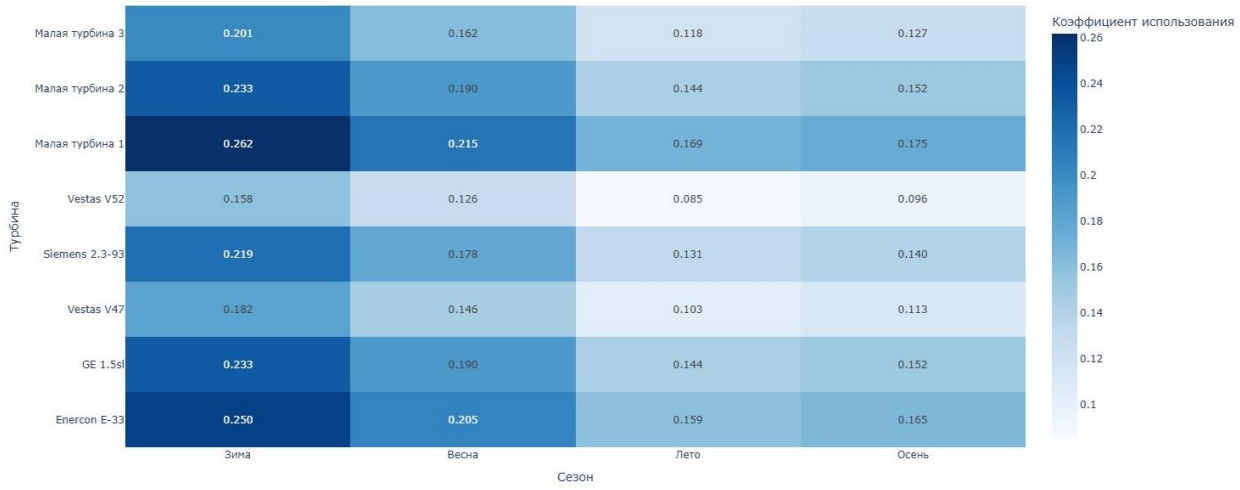


Рис. 1. Сезонный коэффициент использования установленной мощности по турбинам.

Полученные значения CF демонстрируют ярко выраженную сезонную изменчивость. Наибольшая эффективность достигается зимой и весной. Среди крупных турбин выделяются Enercon E-33 (CF=0.250 зимой) и GE 1.5sl (CF=0.233). Среди малых установок лидирует Малая турбина 1 (CF=0.262 зимой), что обусловлено низкой скоростью включения (2.0 м/с) и адаптацией к слабым ветрам. Это согласуется с результатами Tummala et al. [14], согласно которым малые ВЭУ более устойчивы к ветровой нестабильности в горных районах.

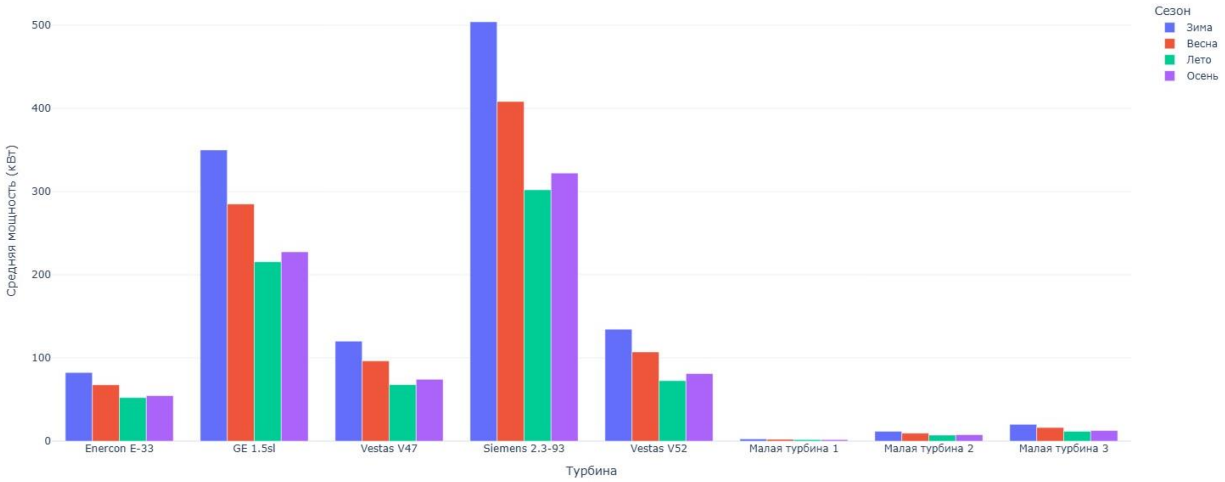


Рис. 2. Средняя мощность турбин по сезонам.

Абсолютные значения выходной мощности наиболее высоки у Siemens 2.3-93 и GE 1.5sl в зимний сезон (до 500 кВт). Однако с точки зрения эффективности использования установленной мощности, малые турбины, такие как Малая турбина 1 и Vestas V52, показывают конкурентоспособные результаты, что делает их перспективными для применения в распределённой генерации.

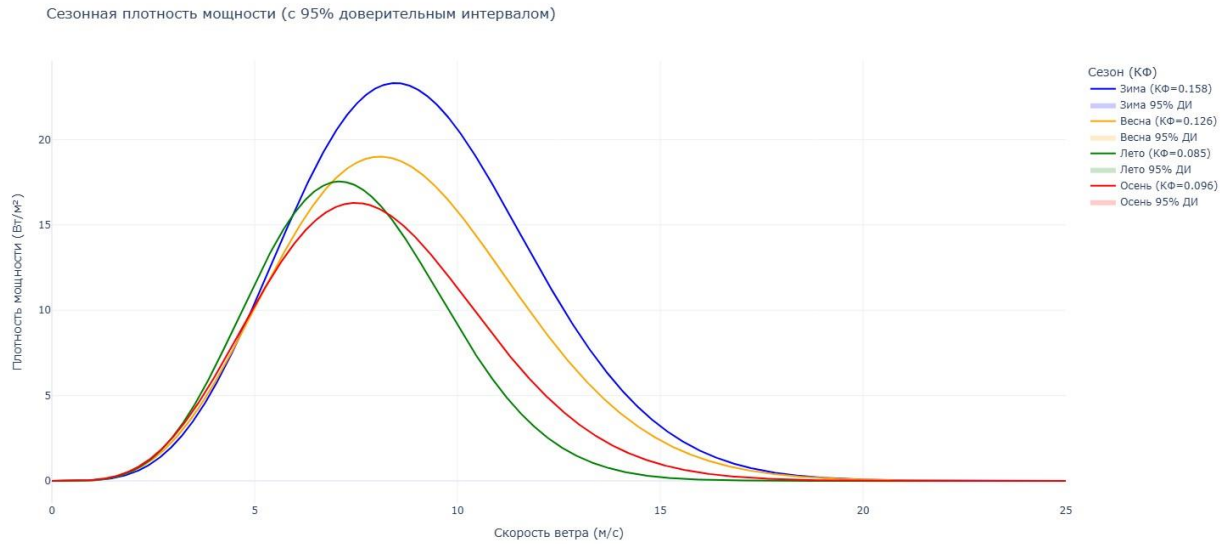


Рис. 3. Сезонная плотность мощности ветра с 95% доверительными интервалами.

Плотность мощности, рассчитанная по распределению Вейбулла с учётом плотности воздуха, достигает максимума зимой (171.5 Вт/м²), снижается весной (141.2 Вт/м²), и достигает минимума летом

(104.1 Вт/м²). Согласно международной классификации IEC [15], исследуемая площадка относится к классу 1 (малая ветровая ресурсность). Эти значения типичны для предгорных и внутренних районов Центральной Азии и согласуются с результатами аналогичных исследований в Узбекистане и Кыргызстане [16, 17].

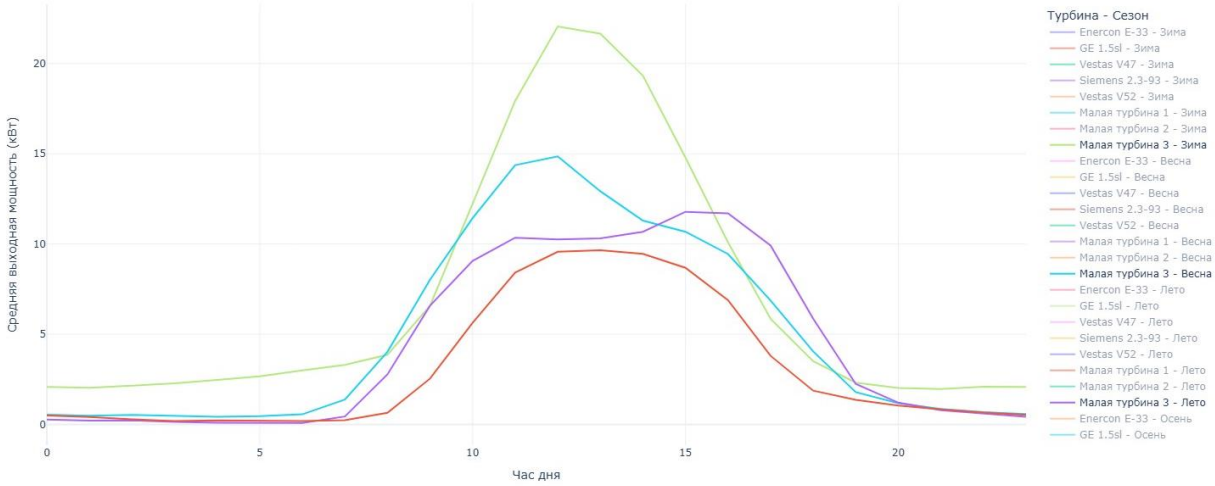


Рис. 4. Почасовая выработка энергии по турбинам и сезонам.

На рисунке 4 представлена почасовая выработка энергии в течение суток для Малой турбины 3 по сезонам. Наблюдается выраженный пик выработки в интервале с 11:00 до 16:00, особенно в весенне-летний период, что связано с усилением прогретых восходящих воздушных потоков и уменьшением стратификации атмосферы в дневное время. Зимой и осенью выработка также сохраняется, но на более низких уровнях. Малая турбина 3 демонстрирует устойчивую генерацию даже при умеренных и слабоустойчивых ветровых условиях, что подтверждает её высокую применимость в системах распределённой автономной генерации, включая изолированные или слаборазвитые регионы [14].

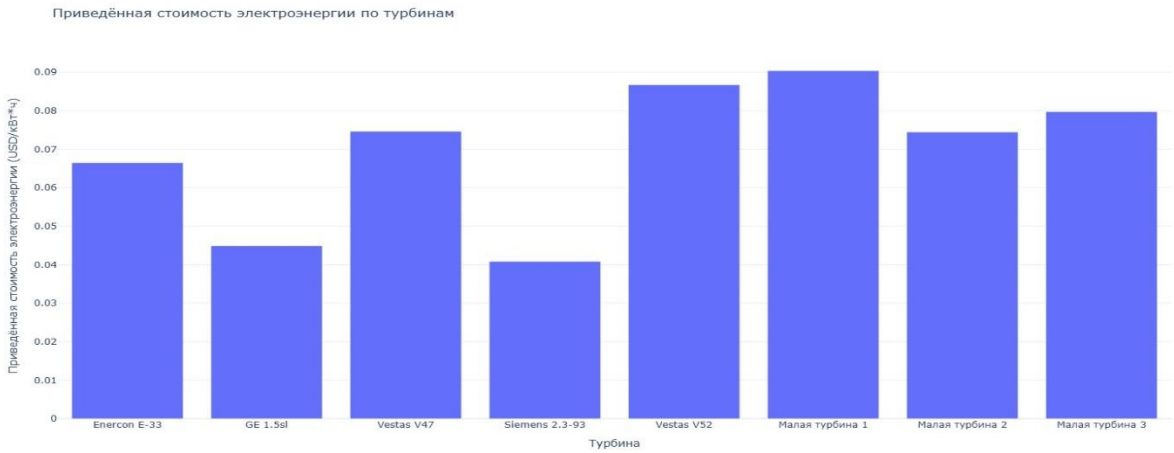


Рис. 5. Приведённая стоимость электроэнергии (LCOE) по турбинам

Минимальные значения LCOE получены для Siemens 2.3-93 (~0.041 USD/кВт·ч) и GE 1.5sl (~0.045 USD/кВт·ч), что обусловлено сочетанием высокой номинальной мощности и приемлемых CF. Наихудшие значения демонстрируют малые турбины (например, Малая турбина 3 – 0.09 USD/кВт·ч),

однако наличие их оправдано при реализации децентрализованных решений, особенно в условиях энергетически уязвимых районов [18].

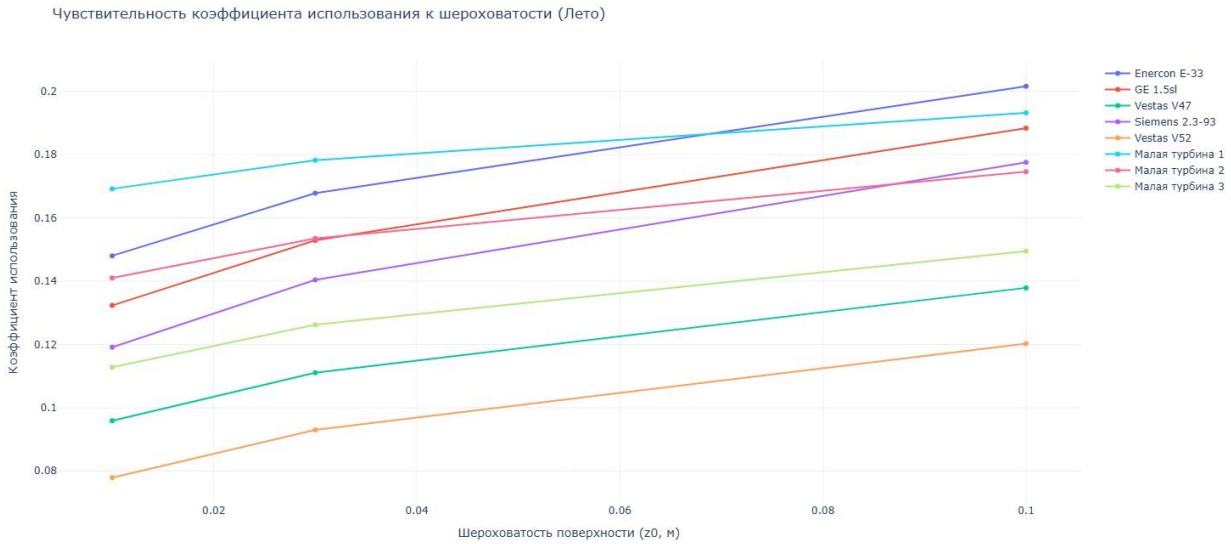


Рис. 6. Влияние шероховатости поверхности (z_0) на коэффициент CF (лето)

Повышение значения шероховатости поверхности с 0.01 до 0.1 сопровождается ростом CF, особенно для низкоустановленных турбин, таких как Vestas V52 и Малая турбина 1. Это подчёркивает необходимость учитывать локальные геофизические параметры при проектировании ветровых станций.

В целом, полученные результаты демонстрируют эффективность предложенной методики и её пригодность для оценки ветрового потенциала в сложных орографических условиях. Использование распределения Вейбулла оправдано как по критериям соответствия, так и с точки зрения воспроизводимости. Результаты могут быть масштабированы и применены к другим регионам Центральной Азии и развивающимся странам, где доступ к точным данным ограничен.

В ы в о д ы

Проведённый анализ подтвердил, что аэропорт Худжанд характеризуется ветроэнергетическим потенциалом, отнесённым к классу 1 по стандарту IEC (≤200 Вт/м²). Несмотря на это, расчёты показали высокую адаптивность малых турбин (в частности, Малая турбина 1) к слабым и нестабильным потокам ветра, что делает их целесообразными для распределённой генерации в удалённых районах. Наиболее высокие значения CF зафиксированы зимой (до 0.262), а наименьшие – летом, что связано с сезонной стратификацией атмосферы и ослаблением градиента давления.

Также выявлено, что при увеличении шероховатости подстилающей поверхности коэффициенты CF повышаются, особенно для турбин с небольшой высотой ступицы. Экономический анализ подтвердил, что крупные установки (Siemens 2.3-93, GE 1.5sl) демонстрируют наиболее низкие значения LCOE, в то время как малые турбины остаются предпочтительными для автономных решений.

Поступило 02.05.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2024. – Brussels, GWEC, 2024, 84 c.
2. Olabi A.G., Elsaid K., Wilberforce T., Sayed E.T., Rezk H. The impact of wind energy on achieving sustainable development goals. – Sustainability, 2023, vol. 15, no. 5, Article 4641, DOI: 10.3390/su15054641.
3. Ветровая энергетика: состояние, технологии, перспективы (под ред. Ю.П.Серебрякова). – М.: Энергоатомиздат, 2020, 276 с.
4. Кудусов М.А., Мадвалиев У., Бахромзод Р., Мукумов А.Р. Оценка потенциала солнечной и ветровой энергии в Таджикистане с использованием мультикритериального метода. – Вестник МЭИ, 2024, № 6, с. 55-67, DOI: 10.24160/1993-6982-2024-6-55-67.
5. Asian Development Bank. Energy Sector Assessment, Strategy, and Road Map: Tajikistan. – Manila, ADB, 2021, 64 p.
6. Committee for Environmental Protection of the Republic of Tajikistan. Low-Emission Development Strategy 2023-2040. – Dushanbe, CEP, 2023, 58 p.
7. Хамидов Р.Р., Турсунов А.К. Технический и экономический анализ развития ветроэнергетики в Узбекистане. – Energy Reports, 2022, т. 8, с. 1245-1252.
8. Бердыев М.Н. Оценка потенциала ветровой энергии в Туркменистане на основе данных реанализа. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, т. 168, № 112863.
9. Khan M.J., Iqbal M.T. Analysis of METAR data for wind energy assessment in remote areas. – Energy for Sustainable Development, 2018, т. 45, с. 23-32.
10. Yip C.M.A., Dabiri J.O. Wind resource characterization from airport METAR data. – Renewable Energy, 2021, т. 168, с. 70-82.
11. Carta J.A., Velasco M.G., González J.M. A review of Weibull function parameters for wind energy analysis. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, vol. 13, no. 5, p. 933-955.
12. Seguro J.V., Lambert T.W. Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. - Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2000, vol. 85, no. 1. pp. 75-84.
13. Akdağ S.A., Dinler A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. – Energy Conversion and Management, 2009, vol. 50, no. 6, pp. 1477-1483.
14. Tummala A., Velamati R.K., Sinha D.K., Indraja V., Krishna V.H. A review on small wind turbine technology. – Renewable Energy, 2016, vol. 56, pp. 1351-1371.
15. IEC 61400-12-1:2017. Power performance measurements of electricity producing wind turbines. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017.
16. Alikulov M., Uralbekov B., Bektemirov A. Wind resource assessment in Uzbekistan using ERA5 Reanalysis. – Energy Reports, 2021, vol. 7, pp. 812-825.
17. Yuldashev S., Zakhidov R.A., Sobirov N. Wind energy potential in Kyrgyzstan. – Renewable Energy Focus, 2022, vol. 41, pp. 67-75.
18. Bhandari B., Lee K.T., Lee C.S., Song C.K. Economic analysis of small wind turbines in developing countries. – Renewable Energy, 2015, vol. 52, pp. 754-765.

У.Мадвалиев, Н.И.Усмонзода*, А.Р.Рустамзода, М.А.Кудусов

АРЗЁБИИ МАВСИМИИ ИҚТИДОРИ ШАМОЛ ДАР ТОҶИКИСТОН БО ИСТИФОДА АЗ МАЪЛУМОТИ METAR

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
Институти физикаю техникаи ба номи С. У. Умарови АМИ Тоҷикистон,
****Донишгоҳи давлатии Хуҷанд ба номи академик Б. Ғафуров***

Кори мазкур ба баҳодиҳии ҳамаҷонибаи хусусиятҳои мавсимии суръати шамоли сатҳӣ дар мавзеи фурудгоҳи Хуҷанд (Ҷумҳурии Тоҷикистон) бо истифода аз алгоритми коркарди додаҳои METAR бахшида шудаст. Ҳисобҳо ба воситаи имтидоди суръати шамол ба баландии меҳвари ҳашт навъи турбинаҳои шамолӣ сурат гирифтанд. Маълумоти таҷрибавӣ бо истифода аз тақсимоти Вейбулл, логнормалӣ ва гамма-тақсимот ба даст омад. Дар асоси тақсимоти мутобиқшуда коэффисиентҳои истифодабарии мавсимӣ ва миёнаи солона, зичии интегралии қувва ва арзиши овардаи тавлиди нерӯи барқ ҳисоб карда шуданд. Фосилаҳои эътимодноки тавоноӣ муайян ва ҳассосият нисбат ба ноҳамвории сатҳи замин таҳлил гардид. Натиҷаҳо нишон медиҳанд, ки захираи шамоли минтақаи мазкур (≤200 Вт/м²) ба синфи пасти иқтидори энергияи шамолӣ мансуб мебошад.

Калимаҳои калидӣ: *суръати шамол, тақсимоти Вейбулл, зичии нерӯ, самаранокӣ, ҳассосияти ноҳамвор, METAR, Тоҷикистон.*

U.Madvaliev, N.I.Usmonzoda*, A.R.Rustamzoda, M.A.Kudusov

SEASONAL WIND ENERGY ASSESSMENT USING METAR DATA IN TAJIKISTAN

National Academy of Sciences of Tajikistan,
S.U.Umarov Physical-Technical Institute, NAS of Tajikistan,
****Khujand State University named after academician B.Gafurov***

This study presents a comprehensive assessment of seasonal near-surface wind speed characteristics at Khujand Airport (Tajikistan) using METAR data. Wind speed was extrapolated to the hub heights of eight turbine types. Empirical distributions were fitted using Weibull, log-normal, and gamma distributions. Seasonal and annual capacity factors (CF), power density, and levelized cost of electricity were computed based on the fitted curves. Confidence intervals for wind power output were visualized, and sensitivity to surface roughness was analyzed. The site exhibits low wind resource classification (≤200 W/m²), but small turbines showed strong performance, highlighting their potential for decentralized energy systems.

Key words: *wind speed, Weibull distribution, power density, capacity factor, surface roughness sensitivity, METAR, Tajikistan.*

Сведения об авторах:

1. **Мадвалиев Умархон** – д.ф.-м.н., член-корр. НАН Таджикистана, Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана, главный научный сотрудник. E-mail: umarkhon@mail.ru;
2. **Усмонзода Нилуфар Илхом** – Худжандский государственный университет им. академика Б.Гафурова, преподаватель кафедры теории физики. E-mail: nilufar.kuchkorova.94@mail.ru;
3. **Рустамзода Аъзам Рустам** – Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана научный сотрудник. E-mail: muqumov@physics.msu.ru;
4. **Кудусов Мансур** – Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана, младший научный сотрудник. E-mail: m.kudusov@systemavto.tj.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311.243
Специальность: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Б.Махмудов, член-корреспондент НАН Таджикистана У.Мадвалиев,
М.А.Кудусов, А.Р.Рустамзода

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РУФТОП-СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК В ТАДЖИКИСТАНЕ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ И МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА

Национальная академия наук Таджикистана,
Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана

В статье оценена экономическая эффективность внедрения руфтоп-солнечных фотоэлектрических систем (СФЭС) в Таджикистане на основе пространственных данных о застройке, солнечной генерации (PVOUT) и ориентации крыш. Рассчитаны технический потенциал годовой генерации, совокупные инвестиционные затраты, а также показатели экономической эффективности — чистая приведённая стоимость (NPV), простой срок окупаемости инвестиций (PP) и приведённая стоимость электроэнергии (LCOE) по каждому району Таджикистана. Установлено, что при действующем тарифе 0.032 USD/кВт·ч все объекты характеризуются отрицательной NPV. Ни снижение капитальных затрат на 20%, ни улучшение параметров не обеспечивают рентабельности без поддержки государства. Повышение тарифа до 0.045 USD/кВт·ч позволяет достичь рентабельности в 83.6 % случаев. Обоснована необходимость внедрения механизмов «зелёного тарифа» и субсидирования для стимулирования развития распределённой солнечной энергетики.

Ключевые слова: *руфтоп-СФЭС, экономическая эффективность, LCOE, NPV, PP, тарифная политика, зелёный тариф, субсидирование, распределённая генерация, Таджикистан.*

Развитие распределённых СФЭС на крышах зданий представляет собой одно из наиболее перспективных направлений в сфере устойчивого энергоснабжения, особенно в развивающихся странах и удалённых территориях [1, 2]. В странах с высокой солнечной инсоляцией, таких как Таджикистан, внедрение руфтоп-СФЭС может способствовать уменьшению зависимости от централизованных источников энергии, увеличению надёжности электроснабжения и достижению климатических целей [3]. Вместе с тем, низкие регулируемые тарифы на электроэнергию (в среднем 0.032 USD/кВт·ч в Таджикистане) и отсутствие устойчивых схем финансирования ограничивают экономическую привлекательность подобных решений. Современные исследования подтверждают высокий технический потенциал использования крыш зданий для размещения солнечных модулей. Подходы, основанные на обработке геопространственных данных — включая данные LiDAR, цифровые модели высот (DSM), сведения из

Адрес для корреспонденции: *Мадвалиев Умархон. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Айни, 299/1. Физико-технический институт им. С.У.Умарова. E-mail: umarkhon@mail.ru.*

OpenStreetMap и спутниковые карты солнечной радиации, — обеспечивают высокоточную оценку доступной площади для установки фотоэлектрических систем, параметров ориентации крыш, степени затенения и потенциальной годовой выработки электроэнергии [6–8]. В работе [6] была предложена методика оценки генерации на уровне городских территорий с использованием LiDAR-данных и ГИС-технологий, продемонстрировавшая высокую корреляцию с фактическими измерениями. Отдельные исследования акцентируют внимание на вопросах визуальной интеграции солнечных установок в городскую среду и соответствующих урбанистических ограничениях [7], тогда как другие сосредоточены на разработке мультикритериальных алгоритмов отбора зданий, пригодных для размещения фотоэлектрических систем, с учётом комплекса технических, архитектурных и социально-экономических факторов [8].

Особый интерес в литературе вызывает технико-экономическая оценка эффективности СФЭС. Ряд авторов анализируют такие показатели, как LCOE, NPV, PP и потребность в субсидировании [9, 10]. В работе [10] подчёркивается важность учёта местных тарифных и макроэкономических условий при расчётах LCOE. В контексте развивающихся стран показано, что при отсутствии стимулирующих тарифов и поддержки капитальных затрат большинство руфтоп-проектов имеют отрицательную NPV [11, 12].

Несмотря на значительное количество исследований в данной области, наблюдается нехватка работ, адаптированных к условиям стран Центральной Азии, в частности Таджикистана, где отсутствуют детализированные данные по высотам зданий, а государственная тарифная политика ограничивает инвестиционную привлекательность ВИЭ. Кроме того, часто используются усреднённые международные параметры стоимости и производительности, не отражающие реалии местного рынка.

Таким образом, сохраняется необходимость в разработке воспроизводимой и адаптированной к локальному контексту методики, сочетающей доступные открытые геопространственные данные, моделирование солнечной генерации и обоснованную экономическую оценку. Целью настоящего исследования является формирование интегрированной методики технико-экономической оценки руфтоп-СФЭС в условиях Таджикистана, включающей расчёт годовой генерации, LCOE, PP, NPV, тарифного разрыва и необходимого объема субсидирования. Разработанный подход реализован в виде автоматизированного Python-алгоритма и апробирован на муниципальном уровне по данным более чем 60 административных районов.

Методология исследования

Настоящее исследование базируется на ранее опубликованной методике расчёта технического потенциала руфтоп-солнечных установок в Таджикистане, предложенной в работе [13], где представлены алгоритмы фильтрации зданий, определения ориентации кровель, расчёта полезной площади размещения панелей и пространственного распределения солнечной генерации. В рамках настоящей статьи указанная методика дополнена расширенным экономическим блоком, направленным на количественную оценку рентабельности, инвестиционной привлекательности и необходимости тарифного субсидирования внедрения СФЭС на крышах зданий. Особое внимание уделяется расчёту LCOE, NPV, PP, а также формированию сценариев субсидирования и зелёных тарифов. Экономические расчёты проводились для административных районов Таджикистана с учётом локализованных параметров

затрат, тарифов и PVOUT. Исходными данными для анализа были взяты контуры зданий, извлечённые из базы данных Microsoft Building Footprints, с предварительной фильтрацией объектов площадью менее 20 м² и условным отнесением зданий площадью свыше 1000 м² к категории коммерческих. Также использовалась пространственно распределённая карта солнечной генерации (PVOUT), предоставляемая SolarGIS с пространственным разрешением около 250 м, и экономические параметры, детализированные в таблице 1. В расчётных значениях стоимости учтены налог на добавленную стоимость (НДС), таможенные пошлины, а также налоги на прибыль компаний-инсталляторов.

Таблица 1

Основные экономические параметры для расчёта показателей эффективности руфтоп-СФЭС

Параметр	Значение
Стоимость установки (CAPEX)	820 USD/кВт
Коэффициент установки	1.20
Стоимость обслуживания (OPEX)	18 USD/кВт/год
Тариф на электроэнергию	0.032 USD/кВт·ч (0.09 USD/кВт·ч для коммерческих зданий)
Ставка дисконтирования	11 %
Срок службы установки	25 лет
Маржа «зелёного тарифа»	15 %

Для каждого здания, отвечающего заданным требованиям по площади, рассчитывалась полезная площадь размещения панелей, число панелей и установленная мощность. Годовая генерация определялась как:

$$E_{годовая} = P_{установленная} \times R_{PVOUT} \times f_{ориентации} \times \eta_{затенения},$$

где:

$P_{панели}$ — номинальная мощность одной панели (0.4 кВт);

$\eta_{затенения}$ — коэффициент затенения (0.95);

$f_{ориентации}$ — поправка на ориентацию;

R_{PVOUT} — годовой уровень солнечной генерации.

Экономический блок модели включает расчёт капитальных и эксплуатационных затрат на установку руфтоп-солнечной системы. Капитальные вложения (CAPEX) определяются как произведение установленной мощности P_{total} и удельной стоимости инсталляции с учётом регионального корректирующего коэффициента. Формально это выражается следующим образом:

$$C_{install} = P \cdot c_{unit} \cdot \gamma,$$

где c_{unit}=820 USD/кВт — базовая стоимость установки, γ = 1.20 — коэффициент, учитывающий дополнительные расходы (логистика, монтаж, административные процедуры).

Годовые эксплуатационные расходы включают техническое обслуживание и мониторинг оборудования. Они рассчитываются пропорционально установленной мощности:

$$C_{от} = P \cdot c_{от},$$

где C_{om} = 18 USD/кВт/год — усреднённые годовые затраты на обслуживание.

Доход от эксплуатации рассчитывается как произведение объёма годовой генерации E_{year} и фиксированного тарифа на электроэнергию:

$$R_{year} = E_{year} \cdot t,$$

где t = 0,032 USD/кВт·ч — тариф, установленный для домохозяйств в Таджикистане. Чистая годовая прибыль определяется как разность между годовой выручкой и эксплуатационными расходами:

$$\Pi = R_{annual} - C_{om},$$

Для оценки инвестиционной привлекательности проекта используется показатель PP, определяемый как отношение полной стоимости установки к ежегодной чистой прибыли. При положительной прибыли срок окупаемости определяется по формуле:

$$PP = \frac{C_{install}}{\Pi},$$

а в случае нерентабельности проекта (при $\Pi \le 0$) PP считается бесконечным.

Другим ключевым показателем является NPV, который отражает текущую ценность будущих доходов с учётом дисконтирования:

$$NPV = \Pi \cdot \frac{1-(1+r)^{-n}}{r} - C_{install},$$

где r = 0.11 — ставка дисконтирования, n=25 лет — срок эксплуатации установки. При положительном значении NPV проект считается экономически целесообразным.

LCOE рассчитывается для оценки себестоимости производства одного киловатт-часа в течение всего срока службы системы. При расчёте учитываются дисконтированные капитальные и эксплуатационные расходы, отнесённые к объёму генерации:

$$LCOE = \frac{C_{install} \cdot \dfrac{r}{1-(1+r)^{-T}} + C_{om}}{E_{year}}$$

Этот показатель используется как базовый ориентир для сравнения с рыночным тарифом. Дополнительно в данной модели рассчитывается альтернативный вариант LCOE для сценария со снижением капитальных затрат на 20 % с целью оценки чувствительности инвестиционной модели.

В целях достижения рентабельности предлагается механизм стимулирующего тарифа (так называемого «зелёного тарифа»), устанавливаемого как процентное превышение над значением LCOE. В настоящем исследовании используется маржа в 15 %, отражающая нормативную прибыльность инвестора:

$$T_{green} = LCOE \cdot (1+\delta)$$

где δ = 0.15 — коэффициент маржи. Разница между стимулирующим тарифом и действующим тарифом на электроэнергию формирует тарифный разрыв:

$$\Delta T = T_{green} - t.$$

При положительном значении разрыва требуется государственное субсидирование, объём которого определяется следующим выражением:

$$S_{subsidy} = \max(0, \Delta T) \cdot E_{year}$$

Значения субсидий рассчитываются по каждому объекту и агрегируются на районном уровне. Эти данные используются для формирования рекомендаций по распределению государственной поддержки.

Модель, использованная в данном исследовании, основывается на ряде допущений и имеет определённые ограничения, обусловленные как доступностью исходных данных, так и целевой направленностью анализа. В частности, в расчётах не учитывались краткосрочные колебания тарифов на электроэнергию, климатическая изменчивость, а также потенциальные налоговые или административные льготы, связанные с процедурой подключения к сети. Архитектурные особенности зданий, такие как наличие мансард, многоуровневых кровель, конструктивных выступов и иных физических ограничений, также не были включены в расчёт полезной площади, что может приводить к переоценке технического потенциала. Все значения капитальных и эксплуатационных затрат были приняты фиксированными для всей территории страны, без учёта региональных различий в ценах на оборудование, стоимость рабочей силы и логистику, что в ряде случаев может влиять на точность оценки экономических показателей. Несмотря на указанные ограничения, разработанная модель демонстрирует высокую воспроизводимость, масштабируемость и применимость в условиях ограниченной информации, обеспечивая надёжную основу для предварительного обоснования и пространственного планирования внедрения руфтоп-солнечных фотоэлектрических систем.

Р е з у л ь т а т ы

В результате пространственно-экономического анализа Таджикистана было отобрано 3 664 104 здания, соответствующие критериям пригодности по площади (>20м²). Совокупная установленная мощность составила 53.97 ГВт, а расчётная годовая генерация достигла 47.85 млрд кВт·ч, что в два раза превышает текущее годовое электропотребление республики (порядка 20 млрд кВт·ч).

Средние значения LCOE по районам варьируются от 0,032 до 0,042 USD/кВт·ч, что сопоставимо с действующим тарифом на электроэнергию в Таджикистане (0,032 USD/кВт·ч) или превышает его на величину до 31 %.

Разброс LCOE между районами составляет ΔLCOE ≈ 0,010 USD/кВт·ч, что в первую очередь обусловлено географическими различиями в PVOUT и ориентацией кровельных поверхностей.

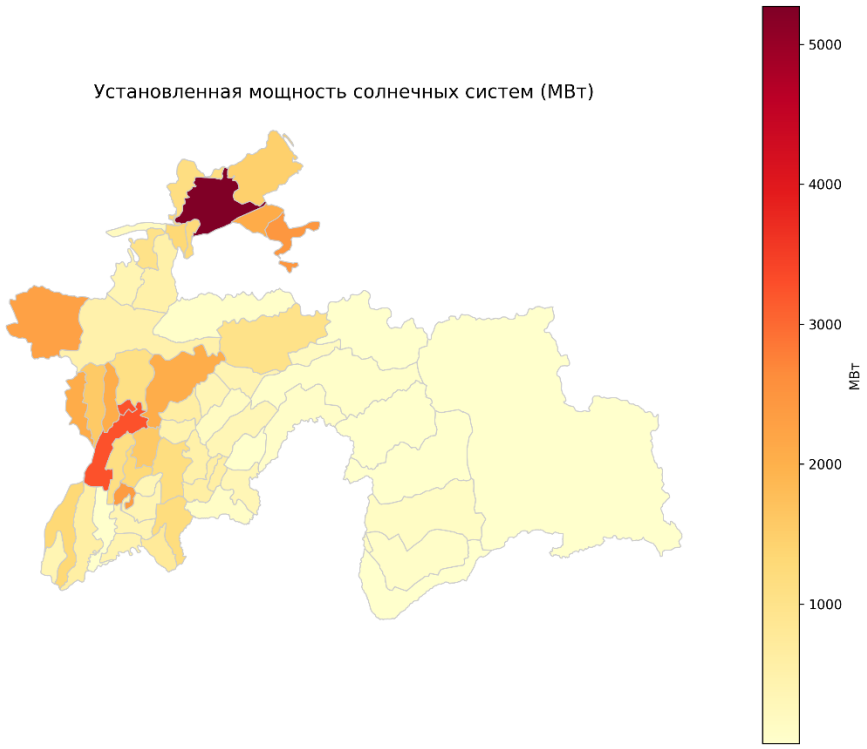


Рис. 1. Пространственное распределение установленной мощности (ГВт) по районам

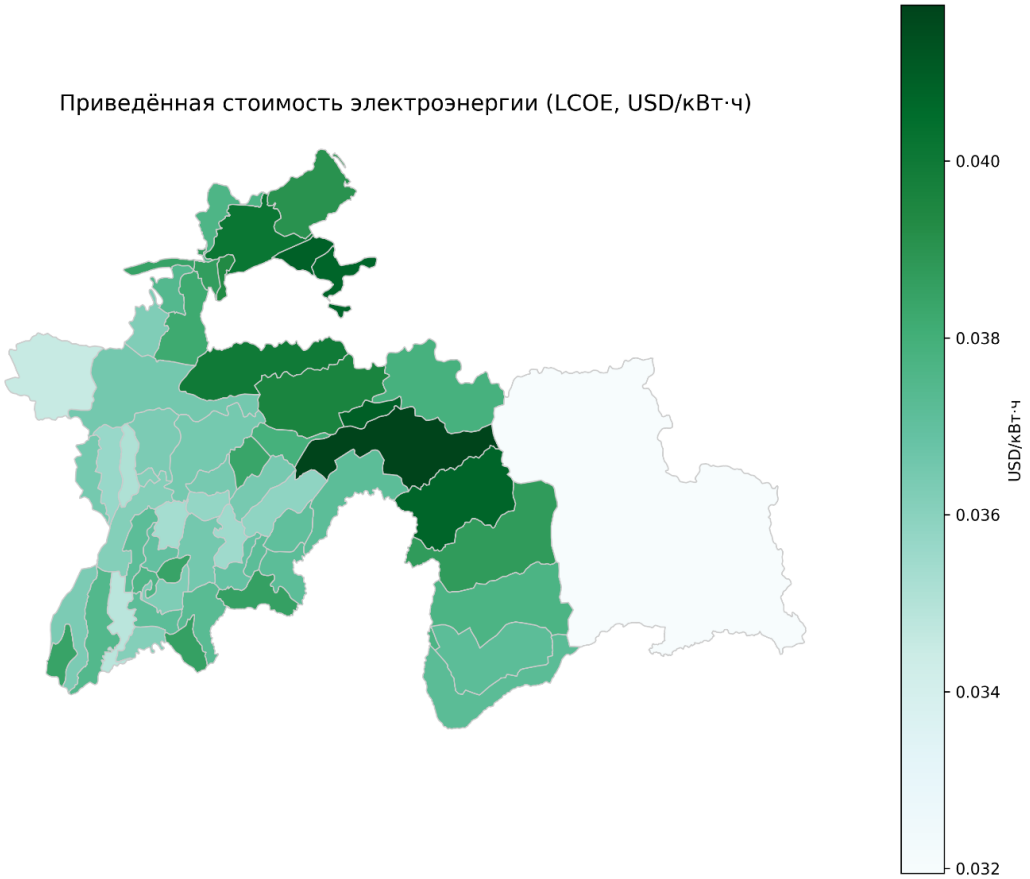


Рис. 2. Картограмма средних значений LCOE по административным районам

Проведённый анализ показывает, что даже в наиболее благоприятных административных районах реализация руфтоп-СФЭС остаётся экономически нецелесообразной при отсутствии внешней финансовой поддержки. Максимальный тарифный разрыв — разность между расчётной LCOE и действующим тарифом на электроэнергию для населения (0.032 USD/кВт·ч) — достигает 0.016 USD/кВт·ч, что указывает на необходимость дополнительных субсидий, инвестиционных стимулов и/или реформирования тарифной политики.

Полученные результаты свидетельствуют о крайне низкой экономической эффективности руфтоп-СФЭС в текущих условиях, несмотря на наличие значительного технического потенциала, и благоприятных климатических характеристик в отдельных регионах. Отрицательные значения NPV во всех районах в базовом сценарии обусловлены одновременно высокими капитальными затратами и заниженными конечными тарифами на электроэнергию.

В сценарии, предусматривающем снижение капитальных затрат на 20% — за счёт локализации производства, предоставления налоговых льгот или инвестиционных субсидий — среднее значение LCOE снижается до 0.029–0.038 USD/кВт·ч. Однако даже при таких параметрах ни один район не достигает положительного значения NPV, что подчёркивает необходимость комплексной и многоуровневой поддержки со стороны государства и международных партнёров.

Расчёт альтернативного сценария с введением «зелёного тарифа» на уровне 0.045 USD/кВт·ч демонстрирует значительное улучшение экономических показателей: в этом случае 83.6% всех анализируемых объектов становятся финансово привлекательными с положительным NPV. Величина необходимой государственной субсидии для компенсации тарифного разрыва оценивается от 41 до 187 USD в год на одно здание, что в совокупности за 25-летний срок эксплуатации требует финансовых вложений на уровне 8.7–11.6 млрд. USD.

Отдельный анализ по типам зданий выявил существенные различия в экономических показателях (табл. 2). Коммерческие здания демонстрируют значительно меньший срок окупаемости (в среднем от 6 до 10 лет), что связано с высокой эффективностью использования произведённой электроэнергии. Жилые здания, напротив, требуют большего объёма финансовой поддержки (от 105 до 127 USD на здание ежегодно), а средний срок окупаемости достигает 80 лет и выше.

Особое значение при этом приобретает внедрение механизма фиксированной выкупной ставки, или так называемого «зелёного тарифа» (англ. feed-in tariff), успешно применяемого в ряде стран с формирующимся рынком ВИЭ. Данный инструмент представляет собой долгосрочное обязательство государства по гарантированному выкупу электроэнергии, произведённой возобновляемыми источниками, по фиксированной ставке, что позволяет обеспечить возврат инвестиций, снизить финансовые риски и повысить привлекательность проектов для частных инвесторов.

В условиях Таджикистана, где текущий тариф не обеспечивает окупаемости даже при оптимистичных сценариях снижения затрат, введение поэтапного «зелёного тарифа» с региональной дифференциацией и предсказуемым горизонтом действия может служить краеугольным элементом политики поддержки сектора распределённой солнечной энергетики.

Таблица 2

Экономические показатели коммерческих и жилых зданий
по административным районам Таджикистана

Область	Район или город	Количество зданий	Количество коммерческих объектов	Количество жилых объектов	Базовый «зелёный» тариф (коммерч.)	Базовый «зелёный» тариф (жилые)
РРП	Файзабад	41494	230	41494	0.038	0,042
	Гисар	137286	641	137286	0.040	0,040
	Лахш	302	2	302	0.051	0,044
	Нуробод	34707	10	34707	0.045	0,044
	Рашт	82241	88	82241	0.047	0,046
	Рогун	28175	124	28175	0.042	0,044
	Рудаки	243596	1485	243596	0.043	0,042
	Шахринав	108449	464	108449	0.041	0,041
	Сангвор	5328	2	5328	0.052	0,048
	Таджикабад	18542	8	18542	0.045	0,047
	Турсунзаде	137861	1052	137861	0.043	0,042
	Вахдат	134020	890	134020	0.043	0,042
	Варзоб	81913	338	81913	0.041	0,042
Душанбе	Душанбе	191261	4176	191261	0.041	0,042
ГБАО	Ишкашим	1129	1	1129	0.051	0,043
	Мургаб	872	4	872	0.040	0,037
	Рошткалъа	3717	4	3717	0.036	0,043
	Рушан	1738	1	1738	0.025	0,045
	Шугнан	7909	38	7909	0.047	0,043
	Ванч	1578	0	1578	0.000	0,047
Хатлонская область	Балджувон	13072	8	13072	0.048	0,042
	Кушониён	156600	1471	156600	0.044	0,043
	Дангара	93337	196	93337	0.040	0,042
	Фархор	89928	160	89928	0.042	0,043
	Дусти	1224	4	1224	0.049	0,040
	Джоми	100975	176	100975	0.044	0,042
	Ховалинг	25190	62	25190	0.043	0,041
	Хуросон	91261	124	91261	0.043	0,043
	Мир Сайид Али Хамадони	6885	18	6885	0.044	0,044
	Муминобод	1160	0	1160	0.000	0,043
	Нурек	33704	136	33704	0.044	0,041
	Носири Хусрав	31890	12	31890	0.044	0,044
	Пяндж	58919	78	58919	0.044	0,044
	Кабодиён	42042	94	42042	0.046	0,043
	Джайхун	25076	310	25076	0.045	0,042
	Левакант	26875	204	26875	0.047	0,044
	Шахритус	100016	147	100016	0.044	0,042
	Темурмалик	42437	70	42437	0.041	0,041
	Вахш	33838	36	33838	0.042	0,042
	Восеъ	39437	214	39437	0.043	0,042
	Яван	124430	368	124430	0.040	0,041

Область	Район или город	Количество зданий	Количество коммерческих объектов	Количество жилых объектов	Базовый «зелёный» тариф (коммерч.)	Базовый «зелёный» тариф (жилые)
Согдийская область	Ашт	121575	194	121575	0.047	0,045
	Айни	40782	94	40782	0.046	0,042
	Бободжон Гафуров	316271	6469	316271	0.046	0,046
	Девештич	32074	205	32074	0.045	0,044
	Исфара	166773	1326	166773	0.046	0,047
	Истаравшан	57634	888	57634	0.043	0,043
	Джаббор Расулов	69156	1425	69156	0.046	0,045
	Канибадам	131052	1076	131052	0.047	0,047
	Горная Матча	5604	2	5604	0.049	0,046
	Матча	79523	314	79523	0.046	0,043
	Пенджикент	130123	1561	130123	0.040	0,040
	Шахристон	27050	72	27050	0.046	0,042
	Спитамен	73999	1606	73999	0.044	0,044
	Зафарабад	12074	138	12074	0.044	0,044
Итого		3664104	28816	3664104	0.042	0.043

Сравнение с международными исследованиями показывает, что расчётные значения LCOE в Таджикистане (0.029–0.042 USD/кВт·ч) сопоставимы с аналогичными проектами в странах с высокой солнечной инсоляцией и ограниченной сетевой инфраструктурой — таких как Вьетнам, Бангладеш и Руанда [10, 11]. Однако, в отличие от этих стран, в Таджикистане отсутствуют устойчивые механизмы поддержки, включая тарифные гарантии, систему net metering или выкуп по фиксированной цене, что существенно снижает инвестиционную привлекательность даже при наличии благоприятных технических условий.

Для успешного масштабирования проекта руфтоп-СФЭС в Таджикистане требуется адаптация международных политик и практик, включая внедрение предсказуемых и гибких тарифных механизмов, институциональную модернизацию нормативной базы, развитие механизмов компенсации начальных затрат, а также формирование прозрачной системы долгосрочных контрактов на поставку электроэнергии.

З а к л ю ч е н и е

Проведённый анализ показал, что при текущих тарифах и капитальных затрат реализация солнечных фотоэлектрических систем на крышах зданий в Таджикистане является экономически нецелесообразной. Во всех административных районах наблюдается отрицательное значение NPV. Даже при снижении капитальных затрат на 20% не достигается безубыточность. Только в сценарии повышения тарифа до 0.045 USD/кВт·ч более 80% объектов становятся рентабельными, что подчёркивает важность тарифной политики как ключевого инструмента поддержки.

Особый интерес представляет коммерческий сектор, который показывает более высокую эффективность установки СФЭС. В отличие от жилых объектов, коммерческие здания характеризуются более компактной и рациональной геометрией крыш, лучшей ориентацией и более высокой плотностью установки, что обеспечивает значительно более короткий срок окупаемости (6–10 лет) и относительно низкий объём необходимого субсидирования. Это делает коммерческий сегмент приоритетным для первоначального внедрения «зелёного тарифа» и других форм поддержки распределённой солнечной генерации.

Среднегодовой объём субсидии, необходимый для компенсации тарифного разрыва, составляет 41–187 USD на здание. При охвате всей выборки (свыше 3.6 млн. зданий) общая потребность в субсидировании за 25 лет достигает 8.7–11.6 млрд. USD. Наиболее эффективными районами с точки зрения генерации на единицу поддержки являются Фархор, Шахритус, Джалолиддин Балхи, Душанбе, Худжанд и Бохтар.

Международные сравнения показывают, что уровень LCOE в Таджикистане сопоставим со странами с высокой инсоляцией и ограниченным доступом к сетям, однако отсутствие механизмов «зелёного тарифа», гарантированного выкупа и субсидирования делает проекты руфтоп-СФЭС малопривлекательными для инвесторов.

Результаты исследования подчёркивают необходимость внедрения комплексной поддержки, включающей гибкие тарифные схемы, налоговые стимулы и приоритетное развитие пилотных проектов в наиболее эффективных регионах.

Поступило 09.05.2025 г

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. REN21. Renewables 2023 Global Status Report. – Paris: REN21 Secretariat, 2023.
2. International Energy Agency. World Energy Outlook 2022. – Paris: IEA, 2022.
3. Мировой банк. Обзор энергетического сектора Таджикистана. – Washington D.C., 2021.
4. Baranski J., Brevik J., Jakobsen K.A., Korpås M. Estimating the potential for rooftop generation of solar energy based on LiDAR data and building footprints. – ISPRS International Journal of Geo-Information, 2023, Vol. 14, №3, pp. 123. DOI: 10.3390/ijgi14030123.
5. Pfeifer L., Breunig M. Application of satellite data for estimating rooftop solar photovoltaic potential at national scale. – Remote Sensing, 2024, Vol. 16, №12, pp. 2205. DOI: 10.3390/rs16122205.
6. Jakubiec J.A., Reinhart C.F. A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data. – Solar Energy, 2013, Vol. 93, pp. 127–143.
7. Freitas S. et al. Identification of suitable areas for the installation of photovoltaic solar panels through GIS and multicriteria analysis. – Renewable Energy, 2015, Vol. 85, pp. 523–531.
8. Santos T. et al. GIS-based approach for assessing solar potential in urban areas: A case study for Lisbon. Sustainable Cities and Society, 2016, Vol. 26, pp. 426–435.
9. Karteris M. et al. Rooftop photovoltaic systems in urban environments: Techno-economic assessment and visual impact analysis. – Sustainable Cities and Society, 2019, Vol. 45, pp. 715–726.
10. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, Vol. 15(9), pp. 4470–4482.

11. Mondal A.H., Denich M. Assessment of renewable energy resources potential for electricity generation in Bangladesh. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, Vol. 14(8), pp. 2401–2413.
12. Sovacool B.K. et al. Energy decisions reframed as justice and ethical concerns. – Nature Energy, 2016, Vol. 1, pp. 16024.
13. Махмудов Б., Мадвалиев У., Рустамзода А.Р., Кудусов М.А. Оценка технического потенциала руфтоп-солнечных установок в Таджикистане на основе открытых пространственных данных и мультикритериального подхода. – Доклады НАН Таджикистана, 2025, т. 68, №5, с.452-463

Б.Маҳмудов, У.Мадвалиев, М.А.Қудусов, А.Р.Рустамзода

АРЗЁБИИ ИҚТИДОРИ ИҚТИСОДИИ НЕРӮГОҲҲОИ ОФТОБИИ БОМӢ ДАР ТОҶИКИСТОН БО ИСТИФОДАИ МАЪЛУМОТИ КУШОДАИ ГЕОМАКОНӢ ВА УСУЛҲОИ БИСЁРМЕЪЁРӢ

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умарови АМИ Тоҷикистон

Дар мақола самаранокии иқтисодии истифодаи нерӯгоҳи офтобии бомӣ (НОБ) дар минтақаҳои Тоҷикистон арзёбӣ шудааст. Методологияи он ба маълумоти фазоӣ оид ба биноҳо, радиатсияи офтобӣ (PVOUT) ва ҳисобкунии автоматии самти бом асос ёфтааст. Иқтидори техникии истеҳсоли солонаи барқ, хароҷоти умумии сармоягузорӣ ва нишондиҳандаҳои самаранокии иқтисодӣ — арзиши холиси кунунӣ (NPV), мӯҳлати бозгашти сармоя (PP) ва арзиши холиси неруи барқ (LCOE) — барои ҳар як ноҳияи Тоҷикистон ҳисоб карда шуданд. Натиҷаҳо нишон медиҳанд, ки бо тарофаи ҷорӣ (0.032 USD/кВт·соат) ҳама минтақаҳо дорои арзиши манфии NPV мебошанд. Танҳо бо боло бурдани тарофа то 0.045 USD/кВт·соат 83.6 % иншоот фоидаовар мегардад. Зарурати ҷорӣ намудани “тарофаи сабз” ва механизмҳои дастгирии сармоягузорӣ асоснок карда шудааст.

Калимаҳои калидӣ: *нерӯгоҳи офтобии бомӣ, самаранокии иқтисодӣ, LCOE, NPV, PP, сиёсати тарофавӣ, тарофаи сабз, субсидияҳо, истеҳсоли тақсимшуда, Тоҷикистон.*

B.Mahmudov, U.Madvaliev, M.A.Kudusov, A.R.Rustamzoda

ASSESSMENT OF ROOFTOP SOLAR ECONOMICAL POTENTIAL IN TAJIKISTAN USING OPEN SPATIAL DATA AND A MULTICRITERIA APPROACH

National Academy of Sciences of Tajikistan,
S.U.Umarov Physical-Technical Institute, NAS of Tajikistan

This study presents an economic assessment of rooftop photovoltaic systems (RPV) in the regions of Tajikistan, based on spatial data on buildings, solar radiation (PVOUT), and roof orientation modeling. The potential annual electricity generation, total investment costs, and key economic performance indicators — net present value (NPV), payback period (PP), and levelized cost of electricity (LCOE) — were calculated for each district of Tajikistan. Results show that at the current tariff of 0.032 USD/kWh, all districts have negative

NPV. Only when increasing the tariff to 0.045 USD/kWh do 83.6% of systems become financially viable. The findings justify the need for feed-in tariff mechanisms and targeted investment support to enable the development of distributed solar energy in the country.

Key words: *rooftop PV, economic feasibility, LCOE, NPV, PP, tariff policy, feed-in tariff, subsidies, distributed generation, Tajikistan.*

Сведения об авторах:

1. **Махмудов Бехруз** — Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана, младший научный сотрудник. E-mail: mahmudov_bekhruz@mail.ru;
2. **Мадвалиев Умархон** — д.ф.-м.н., член-корр. НАН Таджикистана, Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана, главный научный сотрудник. E-mail: umarkhon@mail.ru;
3. **Кудусов Мансур** — Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана, младший научный сотрудник. E-mail: m.kudusov@systemavto.tj;
4. **Рустамзода Аъзам** — Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана, научный сотрудник. E-mail: muqumov@physics.msu.ru.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №6

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 531.001.362 (624.012.45)
Специальность: 2.1.9. Строительная механика

Член-корреспондент НАН Таджикистана Д.Н.Низомов,
И.К.Каландарбеков*, У.М.Махмадиев*, И.И.Каландарбеков*, И.Ш.Ашуров*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Национальная академия наук Таджикистана,
Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана,
****Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими***

В статье представлены результаты экспериментальных исследований моделей железобетонных балок, проведенных с использованием методов теории подобия. Обоснована необходимость применения масштабных моделей в условиях лабораторных испытаний для оценки напряженно-деформированного состояния и прогнозирования поведения натурных железобетонных конструкций. Описана методика изготовления моделей, схема их нагружения и система измерений, позволяющая фиксировать параметры прогибов, раскрытия трещин и относительных деформаций.

Ключевые слова: *железобетонные конструкции, физическое моделирование, теория подобия, размерный анализ, экспериментальное исследование, деформативность, прочность.*

Введение. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций в натурном виде, особенно в условиях лабораторных испытаний, требуют значительных затрат времени, материальных ресурсов и пространства, что делает их экономически нецелесообразными. В связи с этим, использование масштабных моделей является более эффективным и практичным решением. Применение моделей позволяет исследовать поведение конструкций от упругой стадии до стадии разрушения, а также анализировать их напряжённо-деформированное состояние без необходимости проведения полномасштабных испытаний.

Моделирование железобетонных конструкций для оценки их несущей способности и деформационных характеристик остаётся актуальной задачей в области строительной механики. Применение методов теории подобия и размерного анализа способствует прогнозированию поведения конструкций в различных режимах эксплуатации [1,2].

Нелинейное физическое моделирование предоставляет возможность получения информации о предельном состоянии натурной конструкции на основе анализа стадии разрушения экспериментальной модели.

Адрес для корреспонденции: *Низомов Джахонгир Низомович. 734029, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 267, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана. E-mail: tiees@mail.ru; Каландарбеков Имомёрбек Каландарбекович, Махмадиев Усмонали Муродалиевич, Каландарбеков Ифтихор Имомёрбекович, Ашуров Идрис Шарифхонович. 734042, г. Душанбе, пр. акад. Раджабовых, 10А, Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими. E-mail: kalandarbekov-55@mail.ru; mahmadievu-21061997@mail.ru; iftikhor791@mail.ru; ashurovidris@gmail.com.*

В рамках данной работы исследуется поведение железобетонных балок на моделях, охватывая весь спектр возможных стадий их работы - от упругой стадии до стадии разрушения. Это позволяет не только анализировать начальные деформации и трещинообразование, но и оценить механизмы разрушения конструкций при максимальных нагрузках.

Описание конструкции. Испытания моделей железобетонной балки проводились в соответствии со схемой испытания натурной балки и с соблюдением основных принципов физического моделирования, обеспечивающих геометрическое и силовое подобие.

Физическая модель железобетонной балки в масштабе 1:4 была изготовлена с учётом соблюдения критериев подобия, применяемых при статических испытаниях моделей железобетонных конструкций. Материал физической модели был подобран из мелкозернистого бетона с классом прочности B20. В растянутой зоне балка армирована рабочей арматурой периодического профиля Ø10A500. В сжатой зоне для формирования плоского арматурного каркаса применена конструктивная продольная арматура в виде одного стержня Ø6A240. Для обеспечения пространственной жёсткости каркаса и соединения продольных стержней в растянутой и сжатой зонах использованы поперечные хомуты из арматуры диаметром Ø4 мм класса A240. Анкеровка рабочей арматуры была обеспечена за счёт приваривания на её торцах поперечных анкерных пластин размерами 20×50×5 мм. Такое конструктивное решение позволило эффективно передать усилия от арматуры в бетон и предотвратить выскальзывание арматурных стержней из тела балки в процессе испытаний.

Процесс бетонирования модели осуществлялся в горизонтальном положении в заранее подготовленную опалубку. Укладка бетонной смеси производилась послойно с тщательным вибрированием, обеспечивающим уплотнение и удаление воздушных включений. После бетонирования модели выдерживались в опалубке в течение 3 суток, затем были извлечены и оставлены на естественном твердении до достижения проектной прочности бетона.

Схема армирования, арматурные каркасы и модели железобетонных балок с соответствующими контрольными образцами, после бетонирования, представлены на рисунках 1, 2 и 3.

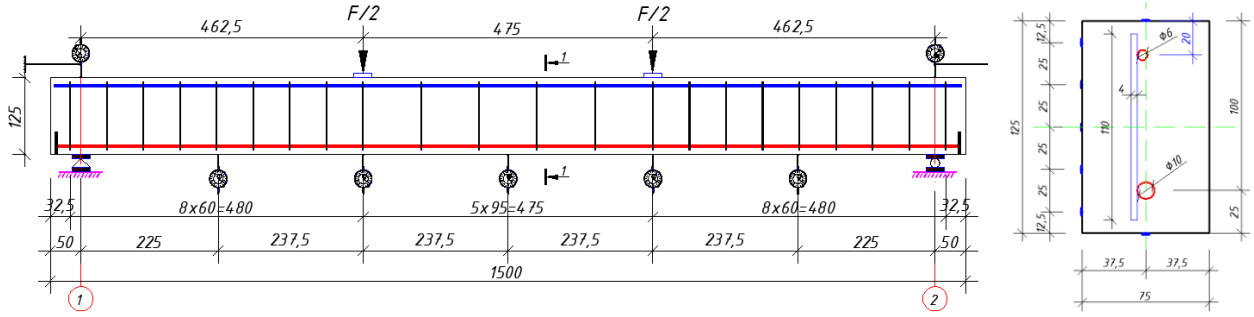


Рис. 1. Схема армирования моделей железобетонных балок

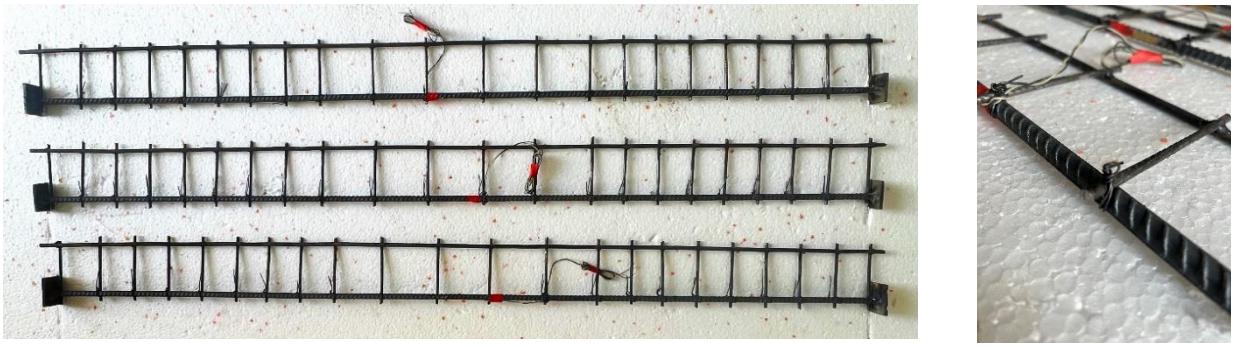


Рис. 2. Арматурный каркас моделей железобетонных балок

Рис. 3. Модели железобетонных балок и соответствующие контрольные образцы после бетонирования

Испытания контрольных образцов. Для определения прочностных и деформативных характеристик бетона, использованного при изготовлении опытного образца балки, были изготовлены из того же материала бетона контрольные образцы: кубики с ребром 100мм для оценки прочности на сжатие и призмы размером 100х100х400мм для определения модуля упругости, коэффициента Пуассона и предельных деформаций. Всего было изготовлено 6 кубика и 3 призмы. Уплотнение бетонной смеси выполнялось в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 10180-2012 [3]. Бетонные образцы были изготовлены из бетона рабочего состава и выдерживались в тех же условиях твердения, что и опытный образец железобетонной балки.

Испытания образцов кубиков и арматурных стержней проводились перед основными испытаниями конструкции с целью предварительной оценки физико-механических характеристик бетона и арматуры. Они проводились в лаборатории «Строительные материалы, изделия и конструкции» Государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт «Строительство и архитектура».

Методика испытания бетонных образцов, изготовленных из подобранного мелкозернистого бетона для физического моделирования железобетонных конструкций, изложена в работе [4].

Для определения физико-механических характеристик арматуры, используемой в модели железобетонных балках, было отобрано по три образца арматуры длиной 380мм.

Методика и порядок испытания арматурных стержней на растяжение выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 12004-81 [5]. Технические требования к арматурным стержням соответствуют ГОСТ 34028-2016 [6].

Результаты испытаний рабочей арматуры модели железобетонных балок на растяжение представлены в табл. 1. Испытательная машина, а также диаграмма усреднённых значений механических характеристик арматурных стержней при растяжении приведены на рис. 4.

Таблица 1

Характеристики рабочей арматуры моделей железобетонных балок

№	Диаметр, мм	Площадь сечения ($мм^2$)	Нагрузка текучести, кН	Разрушающая нагрузка, кН	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
1	10	78.3	45.42	52.17	580.08	666.28
2	10	78.3	45.63	52.29	582.76	667.82
3	10	78.3	45.81	52.32	585.06	668.20
Среднее значение предела текучести, МПа						582.63
Среднее значение предела прочности, МПа						667.43
Согласно табл. 7, ГОСТ 34028-2016 [7], испытанная арматуры относится к классу А500 с модулем упругости $E_s = 2 \cdot 10^5$ Н/мм^2.						

1) 2)

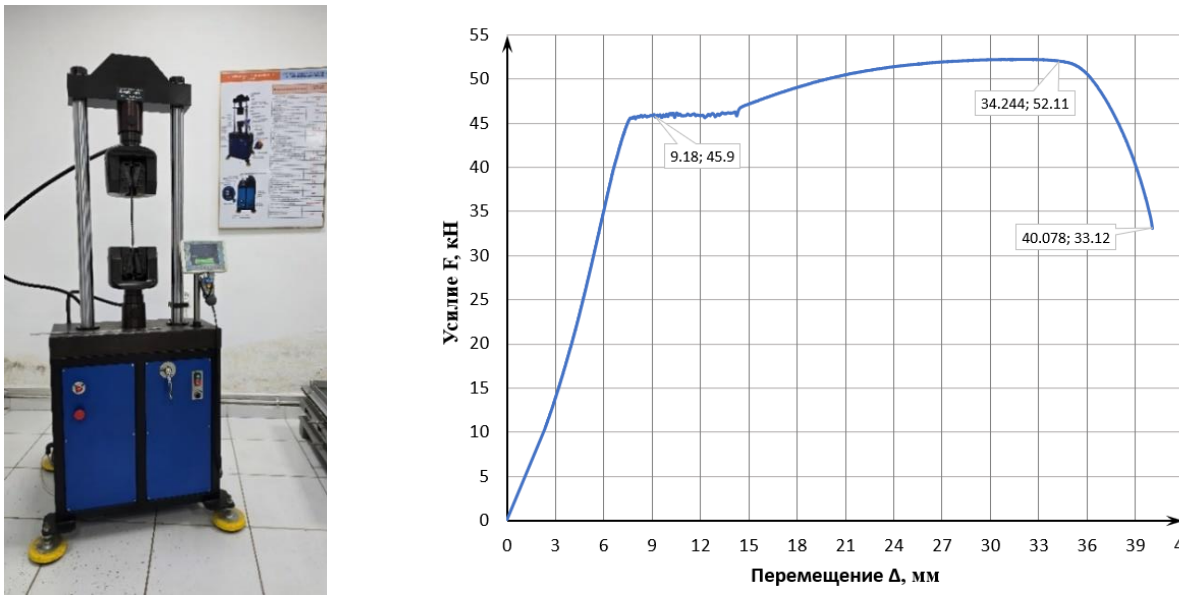


Рис. 4. Испытание образцов рабочей арматуры на растяжение
1 – разрывная машина модификации РМГ-300МГ4; 2– диаграмма растяжения с усреднёнными значениями механических характеристик рабочих арматурных стержней.

Испытания моделей. Исследование физической модели железобетонной балки проводится в соответствии с теорией подобия и размерности, что позволяет установить соотношения между натурными и модельными образцами, а также определить коэффициенты перехода от модельных испытаний к натурным конструкциям [8-11, 13, 14].

Испытания проведены на трёх однопролётной железобетонной балке с ненапрягаемой арматурой, нагруженной двумя сосредоточенными силами, симметрично расположенными относительно её середины на расстоянии 237.5 мм. Нагружение балки осуществляется с использованием механического винтового домкрата TOR-50. Передача нагрузки от домкрата на балку производится через систему распределительных траверс, выполненных из балочного двутавра №20Б1 (L=690мм) по ГОСТ 26020-83 [12], что обеспечивает равномерное распределение нагрузки на две сосредоточенные силы.

Для определения прогибов использованы прогибомеры часового типа ИЧ-50 как в пролёте, так и на опорах, что позволяет учитывать влияние возможной осадки опор и получать более точные данные о деформировании балки в процессе нагружения.

Измерение ширины раскрытия трещин осуществлялось с применением специального измерительного устройства, оснащённого индикаторами часового типа, жёстко закреплёнными на поверхности модели железобетонной балки. Прибор обеспечивал высокую точность регистрации деформаций благодаря цене деления 0,001мм, что позволяло фиксировать параметры трещинообразования в процессе нагружения модели. Распределение относительных деформаций по высоте сечения в середине пролёта и в зоне приложения нагрузки оценивалось с применением тензорезисторов типа ПКБ с базой 50мм. Для регистрации относительных деформаций использовался цифровой измеритель деформации ИДЦ-1.

На обратной стороне балки, по высоте сечения в средней зоне, были установлены индикаторы часового типа с ценой деления 0,001мм на базе 100мм. Они располагались в нижней и верхней зонах с отступом 12.5мм от грани элемента, что позволило зафиксировать деформационные характеристики конструкции в этих областях.

Схема испытательного стенда и расстановки измерительных приборов представлена на рис. 5.

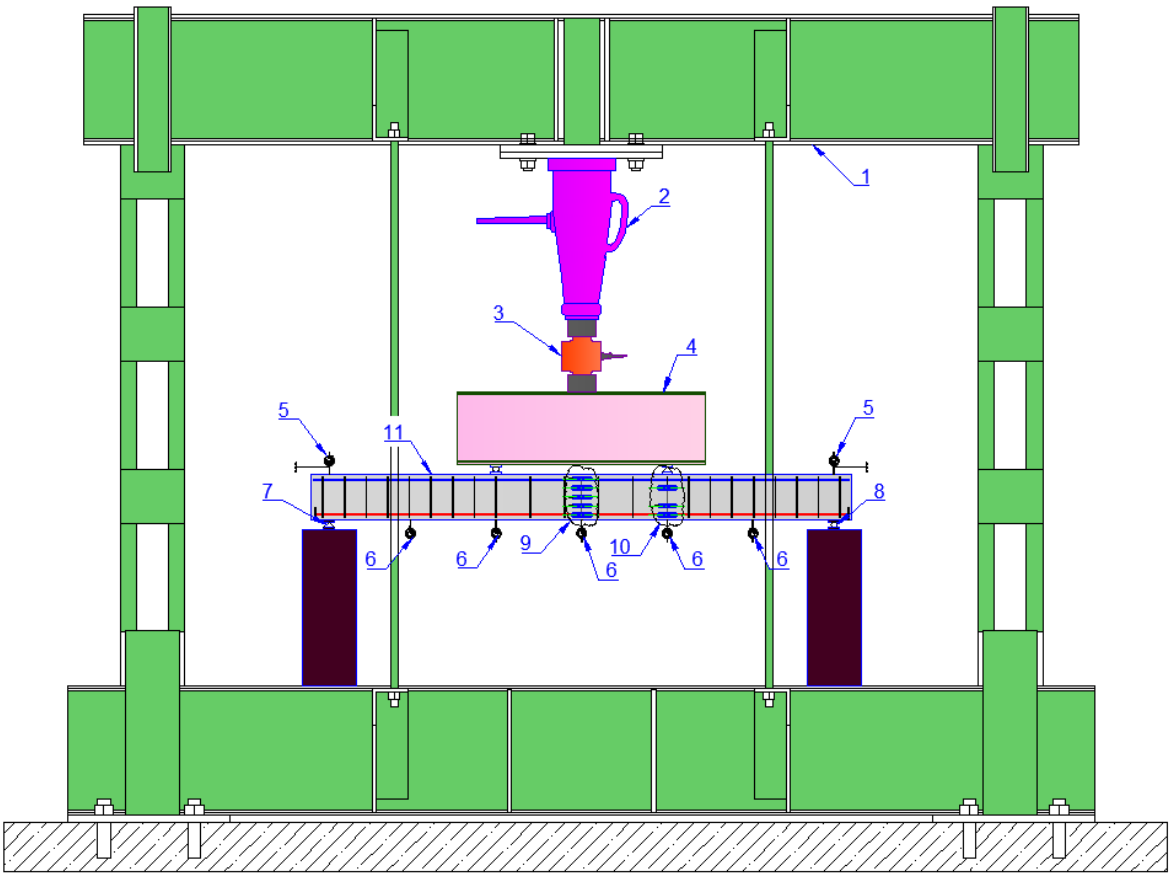


Рис. 5. Испытательный стенд и расположение измерительных приборов

1 – стенд для испытания моделей строительных конструкций, 2– механический винтовой домкрат марки TOR-50, 3 – электронный динамометр марки ДМС-1000/5-1МГ4, 4 – распределитель нагрузки (двутавр №20Б1), 5 – прогибомер часового типа ИЧ-50 (для измерения осадки опор), 6 –прогибомер часового типа ИЧ-50 (для измерения деформаций в пролётной зоне), 7 – шарнирно-неподвижная опора, 8 – шарнирно-подвижная опора, 9 – тензорезисторы типа ПКБ с базой 50мм (для измерения относительных деформаций по высоте сечения в средней зоне балки), 10 – тензорезисторы типа ПКБ с базой 50мм (для измерения относительных деформаций по высоте сечения в зоне приложения нагрузки), 11 – испытуемая модель железобетонной балки.

Характер трещинообразования в модели железобетонной балки БМ-3 представлен на рис. 6.

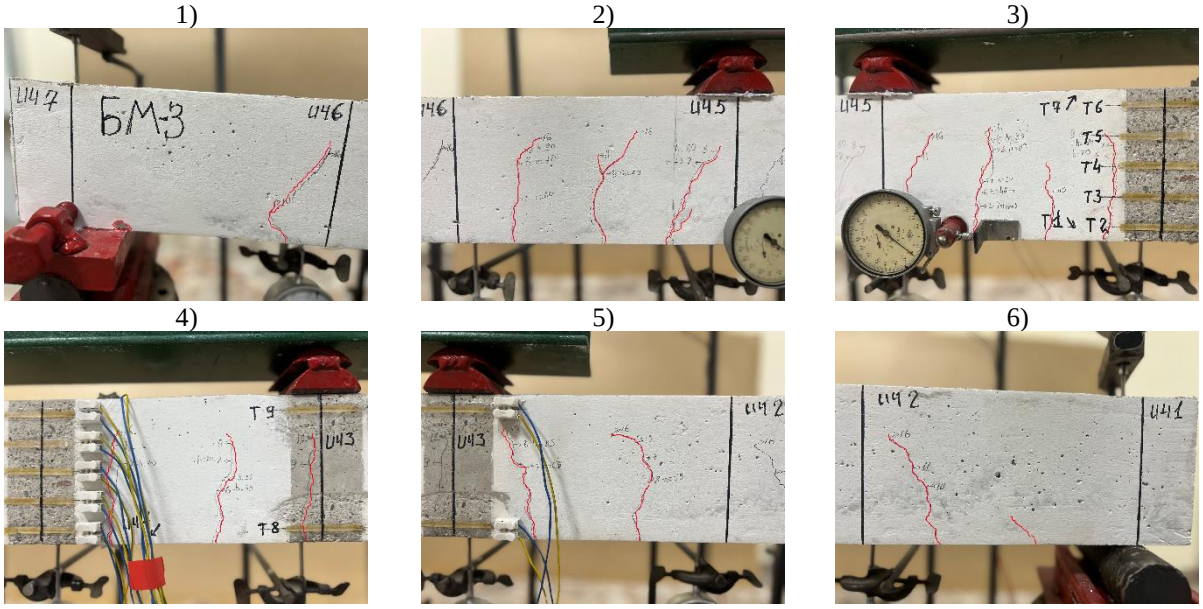


Рис. 6. Характер трещинообразования в модели железобетонной балки БМ-3.

В табл. 2 приведены значения прогибов, относительных деформаций и ширины раскрытия трещин, полученные в зависимости от прикладываемой нагрузки.

Таблица 2

Результаты испытаний модели железобетонной балки БМ-3

№ эт.	Нагрузка на балку F, кН	Выдержка под нагрузкой t, минут	Прогиб в точке измерения ИЧ-4 f, мм	Прогиб в точке измерения ИЧ-5 f, мм	Прогиб в точке измерения ИЧ-6 f, мм	$\varepsilon_b^н$, x10^{-5}	$\varepsilon_b^в$, x10^{-5}	a_{crc}, мм
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	
1	0.45	20	0.06	0.03	0.00	2	2	
2	1	20	0.15	0.11	0.03	4	4	
3	1.6	20	0.25	0.21	0.07	6	6	
4	2.12	20	0.37	0.31	0.11	10	10	
5	2.52	20	0.49	0.43	0.16	18	16	0.000
6	3.03	20	0.79	0.71	0.29	33	24	0.015
7	4.07	20	1.45	1.25	0.60	54	38	0.045
8	5.62	20	2.36	2.03	1.03	81	56	0.096
9	7.62	20	3.63	3.12	1.58	117	79	0.155
10	9.71	20	4.89	4.24	2.41	148	103	0.183
11	10.74	20	5.54	4.78	2.98	163	115	0.196
12	12.09	20	6.33	5.49	2.87	183	131	0.212
13	13.54	20	7.23	6.26	3.32	203	147	0.227
14	15.12	20	8.17	7.10	3.81	227	169	0.244
15	17.05	20	9.47	8.25	4.43	259	194	0.269
16	18.05	20	10.14	8.88	4.78	274	210	0.281
17	18.92	20	10.84	9.48	6.07	291	226	0.300
18	19.1	20	13.77	11.60	6.13	453	272	0.320
19	19.5	20	17.81	14.80	7.69	1100	341	0.625
20	20.02	20	24.22	21.34	10.85	1325	361	2.000

Изгибная форма деформирования модели железобетонной балки БМ-3 при пошаговом приложении нагрузки представлена на рис. 7. График зависимости прогиба от нагрузки для трёх моделей железобетонных балок в средней зоне приведён на рис. 8.

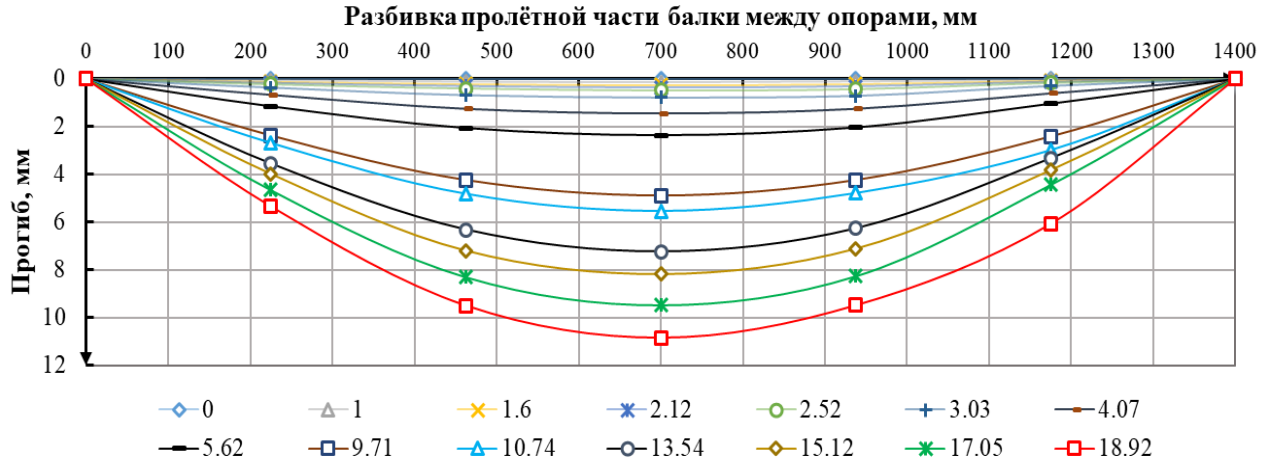


Рис. 7. Изгиб модели железобетонной балки БМ-3

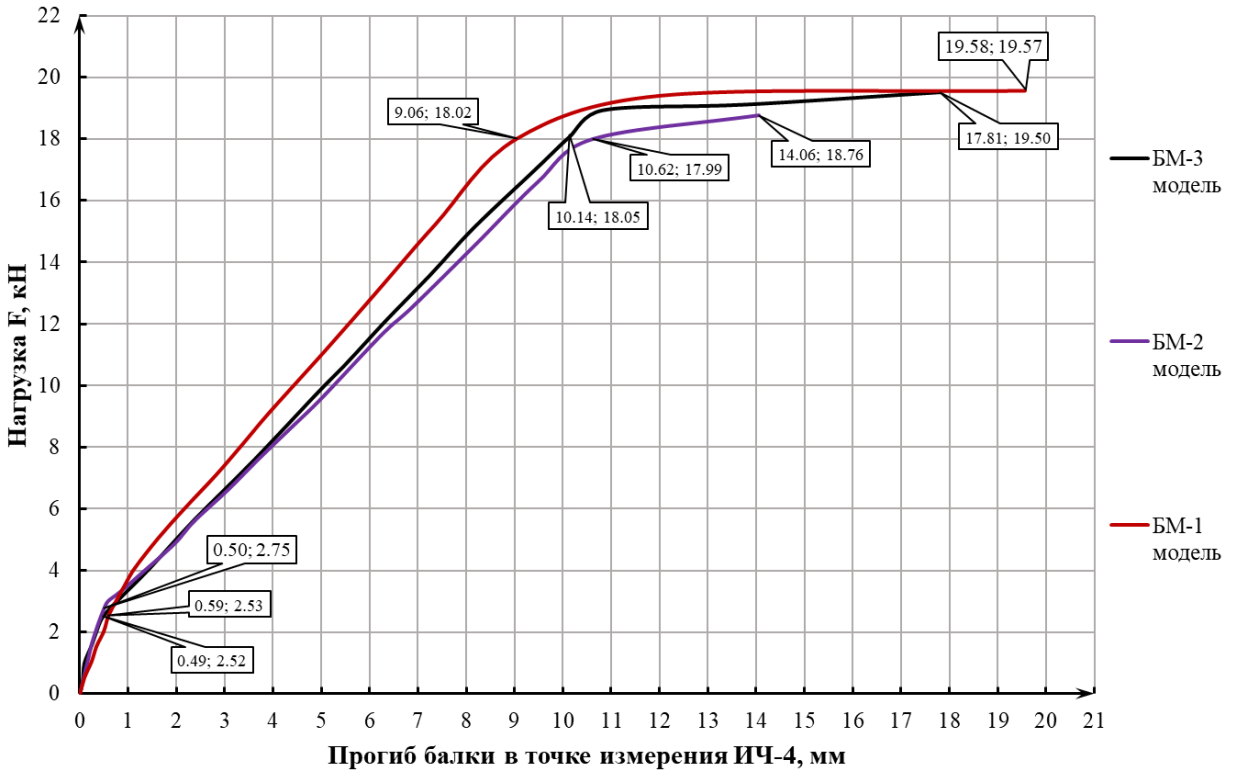


Рис. 8. График зависимости прогиба от нагрузки

Графики зависимости относительной деформации бетона и ширины раскрытия трещин от величины прикладываемой нагрузки приведены на рисунках 9 и 10.

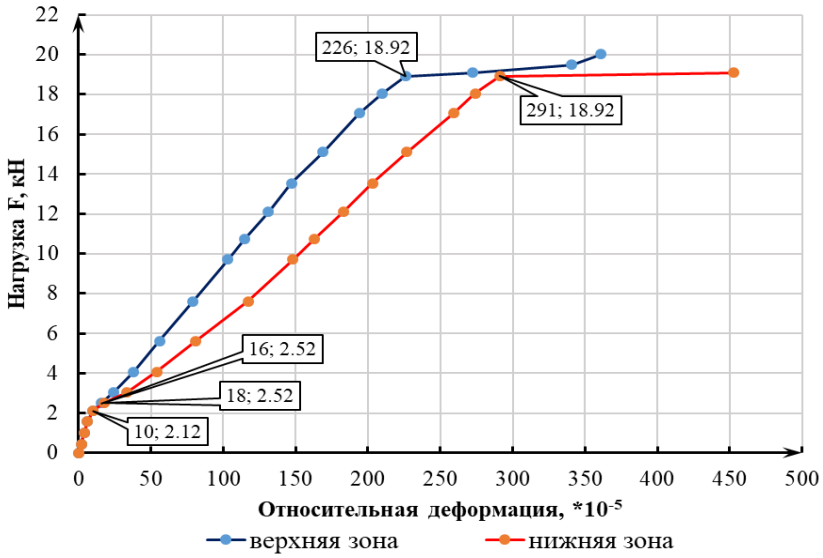


Рис. 9. График зависимости относительной деформации бетона от нагрузки

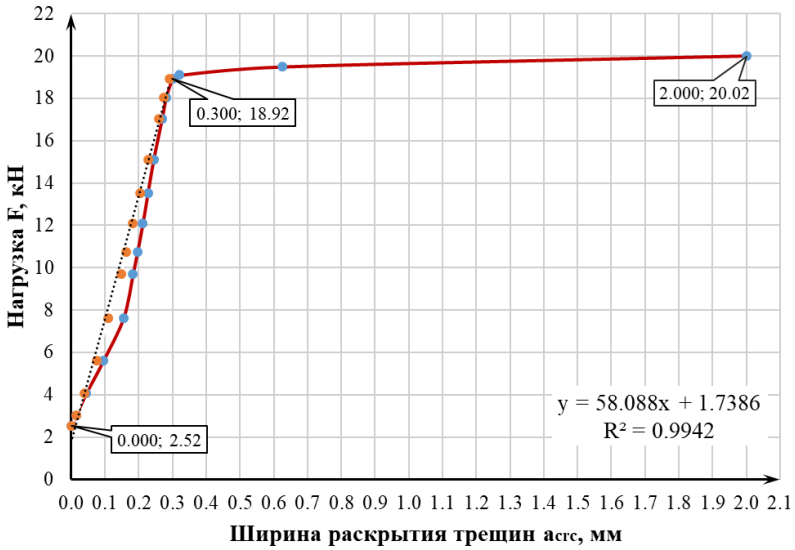


Рис. 10. График зависимости ширина раскрытия трещин от нагрузки

Выводы:

1. Проведённые экспериментальные исследования показали целесообразность применения масштабных моделей для оценки напряжённо-деформированного состояния и предельных состояний натурных железобетонных конструкций, что обеспечивает достаточную точность результатов при снижении затрат на проведение полномасштабных испытаний.

2. Результаты исследования способствуют формированию новых подходов к железобетонным конструкциям, основанных на применении теории подобия и физического моделирования, с последующим уточнением анализа предельных состояний в инженерной практике.

Поступило 19.05.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1965, 303 с.
2. Поляков Л.П., Файнбург В.М. Моделирование строительных конструкций. – Киев: Будівельник, 1975, 82 с.
3. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293782/4293782275.pdf.
4. Каландарбеков И.К., Махмадиев У.М. Применение мелкозернистого бетона при физическом моделировании железобетонных конструкций. – Политехнический вестник. (серия инженерные исследования), 2024, №4(68), – Душанбе: Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, 2022, 189 с. – с. 177-183, ISSN 2520-2227.
5. ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru /Data2/ 1/4294852 / 4294852679.pdf.
6. ГОСТ 34028-2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия растяжение [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293746/4293746568.pdf.
7. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293730/4293730436.pdf.
8. Алабужев П.М., Геронимус В.Б. Теория подобия и размерностей. Моделирование. – М.: Высш. школа, 1968, 206 с.
9. Кирпичев М.В. Теория подобия – М.: 1953, 94 с.
10. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М,: Наука, 1987, 447 с.
11. Мастаченко В.Н. О переходе от параметров модели к параметрам оригинала. - Труды МИИТ, №369, 1971.
12. ГОСТ 26020-83. Двутаври стальные горячекатаные с параллельными гранями полок [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru/Data/211/21141.pdf.
13. Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Махмадиев У.М. Экспериментальные исследования железобетонных балок с целью определения коэффициентов подобий. – Политехнический вестник. (серия инженерные исследования), 2022, №2(58) – Душанбе: Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, 2022. – 164 с. – с. 132-142, ISSN 2520-2227;
14. Махмадиев У.М. О моделировании железобетонной балки. – Международный научний журнал «Молодой ученый», 2022, №48 (443), с. 31-38, URL: https://moluch.ru/archive/443/97222/ ISSN 2072-0297;

Ҷ.Н.Низомов, И.Қ.Қаландарбеков*, У.М.Маҳмадиев*, И.И.Қаландарбеков*, И.Ш.Ашуров*

ТАҲҚИҚОТИ ТАҶРИБАВИИ МОДЕЛҲОИ БОЛОРҲОИ ОҲАНУБЕТОНӢ ДАР АСОСИ НАЗАРИЯИ МОНАНДӢ

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Институти геология, сохтмони ба заминҷунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИ Тоҷикистон,

****Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С.Осимӣ***

Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии моделҳои болорҳои оҳанубетонӣ, ки бо истифода аз усулҳои назарияи монандӣ ва таҳлили ченакҳо гузаронида шудааст, пешниҳод гардидааст. Зарурати

истифодаи моделҳои миқёсӣ дар шароити санҷиши лабораторӣ барои баҳодиҳии ҳолати шиддатнокию шаклтағйирӣ, инчунин пешгӯии рафтори конструксияҳои аслии оҳанубетонӣ асоснок карда шудааст. Усули омода намудани моделҳои болорҳои оҳанубетонӣ, схемаи боргузорӣ ва системаҳои ченкунӣ, ки имкони муайянсозии параметрҳои каҷшавӣ, кушодашавии тарқишҳо ва шаклтағйириҳои нисбиро дорост, тавсиф гардидааст.

Калимаҳои калидӣ: *конструксияҳои оҳанубетонӣ, моделсозии физикӣ, назарияи монандӣ, таҳлили ченакҳо, критерияҳои монандӣ, таҳқиқоти таҷрибавӣ, шаклтағйирӣ, мустаҳкамӣ.*

D.N.Nisomov, I.K.Kalandarbekov*, U.M.Makhmadiev*, I.I.Kalandarbekov*, I.Sh.Ashurov*

EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE BEAM MODELS BASED ON SIMILARITY THEORY

National Academy of Sciences of Tajikistan,
Institute of Geology, Seismic Engineering and Seismology, NAS of Tajikistan,
****Tajik Technical University named after academician M.S.Osimi***

The article presents the results of experimental studies of models of reinforced concrete beams carried out using methods of similarity theory and dimensional analysis. The need for the use of scale models in laboratory tests to assess the stress-strain state and predict the behavior of full-scale reinforced concrete structures is justified. Described is a method of making models, a loading scheme and a measurement system that allows recording parameters of deflections, crack opening and relative deformations.

Key words: *reinforced concrete structures, physical modeling, similarity theory, dimensional analysis, similarity criteria, experimental study, deformability, strength.*

Сведения об авторах:

1. **Низомов Д.Н.** – доктор технических наук, профессор, член-корр. НАНТ, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, заведующий лабораторией сейсмостойкости зданий и сооружений. E-mail: tiees@mail.ru, nizomov-jn@mail.ru;
2. **Каландарбеков И.К.** – доктор технических наук, проф., Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими. E-mail: kalandarbekov-55@mail.ru;
3. **Махмадиев У.М.** – докторант PhD Таджикского технического университета им. акад. М.С.Осими. E-mail: mahmadievu-21061997@mail.ru;
4. **Каландарбеков И.И.** – кандидат технических наук, доцент, Совместный факультет Белорусского национального технического университета – Таджикского технического университета им. акад. М.С.Осими, декан. E-mail: iftikhor791@mail.ru.;
5. **Ашуров И.Ш.** – старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими. E-mail: ashurovidris@gmail.com.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №6

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 624.042
Специальность: 2.1.9. Строительная механика

Член-корреспондент НАН Таджикистана Д.Н.Низомов,
И.К.Каландарбеков[*], И.И.Каландарбеков[*]

ЧИСЛЕННОЕ ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Национальная академия наук Таджикистана,
Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана,
[*]Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими

Статья посвящена исследованию амплитудного спектра Фурье и рассмотрению методики вычисления спектральной плотности для общего случая, когда анализируемый сигнал представлен комплексной функцией частоты. В работе описан алгоритм прямого преобразования Фурье, при котором интегрирование выполняется в области времени, а также представлен вывод обратного преобразования, где интегрирование осуществляется в частотной области. Для подтверждения работоспособности метода рассмотрены и решены тестовые задачи, охватывающие различные типы сигналов. Примеры демонстрируют практическое применение изложенной теории и подтверждают её эффективность при анализе и обработке сигналов в инженерных и научных задачах.

Ключевые слова: *амплитудный спектр Фурье, преобразование Фурье, спектральная плотность, коэффициенты Фурье, комплексная функция, обратное преобразование Фурье, чётная функция, нечётная функция частоты.*

Введение. Одним из важнейших параметров, характеризующих колебания поверхности земли при землетрясениях, является амплитудный спектр Фурье. Он широко применяется в инженерной сейсмологии, особенно при оценке сейсмической опасности, моделировании сильных движений и прогнозировании воздействия на инженерные сооружения. Амплитудный спектр позволяет анализировать распределение энергии сейсмического сигнала по частотам и тем самым выявлять наиболее опасные диапазоны колебаний.

Определение спектральных характеристик и установление их зависимости от основных параметров землетрясений – таких как магнитуда, эпицентральное расстояние, глубина очага, тип грунта и геологические условия – представляет значительный практический интерес. Эти зависимости позволяют разрабатывать более точные модели прогнозирования сейсмического воздействия, учитывать локальные условия площадки и повышать надежность проектирования зданий и сооружений в сейсмоопасных районах. Таким образом, изучение амплитудных спектров и методов их определения является

Адрес для корреспонденции: *Низомов Джахонгир Низомович. 734029, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 267, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана. E-mail: tiees@mail.ru.*
Каландарбеков Имомёрбек Каландарбекович, Каландарбеков Ифтихор Имомёрбекович. 734042, г. Дущанбе, пр. акад. Раджабовых, 10А, Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими. E-mail: kalandarbekov-55@mail.ru; iftikhor791@mail.ru.

актуальной задачей для современных исследований в области сейсмического риска. На основе спектрального анализа определяются преобладающие периоды записей акселерограмм землетрясений. Преобразования Фурье преобразовывают некоторую функцию переменного t в другую функцию переменного ω, и наоборот [1,4-10].

Спектральная плотность $F(\omega)$ в общем случае комплексной функцией частоты может быть представлена в виде

$$F(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt . \tag{1}$$

Функция $F(\omega)$ называется преобразованием Фурье спектральной плотностью исходной функции $f(t)$. Уравнение (1) с учётом $e^{-i\omega t} = \cos\omega t - i\sin\omega t$ может быть представлено в виде

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cos\omega t dt - i\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\sin\omega t dt = a(\omega) - ib(\omega), \tag{2}$$

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cos\omega t dt,\ b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\sin\omega t dt, \tag{3}$$

где i – мнимая единица, функции $a(\omega),\ b(\omega)$ – составляющие спектральной плотности (коэффициенты Фурье).

Функция $F(\omega)$ действительного переменного ω, которая является образом Фурье действительной функции времени $f(t)$, в общем случае является комплексной функцией частоты, имеющей действительную и мнимую части. Предполагается, что функция $F(\omega)$ ограничена и интеграл (1) сходится равномерно по параметру ω. Откуда следует непрерывность функции $F(\omega)$ на всей числовой оси. Модуль этой функции

$$|F(\omega)| = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}, \tag{4}$$

определяет амплитудный частотный спектр. Комплексную функцию $F(\omega)$ можно представить в виде

$$F(\omega) = |F(\omega)|\left(\cos\varphi + i\sin\varphi\right) = |F(\omega)|e^{i\varphi}, \tag{4a}$$

$$\varphi(\omega) = arctg[b(\omega)/a(\omega)], \tag{5}$$

Аргумент $\varphi(\omega)$ – фазовый частотный спектр функции $f(t)$,

$$-\pi/2 < \varphi(\omega) < \pi/2.$$

Обратное преобразование Фурье описывается уравнением

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{\omega=-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega . \tag{6}$$

Уравнение (6) выражает функцию $f(t)$ через её преобразование Фурье. Уравнение (6) описывает синтезирование исходной функции $f(t)$ из различных спектральных компонент $F(\omega)$. Как следует из (1) и (6) при вычислении амплитудного спектра интегрирование производится во временном пространстве, а при обратном преобразовании (6) интегрирование выполняется в частотной области. При этом предполагается, что функция $f(t)$ удовлетворяет соответствующие условиям и интеграл (1) существует в обычном смысле по Лебегу, а интеграл (6) понимается в смысле главного значения по Коши. Равенство (6) при заданной функции $f(t)$ можно рассматривать как интегральное уравнение относительно функции $F(\omega)$, решение которого даётся формулой (1). Может быть и на оборот, решение интегрального уравнения (1) относительно $f(t)$ при заданной $F(\omega)$ даёт формула (6).

Уравнение (6) с учетом (4а) представляется в виде

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|F(\omega)|e^{i(\omega t+\varphi)}d\omega=$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|F(\omega)|\cos(\omega t+\varphi)d\omega+i\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|F(\omega)|\sin(\omega t+\varphi)d\omega.$$

Учитывая, что функция $|F(\omega)|$– чётная, а синус – нечётная функция частоты, интеграл от второго слагаемого равен нулю. Следовательно, обратное преобразование Фурье примет вид

$$f(t)=\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\infty}|F(\omega)|\cos(\omega t+\varphi)d\omega=$$

$$=\frac{1}{\pi}\left[\int_{0}^{\infty}A(\omega)\cos\omega t d\omega-\int_{0}^{\infty}B(\omega)\cos\sin\omega t d\omega\right], \tag{7}$$

$$A(\omega)=|F(\omega)|\cos\varphi,\ B(\omega)=|F(\omega)|\sin\varphi.$$

Из (7) следует, что непериодический сигнал $f(t)$ может быть представлен пределом суммы бесконечно большого числа бесконечно малых гармонических колебаний с амплитудами $|F(\omega)|/\pi$ и начальными фазами $\varphi=\varphi(\omega)$.

Обратное преобразование Фурье (6) с учетом (2) можно также представить в виде

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{\omega=-\infty}^{\infty}\left[a(\omega)-ib(\omega)\right]\left(\cos\omega t+i\sin\omega t\right)d\omega=$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[a(\omega)\cos\omega t+b(\omega)\sin\omega t\right]d\omega+.$$

$$+\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}i\left[a(\omega)\sin\omega t-b(\omega)\cos\omega t\right]d\omega \tag{8}$$

Чтобы сигнал, полученный таким путем, оставался вещественным, необходимо потребовать, чтобы интегралы от нечетной функции в симметричных пределах равнялись нулю

$$\int_{-\infty}^{\infty} a(\omega)\sin\omega t d\omega = 0,\ \int_{-\infty}^{\infty} b(\omega)\cos\omega t d\omega = 0.$$

Это возможно в том случаи, если вещественная часть $a(\omega)$ спектральной плотности сигнала есть четная, а мнимая часть – нечетная функция частоты [1]

$$a(\omega) = a(-\omega),\ b(\omega) = -b(-\omega).$$

В этом случаи обратное преобразование сводится к следующей формуле

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[a(\omega)\cos\omega t + b(\omega)\sin\omega t\right]d\omega =$$

$$= \frac{1}{\pi}\int_{0}^{\infty}\left[a(\omega)\cos\omega t + b(\omega)\sin\omega t\right]d\omega. \qquad (9)$$

Если вещественная функция $f(t)$ является чётной функцией, то есть $f(-t) = f(t)$, то её Фурье-образ также будет четной вещественной функцией, которая приобретает вид

$$F_c(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t)\,e^{-i\omega t}dt = \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t)\left(\cos\omega t - i\sin\omega t\right)dt =$$

$$= \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t)\cos\omega t\,dt = 2\int_{t=0}^{\infty} f(t)\cos\omega t\,dt, \qquad (10)$$

где второй интеграл вследствие нечетности подынтегральной функции обращается в ноль. При этом обратное преобразование (6) записывается в виде

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{\omega=-\infty}^{\infty} F_c(\omega)e^{i\omega t}d\omega =$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F_c(\omega)\left(\cos\omega t + i\sin\omega t\right)d\omega =$$

$$= \frac{1}{\pi}\int_{0}^{\infty} F_c(\omega)\cos\omega t\,d\omega. \qquad (11)$$

Здесь также второй интеграл из-за нечётности $\sin\omega t$ обращается в ноль. Формула (10) определяет косинус – преобразование Фурье чётной функции $f(t)$. Формула (11) определяет обратное косинус – преобразование.

Пример 1. Спектральная характеристика прямоугольного импульса. Предполагается, что одиночный импульс имеет продолжительность τ, а интенсивность p. Следовательно, функция $f(t)$ описывается выражением

$$f(t)=\begin{cases} p, & -\tau/2 \le t \le \tau/2, \\ 0, & t<-\tau/2,\ t>\tau/2. \end{cases}$$

С использованием формулы (1), получим

$$F(\omega)=\int_{t=-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt = p\int_{t=-\tau/2}^{\tau/2} e^{-i\omega t}dt =$$

$$=-\frac{p}{i\omega}\left(e^{-i\omega\tau/2}-e^{i\omega\tau/2}\right)=p\tau\frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2}, \qquad \text{(а)}$$

откуда следует, что спектральная характеристика (спектральная плотность) прямоугольного импульса является вещественной функцией и модуль этой функции

$$|F(\omega)|=p\tau\frac{\left|\sin(\omega\tau/2)\right|}{\omega\tau/2}. \qquad \text{(б)}$$

Из формулы (а) следует, что при $\omega=0$, в соответствии с правилом Лопиталя, получим максимальное значение спектральной плотности

$$F(0)=\lim_{\omega\to0}p\tau\frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2}=\lim_{\omega\to0}p\tau\frac{\left(\sin(\omega\tau/2)\right)'}{\left(\omega\tau/2\right)'}=$$

$$=\lim_{\omega\to0}p\tau\frac{\tau/2\cos(\omega\tau/2)}{\tau/2}=\lim_{\omega\to0}p\tau\cos(\omega\tau/2)=p\tau.$$

При значениях аргумента $\omega\tau/2=n\pi$ и $\omega=2n\pi/\tau$, где $n=1,2,\ldots$, спектральная плотность обращается в ноль $F(\omega)=0$.

Обратное преобразование Фурье (6) с учетом (б) приводит к интегральной функции синуса

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|F(\omega)\right|e^{-i\varphi(\omega)}e^{i\omega t}d\omega=$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|F(\omega)\right|d\omega=\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\infty}p\tau\frac{\left|\sin(\omega\tau/2)\right|}{\omega\tau/2}d\omega=$$

$$=\left|\begin{matrix}\omega\tau/2=x,\\ d\omega=(2/\tau)dx\end{matrix}\right|=\frac{p\tau}{\pi}\frac{2}{\tau}\int_{0}^{\infty}\frac{\sin x}{x}dx=\frac{2p}{\pi}\mathrm{Si}(x). \qquad \text{(в)}$$

Если учесть, что предел интегрального синуса равняется

$$\lim_{x\to\infty}\mathrm{Si}(x)=\int_0^{\infty}\frac{\sin x}{x}dx=\frac{\pi}{2},$$

то мы получим $f(t)=p$.

Таким образом, на примере тестовой задачи, где исходная функция представляется в виде одиночного прямоугольного импульса, показаны получения Фурье-образа функции $f(x)$ (а), (б) и прообраз функции $F(\omega)$ (в). Данный пример будет использован в качестве тестовой задача для анализа достоверности результатов численного моделирования, которое будет ниже применено для прямого и обратного интегрирования Фурье.

Численное интегрирование преобразования Фурье

Интегрирование преобразования Фурье осуществим численным методом. С этой целью используем формулу Симпсона, которая обладает повышенной точностью для полиномов не только второй, но и третьей степени [2,3]. Интегралы (3**)** с применением формулы Симпсона представляются в виде

$$a(\omega)=\sum(t-2\Delta\tau)+\frac{\Delta\tau}{3}\big[f(t-2\Delta\tau)\cdot\cos\omega(t-2\Delta\tau)+$$

$$+4f(t-\Delta\tau)\cdot\cos\omega(t-\Delta\tau)+f(t)\cdot\cos\omega(t)\big], \qquad (12)$$

$$b(\omega)=\sum(t-2\Delta\tau)+\frac{\Delta\tau}{3}\big[f(t-2\Delta\tau)\cdot\sin\omega(t-2\Delta\tau)+$$

$$+4f(t-\Delta\tau)\cdot\sin\omega(t-\Delta\tau)+f(t)\cdot\sin\omega(t)\big], \qquad (13)$$

где $\sum(t-2\Delta\tau)$ – результат суммирования для предшествующего интервала времени $t-2\Delta\tau$, $\Delta\tau$ – шаг интегрирования. Численный процесс суммирования осуществляется в конце каждого шага $2\Delta\tau$, который разбивается на 2 равных частей. Численное интегрирование в (12) и (13) производится при $\omega_k=k\Delta\omega,\quad k=0,1,2,...,N$, а затем по формулам (4) и (5) вычисляются амплитудные и фазовые спектры функции $f(t)$. Чтобы получить амплитудные спектры в зависимости от периода в (12) и (13) производим замену круговой частоты на период

$$\omega_k=2\pi/T_k,\ T_k=(k-1)\Delta T,\ \Delta T=T_{\max}/N=0.015\,\text{с}.$$

При этом шаг интегрирования $\Delta\tau$ принимается равным $\Delta t/2$, где Δt – шаг оцифровки акселерограммы. В результате численного интегрирования во временной области получим массивы чисел $a(T_k)$ и $b(T_k)$. Затем по формуле (4) вычисляются значения амплитудного спектра, соответствующие различные различным моментам времени.

Численное интегрирование обратного преобразования по формуле (7) записывается в виде

$$f(t)=\sum(\omega-2\Delta\omega)+\Delta\omega*\big[|F(\omega_{i-2})|\cos(\omega_{i-2}t+\varphi_{i-2})+$$

$$+4|F(\omega_{i-1})|\cos(\omega_{i-1}t+\varphi_{i-1})+|F(\omega_i)|\cos(\omega_i t+\varphi_i)\Big], \tag{14}$$

где $\omega_i=\omega,\quad \omega_{i-1}=\omega-\Delta\omega,\quad \omega_{i-2}=\omega-2\Delta\omega,\quad \Delta\omega^*=\Delta\omega/3\pi$,

$$\varphi_i=\varphi(\omega),\quad \varphi_{i-1}=\varphi(\omega-\Delta\omega),\quad \varphi_{i-2}=\varphi(\omega-2\Delta\omega).$$

Численное интегрирование обратного преобразования Фурье по формуле (9) представляется в виде

$$f(t)=\sum(\omega-2\Delta\omega)+$$

$$+\Delta\omega^*\big[a(\omega_{i-2})\cos(\omega_{i-2}t)+b(\omega_{i-2})\sin(\omega_{i-2}t)+$$

$$+4\big(a(\omega_{i-1})\cos(\omega_{i-1}t)+b(\omega_{i-1})\sin(\omega_{i-1}t)\big)+$$

$$+a(\omega_i)\cos(\omega_i t)+b(\omega_i)\sin(\omega_i t)\big]. \tag{15}$$

В случаи использования косинус преобразования Фурье (10) и (11) представляются в виде

$$F_c(\omega)=\sum(t-2\Delta\tau)+$$

$$+\Delta\tau^*\big[f(t-2\Delta\tau)\cdot\cos\omega(t-2\Delta\tau)+$$

$$+4f(t-\Delta\tau)\cdot\cos\omega(t-\Delta\tau)+f(t)\cdot\cos\omega(t)\big], \tag{16}$$

$$f(t)=\sum(\omega-2\Delta\omega)+$$

$$+\Delta\omega^*\big[F_c(\omega-2\Delta\omega)\cdot\cos((\omega-2\Delta\omega)t)+$$

$$+4F_c(\omega-\Delta\omega)\cdot\cos((\omega-\Delta\omega)t)+$$

$$+F_c(\omega)\cdot\cos(\omega t)\big], \tag{17}$$

где $\Delta\tau^*=\Delta\tau/3\pi$, $\Delta\omega^*=2\cdot\Delta\omega/3$, $\Delta\tau,\Delta\omega-$ шаги интегрирования по времени и частоте соответственно.

Реализации алгоритма численного решения

Пример 2. Реализации алгоритма численного решения преобразования Фурье. Прямое преобразование осуществляется от заданной функции $f(t)$ в виде одиночного прямоугольного импульса продолжительностью $\tau=0.25$с, интенсивностью $p=1$. Шаг оцифровки импульса принимаем $\Delta\tau=0.025$, шаг интегрирования по времени методом Симпсона $\Delta\tau_1=\Delta\tau/2$, наибольшая частота $\omega_{\text{m}}=100$ рад/с, шаг интегрирования по частоте принимается $\Delta\omega=\omega_m/40=2.5$ рад/с.

На основе разработанной компьютерной программы **SPECTR-15** получены результаты дискретного преобразования, которые сопоставлены с аналитическим решением (а)-(в). На рис.1 представлены графики изменения коэффициентов Фурье

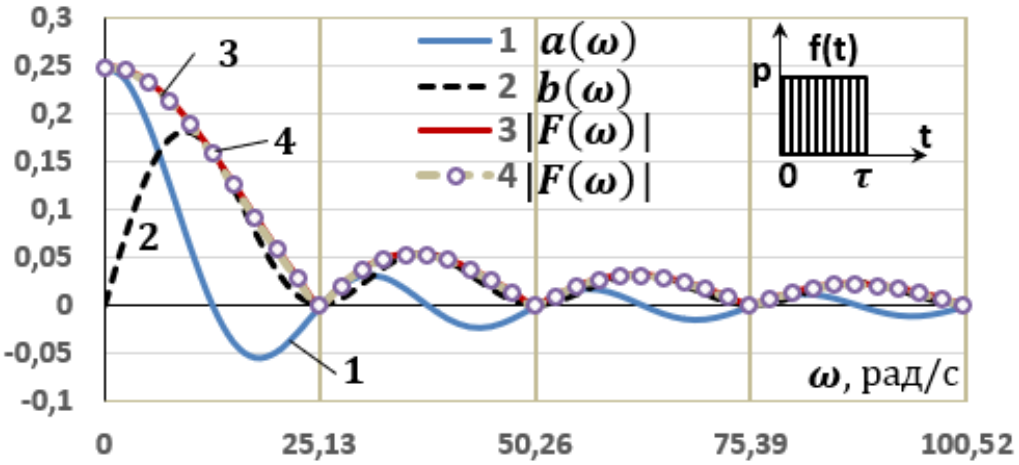


Рис. 1. Коэффициенты Фурье и амплитудный спектр прямоугольного импульса.

$$a(\omega) = p\int_{t=0}^{\tau} \cos\omega t dt\,,\ b(\omega) = p\int_{t=0}^{\tau} \sin\omega t dt\,,$$

полученные численным интегрированием (кривые 1 и 2), а также графики амплитудного спектра, полученные по формуле (4) и (б) (кривые 3 и 4 соответственно). Видно, что результаты численного моделирования практически совпадает с данными аналитического решения.

Обратное преобразование, выполненное с использованием косинус преобразования (15), приводит к следующему результату

0	**0.025**	**0.05**	**0.075**	**0.1**	**0.125**	**0.15**	**0.175**	**0.2**	**0.225**	**0.25**
0.974	**0.992**	**1.021**	**1.021**	**0.991**	**0.973**	**0.992**	**1.024**	**1.024**	**0.989**	**0.989**

где в первой строке указаны время, а на второй строке приведены соответствующие значения импульса. Наибольшая погрешность по сравнению с аналитическим решением составляет 3.4%.

Вывод. Разработанные алгоритмы и программы численного построения спектров Фурье позволяют проводить исследования по спектральному анализу сейсмических воздействий различной интенсивности. На основе разработанной компьютерной программы **SPECTR-15** получены результаты дискретного преобразования, которые сопоставлены с аналитическим решением.

Поступило 07.04.2025 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 2000, 462 с.
2. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1970, 664 с.
3. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. – М.: Стройиздат, 1979, 320 с

4. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: «Наука», 1976, 543 с.
5. Маркус Бат. Спектральный анализ в геофизике. – М.: «Недра», 1980, 535 с.
6. Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Ходжибоев А.А. Спектральный анализ сейсмических колебаний. – ДАН РТ, 2015, т. 58, №11, с. 1009-1016.
7. Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. Спектры сейсмических колебаний на воздействие в виде заданной акселерограммы. – ДАН РТ, 2017, т. 60, №3-4, т. 151-156.
8. Низомов Д.Н., Каландарбеков И. Метод сосредоточенных деформаций. – Душанбе: «Дониш», 2015, 436 с.
9. Снеддон И. Преобразование Фурье. – М.: ИЛ, 1955, 667 с.
10. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М.: Либроком, 2009, с. 2-4.

Ҷ.Н.Низомов, И.Қ.Қаландарбеков[*], И.И.Қаландарбеков[*]

СОХТИ АДАДИИ СПЕКТРҲОИ ЛАППИШИ СЕЙСМИКӢ

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
Институти геология, сохтмони ба заминҷунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИ Тоҷикистон,
[*]Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ

Мақола ба спектри амплитудаи Фуре бахшида шудааст ва методикаи муайян кардани зичии спектралӣ барои ҳолати умумии, ҳангоме, ки сигнали таҳлилшуда ҳамчун функсияи комплексии зуддии пешниҳод шудааст, дида баромада шудааст. Дар кор алгоритми табдилдиҳии рости Фурйе, ки дар он интегриронӣ дар фазои вақт иҷро карда мешавад, дида баромада шудааст, инчунин хулосаи табдилдиҳии баръакси Фуре, ки дар он интегриронӣ дар фазои зуддӣ гузаронида мешавад, оварда шудааст. Барои тасдиқи дурустии методи коркард шуда масъалаҳои тестӣ ҳал карда шудаанд, ки намудҳои ҳархелаи сигналро дар бар мегиранд. Ҳалли мушаххаси мисолҳои тестӣ татбиқи амалии назарияи оварда шуда ва самаранокии онро ҳангоми таҳлил ва коркарди сигналҳо дар масъалаҳои муҳандисӣ ва илмӣ нишон медиҳад.

Калимаҳои калидӣ: *спектри амплитудаи Фуре, табдилдиҳии Фуре, зичии спектралӣ, коэффисиентҳои Фуре, функсияи комплексӣ, табдилдиҳии баръакси Фуре, функсияи ҷуфт, функсияи тоқи зуддӣ.*

D.N.Nizomov, I.K.Kalandarbekov[*], I.I.Kalandarbekov[*]

NUMERICAL CONSTRUCTION OF SEISMIC OSCILLATION SPECTRA

National Academy of Sciences of Tajikistan,
Institute of Geology, Earthguake Resistant Construction and Seismology, NAS of Tajikistan,
[*]Tajik Technical University named after academician M.S.Osimi

The paper is devoted to the study of the Fourier amplitude spectrum and consideration of the technique of calculating the spectral density for the general case when the analyzed signal is represented by a complex function of frequency. The paper describes the algorithm of the direct Fourier transform, where integration is

performed in the time domain, and presents the derivation of the inverse transform, where integration is performed in the frequency domain. To confirm the performance of the method, test problems covering different types of signals are considered and solved. Examples demonstrate the practical application of the theory and confirm its effectiveness in analyzing and processing signals in engineering and scientific problems.
Key words: *Fourier amplitude spectrum, Fourier transform, spectral density, Fourier coefficients, complex function, inverse Fourier transform, even function, odd frequency function.*

Сведения об авторах:

1. **Низомов Джахонгир Низомович** – доктор технических наук, профессор, член корр. НАНТ, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, заведующий лаборатории «Сейсмостойкость зданий и сооружений». E-mail: tiees@mail.ru;
2. **Каландарбеков Имомёрбек Каландарбекович** – заслуженный работник Таджикистана, доктор технических наук, Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство». E-mail: kalandarbekov-55@mail.ru;
3. **Каландарбеков Ифтихор Имомёрбекович** – кандидат технических наук, доцент, Совместный факультет Белорусского национального технического университета – Таджикского технического университета им. акад. М.С.Осими, декан. E-mail: iftikhor791@mail.ru.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №6

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 661.9+6626:662.7
Специальность: 1.4.1. Неорганическая химия
2.6.7. Технология неорганических веществ
2.2.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

З.Х.Гайбуллаева, Т.Х.Гадоев*, Б.И.Асроров, Ш.Б.Бахриддинзода, Ф.М.Рахимов*

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЯ ФОН-ЯГНОБСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ЕГО СОСТАВА

Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими,
****ОАО «АЗОТ»***

(Представлено академиком НАН Таджикистана У.М.Мирсаидовым 11.03.2025 г.)

В статье приведены результаты исследования процесса термической обработки угля для выделения летучих веществ из его состава. Определена зависимость содержания углерода в летучих веществах от содержания углерода и водорода. Элементарный состав летучих веществ содержит: фенолы C_6H_5OH и пиридины C_5H_5N, стиролы, метан CH_4, бензол C_6H_6 и его гомологи, антрацены $C_{14}H_{10}$, метилнафталены $C_{11}H_{10}$ и другие, выделяемые при нагреве образца.

Ключевые слова: *уголь, сжигание, выбросы газов, состав, летучие вещества, термолиз, декарбонизация, газификация.*

Одна из главных проблем современности и ближайшего будущего является обеспечение страны достаточным количеством энергии. Проблема эта довольно острая, имеющая не только технический, но и социально-экономический характер. Её надо решать в рамках нескольких противоречивых проблем, включающих индустрализацию экономики, сохранение чистоты атмосферы, обеспеченности потребности экономики в эффективном энергоносителе, желательно местного происхождения. Проблему энегообеспечения экономики страны требует комплексного подхода, но с ориентиром на использование местных сырьевых ресурсов.

Таджикистан импортирует из соседных стран энергоносители – природный газ и нефтепродукты и ежегодно тратит огромные средства на их приобретение. Природный газ в основном используется в качестве сырья для производства химических веществ широкого применения, например, на ОАО «Азот», импортируемый из Узбекистана природный газ используется для производства аммиака и карбамида.

В зимний период подача импортного природного газа уменьшается и многие производства, в том числе и на ОАО «Азот», простаивают и не могут производить свою продукцию, тем самым невольно они превращаются сезонными производствами. Поэтому возникает необходимость решать данную проблему использованием взамен природного газа другими энергоносителями: углём, нефтью,

Адрес для корреспонденции: *Гайбуллаева Зумрат Хабибовна, 734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. академиков Раджабовых, 10, Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими.*

сланцами и переработкой их в жидкие и газовые энергоносители. В металлургии и энергетике широко известно применение способа газификации угля для получения газовых энергоносителей. Следовательно, преобразование энергии твердого топлива в энергию газовых энергоносителей путем его газификации может быть альтернативным способом замены использования дорогого природного газа [1].

Уголь - наиболее экологически опасное энергетическое сырьё среди ископаемых топлив. Имеет многокомпонентный состав, состоящий из углерода, минеральных веществ, воды, летучих и смолистых компонентов и др. В свою очередь, летучие и смолистые вещества состава угля являются многокомпонентными, содержащими фенолы C_6H_5OH и пиридины C_5H_5N, стиролы, метан CH_4, бензол C_6H_6 и его гомологи, антрацены $C_{14}H_{10}$, метилнафталены $C_{11}H_{10}$ и другие и при их газификации образуются также много веществ, но уже в газовом состоянии. Поэтому, использование традиционных технологий газификации угля не способствует получению чистых газовых энергоносителей ввиду того, что продуктом такой газификации является многокомпонентная смесь, при сжигание которой образуются много веществ, которых, как и при прямом сжигании угля, надо выбрасывать в атмосферу.

В настоящее время изменение климата под влиянием выбросов газов от сжигания ископаемого топлива в атмосферу достигла своего критического масштаба. Чтобы предотвратить данное явление или хотя бы снизить его масштаб в 2015 г при участие представителей 197 стран мира было принято Парижское соглашение о борьбе с изменением климата [2], которое предусматривает снизить количество выбросов газов в атмосферу переходом от использования ископаемого топлива на широкое использование зеленых видов энергоносителей, т.е.энергии водорода, солнечной энергии, ветряной энергии и вырабатываемой гидроэнергостанциями, и тем самим обеспечить декарбонизацию производства материалов и тепла.

Процесс декарбонизации является одним из основных задач научных исследований по достижению нулевого уровня выбросов от сжигания угля. Увеличение выбросов углекислого газа образующийся при сжигании угля оказывает негативное влияние на сельское хозяйство и производство продуктов питания, увеличивает риск экстремальных погодных условий, ухудшает здоровье населения. Изменение климата и его огромные последствия стимулируют процесс декарбонизации. Для достижения целей декарбонизации разрабатываются множество новых научных решений, способствующих сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу за счет их улавливания и использования как сырьё в других отраслях народного хозяйства [3-7].

Для снижения выбросов от сжигания ископаемого топлива Правительством Таджикистана принята стратегия создания «зеленой» экономики на период 2023-2037 гг, которая сосредоточена на мерах по эффективному использованию природного капитала, внедрению современных, инновационных и энергосберегающих технологий, усиление проведения научных исследований в области промышленности и обеспечение технологического развития производственных мощностей, увеличение объемов производства и обеспечение потребности внутреннего рынка экологически чистой продукцией [8]. В русле выполнения данной стратегии развития зеленой энергетики нами разработаны технологии переработки угля [9-11], которые позволяют предварительно выделить все летучие вещества его состава, а затем провести газификацию оставшегося углерода, что позволяет получить генераторный газ, использование которого в качестве энергоносителя способствует исключению выбросов диоксида углерода в

атмосферу. Исследование было проведено с использованием проб угля Фон-Ягнобского месторождения (Таджикистан). Составы угля месторождения Фон-Ягноб для разных пластов более детально изучены в работе [12], в вышеуказанных работах [9-11] для осуществления газификации использована проба угля следующего среднего состава, мас%: C – 81.0; H – 5.2; N – 1.0; O – 2.0; S – 1.4; зола – 5.3; влажность угля – 4.0, содержание летучих веществ 0.98%, содержание смолы 4.5%. До газификации углерода был исследован процесс термолиз угля при температурах до 550°C для выделения летучих веществ и исследования их состава [13]. Результаты исследования процесса выделения летучих веществ состава угля приведеы ниже.

В таблице 1 приведены данные по составу продуктов процесса термолиза угля из разных пластов месторождения Фон Ягноб.

Таблица 1

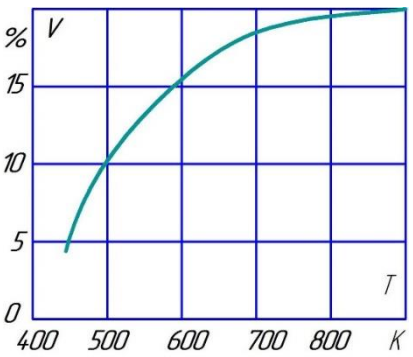
Состав продуктов разложения угля при нагреве

Образцы пласта угля месторождения Фон Ягноб	Выход продуктов нагрева угля на горячую массу			Зольность, А, %	Конечная температура нагрева, °C
	Смолы	Вода разложения	Газ		
16[а]	14.0	22.5	27.2	36.6-40.3	543
16[1]	16.0	22.5	27.5	25.3	543
16	9.2	20.5	25.2	27.8-35.5	500
15[а]	20.2	24.7	20.8	16.6-35.8	500
15	8.9	21.1	22.3	26.6-33.4	493
14[а]	14.1	19.2	26.5	29-36	493
14	7.7	12.8	18.0	31-35	493
13	15.6	14.3	26.0	32-33	500
12[с]	5.3	10.1	24.8	32-34	500
12[в]	14.2	3.3-6.0	24.0	23-24	543
12	4.0	0-1	10.2	27-38	543
11	63.5	2.8	15.6	32-31	543

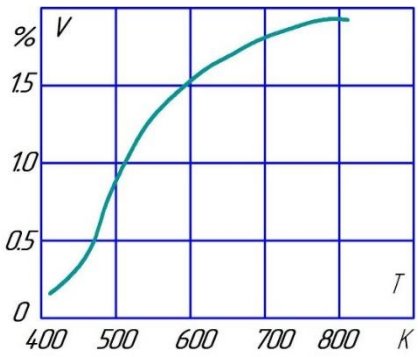
В результате термогравиметрического исследования определена зависимость выхода летучих веществ от температурного интервала процесса термообработки угля (рис.1). Численные значения выхода продуктов состава угля при его термическом разложении отражают кинетику процесса термолиза угля.

В настоящий период использование угля в качестве энергоносителя требует определения всех выделяемых продуктов его состава при нагревании, так как полученные вещества можно использовать согласно их составу и свойствам в различных промышленных производствах.

а)



б)



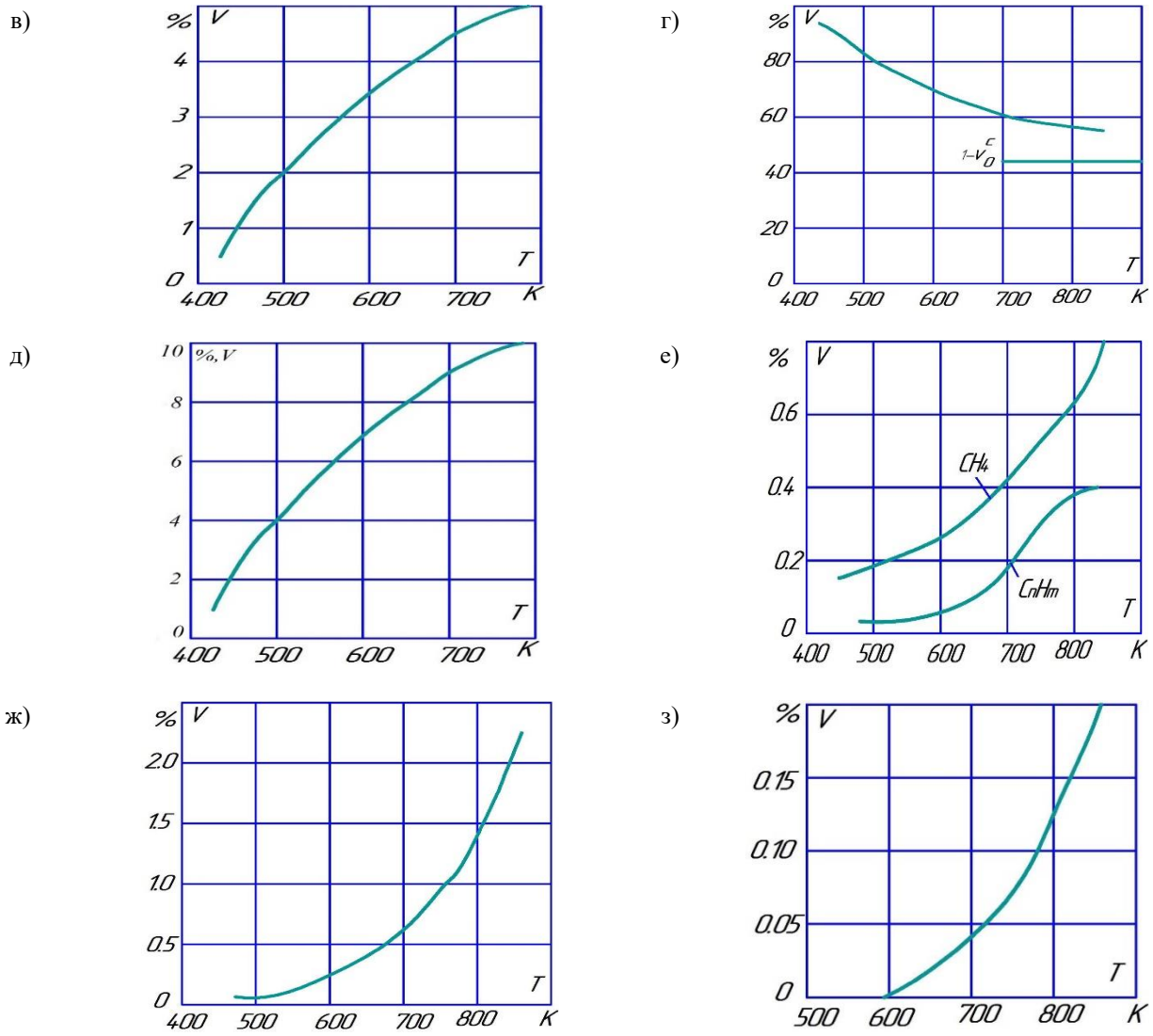


Рис. 1. Зависимости выхода летучих веществ от температуры нагрева пробы угля месторождения Фон Ягноб для: а) воды; б) кислот; в) смолы; г) полукокса; д) CO_2; е) CH_4 и C_nH_m; ж) CO; з) H_2.

Важным является знание элементарного состава летучих веществ: содержание углерода и водорода, а также суммарное количество выхода летучих веществ от соотношения водорода к углероду в их составе. На рис.2 показана зависимость объёма выхода летучих веществ (V, %), а на рис.3 приведена зависимость выхода углерода (C, %) от соотношения водорода к углероду (H/C), в составе летучих веществ.

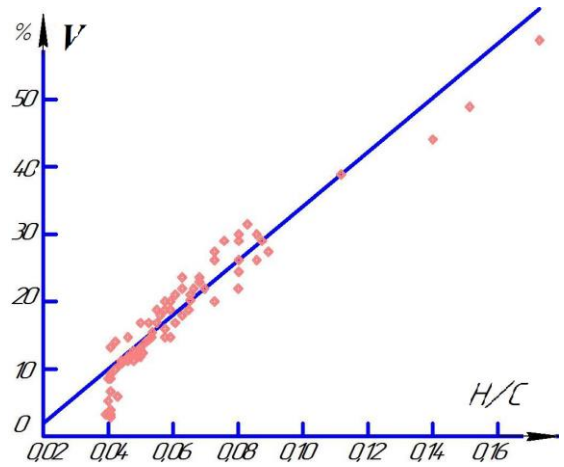


Рис. 2. Зависимость объёма выделяемых летучих веществ от соотношение содержания водорода и углерода в их составе: точки – экспериментальные данные; линия – расчётное значение.

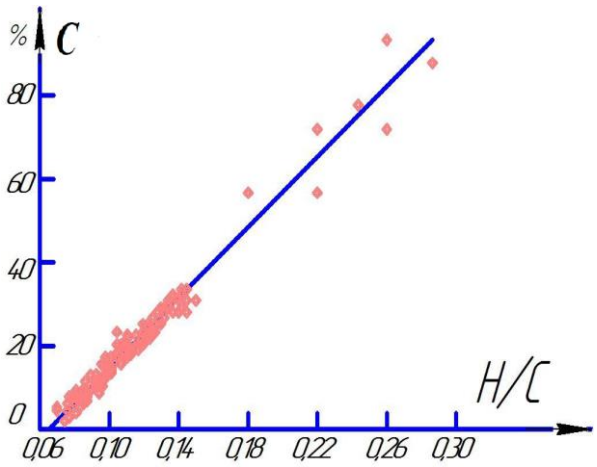


Рис. 3.Зависимость содерания углерода от соотношение водорода и углерода в составе летучих веществ: точки – экспериментальные данные; линия – расчётное значение.

Эти зависимости показывают на прямолинейную зависимость содержания водорода и углерода в составах летучих веществ. Экспериментально определённые значения содержаний H_2 и С лежат вдоль расчётной линии. Исследованы также характеристики летучих веществ, зависящих не от отношения количества водорода к количеству углерода в исследуемой пробе, а от топливного коэффициента угля β [14]. На рис.4 и 5 приведены зависимости значений относительных содержаний углерода и кислорода в составах летучих веществ от значения топливного коэффициента угля β, рассчитанных по формулам [14]

$$C/V = 190\ \beta + 25, \quad (1)$$

$$O/V = 66 - 220\ \beta, \quad (2)$$

где С – содержание углерода; О – содержание кислорода; V – объём летучих веществ угля; β – топливный коэффициент угля.

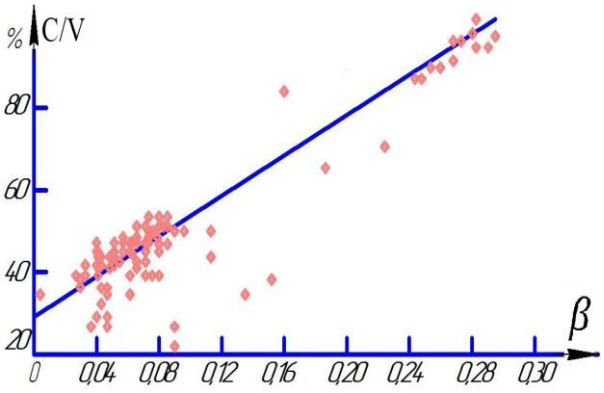


Рис. 4. Относительное содержание углерода в летучих веществах.

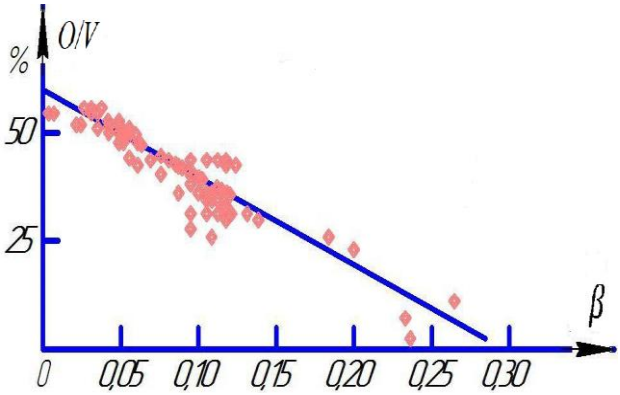


Рис. 5. Относительное содержание кислорода в летучих веществах.

Зависимость значений теплоты сгорания летучих веществ состава угля (Q, мДж/кг) согласно формуле [14]

$$Q = 105\ \beta + 33 \qquad (3)$$

приведена на рис. 6.

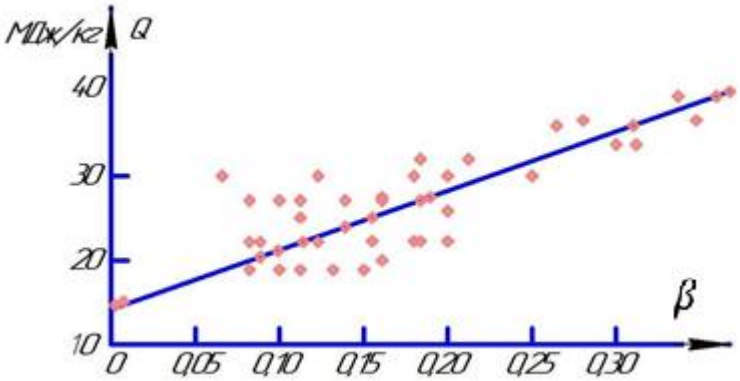


Рис. 6. Зависимость значений теплоты сгорания летучих веществ от значения топливного коэффициента угля.

Значение топливного коэффициента для угля Фон-Ягнобского месторождения рассчитана по формуле [14]

$$\beta = 2.35\ (H+O/8)/(C+S+0/375), \qquad (4)$$

где H, O, C, S – соответственно содержание водорода, кислорода, углерода и серы в составе летучих веществ угля.

Нагрев образца приводит к разрыву физико-химических связей внутри составляющих его компонентов угля с последующим образованием конечных продуктов разложения. Скорость разрушения структуры угля или образования выделяемых веществ можно описать уравнением первого порядка как

$$d(V/C)/dt = K\ (1-V/C), \qquad (5)$$

где V – количество выделяемых веществ при нагреве угля за время (t); t – время термообработки угля; C – общее количество веществ, выделяемых при полном разрушении связей веществ состава угля, ($0 \leq V \leq C$); K – константа скорости реакции выделения летучих веществ.

Константа скорости реакции определяется по уравнению Аррениуса

$$K = K_o \cdot e^{-E/(RT)}. \qquad (6)$$

где K_o – предэкспоненциальный множитель константы скорости реакции; E – энергия активации реакции выделения летучих веществ; R – газовая постоянная; T – температура, K.

Интегрированием уравнения (5) можно получить уравнение для расчёта объёма выделяемых летучих веществ (V) при его термической обработке.

Определение суммарного количества летучих веществ, выделяющееся к моменту времени t по формуле (5) не может полностью определить сложный процесс разложения летучих компонентов при нагреве угля, но она отражает суммарную кинетику процесса, связывая её с основными факторами

процесса термообработки: температурой и временем. Эта зависимость была применима нами при изучении кинетики нагрева вышеприведённого состава угля месторождения Фон-Ягноб. Были определены следующие кинетические данные: $V_{макс.}$=31.0%; E= 30.6 мДж/моль; K_o =14.2 c^{-1}.

Интегрирование уравнения (5) и его решение позволяет определить только суммарный выход летучих веществ во времени в зависимости от температурного режима, а для определения состава летучих можно использовать квазистатический метод расчёта выхода отдельных компонентов состава летучих веществ. Для этого сначала определяем суммарный выход летучих веществ к заданному моменту времени, а потом по температуре разложения определяем выход отдельных их составляющих. Полученные таким образом данные являются исходными для расчета состава продуктов нагрева образца, выделившиеся к заданному моменту времени, в интервале следующих температур нагрева: 500–360 °C – каменноугольный пек; 360–270 °C – антрацены; 270–230 °C – метилнафталены; 230 – 210 °C – нафталеновая фракция; 200– 170 °C – фенолы и пиридины;170–90 °C – бензол и его гомологи; до 100–90°C– конденсируются водяные пары и неконденсируемые газы. Таким образом, основное влияние на состав продуктов нагрева оказывает температурный уровень процесса и время пребывания уже образовавшихся высокомолекулярных продуктов.

З а к л ю ч е н и е

При нагревании угля в пределах от 90 до 500^{0}C выделяются летучие вещества из состава угля, как отдельные продукты. Исследования показали зависимость получения этих веществ от времени и температуры нагревания. Выделение летучих веществ состава угля из его состава способствует в дальнейшем провести газификацию чистого углерода, что позволяет получить генераторный газ определённого состава, при сжигание которого выбросы CO_2 будут, в зависимости от сжигания H_2, CO или CH_4, отсутствовать или уменьшаться.

Поступило 11.03.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Маляренко В.А., Яковлев А.И. Преобразование энергии твердого топлива в газовые. – Альтернативные источники энергии, 2010, №5 (75), с. 36-46.
2. Парижское соглашение. Un.org [Электронный ресурс]. URL: https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement (дата обращения: 1 марта 2025).
3. Мешалкин В.П., Росляков П.В., Госева Т.В., Дови В.Д. Новые технологические показатели выбросов золы твердого топлива и диоксида серы для тепловых электростанций и наилучшие доступные технологии очистки газов. – Экология и промышленность России, 2021, т. 25, №8, с. 40-46. DOI 10. 18412/1816-0395-2021-8-40-46.
4. Киндра В.О., Рогалев А.Н., Рогалев. Н.Д. Кислородотопливные технологии производства электроэнергии с нулевыми выбросами вредных веществ в атмосферу. – М.: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2017, с. 110-113.
5. Ширинкина Е.С., Слюсарь Н.Н, Коротаев Н.В. Улавливание CO_2 от стационарных источников с последующей закачкой в подземные горизонты: обзор современных технологических решений

экология и промышленность России, 2021, т. 25, № 10, с. 64-71. DOI 10.18412/1816-0395-2021-10-64-71.

6. Кузнецов Б.Н., Чесноков Н.В. Перспективные термокаталитические процессы переработки бурых и спропелитовых углей в синтетические топлива, связывающие и углеродные материалы. – Химия в интересах устойчивого развития. 2017, т. 25, с. 231-244. DOI: 10.15371/ KhU R2017030 1.
7. Соловьев Е.А. Получение водорода и нановолокнистого углерода селективным каталитическим пиролизом легких углеводородов. Дисс…. канд. тех. наук. – Москва, 2008, 133 с.
8. Стратегия развития «зеленой» экономики в Республике Таджикистан на 2023-2037 годы. [Электронный ресурс]. URL: http://www.portali-huquqi.tj/publicadliya/view_qonun-hoview.php?showdetail=&asosi_id=26590 (дата обращения 1 Марта 2025).
9. Патент Евразии № 037398. Способ газификации угля для производства тепла и химических веществ. З.Х. Гайбуллаева, А. Шарифов, Ф.Б. Хамроев, Г.Г. Шодиев. Опубл. 24.03.2021.
10. Малый патент TJ 1415 от 14.08.2023 г. Способ газификации угля в двухступенчатом реакторе. З.Х. Гайбуллаева, А. Шарифов, Б.И. Асроров, Т.Х. Гадоев, Я.Г. Назиров, Ш.Б. Бахриддинзода. Способ газификации угля в двухступенчатом реакторе. Душанбе, 2023.
11. Гайбуллаева З.Х., Гадоев Т.Х., Асроров Б.И., Бахриддинзода Ш.Б. Газообразование при взаимодействии угля с кислородом. – Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования, 2023, №2 (62), с. 105-112.
12. Караваев Н.М., Румянцева З.А., Певзнер З.И. Способы использования углей Зеравшанской долины в промышленности и их технико-экономические показатели. – Душанбе: АН Таджикской ССР, 1963, 156 с.
13. Гадоев Т.Х., Рахимов Ф.М., Асроров Б.И., Бахриддинзода Ш.Б., Гайбуллаева З.Х. Исследование процесса термического разложения угля при его газификации. – Известия НАНТ, 2025, №2, с. 45-51.
14. Померанцев В. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986, 312 с.

З.Ҳ.Ғайбуллоева, Т.Ҳ.Гадоев*, Б.И.Асроров, Ш.Б.Бахриддинзода, Ф.М.Рахимов*

КОРКАРДИ ГАРМИ АНГИШТИ ФОН ЯҒНОБ БАРОИ ҶУДО НАМУДАНИ МОДДАҲОИ САБУКИ ТАРКИБИ ОН

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С.Осимӣ,
****ҶСК "АЗОТ"***

Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқоти раванди коркарди гарми ангишти ФонЯғноб барои ҷудо намудани моддаҳои сабуки он оварда шудаанд. Вобастагии миқдори карбон дар таркиби моддаҳои сабуки ангишт аз миқдори карбон ва гидроген муайян карда шудааст. Таркиби элементарии моддаҳои сабук аз фенол C_6H_5OH ва пиридин C_5H_5N, стирол, метан CH_4, бензол C_6H_6 ва гомологҳои он, антрацен $C_{14}H_{10}$, метилнафтален $C_{11}H_{10}$ ва ғайра иборат мебошад.

Калимаҳои калидӣ: *ангишт, сӯзонидан, ихроҷи газҳо, таркиб, моддаҳои сабук, гармкунӣ,бекарбонкунӣ, газкунӣ.*

Z.H.Gaibullaeva, N.H.Gadoev*, B.I.Asrorov, Sh.B.Bahriddinzoda, F.M.Rahimov*

HEAT TREATMENT OF COAL FROM THE FON-YAGHNOB DEPOSIT FOR THE RELEASE OF VOLATILE SUBSTANCES OF ITS COMPOSITION

M.S.Osimy Tajik technical University,
OAO "AZOT"

The article presents the results of a study of the process of heat treatment of coal for the separation of volatile substances from it. The dependence of the carbon content in volatile substances on the content of carbon and hydrogen has been determined. The elementary composition of volatile substances contains: phenols C_6H_5OH and pyridines C_5H_5N, styrene, methane CH_4, benzene C_6 H_6 and its homologues, anthracenes $C_{14}H_{10}$, methylnaphthalenes $C_{11}H_{10}$ and others released when the sample is heated.

Key words: *coal, combustion, gas emissions, composition, volatile substances, thermolysis, decarbonization, gasification.*

Сведения об авторах:

1. **Гайбуллаева З.Х.** – доктор технических наук, ТТУ им. акад. М.С.Осими, профессор. E-mail: zumratihabib@rambler.ru;
2. **Гадоев Т.Х.** – ОАО «АЗОТ», технический директор. E-mail: gadoev.80@mail.ru;
3. **Асроров Б.И.** – ТТУ им. акад. М.С.Осими, соискатель кафедры «Технология химического производства». E-mail: bahodur177@inbox.ru;
4. **Бахриддинзода Ш.Б.** – ТТУ им. акад. М.С.Осими, соискатель кафедры «Технология химического производства». E-mail: kurbonov_1995@list.ru;
5. **Рахимов Ф.М.** – ОАО АЗОТ, аппаратчик цеха «Синтез аммиака». E-mail: rahimov_farruh@mail.ru.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №6

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 544.4:66.092
Специальность: 1.4.4. Физическая химия

Р.С.Ёрмадов, А.С.Курбонов*, М.М.Тагоев,
академик НАН Таджикистана У.М.Мирсаидов

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ БОРОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ МЕТОДОМ СУЛЬФАТИЗАЦИИ

Национальная академия наук Таджикистан,
Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана,
****Агентство по химической, биологической радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана***

Представлены результаты исследований кинетики процесса разложения боросиликатного сырья с концентрированной серной кислотой. Определены механизм и области протекания реакций. Вычислена кажущаяся энергия активация процесса сульфатизации, которая равна 10.15 кДж/моль, что свидетельствует о протекании процесса в диффузионной области.

Ключевые слова: *боросиликатное сырьё, переработка, разложение, извлечение, кинетика, сульфатизация, энергия активации.*

Бор и его соединения обладают уникальными физико-химическими свойствами и структурой, что делает их незаменимыми в различных сферах промышленности. Они широко применяются в атомной энергетике, медицине, сельском хозяйстве, а также в производстве современных строительных и композиционных материалов и т.д.

Ранее в работах [1-6] был изучен процесс разложения боросиликатной руды с различными минеральными кислотами, а также изучена кинетика указанных процессов.

Целью настоящей работы является выявление кинетических закономерностей разложения боросиликатной руды серной кислотой методом сульфатизации.

Разложение проводили в специальной лабораторной установке, состоящей из реактора объёмом 250 мл, над которым вертикально установлен обратный холодильник, и регулируемая электропечь с термометром. Навеску сырья массой 2 г помещали в реактор, который содержал серную кислоту с заранее заданной и достигнутой температурой. Через определённые промежутки времени (15; 30; 45; 60 мин), тормозили реакцию, полученную пульпу обрабатывали водой и фильтровали от нерастворённых примесей, промывали фильтр, смывая промывные воды в мерную колбу объёмом 250 мл, объём колбы доводили до метки. Из сосуда отбирали аликвотную часть объёмом 25 мл, и анализировали содержание в ней содержание B_2O_3 в соответствии с методикой [7].

Адрес для корреспонденции: *Курбанов Амиршо Сохибназарович. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/3, Агентство по химической, биологической радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана. E-mail: amirsho_77@mail.ru.*

Время эксперимента составляло 60 мин. Отбор проб практически не влиял на результаты эксперимента. Степень разложения боросиликатного сырья рассчитывали по отношению количества бора, перешедшего в жидкую фазу (в пересчете на B_2O_3) к его общему содержанию в навеске. Кинетические кривые представлены на рис. 1.

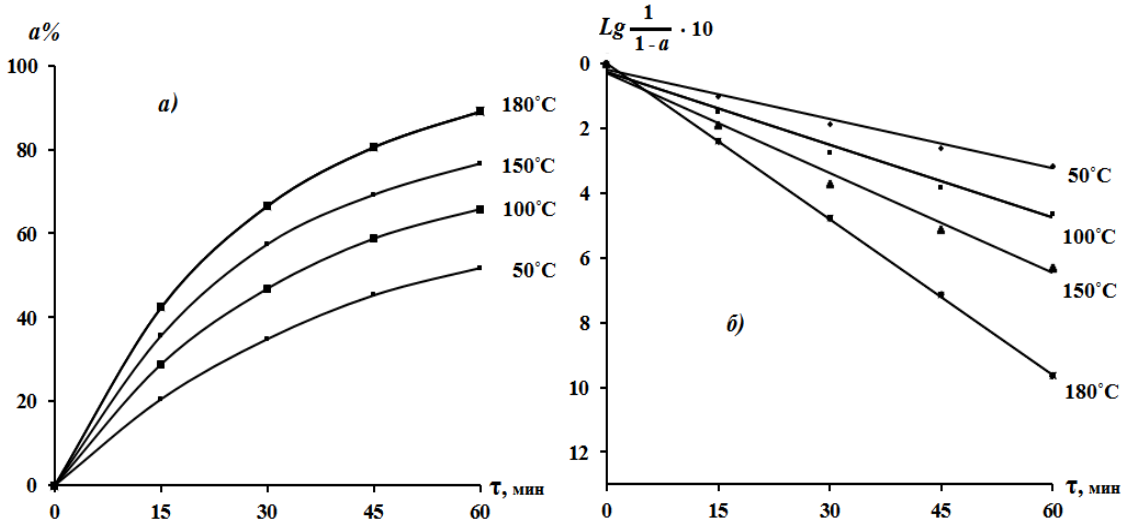


Рис. 1. Зависимость степени извлечения (α) оксида бора от времени (а) и $\lg\frac{1}{1-\alpha}$ от времени (б) при разложении боросиликатного сырья методом сульфатизации.

Как видно из графиков, повышение температуры увеличивает эффективность разложения борного сырья, коэффициенты разложения на момент 60 мин при температурах 50; 100; 150; 180°С имели значения 57.7; 65.8; 76.6 и 89.1%, соответственно.

С помощью обработки кинетических кривых получены значения константы и логарифма константы скорости реакции для различных температур, которые приведены в табл. 1, соответственно

Таблица 1

Значения констант скоростей реакций в исследуемом диапазоне температур

T (K)	323	373	423	453
1/T	0.003096	0.002681	0.002364	0.002207
$k_{ср}$[(моль/л)·с$^{-1}$]	0.00928	0.01369	0.01824	0.02473
Lg $k_{ср}$(моль/л)·с$^{-1}$	-2.0322	-1.8635	-1.7390	-1.6067

Константы скоростей реакций определяли по тангенсу угла наклона линейных участков соответствующих зависимостей. Зависимость константы скорости реакции от температуры выражается законом Аррениуса:

$$K = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}},$$

где T – абсолютная температура, К; R – универсальная газовая постоянная; E_a – энергией активации, A – предэкспоненциальный множитель.

По тангенсу угла наклона прямой, представленной в координатах (lnk – 1/T) (рис. 2), определяли величину наблюдаемой энергии активации, которая составила 10.15 кДж/моль. Численное значение энергии активации свидетельствуют о протекании процесса в диффузионной области.

Теоретические расчёты энергии активации Е показали, что её численные значения совпадают со значениями, определёнными графическим методом. При этом наблюдается достаточно выраженная сходимость экспериментальных и расчётных значений, что обеспечивает достоверность полученных результатов.

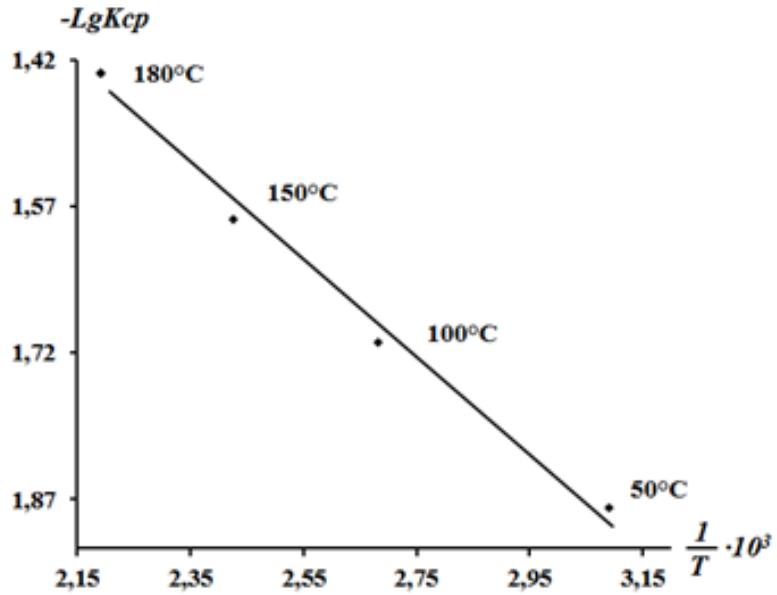


Рис. 2. Зависимость lgK от обратной абсолютной температуры при сульфатизации боросиликатного сырья.

Таким образом, проведённые исследования в области кинетики переработки боросиликатного сырья с целью извлечения B_2O_3 раскрывают механизм происходящих при этом процессов. Полученные результаты подтверждают факт, что механизм и кинетика процессов химической переработки боросиликатного сырья Ак-Архарского месторождения Таджикистана в большей степени определяются структурой и составом растворяемых в кислоте минералов, входящих в состав борного сырья, а также характером химических связей в породе и свойствами самой кислоты.

Поступило 09.04.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Курбонов А.С., Ашуров Н.А., Ятимов П.М. и др. Выщелачивание концентрата данбурита азотной кислотой. – Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. Иркутский государственный технический университет, 2012, с.173-176.
2. Джураев Дж.Х., Курбонов А.С., Тагоев М.М. и др. Физико-химические основы переработки обожжённого концентрата боросиликатной руды Ак-Архарского месторождения Таджикистан ортофосфорной кислотой. – Известия АН Республики Таджикистан, 2019, №4(177), с.84-88.

3. Джураев Дж.Х., Курбонов А.С., Усмонова У.Х., Мирсаидов У.М. Разложение обожжённого концентрата боросиликатной руды Ак-Архарского месторождения Таджикистан смесью ортофосфорной и азотной кислот. – Известия АН Республики Таджикистан, 2020, №2(179), с.76-80.
4. Усмонова У.Х., Маматов Э.Д., Мирсаидов У.М. Разложение обожжённого исходного данбурита соляной кислотой. – ДАН РТ, 2012, т.55, №5, с.378-381.
5. Джураев Дж.Д., Курбонов А.С., Неъматов А.М. и др. Изучение кинетики процесса разложения обожжённого концентрата боросиликатной руды со смесью азотной и ортофосфорной кислоты. – Доклады НАН Таджикистана, 2020, т.63, №7-8, с.500-504.
6. Ашуров Н.А., Маматов Э.Д., Ятимов П.М., Мирсаидов У.М. Кинетика сернокислотного разложения, предварительно обожжённого данбурита месторождения Ак-Архар Таджикистана. – Известия АН Республики Таджикистан. Отделение физ.-мат., хим., геол. и техн. наук., 2008, №4(133), с.43-47.
7. Немодрук А.А., Королева З.К. Аналитическая химия бора. – М.: Наука, 1964, 286 с.

Р.С.Ёрмадов, А.С.Қурбонов*, М.М.Тағоев, У.М.Мирсаидов

ОМӮЗИШИ КИНЕТИКАИ РАВАНДИ ТАҶЗИЯИ АШЁИ БОРОСИЛИКАТӢ БО УСУЛИ СУЛФАТИКУНОНӢ

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
Институти кимиёи ба номи В.И.Никитини АМИ Тоҷикистон,
****Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии АМИ Тоҷикистон***

Натиҷаҳои таҳқиқот оид ба кинетикаи раванди таҷзияи ашёи хоми боросиликатӣ бо кислотаи сулфуати консентронида пешниҳод карда шудааст. Механизм ва ҳудудҳои гузариши реаксияҳо муайян карда шудааст. Энергияи фаъолсозии назариявии раванди сулфатикунонӣ ҳисоб карда шуд, ки он ба 10.15 кДж/мол баробар аст ва ин далели гузариши раванд дар ҳудудҳои диффузионӣ мебошад.

Калимаҳои калидӣ: *маъдани боросиликатӣ, коркард, таҷзия, истихроҷ, кинетика, сульфатикунонӣ, энергия фаъолсозӣ.*

R.S.Yormadov, A.S.Kurbonov*, M.M.Tagoev, U.M.Mirsaidov

STUDY OF THE KINETICS OF THE DECOMPOSITION PROCESS OF BOROSILICATE RAW MATERIALS BY THE SULFATION METHOD

National Academy of Sciences of Tajikistan,
V.I.Nikitin Institute of Chemistry, Academy of Sciences of Tajikistan,
****Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency, NAS of Tajikistan***

The research results on the kinetics of the decomposition process of borosilicate raw materials with concentrated sulfuric acid are presented. The mechanism and reaction zones have been determined. The apparent activation energy of the sulfation process was calculated to be 10.15 kJ/mol, indicating that the process occurs in the diffusion region.

Сведения об авторах:

1. **Ёрмадов Рустам Сангмадович** – Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, соискатель. E-mail: rustam.yrmadov.94@bk.ru;
2. **Курбонов Амиршо Сохибназарович** – Филиал Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАНТ, директор. E-mail: amirsho_77@mail.ru;
3. **Тагоев Муродбек Махмадалиевич** – кандидат химических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, ведущий научный сотрудник. E-mail: murodbek.tagoev@mail.ru;
4. **Мирсаидов Улмас Мирсаидович** – доктор химических наук, профессор, академик, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, главный научной сотрудник; E-mail: ulmas2005@mail.ru.

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 554.476:661.183.123.2
Специальность: 1.4.4. Физическая химия

С.Халикова

ЭНТЕРОСОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ ПЕКТИНОВЫХ ПОЛИСАХАРИДОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Национальная академия наук Таджикистана,
Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана

(Представлено академиком НАН Таджикистана Д.Х.Халиковым 03.02.2025 г.)

В условиях статического режима изучены сорбционные свойства пектиновых полисахаридов в отношении билирубина в опытах in vitro. Установлено, что за 20 минут инкубации водорастворимые полисахариды КП связали до 80% и более от максимально возможного количества билирубина. Для водонабухающих полисахаридов данное значение достигается через 45-60 мин. инкубации. Максимальной сорбционной способностью по отношению к билирубину обладают водонабухающие пектиновые полисахариды на основе корзинок подсолнечника. Образцы пектиновых полисахаридов обладают сорбционными свойствами по отношению к билирубину и могут применяться в комплексной терапии заболеваний печени. Кроме того, в этом документе отмечается, что водонабухающие и водорастворимые пектиновые полисахариды корзинок подсолнечника обладают выраженными дозозависимыми гепатопротекторными лечебными эффектами при экспериментальной тетрахлорметановой интоксикации.

Ключевые слова: *энтеросорбент, пектиновые полисахариды, сорбция билирубина.*

В в е д е н и е

Энтеросорбенты – группа лекарственных средств, которые обладают большой адсорбционной поверхностью, являются нерастворимыми в биологической среде и интактными к слизистым оболочкам желудочно-кишечного тракта. Энтеросорбенты осуществляют связывание экзогенных и эндогенных веществ в желудочно-кишечном тракте (в том числе токсических соединений и биологически активных веществ) путем адсорбции, абсорбции, ионообмена и комплексообразования с последующим выведением данных веществ из организма. Эффективность действия энтеросорбентов оценивается по двум основным характеристикам, которые определяют в конечном итоге выраженность действия и различия в показаниях к применению: сорбционная ёмкость энтеросорбента – количество вещества, которое может поглотить сорбент на единицу своей массы. Способность сорбировать молекулы и бактериальные клетки разного размера и массы, что для энтеросорбентов (в отличие от сорбентов в целом) имеет большое значение. Основными механизмами действия энтеросорбентов являются поглощение токсических веществ, связывание токсических метаболитов, фиксация и перенос физиологически активных веществ [1].

Адрес для корреспонденции: *Халикова Саодатхон, 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ. E-mail: Saodat150552@mail.ru.*

Оценивая возможности практического использования компонентов, выделенных из различных растительных источников пектиновых полисахаридов, следует, прежде всего, сосредоточиться на трёх главных продуктах распада протопектинов. Водорастворимый компонент – пектиновые вещества, главным образом из фруктовых источников, как следует из литературных данных и результатов наших исследований [2], широко используется в пищевой отрасли промышленности в качестве желирующих агентов. Одной из перспективных областей применения микрогеля, по-видимому, является медицина, так как МГ является эффективным энтеросорбентом. Необходимо отметить, что широкое применение эфферентных методов в медицине, в частности сорбционных методов детоксикации организма, позволяет решить две важные задачи: идентификацию токсических продуктов и создание специфических сорбентов для их изоляции. Например, известно, что при печёночной патологии и механической желтухе в биологической жидкости организма и в желудочно-кишечном тракте значительно возрастает концентрация билирубина и возникает необходимость его удаления путём гемо- и энтеросорбции. Известно, что билирубин, являющийся продуктом распада гемоглобина, из-за плохой растворимости в плазме крови находится в комплексе с сывороточным альбумином человека [2-4]. Эти комплексы образуют основную массу непрямого или свободного билирубина и обладают наибольшей токсичностью. Непрямой билирубин в печёночной клетке соединяется с глюкуроновой кислотой, образуя моно- или диглюкурониды. Эти соединения представляют собой так называемый прямой билирубин. Он растворим в воде и частично проходит через почечный фильтр. При дальнейшем увеличении концентрации билирубина в плазме крови и исчерпывании мест связывания альбумина свободный билирубин диффундирует через клеточные мембраны, попадая при этом в ткани организма и оказывая разрушающее действие на клетки. Исходя из этого, естественно стремление многих авторов к разработке сорбентов, способных вывести из организма избыточный билирубин. Однако несмотря на чрезвычайно высокую эффективность многих сорбентов в модельных условиях, их сорбционная активность значительно падает в реальных ситуациях [5,6], поскольку комплексы билирубина с сывороточным альбумином человека обладают принципиально другими физико-химическими свойствами.

Несмотря на ряд оригинальных разработок и наличие разновидностей сорбентов, которые в определённой степени могут решить проблему извлечения билирубина из биологических жидкостей, поставленная задача всё ещё далека от своего решения.

Исходя из этого, целью данной работы являлась постановка исследования по выявлению сорбентов для связывания билирубина с использованием сильно набухающих гидрогелевых материалов на основе высоконабухающих пектиновых полисахаридов.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовались водонабухающие МГ и водорастворимые ПВ пектиновых полисахаридов, полученных методом гидролиз-экстракции в динамическом режиме из необработанных (КП) и предварительно обработанных раствором хлорида натрия корзинок подсолнечника (КП обр.). Пектиновые полисахариды инкубировали в ёмкости с раствором билирубина (50 мкмоль/л) в течение 1-360 мин. при температуре 23-25°С и pH 5.6 [7]. Остаточное количество билирубина определяли спектрофотометрическим методом. Максимальное значение сорбционной ёмкости для определённого полисахарида, полученное в ходе исследования, принимали за 100%, а количество

связанного билирубина для каждой продолжительности инкубации выражали в процентах от максимальной сорбционной ёмкости.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведена кинетика связывания билирубина пектиновыми полисахаридами. Из рис. 1 видно, что за 20 минут инкубации водорастворимые полисахариды КП связали до 80% и более от максимально возможного количества билирубина. Для водонабухающих полисахаридов данное значение достигается через 45-60 мин. инкубации.

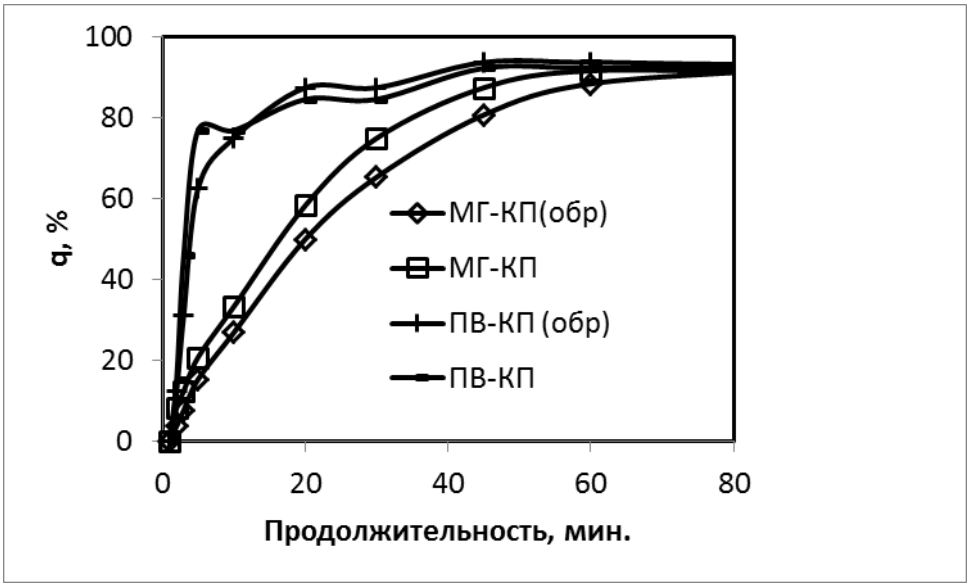


Рис. 1. Кинетика связывания билирубина пектиновыми полисахаридами.

В целом, все исследованные образцы сорбируют максимально возможное количество билирубина за 120 минут контакта с раствором сорбата, что составляет минимальную продолжительность, необходимую для достижения максимальной сорбционной ёмкости. В связи с этим, изучение зависимости величины сорбционной ёмкости от равновесной концентрации билирубина проводили при инкубационном периоде 120 мин. Концентрацию сорбата варьировали от 10 до 100 мкмоль/л.

Изотермы сорбции, построенные на основании полученных данных, представлены на рис. 2. Видно, что максимальной сорбционной способности по отношению к билирубину обладают водонабухающие пектиновые полисахариды на основе корзинок подсолнечника [6]. Полученные положительные экспериментальные данные по сорбции билирубина в опытах *in vitro* дали возможность более подробно изучить сорбционную активность пектиновых полисахаридов в опытах *in vivo* на лабораторных животных. Результаты этих исследований подробно приведены в соответствующем акте медицинского испытания пектиновых полисахаридов.

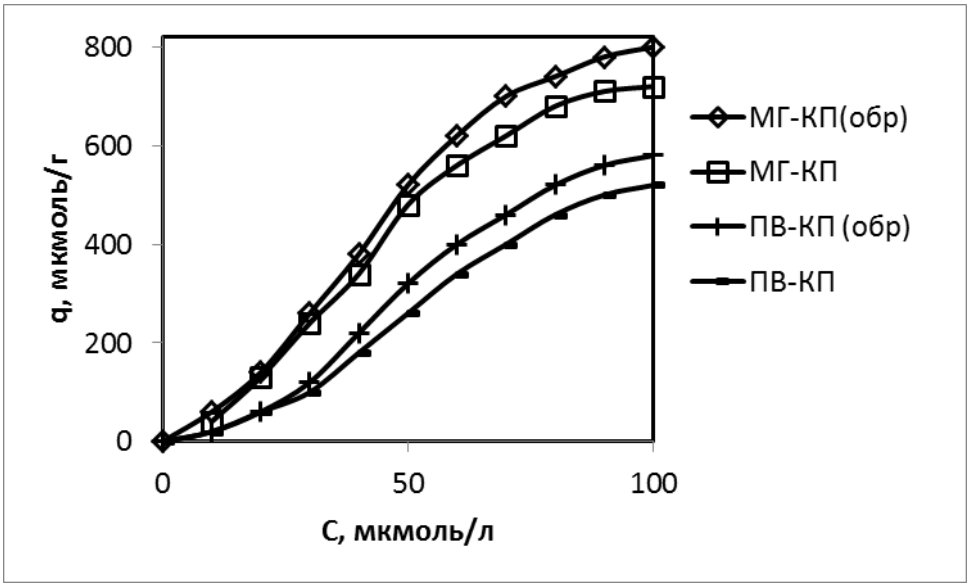


Рис. 2. Изотермы связывания билирубина пектиновыми полисахаридами.

Важно отметить, что, исследованные образцы пектиновых полисахаридов обладают сорбционными свойствами по отношению к билирубину и могут применяться в комплексной терапии заболеваний печени. Кроме того, в этом документе отмечается, что водонабухающие и водорастворимые пектиновые полисахариды корзинок подсолнечника обладают выраженными дозозависимыми гепатопротекторными лечебными эффектами при экспериментальной тетрахлорметановой интоксикации. При этом наибольшая лечебная эффективность наблюдается после использования полисахаридов в максимальной дозе [5]. Полученные данные демонстрируют, что введение и пектиновых веществ, и микрогеля корзинки подсолнечника способствует увеличению резистентности печени к действию токсических факторов, в частности, четырёххлористого углерода. При этом гепатопротекторное действие водонабухающих полисахаридов значительно выше водорастворимых.

В ы в о д ы

В условиях статического режима в опытах *in vitro* изучены кинетика и изотерма связывания билирубина пектиновыми полисахаридами. Установлено, что за 20 минут инкубации водорастворимые полисахариды КП связали до 80% и более от максимально возможного количества билирубина. Для водонабухающих полисахаридов данное значение достигается через 45-60 мин. инкубации. Максимальной сорбционной способностью по отношению к билирубину обладают водонабухающие пектиновые полисахариды на основе корзинок подсолнечника. Образцы пектиновых полисахаридов обладают сорбционными свойствами по отношению к билирубину и могут применяться в комплексной терапии заболеваний печени. Таким образом, полученные экспериментальные данные при сорбции билирубина пектиновыми полисахаридами дают основания заключить о перспективности работы по выявлению тонкого механизма процесса и использования соответствующих результатов в клинической практике.

Поступило 03.02.2025 г

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Николаев В.Г. и др. Энтеросорбция: состояние вопроса и перспективы на будущее. – Вісник проблем біологіī і медицини, 2007, №4, с. 7-17.
2. Бободжонова Г.Н., Горшкова Р.М., Мухидинов З.К., Халиков Д.Х. Перспективы применения пектиновых полисахаридов, полученных из отходов пищевой промышленности – Сборник статей Республиканской научно-практической конференции «Роль молодежи в решении важнейших проблем в процессе глобализации», Душанбе, 19-21 мая 2014 г., с.130-136.
3. Хотимченко Ю.С., Кропотов А.В. Применение энтеросорбентов в медицине. – Тихоокеанский медицинский журнал, 1999, №2, с.84-89.
4. Шаповаленко Е.П. Физико-химическое исследование взаимодействия билирубина с сывороточным альбумином: Автореф.дисс…. канд. хим. наук. – М.: МГУ, 1980, 17 с.
5. Dunlop E.H., Hughes R.D., Williams R. Physico-chemical aspects of the removal of protein-bound substances by charcoal and other adsorbents of potential value in system of artificial liver support. P.1. Eqmilirium properties. – Med.bid.Engin., 1978, vol. 16, pp. 343-349.
6. Рахимов И.Ф., Горшкова Р.М., Мухидинов З.К., Бободжонова Г.Н., Халикова М.Д., Султонов А.Ю., Разыкова Г.В., Халиков Д.Х. Сорбционная активность пектиновых полисахаридов подсолнечника по отношению к билирубину (*in vivo*). – ДАН РТ, 2016, т. 59, №3-4, с.157-161.
7. Хотимченко Ю.С., Ермак И.М., Бедняк А.Е. и др. Фармакология некрахмальных полисахаридов – Вестник ДВО РАН, 2005, №1, с. 72-82.

С.Халикова

ЭНТЕРОСОРБЕНТҲО ДАР АСОСИ ПОЛИСАХАРИДҲОИ ПЕКТИН ВА ИСТИФОДАИ ОНҲО

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Институти химияи ба номи В.И. Никитин АМИ Тоҷикистон

Дар шароити статикӣ хосиятҳои сорбсионии полисахаридҳои пектинӣ нисбат ба билирубин дар таҷрибаҳои *in vitro* омӯхта шудаанд. Муайян карда шудааст, ки дар давоми 20 дақиқаи инкубатсия полисахаридҳои даробҳалшавандаи СО то 80% ва зиеда аз миқдори максималии билирубинро пайваст кардаанд. Барои полисахаридҳои обкаш ин арзиш пас аз 45-60 дақ. инкубатсия ба даст оварда мешавад. Полисахаридҳои пектинии обҷабанда дар асоси сабадҳои офтобпараст нисбат ба билирубин қобилияти максималии сорбсионӣ доранд. Намунаҳои полисахаридҳои пектинӣ нисбат ба билирубин хосиятҳои сорбсионӣ доранд ва метавонанд дар терапияи комплексии бемориҳои ҷигар истифода шаванд. Илова бар ин, дар ин ҳуҷҷат қайд карда мешавад, ки полисахаридҳои пектинии обҷабанда ва дар об ҳалшавандаи сабадҳои офтобпараст ҳангоми заҳролудшавии таҷрибавии тетрахлорметанӣ таъсири шифобахши гепатопротектории вобаста ба миқдор доранд.

Калимаҳои калидӣ: *энтеросорбент; полисахаридҳои пектинӣ; сорбсияи билирубин.*

S.Khalikova

ENTEROSORBENTS BASED ON PECTIN POLYSACCHARIDES AND THEIR APPLICATION

National Academy of Sciences of Tajikistan,
V.I.Nikitin Institute of Chemistry, NAS of Tajikistan

The sorption properties of pectin polysaccharides in relation to bilirubin in in vitro experiments have been studied under static conditions. It was found that during 20 minutes of incubation, water-soluble KP polysaccharides bound up to 80 or more of the maximum possible amount of bilirubin. For water-swelling polysaccharides, this value is reached after 45-60 minutes. incubation. Water-swelling pectin polysaccharides based on sunflower baskets have the maximum sorption capacity in relation to bilirubin. Samples of pectin polysaccharides have sorption properties in relation to bilirubin and can be used in the complex therapy of liver diseases. In addition, this document notes that water-swelling and water-soluble pectin polysaccharides of sunflower baskets have pronounced dose-dependent hepatoprotective therapeutic effects during experimental tetrachloromethane intoxication.

Key words: *enterosorbent; pectin polysaccharides; bilirubin sorption.*

Сведения об авторах:

1. **Халикова Саодатхон** – кандидат химических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, ведущий научный сотрудник. E-mail: Saodat150552@mail.ru.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №6

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 546.662·87:669.0.17.1
Специальность: 1.4.4. Физическая химия

В.Д.Абулхаев, М.А.Балаев[*], академик НАН Таджикистана И.Н.Ганиев, Х.Х.Назарзода[**], Б.Д.Сайдалиев, С.О.Убайдов[***]

СИНТЕЗ, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ $Tb_5Bi_3 – Dy_5Bi_3$

Национальная академия наук Таджикистана,
Институт химии им. В.И. Никитина НАНТ,
[*]***Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими,***
[**]***Таджикский государственный университет коммерции,***
[***]***Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни.***

В статье приведены результаты исследования синтеза, электрофизических и магнитных свойств твердых растворов системы $Tb_5Bi_3 – Dy_5Bi_3$.

Установлено, что в данной системе во всем диапазоне концентраций образуются изоструктурные твердые растворы замещения типа $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$ ($x = 0.5÷4.5$), кристаллизующихся, как и исходные компоненты – Tb_5Bi_3 и Dy_5Bi_3, в ромбической сингонии типа Y_5Bi_3.

Выявлено, что твердые растворы по электропроводности занимают промежуточное положение между проводниками и полупроводниками.

Определено, что твердые растворы $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$ ($x = 0.5÷4.5$) являются парамагнетиками. Молярная магнитная восприимчивости твердых растворов в диапазоне температур 298-500 К следует закону Кюри-Вейсса.

Ключевые слова: *диаграмма состояния, твердые растворы, удельное электросопротивление, магнитная восприимчивость температура Кюри.*

Ранее диаграммы состояния систем Tb –Bi и Dy – Bi в полном диапазоне концентраций были исследованы в [1, 2]. В системах Tb – Bi и Dy– Bi установлено образование соединений Tb_5Bi_3, Tb_4Bi_3, TbBi, Dy_5Bi_3 и DyBi. Соединения Tb_5Bi_3, Tb_4Bi_3 и Dy_5Bi_3 при 1763, 1873, 1723 К, соответственно, плавятся инконгруэнтно, а соединения TbBi и DyBi при 2033 и 2023 К конгруэнтно.

Исследования, связанные с изучением взаимодействия в системах Ln_5Bi_3 - Ln_5Bi_3 (Ln = Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu), представляются актуальной задачей. На основе указанных висмутидов возможно создание, например, новых материалов с повышенными магнитными свойствами. Кроме того, помимо практического значения, сплавы и соединения на основе РЗЭ представляет интерес и с теоретической точки зрения. Изучение изменения физико-химических свойств сплавов и соединений

Адрес для корреспонденции: *Абулхаев Владимир Джалолович.734063. Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 292/2, Институт химии НАНТ. E-mail: abulkhaev-48@mail.*

с заполнением $4f$– уровня позволяет создать основы для развития новых теоретических представлений [3].

В связи с этим, важное значение приобретают вопросы разработки способов получения и всестороннего изучения физико-химических свойств сплавов, соединений РЗЭ и изучение диаграмм состояния, в частности, с сурьмой и висмутом, позволяющих установить закономерность в их строении, внести ясность в вопрос о характере взаимодействия исходных компонентов, составе и количестве образующихся фаз.

Анализ литературных источников показал, что среди антимонидов и висмутидов РЗЭ наиболее полно изучены моноантимониды и моновисмутиды РЗЭ. Антимониды и висмутиды других составов изучены крайне мало.

При этом в научной литературе нет сведений по синтезу, диаграммам состояния и физико-химическим свойствам твердых растворов системы Tb_5Bi_3 – Dy_5Bi_3.

Целью работы явилось синтез, построение диаграммы состояния системы Tb_5Bi_3- $Dy_5Bi_{3.}$, исследование электрофизических и магнитных свойств твердых растворов этой системы.

Твердые растворы системы Tb_5Bi_3 – Dy_5Bi_3 получали с использованием предварительно синтезированных Tb_5Bi_3 и Dy_5Bi_3, через каждые 10 мол.% Dy_5Bi_3.

Висмутиды Tb_5Bi_3 и Dy_5Bi_3 получали прямым взаимодействием стружек тербия и диспрозия и висмута в герметизированных молибденовых тиглях.

При выборе тигельного материала руководствовались данными работ [4, 5], где показано, что растворимость молибдена, тантала и вольфрама в жидких РЗЭ весьма незначительна.

Нагревание тигля с веществом проводили со скоростью 20-40 град/мин до оптимальной температуры (1473±50 К), с последующей выдержкой при этой температуре в течение 2±0.5 часов. После завершения синтеза тигель с веществом охлаждали до комнатной температуры со скоростью 4 град/мин.

Твердые растворы получали следующим образом. Порошки предварительно синтезированных Tb_5Bi_3 и Dy_5Bi_3, отвечающие определенному химическому составу твердого раствора $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$ (x = 0.5÷4.5*)*, смешивали, спрессовывали в штабик, помещали в герметизированный молибденовый тигель и нагревали (со скоростью 80 К/мин) Оптимальная температура синтеза составляла 1573±50 К. При этой температуре образцы выдерживали 2±0.5 ч. После чего тигель с веществом охлаждали до комнатной температуры с скоростью 80 К/мин.

Твердые растворы системы Tb_5Bi_3-Dy_5Bi_3 синтезировали при одном и том же температурном и временном режиме, то есть при 1573±50 К и времени выдержки 2±0.5 ч.

Диаграмму состояния системы Tb_5Bi_3-Dy_5Bi_3 исследовали методами дифференциального термического (ДТА), рентгенофазового (РФА) и металлографического анализов.

ДТА сплавов осуществляли на установке ВДТА-8М3, при скоростях нагревания и охлаждения 40-80 град./мин. Погрешность в определении температур термических эффектов не превышала ±1% от измеряемой величины РФА сплавов проводили на дифрактометре ДРОН-2 с использованием отфильтрованного CuK_α -излучения (Ni – фильтр). Погрешность в определении параметров элементарной ячейки сплавов составляла ±0.0005 нм.

Металлографический анализ сплавов выполняли на приборе «Neophot-21».

Микротвердость сплавов измеряли на микро-твердомере ПМТ-2.

Плотность сплавов определяли по стандартной методике.

Электрофизические свойства сплавов измеряли четырехзондовым методом. Относительная погрешность при определении удельного электросопротивления сплавов составляла ±2.5%.

Молярную магнитную восприимчивость ($\chi_м$) твердых растворов измеряли в диапазоне температур 298-773 К по методике, приведенной в [6]. Относительная погрешность измерений составляла ±3%.

Диаграмма состояния системы Tb_5Bi_3-Dy_5Bi_3, построенная по совокупности экспериментальных данных, представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что как Tb_5Bi_3, так и Dy_5Bi_3, при 1853 и 1810 К, соответственно, плавятся инконгруэнтно

Диаграмма состояния системы Tb_5Bi_3-Dy_5Bi_3 свидетельствует о неограниченной взаимной растворимости компонентов – Tb_5Bi_3 и Dy_5Bi_3 как в жидком, так и в твердом состоянии. При этом рентгенофазовый и микроструктурный анализ указывает на образование во всем исследованном диапазоне концентраций твердых растворов замещения $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; x = 0.5÷4.5, кристаллизующихся в ромбической структуре типа Y_5Si_3 (Пр. группа Pnma [6]) и изоструктурных с исходными компонентами – Tb_5Bi_3 и Dy_5Bi_3, (табл. 1).

Из таблицы 1 следует, что концентрационная зависимость параметра элементарной ячейки твёрдых растворов во всем исследованном диапазоне концентраций изменяется аддитивно. При этом наибольшую микротвердость показывает твёрдый раствор, содержащий 30 мол. % Dy_5Bi_v.

Рассчитана также теоретическая плотность твёрдых растворов

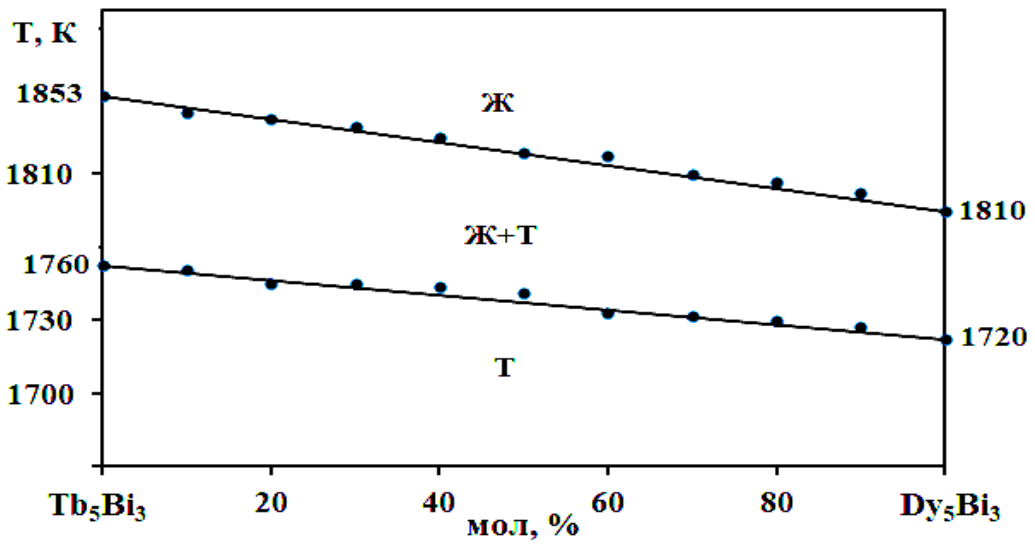


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Tb_5Bi_3-Dy_5Bi_3

Таблица 1

Кристаллохимические характеристики висмутидов и твердых растворов системы Tb_5Bi_3 - Dy_5Bi_3

Твердые растворы	Параметр элементарной ячейки, ±0.0005 нм			Плотность, кг/м^3		Микротвердость, МПа
	а	в	с	расчет.	экспер.	
Tb_5Bi_3	0.8202	0.9482	1.1988	10185	10178	2040±50
$Tb_{4.5}Dy_{0.5}Bi_3$	0.8194	0.9475	1.1982	10209	10204	2045±115
Tb_4DyBi_3	0.8190	0.9467	1.1980	10248	10232	2050±140
$Tb_{3.5}Dy_{1.5}Bi_3$	0.8185	0.9460	1.1977	10278	10270	2053±100
$Tb_3Dy_2Bi_3$	0.8190	0.9452	1.1975	10295	10292	2048±110
$Tb_{2.5}Dy_{2.5}Bi_3$	0.8176	0.9446	1.1972	10335	10326	2038±120
$Tb_2Dy_3Bi_3$	0.8172	0.9438	1.1965	10367	10358	2030±105
$Tb_{1.5}Dy_{3.5}Bi_3$	0.8170	0.9432	1.1964	10410	10408	2020±112
$TbDy_4Bi_3$	0.8162	0.9425	1.1962	10423	10418	2010±125
$Tb_{0.5}Dy_{4.5}Bi_3$	0.8157	0.9416	1.1960	10454	10420	2003±130
Dy_5Bi_3	0.8153	0.9412	1.1956	10480	10478	2000±150

$Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; x = 0.5÷-4.5.

Образованию твердых растворов, с нашей точки зрения, благоприятствуют два фактора: размерный – близость значений атомных радиусов Tb и Dy, которые составляют 0.1783 и 0.1775 нм [7], соответственно, и структурный – изоструктурность Tb_5Bi_3 и Dy_5Bi_3.

С целью установления электропроводности твердых растворов $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; x = 0.5÷4.5 системы Tb_5Bi_3 – Dy_5Bi_3, изучено их удельное электросопротивление в диапазоне температур 298-773 К.

На рис. 2 и в табл. 2 приведены результаты исследования удельного электросопротивления твердых растворов $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; x = 0.5÷4.5 в диапазоне температур 298-773 К.

Как видно из рисунка, температурная зависимость удельного электросопротивления указанных твердых растворов в диапазоне 298-773 К изменяется линейно, что указывает на их металлическую проводимость.

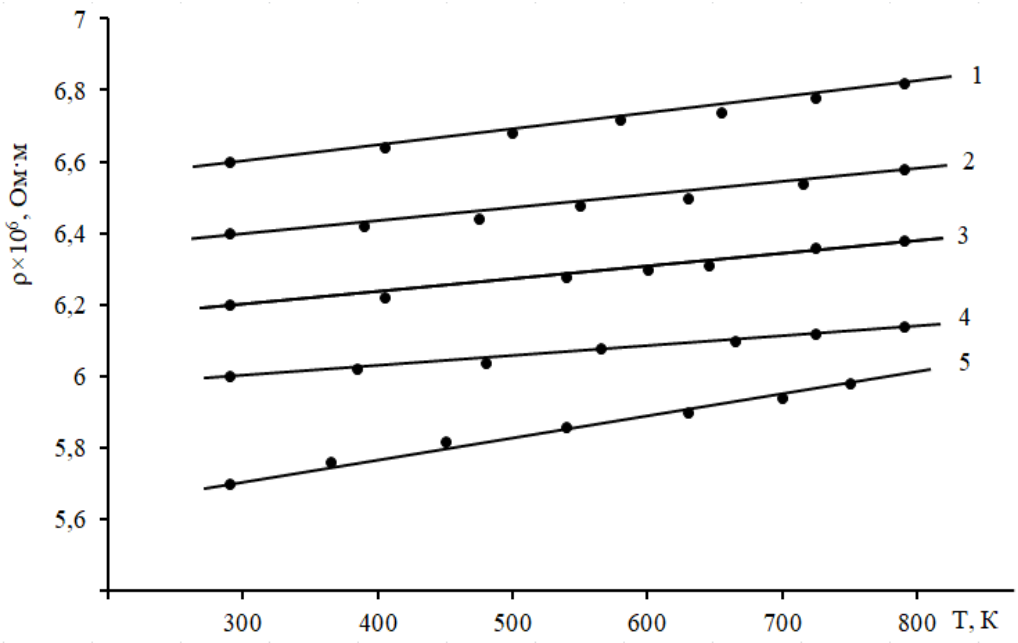


Рис. 2. Температурная зависимость удельного электросопротивления твердых растворов $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$ в диапазоне температур 298-773 К, содержащих : (1) – 10, (2) – 30, (3) - 50, (4) – 70, (5) – 90 мол. % Dy_5Bi_3.

Таблица 2

Электрофизические свойства твердых растворов $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; x = 0.5÷-4.5, при 298 К

Висмутиды и твердые растворы	Удельное электросопротивление, ρ x 10^6, Ом·м	Электропроводность, σ x 10^{-5}, $Ом^{-1}·м^{-1}$
$Tb_{4.5}Dy_{0.5}Bi_3$	6.6±0.16	1.51
Tb_4DyBi_3	6.5±0.16	1.53
$Tb_{3.5}Dy_{1.5}Bi_3$	6.0±0.15	1.66
$Tb_3Dy_2Bi_3$	6.4±0.16	1.56
$Tb_{2.5}Dy_{2.5}Bi_3$	6.2±0.15	1.61
$Tb_2Dy_3Bi_3$	6.1±0.15	1.63
$Tb_{1.5}Dy_{3.5}Bi_3$	5.9±0.14	1.69
$TbDy_4Bi_3$	5.7±0.14	1.75
$Tb_{0.5}Dy_{4.5}Bi_3$	5.6±0.14	1.78

В табл. 2 приведены значения удельного электросопротивления и электропроводности твердых растворов системы $Tb_5Bi_3 – Dy_5Bi_3$, Из таблицы следует, что электропроводность твердых растворов на порядок меньше электропроводности РЗЭ [7].

Относительно низкая электропроводность, свойственная твердым растворам $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; x = 0.5÷4.5, с нашей точки зрения, определяется магнитной составляющей общего электросопротивления и природой их химической связи. Известно, что в парамагнитной области общее удельное электросопротивление РЗЭ складывается из остаточного, фононного и магнитного удельного сопротивления.

Остаточное удельное электросопротивление возникает от рассеяния электронов на нейтральных примесях и дефектах кристаллической решетки. Фононное электросопротивление связано с рассеянием электронов на акустических колебаниях решетки (фононах). Магнитное удельное электросопротивление возникает в результате взаимодействия электронов проводимости с локализованными магнитными моментами 4f – электронов ионов РЗЭ. Это взаимодействие зависит, во-первых, от относительной ориентации спина s- проводимости и, во-вторых, от результирующего спина 4f – слоя. Согласно существующий теории [8], из-за того, что при 0 К 4f – электроны упорядочены, магнитное сопротивление равно нулю. При этом магнитный порядок, с повышением температуры, нарушается и появляется магнитное сопротивление, которое растет при приближении к точке магнитного упорядочения. В парамагнитной области упорядочение 4f-слоя разрушается и магнитное сопротивление приобретает свое максимальное значение и при этом становится постоянным.

Металлическую проводимость указанных антимонидов и твердых растворов, по всей видимости, обуславливает металлическая связь Tb-Nd имеющаяся в их структуре.

Поскольку электропроводность исследованных антимонидов и твердых растворов меньше электропроводности РЗЭ можно заключить, что определенная часть электронов локализована, из-за наличия в них еще и ионной связи Tb – Bi.

Магнитные свойства твердых растворов $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; x = 0.5÷4.5, системы $Tb_5Bi_3 – Dy_5Bi_3$ исследовали в диапазоне температур 298-500 К.

Установлено, что температурная зависимость обратной величины молярной магнитной восприимчивости твёрдых растворов следует закону Кюри-Вейсса [8], характерного парамагнитным веществам.

На рис. 2 представлена температурная зависимость обратной величины молярной магнитной восприимчивости твёрдых растворов $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; x = 0.5÷-4.5, в диапазоне температур 298-500 К.

Значения молярной магнитной восприимчивости ($\chi_м$) и парамагнитной температуры Кюри (θ_p) твёрдых растворов, определенных экстраполяцией линейной части зависимости $1/\chi_м$ -Т к оси температур, приведены в таблице 2. Как видно из таблицы. 2, рост молярной магнитной восприимчивости и парамагнитной температуры Кюри твёрдых растворов проявляется во всем диапазоне концентраций. Это объясняется тем, что тербий, замещая атомы диспрозия в кристаллической решетке Dy_5Bi_3, усиливает обменное взаимо-действие по линии связи Tb - Dy, влияние которой на магнитные свойства твёрдых растворов $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$, (x = 0.5÷4.5) проявляется во всем диапазоне концентраций.

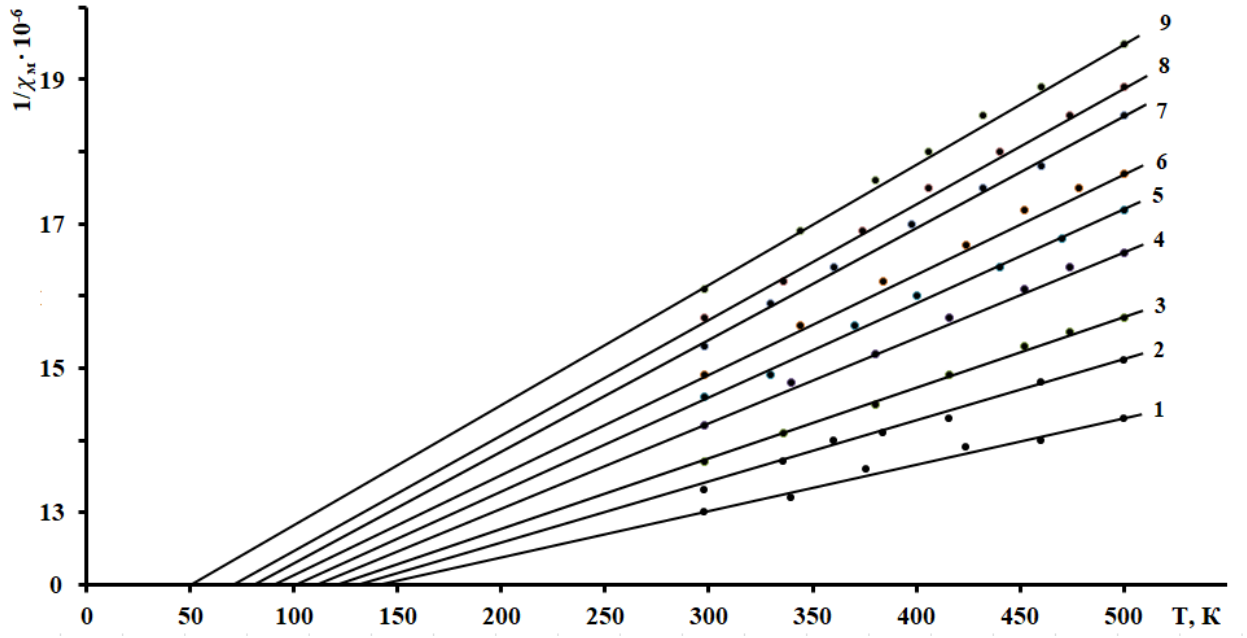


Рис. 3. Температурная зависимость обратной молярной магнитной восприимчивости твердых растворов $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; x = 0.5-4.5, содержащих: (1) – 10, (2) – 20, (3) – 30, (4) – 40, (5) – 50, (6) – 60, (7) – 70, (8) – 80, (9) – 90 мол.% Dy_5Bi_3 в диапазоне температур 298-500 К

Таблица 3

Магнитные свойства твёрдых растворов $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$; (x = 0.5-4.5).

Твёрдые растворы	Молярная магнитная восприимчивость, χ_m x10^6	Парамагнитная температура Кюри, К	Эффективный магнитный момент, μ x 10^{24}, А·м^2
$Tb_{4.5}Dy_{0.5}Bi_3$	74500.2	140	82.5
Tb_4DyBi_3	72992.7	130	84.3
$Tb_{3.5}Dy_{1.5}Bi_3$	70922.0	120	86.2
$Tb_3Dy_2Bi_3$	68965.5	110	88.1
$Tb_{2.5}Dy_{2.5}Bi_3$	67114.1	100	89.0
$Tb_2Dy_3Bi_3$	65359.4	90	90.8
$Tb_{1.5}Dy_{3.5}Bi_3$	64102.5	80	91.8
$TbDy_4Bi_3$	62500.2	70	92.7
$Tb_{0.5}Dy_{4.5}Bi_3$	60975.6	60	94.6

Полученные данные по молярной магнитной восприимчивости и парамагнитной температуры Кюри висмутидов и твёрдых растворов были использованы для определения эффективного магнитного момента ионов РЗЭ (табл. 3).

Таким образом, результаты нашей работы указывают на возможность получения на основе Tb_4Bi_3 и Dy_5Bi_3 твёрдых растворов с повышенными магнитными свойствами.

Поступило 28.04.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Абулхаев В.Д. Диаграмма состояния Tb – Bi – Изв. РАН, Металлы, 1997, №4, с.105-108.
2. Абулхаев В.Д. Диаграмма состояния системы Dy – Bi. – Неорган. материалы, 1992, т. 28, №9, с. 1877-1881.
3. Белов К.П. Редкоземельные магнетики и их применение. – М.: Наука, 1980, 240 с.
4. Dennison D.N., Tschetter T, Gschneidner K.A. The solubility of tantalum in eight liquid rare-earth. – Less-Common Metals, 1966, v.11, pp.423-435.
5. Dennison D.N. The solibillity of tantalum and tangsten in liquid rare-earth metals. – Less-Common Metals, 1966, v.10, pp.108-111.
6. Чечерников В.И. Магнитные измерения. – М.: МГУ, 1963, с. 92.
7. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. Металловедение редкоземельных металлов. – М.: Наука, 1975, 270 с.
8. Тейлор К., Дарби М. Физика редкоземельных соединений. – М.: Мир, 1974, 374 с.

В.Д.Абулҳаев, М.А.Балаев, И.Н.Ғаниев, Х.Х.Назарзода, Б.Д. Сайдалиев, С.О.Убайдов

ДИАГРАММАИ ҲОЛАТ ВА ХОСИЯТҲОИ ЭЛЕКТРОФИЗИКӢ ВА МАГНИТИИ МАҲЛУЛҲОИ САХТИ СИСТЕМАИ Tb_5Bi-Dy_5Bi_3

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Институти химияи ба номи И.И.Никитини АМИ Тоҷикистон

ЕСЛИ НЕ БУДУТ НАПИСАНЫ ОСТАЛЬНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ – СТАТЬЮ ПЕРЕНЕСЕМ В СЛЕДУЮЩИЙ НОМЕР!!!!

Дар мақола натиҷаи таҳқиқоти диаграммаи ҳолат ва хосиятҳои электрофизикӣ ва магнитии маҳлулҳои сахти системаи Tb_5Bi-Dy_5Bi_3 оварда шудааст.

Муайян карда шуд, ки дар ин система маҳлулҳои сахти изоструктурии ҷойивазшавии наъви $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$ ($x = 0.5 \div 4.5$) ҳосил мешаванд. Маҳлулҳои сахт ва ҷузъҳои ибтидоӣ – Tb_5Bi ва Dy_5Bi_3 дар структураи ромбии навъи Y_5Bi_3 кристаллизатсия мешаванд.

Маҳлулҳои сахт аз ҷиҳати электрогузаронӣ байни ноқил ва нимноқилҳо ҳолати мобайниро ишғол менамояд.

Муқаррар карда шудааст. ки маҳлулҳои сахт парамагнетик мебошанд.

Таъсирпазирии магнитии маҳлулҳои сахт дар ҳудуди 298-500 К ба қонуни Кюри-Вейсс итоат мекунад.

Калимаҳои калидӣ: *диаграммаи ҳолат, маҳлулҳои сахт, муқовимати хоси электрикӣ, таъсирпазирии магнитӣ, ҳарорати парамагнитии Кюри.*

V.D.Abulkhaev, M.A.Balaev, I.N.Ganiev, Kh.Kh.Nazarzoda, B.D.Saydaliev, S.O.Ubaydov

SYNTHESIS, ELECTROPHYSICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS OF THE Tb_5Bi_3 – Dy_5Bi_3 SYSTEM

National Academy of Sciences of Tajikistan,

V.I.Nikitin Institute of Chemistry, NAS of Tajikistan,

ЕСЛИ НЕ БУДУТ НАПИСАНЫ ОСТАЛЬНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ – СТАТЬЮ ПЕРЕНЕСЕМ В СЛЕДУЮЩИЙ НОМЕР!!!!

The article presents the results of a study of the synthesis, electrophysical and magnetic properties of solid solutions of the Tb_5Bi_3 – Dy_5Bi_3 system

It was found that in this system, isostructural substitution solid solutions of the $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$ (x = 0.5÷4.5) type are formed in the entire concentration range; they crystallize, like the initial components - Tb_5Bi3 and Dy_5Bi_3, in the orthorhombic syngony of the Y_5Bi_3 type.

It was revealed that the solid solutions occupy an intermediate position between conductors and semiconductors in electrical conductivity.

It was determined that the $Tb_{5-x}Dy_xBi_3$ (x = 0.5÷4.5) solid solutions are paramagnets.

The molar magnetic susceptibility of the solid solutions in the temperature range of 298-500 K follows the Curie-Weiss law.

Key words: *phase diagram, solid solutions, specific electrical resistance, magnetic susceptibility, paramagnetic Curie temperature.*

Сведения об авторах:

1. **Абулхаев Владимир Джалолович** – доктор химических наук, профессор, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, главный научный сотрудник. E-mail: abulkhaev-48@mail.ru;
2. **Балаев Мухамадшо Ахтамович** – кандидат технических наук, Таджикский технический университет им. акад. М.Осими, доцент кафедры «Электроснабжение». E-mail: muhamad65balaev@mail ru;
3. **Ганиев Изатулло Наврузович** – доктор химических наук, профессор, академик НАНТ, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, зав. лабораторией «Коррозионностойкие материалы». E-mail: ganiev48@mail.ru;
4. **Назарзода Хайрулло Холназар** – доктор технических наук, доцент, Таджикский государенный университет коммерции, ректор. E-mail: nazarov-h2013@mail.ru;
5. **Сайдалиев Бахром Джураевич** – соискатель Института химии им. В.И.Никитина НАНТ. E-mail: saidaliev_bahrom@mail.ru;
6. **Убайдов Солмоншо Одинаевич** – кандидат технических наук, Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни, доцент кафедры «Технология черчения и дизайна». Соискатель Института химии им. В.И.Никитина НАНТ. E-mail: salmonubaidov@mail.ru.

ЭКОЛОГИЯ

УДК 544.03
Специальность: 1.5.11. Экология

И.Мирсаидзода (И.У.Мирсаидов), Х.М.Назаров, Х.И.Тиллозода, Ш.Н.Ишратов, Ф.Х.Гаффорова

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УРАНСОДЕРЖАЩИХ ВОД ПРИ АДСОРБЦИИ С РАЗЛИЧНЫМИ АДСОРБЕНТАМИ

Национальная академия наук Таджикистана,
Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана

(Представлено академиком НАН Таджикистана У.М.Мирсаидовым 19.03.2025 г.)

В статье приводятся результаты измерения физических параметров урансодержащих технических вод при сорбции с различными адсорбентами. Исследование проводилось при комнатной температуре и выдержкой адсорбента в урансодержащих водах в течение 20 мин.

Ключевые слова: *урансодержащие воды, концентрация, время, температура, уран, электропроводность, окислительно-восстановительный потенциал.*

Целью исследования является определение физических параметров урансодержащих технических вод при сорбции с различными адсорбентами.

Методы исследования. Пробы для исследования отбирались пробоотборником из урансодержащих технических вод месторождения «Киик-Тал» Таджикистана. При необходимости пробы непосредственно в полевых условиях подкислялись азотной кислотой (3 мл кислоты на 1 л воды) для дальнейшего анализа [1].

В лабораторных условиях определялось содержание отдельных тяжелых металлов. В экспериментах в качестве адсорбента использовали угли месторождения «Фон-Ягноб» Айнинского района, золу 2-х видов (зола угля месторождения «Фон-Ягноб» Айнинского района и стеблей хлопчатника), каолин месторождения «Зидди» Варзобского района.

Литохимические пробы угля и каолина отбирались размером примерно 0.30×0.30 м и глубиной до 0.10 м. Отбор производился традиционным методом «конверта» с усреднением из пяти точек.

Первичная обработка проб заключалась в просушивании, удалении камней и остатков растительности. От усредненной пробы отбиралась навеска массой 100 г, которая истиралась до порошкообразного состояния, размером 0.074 мм и направлялась для проведения аналитических работ.

Физические параметры урансодержащих технических вод определяли с использованием микропроцессорного портативного многодиапазонного кондуктометра типа HI 8733(N) (производства Румыния) – предназначенного для проведения высокоточных измерений проводимости растворов с автоматической температурной компенсацией, как в лабораторных, так и в полевых условиях, а также портативных приборов Mettler Toledo GmbH FiveGo F2, F3, F4 (производства Швейцарии). Калибровка pH-метра проводилась при помощи буферных растворов.

Исследование проводилось в стационарном режиме при объеме воды 14 мл с добавками адсорбентов весом 2, 4, 6 гр. при разных температурах и выдержкой адсорбента в технических водах в течение 20 мин. Далее адсорбент отфильтровали и высушивали в сушильном шкафу.

В результате проведенных исследований выявлено, что при выдержке адсорбентов в среде урансодержащих технических вод, значения pH колеблются в пределах 7.05÷9.41. При этом, ярко выраженная щелочная среда отмечается, когда в качестве адсорбента использовали золу стебля хлопчатника (табл. 1). Жирным шрифтом в таблице отмечены максимальные значения параметров состояния.

Таблица 1

Физические параметры урансодержащих технических вод при адсорбции с различными адсорбентами

Виды адсорбентов	Масса адсорбента, г	pH	ОВП, -мВ	EC, мкСм/см	TDS, мг/л	O_2, мг/л
Вода исходная	-	7.40	11	2154	853.1	5.02
Угли месторождения «Фон-Ягноб»	1	**7.54**	**8**	**2171**	**868.5**	5.08
	2	7.44	15	1654	661.7	**9.31**
	3	7.26	14	1615	646.0	5.76
	4	7.15	14	1612	544.9	4.52
	5	7.07	17	1622	649.0	4.14
	6	7.05	12	1751	700.1	4.27
Зола угля месторождения «Фон-Ягноб»	1	8.40	69	1744	697.7	4.43
	2	8.42	69	1748	697.7	**5.02**
	3	8.44	68	1788	715.1	4.77
	4	8.45	69	1701	680.3	3.05
	5	8.47	69	1885	754.1	2.83
	6	**8.48**	**65**	**2111**	**844.6**	3.59
Зола стебли хлопчатника	1	8.46	**100**	2291	910.5	0.62
	2	8,98	120	3133	1267	1.59
	3	9.22	133	3401	1360	**2.87**
	4	9.30	144	3695	1478	0.57
	5	9.39	145	1325	**5300**	1.06
	6	**9.41**	141	**5252**	2101	0.36
Каолин месторождения «Зидди»	1	**8.24**	62	1531	615.1	**5.01**
	2	8.18	48	1527	610.8	4.91
	3	8.03	49	**1538**	**615.4**	4.40
	4	7.83	**27**	1528	611.3	4.67
	5	7.64	41	1531	612.2	4.65
	6	7.45	47	1533	612.9	4.57

Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) исследуемых технических вод колеблется от -8 до -145 мВ. При отрицательном ОВП вода является восстановителем и отдаёт электроны свободным радикалам [2].

Общее количество растворенных твердых частиц в воде находится в пределах 545-5300 мг/л. Нормальный уровень TDS воды – 75÷250 мг/л.

Высокие концентрации ионов зачастую приводят к увеличению электропроводности воды, что указывает на ухудшение ее качества. Величина электропроводности (EC) исследуемых вод колеблется в пределах от 1325 мкСм/см до 5252 мкСм/см.

Наличие урана и тяжелых металлов может привести к снижению растворенного кислорода, что негативно сказывается на водной флоре и фауне. Значение растворенного кислорода в воде составляет 0.3-9.31.

Полученные результаты физических параметров в дальнейшем могут быть использованы для выяснения механизма протекания процесса адсорбций ионов урана и тяжелых металлов с неорганическими вышеуказанными адсорбентами.

Поступило 19.03.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бобочонова З.Х., Назаров Х.М., Тиллобоев Х.И. Особенности распределения тяжелых металлов в водных системах Северного Таджикистана и их очистка (монография) – Худжанд: Нури маърифат, 2021, 130 с.
2. Шульц М.М., Писаревский А.М., Полозова И.П. Окислительный потенциал. Теория и практика. – Л.: Химия, 1984, 160 с.

И.Мирсаидзода (И.У.Мирсаидов), Х.М.Назаров, Ҳ.И.Тиллозода, Ш.Н.Ишратов, Ф.Х.Гаффорова

ПАРАМЕТРҲОИ ФИЗИКИИ ОБҲОИ УРАНДОР ДАР РАВАНДИ АДСОРБСИЯ БО АДСОРБЕНТҲОИ ГУНОГУН

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии АМИ Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои ченкунии параметрҳои физикии оби техникии урандор дар раванди адсорбсия бо адсорбентҳои гуногун оварда шудааст. Таҳқиқот дар ҳарорати хонагӣ гузаронида шуд ва адсорбент дар оби техникии урандор 20 дақиқа нигоҳ дошта шудааст.

Калимаҳои калидӣ: *обҳои урандор, консентратсия, вақт, ҳарорат, уран, гузарониши барқ, потенсиали оксиду-барқороршавӣ.*

I.Mirsaidzoda (I.U.Mirsaidov), Kh.M.Nazarov, H.I.Tillozoda, Sh.N.Ishratov, F.Kh.Gafforova

PHYSICAL PARAMETERS OF URANIUM-CONTAINING WATER DURING ADSORPTION WITH VARIOUS ADSORBENTS

National Academy of Sciences of Tajikistan,

Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agenc, NAS of Tajikistan

This article presents the results of measuring the physical parameters of uranium-containing technical water during sorption with various adsorbents. The study was carried out at room temperature and keeping the adsorbent in uranium-containing water for 20 minutes.

Key words: *uranium-containing waters, concentration, time, temperature, uranium, electrical conductivity, redox potential.*

Сведения об авторах:

1. **Мирсаидзода Илхом** – д.т.н., Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, директор. E-mail: i.mirsaidzoda@cbrn.tj;
2. **Назаров Холмурод Марипович** – д.т.н., Филиал Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана в Согдийской области, зам. директора. E-mail: holmurod18@mail.ru;
3. **Тиллозода Хаким Иброгим** – к.х.н., Филиал Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана в Согдийской области, заведующий научно-исследовательского сектора. E-mail: tilloboev-2006@mail.ru;
4. **Ишратов Шерзод Нозиршоевич** – Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, заведующий отделом. E-mail: sh.ishratov@cbrn.tj;
5. **Гаффорова Фирузаджон Хакимджоновна** – Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, соискатель. E-mail: tilloboev-2006@mail.ru.

ОРНИТОЛОГИЯ

УДК 598.4(575.3) +598.4(575)
Специальность: 03.02.04. Зоология

У.М.Набиев, член-корреспондент НАН Таджикистана А.С.Саидов[*], Г.Д.Гарибмамадов

ЦВЕТНОЙ БЕКАС (*ROSTRATULA BENGHALENSIS* LINNAEUS, 1758) – НОВЫЙ ВИД ДЛЯ ОРНИТОФАУНЫ ТАДЖИКИСТАНА

Национальная академия наук Таджикистана,
[*]Институт зоологии и паразитологии им. Е.Н. Павловского НАН Таджикистана,
[**]Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе) НАН Таджикистана

Впервые приводятся данные о находке залётного вида цветного бекаса (Rostratula benghalensis Linnaeus, 1758) в Таджикистане. Вид был обнаружен 21.07.2024 г. в очистительных сооружениях «Гулбутта», расположенных на южной окраине г. Душанбе.

Ключевые слова: *цветной бекас, Rostratula benghalensis, новый вид, город Душанбе, Таджикистан.*

За последние два десятилетия в составе орнитофауны Таджикистана было зарегистрировано несколько новых видов птиц, которые ранее не были отмечены орнитологами. В Северном Таджикистане в 1999 г. Ш.Р.Мирзобаходуровой впервые была отмечена кольчатая горлица, которая за последние 25 лет за исключением Восточного Памира расселилась почти на всей урбанизированной территории Таджикистана [1,2].

В ходе наших исследований в Юго-Западном Таджикистане для орнитофауны Таджикистана впервые были обнаружены 3 новых вида – пегий лунь (*Circus melanoleucos*), белопоясный стриж (*Apus pacificus*) и гималайская маскированная трясогузка (*Motacilla alba alboides)* [3].

По данным А.Г.Абдулназарова [4], в составе орнитофауны Памира в последние десятилетия зарегистрировано 23 новых вида птиц, среди которых 6 видов – индийская болотная цапля (*Ardeola grayii*), чёрная кряква (*Anas zonorhyncha*), азиатский бекас (*Gallinago stenura)*, браминский скворец (*Sturnus pogodarum*), одноцветный дрозд (*Turdus unicolor*) и большеклювая камышёвка (*Acrocephalus orinus*) впервые отмечены на территории Таджикистана. За исключением браминского скворца и одноцветного дрозда, все остальные расселившиеся виды приурочены к водно-болотным угодьям и относятся к представителям Южно-Азиатского и Индийского орнитокомплексов.

21 июля 2024 г. в ходе утренних наблюдений на территории очистных сооружений “Гулбутта”, расположенных на южной окраине г. Душанбе, в густых зарослях травянистых околоводных растений – тростника (*Phragmites australis*) и рогоза *(Typha angustifolia*) нами была обнаружена взрослая самка цветного бекаса.

Адрес для корреспонденции: *Набиев Умед Мардонкулович, 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, п/я 70, Институт зоологии и паразитологии НАНТ. E-mail: umedn8735@gmail.com.*

Очистные сооружения «Гулбутта» (координаты: 38°49′42″ северной широты, 68°77′08″ восточной долготы) расположены на правобережье реки Кафирниган. Абсолютная высота местности составляет 731 м над ур. м. Общая площадь сооружений – около 180 га.

Ареал цветного бекаса охватывает Северную Африку, Мадагаскар и Южную Азию. Территория Таджикистана находится на расстоянии от 5000 до 15 000 км от основной области распространения вида. Ранее цветной бекас не был зарегистрирован не только на территории Таджикистана, но и в других странах Центральной Азии.

В ходе обследования других водоёмов и водно-болотных угодий в окрестностях г. Душанбе и прилегающих к нему территорий цветной бекас нигде не был обнаружен.

Цветной бекас ведёт сумеречный и ночной образ жизни, что затрудняет его наблюдение. Возможно, именно по этой причине он ранее не был отмечен орнитологами.

В Таджикистане из представителей отряда ржанкообразных (Charadriiformes) отмечено 53 вида, относящихся к шести семействам – авдотковые (Burhinidae), тиркушковые (Glareolidae), ржанковые (Charadriidae), кулики-сороки (Haematopodidae), бекасовые (Scolopacidae) и чайковые (Laridae).

Таким образом, обнаружение цветного бекаса на территории Таджикистана свидетельствует о возможном расширении ареала этого африканского вида. На наш взгляд, а также согласно мнению других исследователей [4], расселение африканских видов птиц на новые территории может быть связано с трансформацией их естественных местообитаний под воздействием антропогенных факторов, а также с глобальными климатическими изменениями. Проведение регулярного мониторинга водно-болотных угодий играет важную роль в сборе научных данных по редким и малоизученным видам птиц.

Поступило 26.03.2025 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирзобаходурова Ш.А. Материалы международной научной конференции «Экологические особенности биологического разнообразия в Республике Таджикистан и сопредельных территориях». – Худжанд, 1998, с. 40.
2. Гарибмамадов Г.Д. Расселение и гнездование кольчатой горлицы (*Streptopelia decaocto* Srivaldszky, 1838) в Таджикистане. – ДАН РТ, 2006, т. 49, № 10-12, с. 962-963.
3. Гарибмамадов Г.Д. Особенности миграции птиц в аридных и предгорных зонах Юго-Западного Таджикистана. Дисс ... канд. биол. наук. – Душанбе, 2019, 186 с.
4. Абдулназаров А.Г. Эколого-фаунистические и пространственно-временные особенности орнитофауны Памира. Дисс … докт. биол. наук. – Душанбе, 2023, 303 с.
5. Forshaw, Joseph (Hrsg.). Enzyklopädie der Vögel. 1999. ISBN 3-8289-1557-4.
6. Абдусалямов И.А. Фауна Таджикской ССР. Птицы. – Душанбе: Дониш, 1977, т. 19, ч. 3, 273 с.

У.М.Набиев, А.С.Саидов*, Ғ.Д.Ғарибмамадов

АБЁИ РАНГА (*ROSTRATULA BENGHALENSIS* LINNAEUS, 1758) – НАМУДИ НАВ БАРОИ ОРНИТОФАУНАИ ТОҶИКИСТОН

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
Институти зоология ва паразитологияи ба номи Е.Н.Павловскийи АМИ Тоҷикистон,
****Маркази илми-таҳқиқотии экология ва муҳити зисти Осиёи Марказӣ (Душанбе),***
АМИ Тоҷикистон

Нахустин бор оид ба дарёфти парандаи кӯчандаи абёи ранга (*Rostratula benghalensis* Linnaeus, 1758) дар Тоҷикистон маълумот оварда шудааст. Намуди номбурда 21 июли соли 2024 дар иншооти тозакунии Гулбуттаи шаҳри Душанбе ба қайд гирифта шудааст.

Калимаҳои калидӣ: *абёи ранга, Rostratula benghalensis, намуди нав, шаҳри Душанбе, Тоҷикистон.*

U.M.Nabiev, A.S.Saidov*, G.D.Garibmamadov

COLORED SNIPE (*ROSTRATULA BENGHALENSIS* LINNAEUS, 1758) – A NEW SPECIES FOR THE AVIFAUNA OF TAJIKISTAN

National Academy of Sciences of Tajikistan,
E.N.Pavlovskyi Institute of Zoology and Parasitology, NAS of Tajikistan,
****Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe), NAS of Tajikistan***

The first data are presented on the discovery of the vagrant species, the colored snipe (*Rostratula benghalensis* Linnaeus, 1758) in Tajikistan. The species was discovered on July 21, 2024, in the "Gulbutta" wastewater treatment facilities located on the southern outskirts of the city of Dushanbe.

Key words*: colored snipe, Rostratula benghalensis, new species, Dushanbe city, Tajikistan.*

Сведения об авторах:

1. **Набиев Умед Мардонкулович** – магистр 2-го курса, Институт зоологии и паразитологии им. Е.Н.Павловского НАН Таджикистана. E-mail: umedn8735@gmail.com;
2. **Саидов Абдуссатор Самадович** – доктор биологических наук, член-корреспондент НАН Таджикистана, Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе) НАН Таджикистана, содиректор. E-mail: abdusattor.s@mail.ru;
3. **Гарибмамадов Гарибмамад Давлатмамадович** – к.б.н., Институт зоологии и паразитологии им. Е.Н.Павловского НАН Таджикистана, старший научный сотрудник. E-mail: garibmamadov-g@mail.ru.

БИОХИМИЯ

УДК 581.1:577.1
Специальность: 1.5.4. Биохимия

А.З.Имомзода, М.С.Саидзода, З.Б.Давлятназарова

ЧИСЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЛЕКАРСТВЕННОГО СЫРЬЯ РАСТЕНИЙ УСЬМЫ

Национальная академия наук Таджикистана,
Институт ботаники, физиологии и генетики растений НАН Таджикистана

(Представлено член-корреспондентом НАН Таджикистана К.Алиевым 07.04.2025 г.)

В статье представлены результаты изучения некоторых показателей растений Isatis tinctoria L. и впервые предложены требования и нормы на цельное сырье, такие как листья и наземная часть растений. В результате проведенных исследований разработаны следующие числовые нормы для получения растительного лекарственного сырья: влажность не более 13%; зола общая не более 9%; зола нерастворимая в 10% растворе кислоты хлористоводородной, не более 2%; растительные, органические и минеральные примеси не более 1%. В качестве экстрагента рекомендуется 70% этиловый спирт и очищенная вода. Проведенное исследование способствует обеспечению условий для стандартизации сырья растений усьмы.

Ключевые слова: *вайда красильная, усьма, числовые показатели, зола, сухой остаток, влажность, экстрактивные вещества.*

Растения *Isatis tinctoria L.* или вайда красильная широко распространены на территории Средней Азии под названием усьма и используется как косметическое средство с давних времён. В Таджикистане, с традиционно возделываемыми в регионе культурами, усьму выращивают на ограниченной площади и в основном только для индивидуального применения. Однако существуют множество данных, указывающих на использование усьмы как кормового и лекарственного средства в различных странах [1-3].

Выращивание усьмы как лекарственного средства требует определённых условий и технологии возделывания. Лекарственное растительное сырьё (ЛРС) заготавливают на основе использования дикорастущих и культивируемых растений, и качество сырья определяют как по внешним признакам, так и с учётом числовых показателей. Определение числовых показателей является одним из важных условий стандартизации ЛРС [4, 5].

Для лекарственного растительного сырья количественными или числовыми показателями качества являются: влажность, сумма экстрактивных веществ, зольность, а также содержание

Адрес для корреспонденции: *Имомзода Аслиддин Зохир, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Навои 5\5, Служба государственного надзора здравоохранения и социальной защиты населении. E-mail: sodot77@mail.ru;*
Саидзода Мухаммадтоир Саид, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 121, Агентство по надзору в сфере образования и науки при Президенте РТ. E-mail: nts.tahir@mail.ru;
Давлятназарова Зульфия Буриевна, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни 299\2, ИБФГР НАНТ. E-mail: zulfiyad@gmail.com.

органических и неорганических примесей. Определение содержания экстрактивных веществ, т.е. веществ полученных в ходе экстракции, в ЛРС необходимо для идентификации качества, особенно для тех видов растений, у которых, на настоящее время, не проводилось определения количественного и качественного состава биологически активных соединений. Определение экстрактивных веществ необходимо для характеристики лекарственных компонентов растений с целью рекомендации в качестве ЛРС. Следует отметить, что наиболее актуальным является определение экстрактивных веществ в сырье даже в том случае, если не существует разработанного количественного метода определения действующих веществ [4 - 7].

В результате фитохимического анализа изучаемых видов сырья, возможно, обусловить перспективу их использования в народном хозяйстве, что в свою очередь требует выявления показателей качества и характеристик подлинности данного сырья.

В связи с этим были проведены исследования, на основе которых разработаны числовые показатели качества ЛРС, полученного из листьев и наземной части растений усьмы (*Isatis tinctoria L.).*

М а т е р и а л и м е т о д ы и с с л е д о в а н и я

Объектом исследования служили листья и другие наземные органы растений усьмы (*Isatis tinctoria L.*).

Пробы для анализа листьев и надземной части растений усьмы отбирали в соответствии с требованиями общей фармакопейной статьи (ОФС) 42- 0013 -03 [4].

Изучение и разработку числовых показателей листьев и надземной части растений проводили на образцах сырья из растений, собранных в городе Левакант Республики Таджикистан.

В соответствии с Государственной фармокопеей СССР (ГФ XI) были определены такие количественные показатели, как общая и зола, нерастворимая в 10% растворе кислоты хлористоводородной, влажность, содержание различных примесей, которые включают части растений (сырья), утратившие естественную окраску, другие части растения, не соответствующие установленному определению сырьё, то есть корни, органические примеси, состоящие из других неядовитых растений, минеральные примеси, включая землю, песок и камешки, определяли по [5].

Экстрактивные вещества были определены гравиметрическим методом, с использованием чашек для выпаривания, содержащих сухой остаток по ГФ XI [6, 7]. В качестве экстрагента использовали очищенную воду и растворы, содержащие этиловый спирт в концентрации 96%, 70%, 50%, 30% и гексан.

Процентное содержание общей золы x_1 в абсолютно сухом сырье вычисляли по формуле

$$X_1 = \frac{m_1 \cdot 100}{m_2(10 - w)} \quad X_1 = m_1 \,.\, 100$$

где m_1 – масса золы, г; m_2 – масса навески сырья, г; w – потеря в массе сырья при высушивании, %.

Процентное содержание золы, нерастворимой в 10% HCl X_2, в абсолютно сухом сырье вычисляли по формуле

$$X_2 = \frac{(m_1 - m) \cdot 100 \cdot 100}{m_2(100 - w)}$$

где m_1 – масса золы, г; m – масса золы фильтра (если зола последнего более 0,002); m_2 – масса навески сырья, г; w – потеря в массе сырья при высушивании, %.

Статистическую обработку данных проводили с использованием компьютерной программы *Microsoft Exel* 2010.

Результаты исследования и их обсуждение

В исследуемых образцах листьев и наземной части растений усьмы определили такие признаки, как: утратившие естественную окраску части сырья (пожелтевшие, почерневшие и т.д.), другие части растения, не соответствующие установленному описанию сырья (корни); органическую примесь (части других неядовитых растений) и минеральную примесь (земля, песок, камешки).

Как показано в таблице 1, части сырья утратившие естественную окраску составили от 0.20 до 0.50%, при норме не более 1.0%; другие части растения, не соответствующие установленному описанию сырья – 0.10-0.20% при норме не более 0.5%; органическая примесь составила 0.20-0.50% и минеральная примесь – 0.10-0.60% при норме не более 1.0%.

Определение влажности в растениях усьмы показало, что наблюдается потеря в массе от 9.74 до 12.25%. Многократные измерения данного параметра подтвердили данную закономерность, что дало возможность рекомендовать в качестве показателя влажности для растений усьмы норму не более 13%.

Результаты изучения зольности в листьях и надземной части растений усьма представлены в таблице 1.

В ходе исследования выявлено, что массовая доля золы в сырье из растений усьмы колеблется в интервале 7.15 до 8.88%, то есть составляет не более 9%. Массовая доля золы не растворимой в хлористоводородной кислоте колеблется от 1.00 до 1.72%., что дало возможность рекомендовать в качестве показателя массовая доля золы для растений усьмы норму не более 2%.

Таким образом, на основании изучение вышеуказанных параметров в растениях усьмы разработаны требования и нормы на ЛРС, которое можно получить из листьев и наземной части (табл. 1)

Таблица 1

Числовые показатели и нормы качества сырья листья и наземной части растений усьмы

№ п/п	Наименование числовых показателей	Содержание в сырье, %	Предлагаемые нормы, %
1	Влажность	9.74-12.25	не более 13.0
2	Зола общая	7.15-8.88	не более 9.0
3	Зола, нерастворимая в 10% растворе кислоты хлористоводородной	1.00-1.72	не более 2.0
4	Части сырья, утратившие естественную окраску (пожелтевшие, почерневшие)	0.20-0.50	не более 1.0
5	Другие части растения, не соответствующие установленному описанию сырья (корни)	0.10-0.20	не более 0.5
6	Органическая примесь (части других неядовитых растений)	0.20-0.50	не более 1.0
7	Минеральная примесь (земля, песок, камешки)	0.10-0.60	не более 1.0

Далее был определен выход экстрактивных веществ растений усьмы с использованием метода взвешивания сухого остатка, в соответствии с требованиями ГФ XI [4-6].

Как представлено в таблице 2, максимального извлечения экстрактивных веществ из растений усьмы можно достичь на основе использования в качестве экстрагента воды очищенной и 70% этилового спирта, так как различия в извлекающей способности данного сочетания экстрагентов минимальны. На основании данного исследования можно рекомендовать норму содержания экстрактивных веществ, извлекаемых указанным растворителем, не менее 25%.

Таблица 2

Содержание экстрактивных веществ в растениях усьмы

Экстрагент	Содержание экстрактивных веществ, %	
	листья	другие надземных части, %
Вода очищенная	36.24 ± 1.33	40.30 ± 1.02
Спирт этиловый 30%	31.74 ± 1.43	43.69 ± 1.12
Спирт этиловый 50%	33.49 ± 1. 09	43.62 ± 0.93
Спирт этиловый 70%	38.58 ± 0. 74	45.68 ± 0.91
Спирт этиловый 96%	28.76 ±0. 74	39.06 ± 0.53
Гексан	26.89 ± 0. 69	36.42 ± 0.62

Таким образом, на основе анализа определения таких показателей, как влажность, зола общая и нерастворимая в 10% растворе кислоты хлористоводородной, содержание допустимых примесей, а также содержания экстрактивных веществ с целью разработки лекарственного сырья из растений усьмы рекомендуются следующие числовые показатели: влажность не более 13%; зола общая не более 9%; зола нерастворимая в 10% растворе кислоты хлористоводородной не более 2%; растительные, органические и минеральные примеси не более 1%. Для получения наиболее оптимального количества экстракта из растений усьмы использовать в качестве экстрагента 70% этиловый спирт и очищенную воду.

Поступило 07.04.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Jasmine Speranza, Natalizia Miceli, Maria Fernanda Taviano, Salvatore Ragusa, Inga Kwiecie, Agnieszka Szopa and Halina Ekiert. Isatis tinctoria L. (Woad): A Review of Its Botany. Ethnobotanical Uses. Phytochemistry. Biological Activities. and Biotechnological Studies. – Plants, 2020, №9, pp.2-40.
2. Potterat O., Hamburger M., Ríos J.L. Anti-inflammatory and antiallergic activity in vivo of lipophilic Isatis tinctoria extracts and tryptanthrin. – Planta Med., 2006, v. 72, pp.539-546.
3. Головкин Б.Н., Руденская Р.Н., Трофимова И.А., Шретер А.И. Биологически активные вещества растительного происхождения. Т 1. – М.: Наука, 2001, 350 с.
4. Правила приёмки лекарственного растительного сырья и методы отбора проб. – ОФС. 42 - 0013-03., Москва. 2003.
5. Государственная фармакопея СССР. XI издание. Вып. 1. – М.: Медицина, 1987, 333 с.
6. Государственная фармакопея СССР. XI издание. Вып. 2. – М.: Медицина, 1990, 397 с.
7. Определение содержания экстрактивных веществ в лекарственном сырье и лекарственных растительных препаратах. – ОФС. 1.5.3.0006.15. – М., 2003.

А.З.Имомзода, М.С.Саидзода, З.Б.Давлятназарова

НИШОНДИҲАНДАҲОИ АДАДИИ СИФАТИ АШЁИ ТАБОБАТИИ РАСТАНИИ УСМА

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Институти ботаника, физиология ва генетикаи растанӣ АМИ Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои омӯзиши баъзе нишондиҳандаҳои растаниҳои *Isatis tinctoria* L. оварда шуда, бори аввал талабот ва стандартҳо нисбати ашёи хом, аз қабили баргҳо ва қисмҳои болоии растаниҳо пешниҳод карда мешаванд. Дар натиҷаи таҳқиқоти гузаронидашуда меъёрҳои зерини ададии ба даст овардани ашёи хоми шифобахши гиёҳӣ тартиб дода шудаанд: намнокӣ на бештар аз 13%; хокистари умумӣ на бештар аз 9%; хокистари дар кислотаи гидрогенхлориди 10% ҳалнашаванда на бештар аз 2%; на зиёда аз 1% олудагиҳои органикӣ ва минералӣ. Ба сифати экстрагентҳо 70% спирти этилӣ ва оби тозашуда тавсия дода мешавад. Тадкикоти гузаронидашуда ба мухайё намудани шароити стандартикунонии ашёи хоми растании усма ёрӣ мерасонад.

Калимаҳои калидӣ: *растании усма, нишондиҳандаҳои ададӣ, хокистар, боқимондаи хушк, намӣ, моддаҳои экстрактӣ.*

A.Z.Imomzoda, M.S.Saidzoda, Z.B.Davlyatnazarova

NUMERICAL QUALITY INDICATORS OF RAW MATERIALS OF WOAD PLANTS

National Academy of Sciences of Tajikistan,

Institute of Botany, Plant Physiology and Genetics, NAS of Tajikistan

The article presents the results of studying some indices of Isatis tinctoria L. plants and for the first time proposes requirements and standards for whole raw materials, such as leaves and above-ground parts of plants. As a result of the conducted research, the following numerical standards for obtaining herbal medicinal raw materials were developed: humidity no more than 13%; total ash no more than 9%; insoluble ash no more than 2%; plant, organic and mineral impurities no more than 1%. 70% ethanol and water are recommended as an extractant. The conducted research contributes to providing conditions for standardization of woad plant raw materials.

Key words: *woad, numerical indicators, ash, dry residue, moisture, extractive substances.*

Сведения об авторах:

1. **Имомзода Аслиддин Зохир** – соискатель Института ботаники физиологии и генетики растений НАН Таджикистана, Центральная лаборатория Службы государственного надзора здравоохранения и социальной защиты населения РТ, заведующий;
2. **Саидзода Мухаммадтоир Саид** – кандидат биологических наук, Агентство по надзору в сфере образования и науки при Президенте РТ, директор;
3. **Давлятназарова Зульфия Буриевна** – доктор биологических наук, Институт ботаники физиологии и генетики растений НАН Таджикистана, главный научный сотрудник.