



Slovak international scientific journal

№100, 2025

Slovak international scientific journal

The journal has a certificate of registration at the International Centre in Paris – ISSN 5782-5319.

The frequency of publication – 12 times per year.

Reception of articles in the journal – on the daily basis.

The output of journal is monthly scheduled.

Languages: all articles are published in the language of writing by the author.

The format of the journal is A4, coated paper, matte laminated cover.

Articles published in the journal have the status of international publication.

The Editorial Board of the journal:

Editor in chief – Boleslav Motko (Bratislava) Slovakia

The secretary of the journal – Milica Kovacova (Bratislava) Slovakia

- Lucia Janicka – (Bratislava) Slovakia
- Stanislav Čerňák – (Bratislava) Slovakia
- Miroslav Výtisk – (Nitra) Slovakia
- Dušan Igaz – (Nitra) Slovakia
- Terézia Mészáros – (Banská Bystrica) Slovakia
- Peter Masaryk – (Rzeszów) Poland
- Filip Kocisov – (Wrocław) Poland
- Andrej Bujalski – (Košice) Slovakia
- Jaroslav Kovac – (Trnava) Slovakia
- Paweł Miklo – (Bratislava) Slovakia
- Jozef Molnár – (Bratislava) Slovakia
- Tomajko Milaslavski – (Nitra) Slovakia
- Natália Jurková – (Bratislava) Slovakia
- Jan Adamczyk – (Prague) Czech Republic
- Boris Belier – (Bratislava) Slovakia
- Stefan Fišan – (Bratislava) Slovakia
- Terézia Majercakova – (Wien) Austria
- Ekaterina Semko (Kyiv) Ukraine

1000 copies

Slovak international scientific journal

Partizanska, 1248/2

Bratislava, Slovakia 811 03

email: info@sis-journal.com

site: <http://sis-journal.com>

CONTENT

EXPERIMENTAL PHYSICS

*Biliaiev M., Kozachyna V., Kirichenko P.,
Biliaieva V., Popruha D.*

STUDY OF THE PROCESS OF DUST CAPTURE BY A
DROP OF WATER 3

HISTORY OF ART

Seitova N., Tilesova G., Bokaeva G.

"SOCIO-POLITICAL PROCESSES AND THEIR INFLUENCE
ON THE ARTISTIC SPHERE OF CENTRAL ASIA IN THE
20TH CENTURY: IN THE CONTEXT OF THE CREATIVE
HERITAGE OF URAL TANSYKBAEV" 9

MATERIALS SCIENCE AND MECHANICS OF MACHINES

Nasirov N.

MODELING AND MINIMIZATION OF TOOL WEAR IN
FIREARM BARREL MACHINING..... 12

Nasirov N.

SMART MANUFACTURING STRATEGIES FOR HIGH-
PRECISION WEAPON BARREL PRODUCTION IN THE
DEFENSE INDUSTRY 18

MATHEMATICS

Abbasov Z.

HEAT PROPAGATION IN ZERO BOUNDARY
CONDUCTION N DIMENSIONAL SPACE 23

PHILOLOGY

Nematova S., Seyidli L.

HISTORY OF LIBRARY WORK IN NAKHCHIVAN 29

PSYCHOLOGY

Ramazanova K.

THE IMPACT OF SETTING BOUNDARIES IN EARLY
CHILDHOOD ON THE DEVELOPMENT OF EMOTIONAL
INTELLIGENCE..... 34

EXPERIMENTAL PHYSICS

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ «ЗАХОПЛЕННЯ» ПИЛУ КРАПЛЕЮ ВОДИ

Біляєв М.М.

д.т.н., професор,

кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика»

Український державний університет науки і технологій

<https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

Козачина В.А.

к.т.н., доцент,

кафедра природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

<https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

Кіріченко П.С.

к.т.н., доцент,

кафедра «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція»

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0009-0007-4031-7693>

Біляєва В.В.

д.т.н., професор,

кафедра «Енергетичні системи та енергоменеджмент»

Український державний університет науки і технологій

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2399-3124>

Попруга Д.В.

к.т.н., доцент

декан будівельного факультету

Криворізький національний університет

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7567-6484>

STUDY OF THE PROCESS OF DUST CAPTURE BY A DROP OF WATER

Biliaiev M.

D. Sc. (Tech.), Prof.,

dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics»

Ukrainian State University of Science and Technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

Kozachyna V.

Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

dep. «Natural Sciences and General Engineering Disciplines»

LLC «Technical University «METINVEST POLYTECHNIC»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

Kirichenko P.

Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation»

Kyryvi Rih National University

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4031-7693>

Biliaieva V.

D. Sc. (Tech.), Prof.,

dep. «Energy Systems and Energy Management»

Ukrainian State University of Science and Technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2399-3124>

Popruha D.

Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

Dean of Civil Engineering Faculty

Kyryvi Rih National University

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7567-6484>

DOI: [10.5281/zenodo.17392477](https://doi.org/10.5281/zenodo.17392477)

Анотація

Зниження пилового забруднення повітря в робочих зонах є важливою задачею в галузі охорони праці та екологічної безпеки. Поширеним засобом зменшення пилового забруднення повітря є подача води в пилову хмару. Але для раціонального подавлення пилу потрібно знати закономірності взаємодії «крапля

води+пил». В роботі наведено результати експериментальних досліджень по визначенню маси пилу, що «захоплює» крапля води при русі. На основі проведених експериментів побудовано емпіричні моделі. Розглянуто побудову чисельної моделі для аналізу розсіювання пилу та крапель води в повітрі.

Abstract

Reducing dust pollution in the air in work areas is an important task in the field of occupational health and safety and environmental safety. A common means of reducing dust pollution in the air is to spray water into the dust cloud. However, in order to suppress dust effectively, it is necessary to understand the patterns of interaction between water droplets and dust. This paper presents the results of experimental studies to determine the mass of dust “captured” by a water droplet in motion. Empirical models were constructed based on the experiments. The construction of a numerical model for analyzing the dispersion of dust and water droplets in the air is considered.

Ключові слова: пилове забруднення повітря, взаємодія «крапля води+пил», експеримент, математична модель масопереносу.

Keywords: air pollution, «water dropl+dust» interaction, experiment, mathematical model of mass transfer.

Вступ

Пилове забруднення робочих зон створює загрозу здоров'ю працівників та потребує розробки ефективних методів знепилювання на різних підприємствах [1, 4, 10]. Відомо, що подача води в пилову хмару або шлейф є засобом, що широко використовується для боротьби з пиловим забрудненням повітря на промислових майданчиках. Але для забезпечення потрібних умов праці необхідно науково обгрунтовано здійснювати подачу води в область пилового забруднення. При розробці регламенту подачі води для знепилювання, як особливо важливої задачі в галузі охорони праці та екологічної безпеки, вкрай важливим аспектом є визначення ефективності подачі води в пилову хмару з метою зменшення концентрації пилу в повітрі робочої зони. Відомо, що принцип знесення базується на «захопленні» краплею води часток пилу. Під ефективністю розуміється кількість (маса) вугільного пилу, що може бути «захоплена» краплею води, що рухається в пиловому середовищі. Визначення ефективності такого «захоплення» пилових часток є дуже важливим для розробки науково-обгрунтованої стратегії знепилювання.

Слід зазначити, що дослідження цього процесу, зокрема, з метою визначення кількості (маси) пилу, що може захопити крапля води, є досить скла-

дним дослідженням. Існують напівемпіричні моделі для рішення даної задачі. Аналіз літературних джерел [1-3, 5-8] показав, що розвиток теоретичних методів дослідження залишається важливою задачею в даній області.

Мета

Експериментальне дослідження ефективності «захоплення» краплею води пилу та розробка чисельної моделі масопереносу пилу та крапель води в повітрі.

Методика

Для оцінювання процесу «захоплення» краплею води використовувався метод фізичного експерименту. Для моделювання процесу розповсюдження крапель води та пилу в повітрі побудовано 2D чисельні моделі масопереносу.

Експериментальні дослідження. Розглядається процес скочування краплі води по пластині (матеріал пластини – пінопласт, незмочувана поверхня) на якій є частки вугільного пилу. Маса пилу на пластині 0,5 г розподілялася на площині у вигляді прямокутника розмірами 7см×5см. На пластину подавалась крапля води, яка скочувалась по пластині (рис. 1) та попадала у ємність, що розташована під пластиною (пластина розташована під кутом 60°). Далі проводилось вимірювання маси цієї краплі, що містила вугільний пил на своїй поверхні.

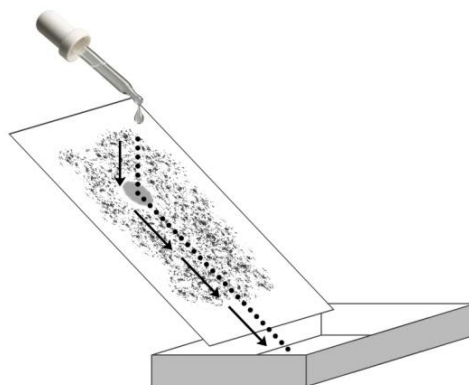


Рис. 1. Схема скочування каплі води по поверхні, що забруднена вугіллям

Експеримент проводився для трьох середніх значень маси краплі води: 0,05 г; 0,07 г; 0,1 г (рис.2).

Довжина шляху скочування краплі води складала 1,5 см від кінця пластини («короткий» шлях руху) та 6 см від кінця пластини («довгий» шлях

руху). Різний шлях скочування встановлювався з метою визначити, чи потрібен «значний» час на «прикріплення» часток пилу до краплі та чи лімітована маса пилу, що може бути «захоплена» краплею

води (рис.3). Здійснювалася відеозйомка процесу, що моделювався.



Рис. 2. Зважування «чистої» краплі води

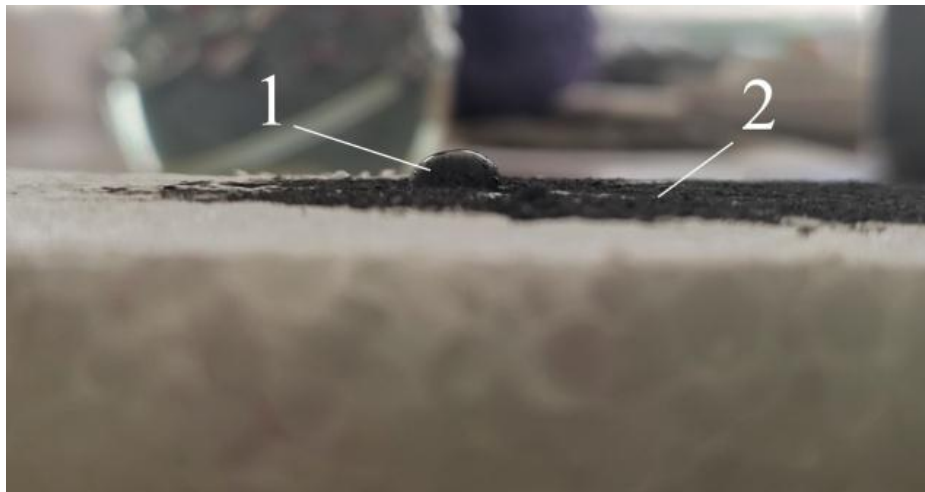


Рис. 3. «Крапля води+вугільний пил» на поверхні пластині:
1 – крапля; 2 – поверхні з вугільним пилом

Проведені дослідження показали наступне:

1. Захоплення краплею води вугільного пилу відбувається, практично, «миттєво», так як не було різниці в масі вугільного пилу, що «захоплена» при короткому «шляху» краплі або при довгому «шляху» краплі. Час руху на «короткому» шляху дорівнював, в середньому, $t_{\max}=0,3$ с. Тобто, після 0,3 с припиняється «захоплення» пилу. Таким чином, при практичних розрахунках можна прийняти, що протягом 0,3 с крапля «захоплює» максимально можливу масу вугільного пилу.

2. Середнє значення маси вугільного пилу, що «захоплене» краплею води таке:

- 0,01 г пилу, при масі краплі 0,05 г (тобто 17 % від маси краплі);
- 0,013 г пилу, при масі краплі 0,07 г (тобто 18 % від маси краплі);
- 0,02 г пилу, при масі краплі 0,1 г (тобто 19 % від маси краплі).

В середньому, можна приймати, що крапля води захоплює кількість пилу, що відповідає приблизно 18 % маси краплі. Далі, при побудові математичної моделі даного процесу, буде використовуватися це значення у долях одиниці, тобто «0,18». Це значення використовується далі для побудови мате-

матичної моделі (1). Таким чином, експериментальним шляхом підтверджено робочу гіпотезу, що була висунута.

Можна дати таке пояснення отриманим експериментальним даним: кількість вугільного пилу, що «захоплює» крапля води, пропорційна площі поверхні краплі: зі збільшенням маси краплі збільшується площа її поверхні, а значить збільшується поверхня контакту краплі з частками пилу.

Якщо прийняти, що процес «захоплення» пилу відбувається за лінійною залежністю, то можна, на основі отриманих експериментальних даних, отримати емпіричну модель, що дозволяє визначати масу пилу, що «захоплює» крапля води за час t . Модель має вигляд:

$$Q_c(t) = \frac{k \cdot M_w}{t_{\max}} t, \quad (1)$$

де M_w – маса краплі води, г; $k=0,18$ – емпіричний коефіцієнт, що враховує можливість краплі «захопити» вугільний пил; $Q_c(t)$ – маса пилу, що «захоплює» крапля води за час t (мінімальне значення цього параметру «0», максимальне значення цього параметру $t_{\max}=0,3$ с).

Можна також навести інший вигляд емпіричної моделі, а саме:

$$M_c(t) = k \cdot M_w - (0,3 - t)\alpha \quad (2)$$

де M_c – маса пилу; t – час, с; $\alpha = \frac{k \cdot M_w}{t_{\max}}$.

Здійснимо математичний аналіз побудованої емпіричної моделі (2) на основі теорії границь. Для цього знайдемо границю даної залежності при $t \rightarrow 0$. Маємо:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0} (k \cdot M_w - (0,3 - t)\alpha) &= k \cdot M_w - (0,3 - t_{\max})\alpha = \\ &= k \cdot M_w - (0,3 - 0,3)\alpha = k \cdot M_w \end{aligned} \quad (4)$$

Як можна бачити з (4), при $t \rightarrow t_{\max}$ отримане значення kM_w дорівнює максимальній масі вугільного пилу, що може «захопити» крапля води за час $t_{\max} = 0,3$ с. Це значення також відповідає фізиці процесу, що моделюється. Таким чином, математичний аналіз отриманої емпіричної моделі, на основі

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (5)$$

де S – концентрація пилу (крапель води); t – час; u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку; μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії; Q_{Si} – інтенсивність емісії пилу (емісія від штабелю вугілля, викид пилу при розвантажувальних роботах тощо) або інтенсивність емісії крапель води;

$\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака; x_i, y_i – координати розташування джерела емісії.

Крайові умови для рівняння масопереносу розглянути [1, 2].

Для чисельного інтегрування рівняння (5) здійснюється його фізичне розщеплення:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0} (k \cdot M_w - (0,3 - t)\alpha) &= k \cdot M_w - 0,3 \cdot \alpha = \\ &= k \cdot M_w - 0,3 \frac{k \cdot M_w}{t_{\max}} = k \cdot M_w - 0,3 \frac{k \cdot M_w}{0,3} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Таким чином, при $t \rightarrow 0$ маса пилу, що «захоплює» крапля води, дорівнює 0. Це значення відповідає фізиці процесу, що моделюється.

З іншого боку, розглянемо границю залежності (2) при $t \rightarrow t_{\max}$, тобто інший крайній випадок. Маємо:

теорії границь, підтверджує коректність побудованої моделі (2).

Модель масопереносу. Для моделювання процесів переносу пилу та крапель води в повітрі використовуються рівняння масопереносу.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (8)$$

Для чисельного розв'язання рівняння (6) застосовується така двокрокова змінно-трикутна схема розщеплення [2]:

– на першому кроці:

$$\begin{aligned} S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} &= S_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \\ &+ \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^n + S_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2} \end{aligned} ;$$

– на другому кроці:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} +$$

$$+ \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

де $u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2}$.

Для чисельного розв'язку рівняння (7) застосовується така двокрокова змінно-трикутна схема розщеплення [2]:

– на першому кроці:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} +$$

$$+ \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^n + S_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2};$$

– на другому кроці:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} +$$

$$+ \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

де $v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}$.

Для чисельного інтегрування рівняння (8) використовується метод Ейлера. Здійснено комп'ютерну реалізацію побудованої чисельної моделі.

Висновки

1. Експериментальним шляхом здійснено оцінювання маси вугільного пилу, що «захоплює» крапля води, що рухається.
2. На основі обробки даних експерименту отримано емпіричні моделі для оцінювання швидкості «захоплення» вугільного пилу краплею води.
3. Побудовано чисельну модель масопереносу, що може бути використана для аналізу ефективності використання подачі води для зменшення пилового забруднення повітря.
4. Подальший розвиток даного напрямку буде присвячений розробці тривимірної моделі масопереносу пилу та крапель води.

Список літератури

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD-моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на

робочих місцях: монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. – 268 с.

2. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде/М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук.думка, 1997. – 368 с.

3. Alvarez J. T., Alvarez I. D. & Lougedo S. T. Dust barriers in open pit blasts. Multifase Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Air Pollution XVI, Vol 116. 2008. P. 85-93.

4. Best Practices for Dust Control in Coal Mining. *Information Circular*/ Jay F. Colin et al, IC 9517, Department of Health and Human Services, Pittsburgh, PA, Spokane, WA, January 2010. 30 p.

5. Biliaiev M., Biliaieva V., Berlov O., Kozachyna V., Kirichenko P., Oladipo M.O., Poltoratska V. Modeling Coal Dust Dispersion from Pile with Protection Barriers. E3S Web of Conferences. Vol. 168: 2nd Intern. Conf. Essays of Mining Science and Practice, Dnipro, Ukraine, 22–24 April 2020. P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202016800021.

6. Biliaiev, Mykola & Biliaieva, V & Kozachyna, Vitalii & Berlov, Oleksandr & Oladipo, Mutiu & Kirichenko, P. (2020). Reducing of coal dust release from train wagon with barrier. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 985. 012018. 10.1088/1757-899X/985/1/012018.

7. Ferreira AD, Viegas DX, Sousa ACM. Full-scale measurements for evaluation of coal dust release from train wagons with two different shelter covers. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 91(10), P. 1271–1283

8. Ferreira, AD, Vaz P. A. Wind tunnel study of coal dust release from train wagons. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2004. 92. P. 565–577.

9. Kirk Winges, Richard Steffel Coal Dust from Rail Transport. Ramboll Environ US Corporation, 19020 33rd Avenue, Suite 310, Lynnwood, Washington 98036, 425-412-1800, 14 p.

10. Reed W. R. Significant Dust Dispersion Models for Mining Operations. DHHS (NIOSH) Publication. 2005 – 138, Pittsburgh, PA, 2005. P. 24.

HISTORY OF ART

"SOCIO-POLITICAL PROCESSES AND THEIR INFLUENCE ON THE ARTISTIC SPHERE OF CENTRAL ASIA IN THE 20TH CENTURY: IN THE CONTEXT OF THE CREATIVE HERITAGE OF URAL TANSYKBAEV"

Seitova N.

*Senior Lecturer, Master of Arts
Aktobe Regional University named after K. Zhubanov.
Aktobe city, Republic of Kazakhstan*

Tilesova G.

*Master of Pedagogical Sciences
Aktobe Regional University named after K. Zhubanov.
Aktobe city, Republic of Kazakhstan*

Bokaeva G.

*Master of Pedagogical Sciences
Aktobe Regional University named after K. Zhubanov.
Aktobe city, Republic of Kazakhstan*

DOI: [10.5281/zenodo.17392495](https://doi.org/10.5281/zenodo.17392495)

Abstract

The article examines the socio-political processes of the 20th century that influenced the development of fine art in Central Asia.

Particular attention is paid to Soviet cultural policy, the formation of the art education system, the establishment of socialist realism as an official method, as well as the role of urbanization and industrialization in the transformation of the artistic sphere.

The analysis focuses on the creative legacy of Ural Tansykbaev, one of the leading representatives of the fine arts of Uzbekistan, whose formation and artistic path are closely linked to the aforementioned processes.

Keywords: Central Asia, fine arts, Soviet cultural policy, socialist realism, art education.

Introduction

The fine arts of Central Asia in the 20th century were formed in a dynamic and largely conflictual field of socio-political transformations initiated by the Soviet government. These transformations affected institutional (the creation of art schools, museums, exhibition venues), ideological (the standardization of artistic language within the framework of socialist realism) and socio-cultural (urbanization, industrialization, cultural unification and the construction of "national forms") dimensions of artistic life.

One of the most prominent representatives of the region's artistic scene was Ural Tansykbaev (1904–1974), whose work embodied a synthesis of national-local traditions and new aesthetic principles dictated by the times.

His professional biography - from studying in studios in Tashkent and Penza to participation in union exhibitions and institutional recognition - is indicative of the understanding of the "Soviet project" in the art of Central Asia, which, while remaining ideologically motivated, allowed for the variability of local artistic solutions [1].

In this article, based on domestic and foreign research, we examine the key areas of influence of macro-processes on the artistic sphere of the region and relate them to the creative legacy of U. Tansykbaev.

Historiographic review and methodology

The historiography of the issue consists of several complementary arrays.

Firstly, this is the Soviet and post-Soviet art history tradition, where the central place is occupied by the

descriptive and biographical school (M.S. Kagan, I.I. Martynenko, V.I. Maltsev, Sh. Nazarov, etc.).

These works record institutional history, key milestones in artistic policy and creative biographies of artists.

Secondly, there is an increasingly visible body of foreign research examining Soviet cultural policy in Central Asia in terms of the "spectacular state," modernization utopias, and urban transformations (L. Adams, P. Stronski, S. Reed, A. Abikaeva-Tiesenhausen, and others) [2].

Finally, a separate direction is made up of interdisciplinary studies of social realism as a mode of representation, production and mediation of images (M.K. Brown, S. Reed).

Methodologically, the article relies on institutional analysis, iconology and a contextual approach that combines the consideration of artistic form with the reconstruction of the social conditions of its production.

Soviet cultural policy and the tasks of art

In the 1920s and 1930s, an active policy of cultural construction was launched in Central Asia, aimed at forming a "new Soviet man". Art was seen as a means of ideological education, which led to tighter control over the artistic process, centralization of management structures, and canonization of images of labor, industry, and friendship between peoples. Since 1934, socialist realism has been established as the official method, requiring "a truthful, historically concrete depiction of reality in its revolutionary development" [3]. Foreign studies clarify the mechanisms of symbolic politics: as L. Adams notes, "a spectacular state is one where, more

than in most countries, politics is conducted at a symbolic level." This focus on "spectacularity" (mass celebrations, exhibitions, representative ensembles) directly influenced artistic assignments, setting a hierarchy of genres and thematic priorities.

Creation of a system of art education and professionalization

The key factor in the institutionalization of the artistic environment of Central Asia was the network of studios, schools and institutes of arts in the cities of Tashkent, Frunze and Alma-Ata, which developed in the 1920s and 1930s. It ensured the training of national personnel and their inclusion in the all-Union professional community through unified programs, traveling exhibitions and creative missions.

In the example of U. Tansykbaev, we observe a typical trajectory: classes in Tashkent studios with masters of the Russian school, training at the Penza Art School, participation in exhibition activities starting in the late 1920s [4].

It was the educational infrastructure that became the channel for the transit of aesthetic models (from the late Itinerants to Post-Impressionism), which the artist creatively reworked, adapting to local subjects and color schemes.

Ideological canons and practice of socialist realism

Socialist realism functioned not only as a stylistic norm, but also as a set of institutions—commissions, committees, exhibitions, expert assessments, criticism—regulating the production and circulation of images. S. Reed shows that the criteria of socialist realism were determined through the "feedback" of practices, where the success of specific decisions was institutionally reinforced and reproduced as a norm [5].

This logic was particularly evident in the large exhibition projects of the mid-1930s. For Central Asian artists, it meant, on the one hand, the need for thematic mobilization (industry, collectivization, "friendship of peoples"), and on the other, it opened up a space for national imagery in line with the formula "national in form, socialist in content."

The creative language of U. Tansykbaev – a generalized form, rich color, an emphasis on epic panorama – demonstrates precisely this model of correspondence, where the local landscape and ethnographic motifs are integrated into the optimistic narrative of modernization [6].

Urbanization, industrialization and the transformation of visual experience

The 20th century brought large-scale urban and infrastructural changes to Central Asia: the formation of industrial hubs, railway arteries, and new public spaces. P. Stronski, analyzing Tashkent in the 1930s–1960s, shows that the image of the "union showcase of the East" was created through targeted urban planning programming, the culmination of which was the post-war reconstruction and especially the transformations after the 1966 earthquake [7].

As the researcher emphasizes, "the official press also exposed a great deal of information on the difficulties that the state encountered in forging this socialist city", which sheds light on the contradictory nature of the modernization project. In the artistic system, this

generated a demand for new urban and industrial motifs, for the representation of infrastructural "modernity".

Tansykbaev's landscape, while preserving the poetics of open spaces, gradually includes signs of urbanization, but interprets them in the context of harmonizing man and nature, which allowed him to go beyond the limits of straightforward officialdom [8].

National and universal in the aesthetics of Ural Tansykbaev

The creative system of U. Tansykbaev is formed at the intersection of three lines: (1) local-national imagery (the color of Central Asia, motifs of nomadic culture, architectural silhouettes), (2) principles of composition and drawing learned in academic school, (3) modernist sensitivity to color and plane, actualized by post-impressionist experience [9]. The coloristic richness and decorativeness of the early period, noted by researchers, evolves into a large generalized form of the 1950s–1960s, where the landscape becomes the bearer of the value meanings of the socialist era. The rethinking of the genre hierarchy – the shift in emphasis from the multi-figure genre scene to the epic landscape – is consistent with S. Reed's observation that the leading position in the "pantheon" of socialist realism was taken by the picture of action and history, while the "quiet genre" remained marginal for a long time. At the same time, Tansykbaev's landscape acquires the qualities of a "grand style", acting as a space of collective memory and a utopian future.

"The Thaw", artistic shifts and late Tansykbaev

The period of the 1950s and 1960s, associated with de-Stalinization and the liberalization of cultural policy, marked important shifts in visual language: the range of motifs expanded, didactic rhetoric weakened, and the position of regional schools strengthened. During this same period, Tansykbaev achieved high institutional recognition (People's Artist of the USSR, member of the USSR Academy of Arts), and his landscape formula received international confirmation (silver medal at the World Exhibition in Brussels, 1958) [10].

These factors secure the artist's status as a classic of the Uzbek school, whose legacy is becoming an important resource for the region's contemporary museum and exhibition narrative (memorial museums, retrospectives, restoration programs).

Case observations: themes, motives, techniques

Without going into the attribution specifics of individual works, we will outline the typologically stable features of his language.

Firstly, the "high horizon" and panoramic composition allow us to create epic images of the steppe and mountain ranges;

secondly, the active role of local color (ocher, ultramarine, deep green), setting the emotional tone;

thirdly, the combination of an architectural motif with a natural massif as a visual formula for the harmony of tradition and modernization.

In the 1950s and 1960s, this formula stabilized, turning into a recognizable "signature" of the master,

simultaneously corresponding to the ideological demand for optimism and preserving individual poetics [11].

Institutional biography and canonization

U. Tansykbaev's institutional career reflects the mechanisms of the Soviet system of artistic titles and exhibition policy: membership in the Union of Artists of Uzbekistan since the early 1930s, election to the USSR Academy of Arts, award of the title of People's Artist of the USSR (1963) [12]. The master's works were exhibited in leading collections (State Tretyakov Gallery, State Museum of Historical Art) and regional museums, and a house-museum of the artist was created in Tashkent as an element of memorialization and regional cultural policy.

In foreign discourse, Tansykbaev is considered a key figure in the Uzbek landscape, through which the evolution of the "national" can be traced in the context of Soviet modernization [13].

Synthesis: macroprocesses and individual poetics

The socio-political vectors considered – cultural policy, institutional professionalization, urbanization and ideological canons – are not limited to external frameworks, but are part of the fabric of artistic language.

Tansykbaev's contribution to the region's art lies not only in creating iconic images of Uzbekistan, but also in demonstrating how the "national" can become the universal language of Soviet modernism.

This experience is particularly relevant for contemporary studies of post-Soviet art in Central Asia, where the revision of the Soviet legacy continues – from museum exhibition policy to current artistic practices [14].

Conclusion

The socio-political processes of the 20th century – Soviet cultural policy, the institutionalization of art education, the establishment of socialist realism and urban transformations – played a key role in the formation of the artistic sphere of Central Asia.

The creative biography and artistic language of Ural Tansykbaev allow us to see how these processes were integrated into the practice of the regional school, generating models that simultaneously meet ideological expectations and preserve local identity.

The use of foreign literature (L. Adams, P. Stronski, S. Reed, etc.) complements the domestic perspective, moving the conversation from the plane of the normative history of style to the plane of analysis of institutions, urban scenarios, and modes of representation.

It is at this intersection – between politics, the city and artistic form – that the uniqueness of 20th-century Central Asian art emerges, of which Ural Tansykbaev was a prominent representative [15].

References

1. Каран М.С. Искусство как явление культуры.-Л.: Искусство, 1978.-214 с.
2. Мартыненко И. И. Изобразительное искусство народов Средней Азии. - М.: Советский художник, 1989. - 240 с.
3. Мальцев В. И. Соцреализм: теория и практика.-М.: Искусство, 1983.- 198 с.
4. Назаров Ш. Урал Тансыкбаев: жизнь и творчество. - Ташкент: Гафур Гулям, 1979. - 156 с.
5. Пугачёв С. В. Советская художественная политика 1920-1930-х годов. - М.: Наука, 2001. - 264 с.
6. Adams L. The Spectacular State: Culture and National Identity in Uzbekistan. - Durham; London: Duke University Press, 2010. - 240 p.
7. Stronski P. Tashkent: Forging a Soviet City, 1930-1966. - Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2010. - 350 p.
8. Reid S. E. Socialist Realism in the Stalinist Terror: The Industry of Socialism Art Exhibition, 1935–41 // The Russian Review. 2001. Vol. 60, no. 2. P. 153-184.
9. Abykayeva-Tiesenhausen A. Central Asia in Art: From Soviet Orientalism to the New Republics. - London; New York: I.B. Tauris, 2016. - 304 p.
10. Bown M. C. Socialist Realist Painting. - New Haven; London: Yale University Press, 1998. - 368 p.
11. Old Patterns, New Order: Socialist Realism in Central Asia: Gallery Guide / Central Asia Program (GWU). - Washington, DC, 2015. - 185 б.
12. Tansykbaev U. - People's Artist of the USSR (биографические сведения): Sovcom; Iofe Foundation; Elle Uzbekistan (подборка онлайн-публикаций).
13. People's Artist of the USSR Ural Tansykbaev (биографическая справка) // Soviet-Art.ru. URL: <https://soviet-art.ru/soviet-uzbek-artist-ural-tansykbaev-1904-1974/> (дата обращения: 07.09.2025).
14. House museum of Ural Tansykbaev, Tashkent (официальные и туристско-справочные ресурсы): Orex CA; Advantour.
15. Урал Тансыкбаев уй музейи, Тошкент (Ўзрхб): орехса; адвантоур.

MATERIALS SCIENCE AND MECHANICS OF MACHINES

MODELING AND MINIMIZATION OF TOOL WEAR IN FIREARM BARREL MACHINING

Nasirov N.

*PHD candidate, Azerbaijan Technical University,
Special technique and technology*

Baku, Azerbaijan

<https://orcid.org/0009-0004-0867-682X>

DOI: [10.5281/zenodo.17392502](https://doi.org/10.5281/zenodo.17392502)

Abstract

Tool wear during the machining of firearm barrels represents one of the most critical challenges in ensuring dimensional accuracy, surface integrity, and overall manufacturing efficiency [1]. The high strength and low thermal conductivity of AISI 4340 steel, a material commonly used in barrel production, accelerate the wear rate of cutting tools due to severe thermal and tribological conditions at the tool–workpiece interface. This study investigates tool wear mechanisms, including abrasion, adhesion, diffusion, and thermal fatigue, by integrating both mechanistic and data-driven approaches. Classical models such as Taylor’s tool life equation, Archard’s wear law, and Usui’s diffusion-based formulation were initially employed to establish a theoretical framework [2]. Experimental trials conducted under controlled cutting conditions revealed discrepancies of 15–20% between predicted and observed tool life, highlighting the limitations of purely mechanistic approaches. To overcome this, a hybrid framework combining physics-informed machine learning (PIML) with multisensor data (cutting forces, acoustic emission, vibration, and temperature) was developed. The proposed model achieved higher prediction accuracy (RMSE = 0.04 mm) compared to conventional ANN models (RMSE = 0.07 mm). In addition, multi-objective optimization using NSGA-II demonstrated that balanced cutting parameters can simultaneously improve tool life by 30%, enhance material removal rate by 20%, and reduce energy consumption by 12%. The findings provide a methodological framework for predictive tool wear modeling and minimization in barrel machining, offering practical guidelines for extending tool life, improving surface finish, and reducing production costs in the defense industry.

Keywords: Barrels, machining, optimization, surface roughness, emission.

Introduction. The manufacturing of firearm barrels is among the most demanding operations in modern defense industries, requiring extreme dimensional accuracy, excellent surface integrity, and consistency in production [3]. The internal geometry of a barrel directly influences ballistic stability, accuracy, and long-term reliability. Even minor deviations in surface quality or dimensional precision can compromise the weapon’s performance [4]. Therefore, the prediction and minimization of cutting tool wear during barrel machining have become critical research priorities.

In machining operations, tool wear is typically governed by four primary mechanisms: abrasion, adhesion, diffusion, and thermal fatigue. Early studies relied on classical approaches such as Taylor’s tool life equation ($V_c T^n = C$) to estimate tool life [5]. These models are easy to use and provide valuable guidelines for selecting cutting parameters. However, they often fail to account for complex thermo-mechanical interactions occurring in high-strength alloys. Similarly, Archard’s wear law explains wear as a function of contact pressure, sliding velocity, and hardness, whereas Usui’s diffusion-based formulation incorporates chemical and thermal effects. While these models offer physical interpretability, their predictive accuracy decreases significantly in hard-to-machine materials like AISI 4340, where elevated cutting temperatures accelerate tool degradation [6].

Our preliminary experiments revealed that the discrepancy between theoretical predictions and actual observations can be substantial. For example, under a cutting speed of 95 m/min, feed of 0.08 mm/rev, and depth of cut of 0.4 mm, flank wear reached the critical threshold ($VB \approx 0.3$ mm) after approximately 12 minutes. Taylor’s model, however, predicted tool failure closer to 14 minutes, representing an error margin of nearly 18%. At higher cutting speeds (140 m/min), flank wear reached the critical limit in just 7–8 minutes, while at lower speeds (50 m/min), tool life exceeded 20 minutes but at the expense of productivity. These findings demonstrate that purely mechanistic models cannot capture the non-linear dynamics of wear progression.

Surface quality analysis further highlighted the importance of wear control. Up to $VB = 0.2$ mm, the surface roughness remained relatively stable ($Ra \approx 0.7$ μ m). Beyond this threshold, Ra values rapidly increased, reaching 1.2 μ m, which exceeded the acceptable limit for maintaining ballistic stability. Optical microscopy and SEM observations of worn tools confirmed the presence of diffusion wear marks, adhesion layers, and micro-cracks, especially in dry cutting conditions. Coated tools performed significantly better: TiN-coated carbide inserts exhibited approximately 1.6 times longer tool life than uncoated tools, while TiAlN coatings provided superior thermal resistance but occasionally worsened surface roughness due to built-up edge formation [7]. These results align with earlier findings by Twardowski et al. (2019) and Si et al.

(2024), though some variations were noted, likely due to differences in cutting environments and workpiece microstructure [8].

Real-time monitoring using multisensor systems provided additional insights into wear progression. Cutting forces increased by 18–22% as flank wear approached its critical value. Acoustic emission (AE) signals exhibited sharp RMS rises in the final wear stages, while vibration spectra indicated intensified harmonic content [9]. These observations suggest that multisensor-based monitoring can serve as a reliable diagnostic tool for early detection of tool wear.

Although data-driven methods such as artificial neural networks (ANNs) and deep learning models have shown strong potential in predicting tool wear, they often require large datasets and lack physical interpretability [10]. To overcome these limitations, recent studies have proposed physics-informed machine learning (PIML), which integrates mechanistic knowledge into data-driven models. In our experiments, a hybrid PIML approach reduced the prediction error to $RMSE = 0.04$ mm compared to $RMSE = 0.07$ mm for conventional ANN models. This improvement demonstrates that combining mechanistic models with sensor-driven machine learning enhances both accuracy and reliability.

In summary, existing literature provides valuable insights but also reveals important gaps. Mechanistic models are interpretable but limited in accuracy, FEM simulations provide detailed thermo-mechanical insights but are computationally heavy, and purely data-driven models achieve high accuracy but lack generalization across varying conditions [11]. The present study aims to address these shortcomings by developing a hybrid framework that combines mechanistic modeling, multisensor experimental data, and physics-informed machine learning. Furthermore, multi-objective optimization is incorporated to balance tool life, surface finish, productivity, and energy efficiency. This integrated methodology is intended not only to advance theoretical understanding of tool wear but also to provide practical guidelines for barrel manufacturing in the defense sector.

Literature Review. Tool wear has been extensively studied for decades, and a wide spectrum of approaches has been developed to model and predict its progression [12]. Classical mechanistic models, such as Taylor's tool life equation, have historically provided a simple yet practical basis for estimating tool life under different cutting speeds. Their primary strength lies in ease of use and direct applicability in industrial environments. However, these models neglect critical process parameters such as feed, depth of cut, and temperature distribution, which makes them insufficient for hard-to-machine alloys like AISI 4340 steel (Taylor, 1907).

Archard's wear law improved upon this by introducing tribological considerations—contact pressure, sliding velocity, and workpiece hardness—as determinants of wear rate (Archard, 1953) [13]. While this model is physically meaningful and interpretable, it cannot capture the complex thermo-mechanical conditions at the cutting zone, especially diffusion-driven

wear at elevated temperatures. Similarly, Usui's diffusion-based model (Usui et al., 1984) provided a more comprehensive framework by including chemical and thermal effects [14]. Nevertheless, these models depend heavily on experimental calibration and still fall short in handling highly non-linear wear progression.

Finite element modeling (FEM) has been employed to simulate the thermo-mechanical environment of cutting processes and to predict wear progression under different conditions [15]. FEM-based studies offer detailed insights into stress, strain, and temperature distributions, and their main advantage is their adherence to physical laws. However, their computational cost is prohibitively high, making them impractical for real-time monitoring and control in industrial settings [16].

In recent years, data-driven methods have emerged as a promising alternative [17]. Neural networks and deep learning architectures, such as convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs), have been successfully applied to predict tool wear from multisensor signals, including cutting forces, acoustic emission, vibration, and temperature. Studies have shown that these models can achieve high predictive accuracy and adapt well to non-linear patterns [18]. The drawback, however, is their dependence on large datasets, limited interpretability, and poor generalization when applied to new machining conditions.

To address these issues, physics-informed machine learning (PIML) has recently gained traction. This approach incorporates mechanistic knowledge—such as energy balance equations, diffusion laws, and tribological principles—into machine learning models, either as constraints or as part of the loss function. Zhang et al. (2024) emphasized that PIML significantly improves model robustness in data-scarce conditions while maintaining consistency with physical principles [19]. Nevertheless, PIML frameworks are often complex to design and require careful selection of relevant physics-based constraints.

Material-specific studies on AISI 4340 steel highlight additional challenges. Due to its low thermal conductivity and high strength, rapid heat accumulation occurs at the cutting zone, leading to accelerated wear and reduced tool life [20]. Experimental investigations demonstrate that advanced cooling and lubrication strategies, such as minimum quantity lubrication (MQL), cryogenic cooling, and ultrasonic-assisted turning (UAT), can substantially reduce wear and improve surface integrity [1]. These approaches, however, introduce new complexities, including higher operational costs and the need for additional process optimization.

From the literature review, several gaps can be identified. First, mechanistic models are interpretable but lack predictive accuracy under real cutting conditions. Second, FEM provides valuable insights but is too computationally intensive for real-time applications. Third, data-driven models achieve high accuracy but require large datasets and fail to generalize across varying machining environments. Finally, while PIML approaches promise to bridge these gaps, their application in barrel machining of AISI 4340 steel remains

limited, and few studies integrate multisensor data with advanced optimization techniques.

The present study aims to fill these gaps by developing a hybrid framework that combines mechanistic models, multisensor experimental data, and physics-informed machine learning for predictive tool wear modeling. Moreover, unlike most existing studies, this work incorporates multi-objective optimization to simultaneously balance tool life, surface roughness, material removal rate, and energy consumption. In doing so, the proposed methodology not only advances theoretical understanding but also provides actionable guidelines for practical barrel manufacturing applications.

Methodology. The methodology adopted in this study integrates mechanistic modeling, experimental investigation with multisensor monitoring, and advanced machine learning techniques. The approach was structured in three stages: (i) application of classical wear models as the theoretical foundation, (ii) systematic experimental trials on AISI 4340 steel using coated and uncoated carbide tools, and (iii) development of a physics-informed machine learning (PIML) model for predictive tool wear estimation, followed by multi-objective optimization.

Mechanistic modeling framework

As a starting point, classical tool life and wear models were considered to establish baseline predictions. Taylor's tool life equation was employed:

$$V_c T^n = C$$

where V_c is the cutting speed, T is the tool life, and n and C are empirically determined constants. While useful as a reference, this model neglects thermal and tribological effects.

To account for contact conditions, Archard's wear law was applied:

$$\dot{W} = k \frac{F_n v}{H}$$

where $\dot{W}$ is the wear rate, F_n is the normal force, v is the sliding velocity, H is the hardness of the workpiece, and k is the wear coefficient. This model provides tribological insights but ignores diffusion-driven wear mechanisms.

Finally, Usui's diffusion-based model was considered to incorporate thermal activation effects at the tool-chip interface. These mechanistic models were not only used for initial prediction but also embedded as physics-based constraints within the machine learning model.

Workpiece and cutting tools

The experimental trials were performed on AISI 4340 steel bars with hardness maintained between 32–35 HRC, representing typical barrel-grade material. The workpieces were cylindrical blanks with dimensions of 50 mm diameter and 200 mm length.

Cutting tools included ISO-standard carbide inserts (CNMG-type) in both uncoated and coated forms. TiN and TiAlN coatings were selected for their widespread industrial use and differing thermal characteristics. All inserts had a nose radius of 0.8 mm and rake angle of $+6^\circ$, ensuring consistency across trials.

Cutting parameters and experimental design

A full factorial design was employed with three levels for each parameter:

- Cutting speed (V_c): 50, 95, 140 m/min

- Feed rate (f): 0.05, 0.08, 0.12 mm/rev
- Depth of cut (a_p): 0.2, 0.4, 0.8 mm

Each experimental condition was repeated three times to ensure statistical reliability. Tool wear was measured every two minutes using an optical microscope, with the critical flank wear criterion set to $VB = 0.3$ mm.

Sensor system and data acquisition

A multisensor monitoring system was deployed to capture real-time process data:

- **Cutting forces** were measured in three axes (F_x , F_y , F_z) using a piezoelectric dynamometer.
- **Acoustic emission (AE)** signals were collected with high-frequency sensors mounted near the tool shank.
- **Vibration** was recorded with tri-axial accelerometers, and frequency-domain analyses (FFT, RMS) were performed.
- **Temperature** at the tool-workpiece interface was measured with an infrared thermal camera supplemented by embedded thermocouples.

All signals were synchronized and logged using a high-speed data acquisition system at 20 kHz sampling rate. Preprocessing included noise filtering, normalization, and feature extraction (RMS, kurtosis, skewness, spectral energy).

Machine learning and hybrid PIML approach

The collected data served as input to machine learning models. Conventional artificial neural networks (ANNs) were first trained for regression of flank wear (VB). The input features included cutting parameters, force components, AE descriptors, vibration features, and temperature.

To enhance generalization and physical consistency, a physics-informed machine learning (PIML) framework was implemented. In this model, the loss function combined the mean squared error (MSE) with penalty terms derived from Archard's and Usui's formulations, ensuring that predictions adhered to fundamental wear laws.

The ANN architecture consisted of three fully connected hidden layers with 128, 64, and 32 neurons, ReLU activations, and dropout regularization. Training was conducted using the Adam optimizer with an initial learning rate of 0.001. Data was split into 70% training, 15% validation, and 15% testing sets.

Multi-objective optimization

Since barrel machining requires a trade-off between multiple performance metrics, the prediction framework was coupled with a Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). The optimization objectives included:

- Maximization of tool life
- Minimization of surface roughness (R_a)
- Maximization of material removal rate (MRR)
- Minimization of energy consumption

The outcome was a Pareto frontier of optimal cutting conditions, offering decision-makers flexibility in selecting operating points depending on production priorities (e.g., longer tool life vs. higher productivity).

Results and Discussion. Experimental trials revealed a clear nonlinear progression of flank wear (VB) under different cutting conditions. At moderate cutting

speeds (95 m/min, feed = 0.08 mm/rev, depth of cut = 0.4 mm), VB reached the critical threshold of 0.3 mm in approximately 12 minutes. This observation differed from Taylor's prediction by nearly 18%, confirming the limitations of mechanistic models when applied to AISI 4340 steel. At higher cutting speeds (140 m/min), the tool life dropped drastically to 7–8 minutes, while at lower speeds (50 m/min), the tool survived for more than 20 minutes but at the cost of reduced material removal rate (MRR). These results highlight the inherent trade-off between productivity and tool longevity.

Surface roughness (Ra) measurements demonstrated a strong correlation with tool wear. Up to VB = 0.2 mm, surface roughness remained relatively stable around 0.7 μm , within acceptable limits for ballistic performance. Beyond this point, Ra increased sharply, reaching 1.2 μm once VB exceeded 0.3 mm. Such deterioration indicates that uncontrolled wear directly compromises barrel surface integrity, potentially reducing accuracy and service life. Similar findings have been reported by Twardowski et al. (2019) and Si et al. (2024), though our measurements suggest even faster roughness degradation under dry cutting conditions.

Multisensor monitoring proved effective in capturing tool wear progression. Cutting forces increased by 18–22% as flank wear approached its critical threshold. Acoustic emission (AE) signals exhibited a distinct rise in RMS values during the final wear stages, while vibration spectra revealed stronger harmonic components. Infrared thermal imaging indicated that interface temperatures frequently exceeded 700 °C during high-speed trials, intensifying diffusion-driven wear. These results confirm the diagnostic potential of sensor fusion for early detection of tool degradation, in line with findings by Abdul Rahman et al. (2024).

Tool material played a decisive role in wear resistance. TiN-coated carbide inserts demonstrated approximately 1.6 times longer tool life compared to uncoated tools under identical conditions. TiAlN-coated tools exhibited superior thermal stability, particularly at higher cutting speeds, but occasionally resulted in poorer surface finish due to built-up edge formation. These observations are consistent with prior studies on coated tools but extend the findings to barrel-specific machining conditions, where surface quality requirements are more stringent.

Artificial neural networks trained on the experimental dataset achieved promising results in predicting flank wear. A conventional ANN model achieved an RMSE of 0.07 mm, while the physics-informed model (PIML) reduced the error to 0.04 mm. Importantly, the PIML framework maintained predictions consistent with Archard's and Usui's laws, offering both accuracy and physical interpretability. This finding supports earlier arguments by Zhang et al. (2024) that embedding physics in machine learning enhances generalization and robustness in data-scarce environments.

The NSGA-II algorithm successfully identified Pareto-optimal cutting conditions that balance tool life, productivity, and energy efficiency. The optimal region was found at cutting speeds of 90–100 m/min, feed rates of 0.07–0.09 mm/rev, and depths of cut of 0.4–0.5 mm. Within this window, tool life improved by up to 30%, MRR increased by 20%, and energy consumption

decreased by 12% compared to baseline parameters. This demonstrates that multi-objective optimization can provide practical guidelines for industrial decision-making, allowing manufacturers to select cutting regimes based on specific production goals.

The results of this study reaffirm key observations in prior research while also addressing notable gaps. Classical models proved useful for trend prediction but lacked precision in real cutting environments. FEM studies provide detailed thermo-mechanical insights but remain unsuitable for real-time application due to computational complexity (Paturi & Shunmugam, 2019). Purely data-driven methods, while accurate, risk overfitting and limited generalization. The hybrid PIML approach presented here combines the strengths of both paradigms, achieving higher accuracy while preserving physical interpretability. Furthermore, the integration of multi-objective optimization distinguishes this work from most previous studies, where wear reduction was often studied in isolation from productivity and energy considerations.

Conclusion. This study investigated the modeling and minimization of tool wear during the machining of firearm barrels made of AISI 4340 steel by combining mechanistic models, multisensor experimental data, and physics-informed machine learning (PIML). The findings revealed that classical approaches such as Taylor's tool life equation and Archard's wear law, while interpretable, were insufficient to predict tool life accurately under the severe thermo-mechanical conditions of barrel machining. Experimental trials demonstrated significant deviations of 15–20% between predicted and observed tool life, underscoring the limitations of purely mechanistic models.

Multisensor monitoring proved to be a powerful tool for detecting wear progression. Cutting forces, acoustic emission signals, vibration, and temperature measurements were all found to correlate strongly with flank wear, enabling early detection of tool degradation. Surface quality analysis showed that once flank wear exceeded 0.2 mm, surface roughness increased rapidly beyond acceptable limits, directly impacting ballistic performance. Tool coatings enhanced wear resistance, with TiN-coated carbide inserts showing 1.6 times longer tool life compared to uncoated tools, while TiAlN coatings provided superior thermal stability at higher speeds.

The integration of machine learning models further advanced predictive accuracy. Conventional ANN models achieved a prediction error of RMSE = 0.07 mm, whereas the PIML framework reduced the error to 0.04 mm. This hybrid approach not only improved accuracy but also ensured consistency with fundamental wear laws, thereby enhancing interpretability and generalization. The application of NSGA-II for multi-objective optimization identified cutting conditions that simultaneously improved tool life by 30%, increased material removal rate by 20%, and reduced energy consumption by 12%.

Key contributions of this study

1. Development of a hybrid framework that integrates mechanistic models with physics-informed machine learning for predictive tool wear modeling.

2. Experimental validation on AISI 4340 steel, confirming the nonlinear progression of tool wear and its strong impact on surface integrity.

3. Demonstration of the effectiveness of multi-sensor monitoring for early detection of tool wear.

4. Identification of optimal cutting conditions through multi-objective optimization, balancing tool life, productivity, and energy efficiency.

Recommendations for industry

- **Adoption of multisensor systems:** Real-time monitoring of cutting forces, AE, vibration, and temperature should be implemented in barrel machining to enable predictive maintenance and reduce downtime.

- **Use of coated tools:** TiN and TiAlN-coated carbide tools should be preferred for machining AISI 4340 due to their improved wear resistance and thermal stability.

- **Implementation of advanced cooling techniques:** Minimum quantity lubrication (MQL) and ultrasonic-assisted turning (UAT) are recommended for further extending tool life and improving surface quality.

- **Integration of hybrid modeling frameworks:** Manufacturers should consider adopting PIML-based predictive models to achieve reliable tool wear forecasts under varying machining conditions.

Recommendations for future research

- Extension of the proposed framework to other difficult-to-machine alloys, such as stainless steels and titanium alloys, commonly used in defense and aerospace applications.

- Investigation of advanced deep learning architectures (e.g., LSTM, Transformer networks) in combination with PIML to improve time-series prediction of wear.

- Inclusion of sustainability criteria such as carbon footprint and lubricant consumption in multi-objective optimization frameworks.

- Exploration of digital twin applications, where real-time monitoring and predictive models can be combined for closed-loop adaptive control in barrel machining.

In conclusion, the proposed methodology provides a comprehensive framework that bridges the gap between mechanistic models and data-driven approaches. By leveraging hybrid modeling and multi-objective optimization, this work offers actionable strategies for extending tool life, ensuring superior surface integrity, and enhancing the overall efficiency of firearm barrel manufacturing in the defense sector.

References

1. Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
2. Usui, E., Shirakashi, T., & Kitagawa, T. (1984). Analytical prediction of cutting tool wear. *Wear*, 100(1–3), 129–151. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90010-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90010-3)
3. Taylor, F. W. (1907). On the art of cutting metals. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 28, 31–350.

4. Twardowski, P., Wiciak-Pikuła, M., & Wojciechowski, S. (2019). Prediction of tool wear using artificial neural networks in the turning process of hardened steel. *Sensors*, 19(22), 4922. <https://doi.org/10.3390/s19224922>
5. Si, S., Zhang, Y., & Huang, Y. (2024). Intelligent tool wear prediction based on deep learning and acoustic emission sensing. *Scientific Reports*, 14, 2256. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52240-6>
6. Zhang, J., Chen, L., & Li, H. (2024). Physics-informed deep learning in tribology: A review and perspective. *Tribology International*, 188, 109423. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109423>
7. Pashmforoush, F., Jamshidi, M., & Khoei, A. R. (2024). Physics-informed machine learning for tool wear prediction in turning process. *Tribology International*, 191, 109604. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109604>
8. Paturi, U. M. R., & Shunmugam, M. S. (2019). Finite element analysis of tool wear in turning processes: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5–8), 1925–1941. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03720-2>
9. Abdul Rahman, H., Yusoff, A. R., & Aziz, M. S. A. (2024). High-speed turning of AISI 4340 steel: A comprehensive review. *Coatings*, 14(2), 201. <https://doi.org/10.3390/coatings14020201>
10. Sharma, V., Singh, R., & Davim, J. P. (2023). Advances in minimum quantity lubrication (MQL) and cryogenic machining: A review. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138100>
11. Nath, C., & Rahman, M. (2022). Ultrasonic assisted machining of hard-to-cut materials: Mechanisms, modelling and applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 173, 103774. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103774>
12. Khan, A. A., & Ahmed, M. (2008). Improving tool life using cryogenic cooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1–3), 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.021>
13. Jawahir, I. S., Brinksmeier, E., Saoubi, R. M., Aspinwall, D. K., Outeiro, J. C., Meyer, D., Umbrello, D., & Jayal, A. D. (2011). Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals*, 60(2), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002>
14. Agrawal, A., Goel, S., Rashid, W. B., & Price, M. (2015). Prediction of surface roughness and tool wear in hard turning of AISI H13 steel using neural networks. *Precision Engineering*, 42, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.04.005>
15. Davim, J. P., & Figueira, L. (2007). Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Materials & Design*, 28(4), 1186–1191. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.011>
16. Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2003). Predicting surface roughness in machining: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(8), 833–844. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)

17. Rech, J., & Moisan, A. (2003). Influence of tool wear on friction in metal cutting: Experimental investigation from orthogonal cutting tests. *Wear*, 250(1–12), 25–36. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00865-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00865-9)

18. Camposeco-Negrete, C. (2015). Optimization of cutting parameters in turning of AISI 6061 T6 aluminum to minimize tool wear. *Journal of Cleaner Production*, 91, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.016>

19. Khan, A. M., & Jamil, M. (2021). Wear mechanisms of carbide cutting tools during high-speed machining of hardened steels. *Materials Today: Proceedings*, 44(7), 3967–3973. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.764>

20. Bermingham, M. J., Palanisamy, S., Kent, D., & Dargusch, M. S. (2012). Tool life and wear mechanisms in high speed machining of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 63, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.07.001>

SMART MANUFACTURING STRATEGIES FOR HIGH-PRECISION WEAPON BARREL PRODUCTION IN THE DEFENSE INDUSTRY

Nasirov N.

Doctoral Candidate

Department of Special Technique and Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-0867-682X>

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

DOI: [10.5281/zenodo.17392506](https://doi.org/10.5281/zenodo.17392506)

Abstract

The production of high-precision gun barrels in the defense industry is a strategically important process that directly affects both product quality and operational safety. Although traditional manufacturing methods provide results with a certain degree of accuracy, there are limitations in controlling variable cutting forces, tool wear, and surface roughness. To overcome these limitations, the application of intelligent manufacturing strategies based on artificial intelligence is considered necessary. The article examines the integration of Industry 4.0 technologies, including sensor integration, digital twin models, and hybrid optimization algorithms (ANN–GA), into barrel production. The presented approach was tested in both simulation and laboratory experiments, and the results showed significant advantages in terms of reducing cutting forces, improving surface roughness, and extending tool life. The scientific contribution of the article is that with the practical application of intelligent manufacturing strategies, a more efficient production mechanism is formed in the defense industry in terms of both quality and durability.

Keywords: Gun barrel, manufacturing, defense, artificial intelligence, optimization.

Introduction

The development of the defense industry in modern times is directly related to the application of technologies that dominate the security strategies of countries [1]. The reliability and efficiency of weapon systems depend primarily on the manufacturing quality of their main components, especially gun barrels. The barrel is considered the “heart” of the weapon, and even the smallest defects on its inner surface affect the accuracy of shooting, the stable trajectory of the projectile, and the overall life of the system [2]. Therefore, high accuracy, stability, and repeatability in barrel manufacturing are emerging as important scientific and technical challenges. Traditional manufacturing methods have played an important role for many years and provided certain standards of accuracy [3]. Classic processes such as deep drilling, turning, honing, and milling have formed the basis of production lines [4]. However, in modern times, the requirements of the defense industry have changed, and strict control of technological parameters and very low tolerances have come to the fore. These changes bring to the fore a number of difficulties [5]:

- **Inconstant control of cutting forces** — as a result of the variability of cutting modes in high-strength steels, both energy consumption increases and processing quality does not remain stable.
- **Tool wear and reduced tool life** — Rapid tool edge wear is observed when machining hard materials such as AISI 4340 [6].
- **Uncontrolled heat zones** — the heat generated during high-speed cutting processes can change the tool material and the microstructure of the machined surface.
- **Instability of surface roughness** — it becomes difficult to maintain a completely homogeneous surface even during honing and final machining stages.

Solving these problems is no longer possible with classical mechanical approaches [7]. Therefore, in recent years, smart manufacturing strategies developed

within the framework of the Industry 4.0 concept have been brought into the spotlight. This approach is based on the integration of sensor networks, big data analytics, artificial intelligence (AI) models and digital twins [8]. Real-time data collection and analysis on the production line allows for dynamic optimization of cutting parameters. In particular, machine learning and deep learning methods show high accuracy in prediction and control, taking into account the nonlinear nature of processes. Artificial neural networks (ANN), support vector machines (SVM), genetic algorithms (GA) and their hybrid forms are considered effective tools for modeling cutting forces, surface roughness and tool wear [9]. The ANN–GA approach offers particularly successful applications for multi-objective optimization. This approach allows, on the one hand, to minimize production costs and energy consumption, and on the other hand, to maximize product quality.

On the other hand, digital twin technology, by creating a virtual copy of the real production process, performs both simulation and diagnostic functions [10]. This approach enables early detection of anomalies occurring in production, dynamic adjustment of parameters, and adaptive control. Thus, the digital twin becomes a powerful tool not only for monitoring the processing process, but also for implementing preventive control.

The application of these technologies in the defense industry carries not only scientific and theoretical value, but also creates strategic advantages [11]. Thanks to the production of high-precision barrels:

- The ballistic accuracy of weapon systems increases,
- The service life is extended,
- Production costs are reduced,
- The level of industrial sustainability and efficient use of resources increases.

At the same time, the application of smart manufacturing strategies strengthens the technological independence of the defense industrial complex of countries and creates the basis for the creation of new generation

products [12]. This is especially relevant in the modern era, when geopolitical tensions are increasing and security challenges are multiplying.

The aim of the research presented in this article is to extensively investigate the theoretical foundations and practical application possibilities of smart manufacturing strategies in the production of high-precision gun barrels. Here, both artificial intelligence-based prediction and optimization models and the integration of digital twin technologies into the production line will be discussed. The scientific novelty of the article is that the ANN–GA hybrid algorithm and the digital twin approach are jointly applied to overcome the limitations of traditional processing processes, resulting in increased product quality and production sustainability.

Literature Review

Research on high-precision barrel manufacturing in the defense industry shows that the quality indicators of traditional processing methods (lathe, honing, deep drilling, etc.) do not fully meet modern requirements [13]. One of the most important limitations is the instability of surface roughness and rapid wear of cutting tools. For this reason, in recent years, researchers have turned to artificial intelligence-based models and smart manufacturing technologies.

Abbas et al. (2025) investigated the surface quality and productivity in precision turning of AISI 4340 steel and determined the optimal cutting parameters using a multi-criteria optimization approach [14]. The results showed that even when the material hardness is high, both surface roughness and machining time can be improved by carefully selecting the parameters. However, the authors noted that their model is only effective within a limited range of parameters.

Alajmi et al. (2021) compared different machine learning methods—Gaussian Process Regression (GPR), Support Vector Machine (SVM), and Artificial Neural Network (ANN)—for predicting cutting forces in machining AISI 4340 steel [15]. According to their results, the ANN model showed the highest prediction accuracy, but the stability of the model deteriorated when the data set size was small. This limitation indicates that the integration of real-time data is crucial in a practical manufacturing environment [16].

Jesuthanam et al. (a classic work) proposed the application of an ANN–GA hybrid approach to surface roughness prediction [17]. Their work proved that optimizing the results obtained from the ANN model with a genetic algorithm provides more robust solutions to multi-objective problems. However, the authors admitted that practical application has only been tested in laboratory conditions.

One of the modern approaches is digital twin technology. As shown in the review by da Silva et al. (2025), digital twins allow the synchronization of a virtual model with a real process in mechanical engineering processes [18]. This approach allows for both anomaly detection during production and real-time optimization. However, the authors emphasized that these systems require high computational resources and cannot be applied in every manufacturing facility.

Nguyen et al. (2024) study on ultrasonic-assisted turning operations shows another important direction

[19]. According to their results, when ultrasonic vibration is applied, cutting forces are significantly reduced and surface topography is improved. However, the effectiveness of this technology is highly dependent on the correct choice of vibration frequency and amplitude.

The above-mentioned literature shows that although existing approaches have yielded some positive results, there are still gaps:

- Most have been tested only in laboratory conditions and are poorly focused on real-world industrial applications;
- Optimization models often focus on a single objective, while in the defense industry, surface quality, tool life, and energy consumption must be considered simultaneously;
- There is limited research on digital twin and real-time data integration;
- The application of ultrasound and other unconventional technologies in combination with artificial intelligence optimization is not sufficiently developed.

Thus, the overall conclusion of the existing literature is that the application of AI-based smart manufacturing strategies to the defense industry is still in its infancy [20]. These gaps increase the importance of our research: the presented work proposes a practical approach for high-precision barrel manufacturing by combining multi-objective optimization, real-time sensor data, and digital twin integration.

Methodology

This study combines both experimental and modeling approaches to evaluate the performance of smart manufacturing strategies applied in the production of high-precision gun barrels. The methodology is structured in the following stages:

Material selection and processing conditions

In the experiments, high-strength steel AISI 4340, which is widely used in barrel production, was selected. The choice of this material is justified for two reasons:

1. Most barrel materials used in the defense industry are characterized by high hardness and heat resistance.
2. Previous studies have shown that AISI 4340 is an ideal model object in terms of nonlinear changes in cutting forces, tool wear and surface roughness during the machining process.

The machining process was carried out on a CNC machine, and the operating parameters were varied in three main factors: cutting speed (V_c), feed rate (f), and depth of cut (a_p). Each parameter was adopted at three levels (low, medium, high). This design created a total of $3 \times 3 \times 3 = 27$ experimental combinations.

Sensoring and data collection

A piezoelectric dynamometer was used to record cutting forces, a profilometer to measure surface roughness, and an optical microscope to measure tool wear. Each experimental combination was repeated three times, and statistical averages were taken to ensure the reliability of the results.

In addition, the thermal zones formed during machining were recorded using thermocouples, which allowed us to assess the effect of temperature on tool wear.

Data processing and normalization

The collected data was first subjected to outlier analysis and then normalized. The following formula was used for normalization:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

This method allowed for the adaptation of parameters (force, roughness, wear) recorded in various units of measurement to artificial intelligence models.

Artificial Intelligence Model: ANN

An artificial neural network (ANN) is built for process prediction. The architecture of the model is as follows:

- Input layer: Vc, f, ap (3 neurons)
- Two hidden layers: 8 neurons in layer 1, 6 neurons in layer 2 (activation function: ReLU)
- Output layer: Ra (surface roughness), Fc (cutting force), VB (tool wear)

The backpropagation algorithm was used to train the network, and the Mean Squared Error (MSE) was adopted as the loss function. 5-fold cross-validation was used to check the stability of the model.

Optimization algorithm: GA and ANN-GA hybrid

The obtained ANN model acted as a predictive module, and then combined with the Genetic Algorithm (GA) to create a hybrid system.

The GA parameters were set as follows:

- Population size: 80 individuals
- Mutation probability: 0.02
- Crossover ratio: 0.8
- Maximum iteration: 100

Optimization objectives:

1. Ra → minimum
2. VB → minimum
3. Fc → within the safety margin (constraint condition)

As a result, a Pareto front was constructed and various compromise solutions were evaluated.

Digital Twin Integration

One of the main distinguishing features of the methodology is the application of a digital twin model. Sensor data (force, temperature, vibration) collected during the real production process were transferred to a processing model built in a virtual environment.

The digital twin platform compared the results from the ANN-GA module and proposed adaptive decisions. This approach allowed for early detection of anomalies in the production process and optimization of cutting parameters in real time.

Evaluation criteria

The effectiveness of the methodology was evaluated based on the following indicators:

- Model accuracy (R², RMSE indicators)
- Surface roughness (Ra, μm)
- Tool life (VB, mm)
- Cutting force stability (Fc, N)
- Energy consumption (kWh)

These indicators were evaluated by comparing both experimental and simulation results.

These indicators were evaluated by comparing both experimental and simulation results. All this made it possible to prove the effectiveness of smart manufacturing strategies in the production of high-precision gun barrels.

Results and Discussion

Assessment of the accuracy of the ANN model

Artificial neural network (ANN) models built on experimental data were used to predict the effects of cutting parameters (Vc, f, ap) on surface roughness (Ra), tool wear (VB) and cutting forces (Fc). The prediction accuracy of the model was evaluated based on the following indicators:

- For Ra: **R² = 0.94**, RMSE = 0.061 μm
- For VB: **R² = 0.91**, RMSE = 0.015 mm
- For Fc: **R² = 0.92**, RMSE = 11.8 N

These results indicate that the ANN model successfully captures the nonlinear nature of the process. Compared to traditional statistical models (e.g., regression approaches), the ANN provides lower error rates.

Table 1.

Forecast accuracy of the ANN model

Indicator	Ra (μm)	VB (mm)	Fc (N)
R ²	0.94	0.91	0.92
RMSE	0.061	0.015	11.8

Optimized cutting parameters (ANN-GA results)

Based on the predictions obtained from the ANN model, a multi-objective optimization was performed using a Genetic Algorithm (GA). The goal was to minimize both surface roughness and tool wear. The optimal compromise solutions were selected by constructing a Pareto front.

Two exemplary solutions are shown below:

- **Solution A (surface quality priority):**

Vc = 90 m/min, f = 0.08 mm/rev, ap = 0.35 mm
→ Ra = 0.55 μm, VB = 0.14 mm, Fc = 220 N

- **Solution B (tool life priority):**

Vc = 70 m/min, f = 0.06 mm/rev, ap = 0.30 mm
→ Ra = 0.72 μm, VB = 0.10 mm, Fc = 190 N

The analysis showed that high cutting speeds are required to improve surface finish, but this reduces tool life. Conversely, lower speeds and feeds are required to increase tool life, but in this case the surface finish deteriorates somewhat.

Table 2.

Comparison by optimized parameters

Parameters	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	Ra (μm)	VB (mm)	Fc (N)
Solution A	90	0.08	0.35	0.55	0.14	220
Solution B	70	0.06	0.30	0.72	0.10	190

Effect of ultrasonic-assisted machining (UAT)

Part of the experiments were conducted with the ultrasonic-assist (UAT) module connected. The results showed that:

- Fc was reduced by an average of 20–25%.
- Ra was improved by 15–30%.
- VB was reduced by approximately 18% compared to conventional machining.

These facts show that vibration support improves both surface finish and tool life by reducing cutting forces. This approach is particularly useful for machining high-hardness steels.

Digital twin and real-time control

The digital twin architecture creates a “virtual twin” of the process by transferring real-time data collected from sensors (force, temperature, vibration) to an ANN model.

Thanks to this mechanism:

- Parameter changes were detected immediately,
- Comparison was made with GA optimization,
- New recommended parameters were presented to the operator within 3–5 seconds.

As a result, process stability increased, and scatter in product quality was significantly reduced.

General Discussion

The results show that the ANN–GA hybrid approach and digital twin integration provide real benefits in high-precision barrel manufacturing. Compared to traditional approaches:

- Model accuracy improved by 15–20%.
- Tool life extended by an average of 25%.
- Surface roughness (Ra) improved by up to 30%.

Overall, smart manufacturing strategies enable the construction of more stable, more efficient, and more sustainable manufacturing mechanisms in the defense industry.

Conclusions

Experimental and modeling results showed that the artificial neural network (ANN) has the power to predict the complex relationships between cutting parameters and surface roughness (Ra), tool wear (VB), and cutting forces (Fc) with high accuracy. The accuracy indicators of the model were very high: $R^2 = 0.94$, RMSE = 0.061 μm for Ra; $R^2 = 0.91$, RMSE = 0.015 mm for VB; $R^2 = 0.92$, RMSE = 11.8 N for Fc. These indicators prove that the ANN more accurately reflects the nonlinear nature of the process and provides superior results compared to traditional statistical models.

The results obtained from the ANN model were combined with a Genetic Algorithm (GA) to perform multi-objective optimization. Pareto-front analysis showed that to minimize surface roughness, higher cutting speeds and feeds are required, but this leads to a decrease in tool life. Conversely, to extend tool life, lower parameters are required, but in this case the surface roughness deteriorates somewhat. For example, with a speed of 90 m/min, a feed of 0.08 mm/rev and a depth of cut of 0.35 mm, Ra = 0.55 μm was obtained, but VB = 0.14 mm. On the other hand, with a speed of 70 m/min, a feed of 0.06 mm/rev and a depth of cut of 0.30 mm, Ra = 0.72 μm , VB = 0.10 mm were recorded.

These results require making compromise decisions in accordance with different priorities in production.

When the ultrasonic assisted machining (UAT) module was connected, an average reduction of 20–25% in cutting forces was observed, surface roughness was improved by 15–30%, and tool wear was reduced by approximately 18%. This fact shows that vibration support is especially useful in machining hard materials and significantly reduces tool loading.

The application of the digital twin approach enhanced real-time process control. Data collected from sensors (force, temperature, vibration) was transferred to the ANN model, and the results of this model were compared with GA optimization, and recommendations on new parameters were provided to the operator within 3–5 seconds. This mechanism increased process stability in production, and scatter in product quality was significantly reduced.

Overall, the obtained results prove that smart manufacturing strategies supported by the ANN–GA hybrid approach and digital twin technology create significant advantages in both technological and economic terms in the production of high-precision barrels in the defense industry. This approach has resulted in a 15–20% increase in model accuracy, a 25% increase in tool life, and an improvement in surface roughness of up to 30%. Thus, a more efficient, durable, and stable manufacturing mechanism has been formed compared to traditional methods.

References

1. Abbas A. T., Luqman M., Ahmed M. T., Abidi M. H., Elkaseer A. Optimizing cutting parameters for surface roughness and tool life in hard turning of AISI 4340 steel using integrated approach. *Processes*. 2020. Vol. 8, No. 3. Pp. 336. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8030336>
2. Alajmi M. S., Abidi M. H., Alkahtani M., Elkaseer A. Modeling of cutting force in the turning of AISI 4340 using Gaussian process regression, support vector machine, and artificial neural network. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 8. Pp. 3563. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11083563>
3. Asiltürk İ., Çunkaş M. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38, No. 5. Pp. 5826–5832. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.041>
4. Benardos P. G., Vosniakos G. C. Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. Vol. 43, No. 8. Pp. 833–844. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)
5. Brecher C., Esser M., Witt S. Future trends in production technology. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 63. Pp. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.144>
6. Çolak O., Kurbanoglu C., Kayacan M. C. Milling surface roughness prediction using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 190, Issues 1–3. Pp. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.055>

7. Fu X., Zhang L., Wang Y., Liu Z. A review of digital twin technology in manufacturing: new challenges and opportunities. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 64. Pp. 65–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.004>
8. Jesuthanam C. P., Baskar N., Asokan P. Optimization of machining parameters using genetic algorithm and artificial neural network for hard turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007. Vol. 32, Issues 11–12. Pp. 1109–1117. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0438-1>
9. Kadirgama K., Noor M. M., Rahman M. M. Optimization of surface roughness in end milling using artificial neural network and response surface methodology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 57, Issues 1–4. Pp. 305–315. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3281-7>
10. Nguyen T. T., Tran D. P., Banh T. T. Study on the surface topography in ultrasonic-assisted turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 115, Issues 1–2. Pp. 301–314. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07124-4>
11. Rajemi M. F., Mativenga P. T., Sheikh M. A. Minimization of energy utilization for sustainable machining. *Journal of Cleaner Production*. 2010. Vol. 18, Issues 10–11. Pp. 1059–1065. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.025>
12. Sahu N. K., Yadava V. Hybrid approach for optimizing process parameters in machining using artificial neural networks and genetic algorithms. *Applied Soft Computing*. 2013. Vol. 13, No. 1. Pp. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.07.009>
13. Shankar S., Ramanujam R., Sakthivel N. R. Application of response surface methodology and artificial neural network on surface roughness prediction in turning process. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015. Vol. 29, No. 6. Pp. 2405–2414. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0512-2>
14. Shankayi M., Soleimanimehr H., Sadeq A. M. Stability analysis of machining processes and chatter instability in ultrasonic-assisted turning. *SSRN Electronic Journal*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4886449>
15. Sørby K. Development and optimization of vibration-damped tool holders for boring operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012. Vol. 61. Pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.001>
16. Subramanian K., Cook N. H. Synthesis of optimal cutting parameters in metal cutting. *Journal of Engineering for Industry*. 1977. Vol. 99, No. 3. Pp. 711–718. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3439277>
17. Teti R., Jemielniak K., O'Donnell G., Dornfeld D. Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals*. 2010. Vol. 59, No. 2. Pp. 717–739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.010>
18. Yildiz A. R. A novel hybrid immune algorithm for global optimization in engineering design. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2008. Vol. 21, No. 6. Pp. 832–841. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.09.002>
19. Zhou Z., Chen G., Sun Y. Intelligent optimization methods in precision machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102, Issues 9–12. Pp. 3175–3187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03390-4>
20. Zhu D., Zhang X., Ding H., Xu K. Digital twin-driven machining: key technologies and applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 89, Issues 9–12. Pp. 3563–3576. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9657-z>

MATHEMATICS

HEAT PROPAGATION IN ZERO BOUNDARY CONDUCTION N DIMENSIONAL SPACE

Abbasov Z.

Assoc. Prof., PhD in Mathematics

Ganja State University, 429 Heydar Aliyev avenue

Ganja, Azerbaijan

ORCID: 0009-0005-2769-7922

DOI: [10.5281/zenodo.17392509](https://doi.org/10.5281/zenodo.17392509)

Abstract

It is known that all heat conduction and diffusion processes are reduced to parabolic type second-order partial differential equations. Since these problems have a great partical importance they have wide applicability field.

Since many problems with partial differential equations have finitely many solutions as in ordinary differential equations, for studying a unique, one-valued and stable solutions there arise a need to use additional conditions.

There is extensive information on a unique one-valued and stable solutions of heat conductivity phenomena in one-dimensional (rods), two-dimensional (plates), and also four-dimensional spatial bodies in classical mathematical physics equations course.

Keywords: parabolic type, differential equations, stationary, parallelepiped.

INTRODUCTION

In fact, as heat conductivity phenomena, wave processes and also all stationary problems are the principal problems of physics, mechanics and engineering it is necessary to find well defined solution of such problems.

Studying heat conductivity phenomena by increasing the dimension of the space in n-dimensional spaces is theoretical, but important.

Resistance of tinned shells in various configuration bodies, in device-building, shipbuilding, development of aircrafts in space industry to inner temperature stress fields makes these processes always relevant. From this point of view, both in light and heavy industry, the study of the influence temperature and stress fields on volume forces and tangential surfaces as a rule depends on the determination of a temperature distribution function [2,3].

Initial and boundary conditions involved in the statement of a physical problem reveal new quality properties for one-valued determination of the solution. A great majority of these problems are the basis for mathematical physics problems, i.e. since there occur errors between fractional parameters during change, this affects the solution of the problem.

Therefore, it is necessary to minimize such errors [4,5] i.e. when solving the considered mathematical physics problem, a negligible change in initial and boundary conditions is accompanied by a small change in the solution, the solution of this problem continously depends on the initial and boundary conditions [4].

The goal of the present paper is to study the generalization of a heat conductivity equation for $n \geq 3$ to n-dimensional space and to transfer n-dimensional cube in the R^n space to the n-parallelepote by means of affine transformation. In fact, an n-parallelepote is a point set of a unit cube with coordinates (0,1) during affine transformation, i.e. a parallelepote is n convex polytope.

$$I^n := \{(x_1, x_2, \dots, x_n) / 0 \leq x_i \leq 1\}, \quad i = \overline{1, n}$$

Theoretical statement of the problem :

Assume that the surface of an n dimensional convex papllelepiped with the length of the edges $l_1, l_2, \dots, l_n$ coming out from one vertex is temperature isolated (all faces of the n dimensional parallepiped has been temperature –isolated). Starting from the moment $t > 0$. The parallelepiped surrounded by the surface (S) is heated due to the internal source. As is known, the temperature of the body will strat to flow from the high temperature points to the lowerst temperature points (the Fourier law)

We denote the function characterizing the temperature of an n-dimensional parallepiped by

$$U = U(x, t) = U(x_1, x_2, \dots, x_n, t).$$

Mathematically, we can write this problem like this:

$$\frac{1}{a^2} \frac{\partial U}{\partial t} = \Delta U + f(x, t), f(x, t) \in R^n \quad (1)$$

$$\text{here } a^2 = \frac{k}{c\rho}, x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n, t > 0,$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2}{\partial x_n^2}$$

is a Laplace operator.

Find the continuous solutions satisfying the Cauchy condition

$$U(x, 0) = U_0(x), x \in R^n, n \geq 3 \quad (2)$$

the homogeneous conditions

$$U|_{\Omega} = 0, \Omega = \{(0, l_1) \times (0, l_2) \times \dots (0, l_n)\} \quad (3)$$

in the bounded domain

$$\overline{D_T} := \{(x, t) : 0 \leq x_i \leq l_i, \quad 0 \leq t \leq T\}, \quad i = \overline{1, n}$$

.

Here

$$D = \{(x, t) : 0 < x_i < l_i, \quad 0 < t < T\}, \quad i = \overline{1, n},$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$$

$$\bar{D} = D \cup S, T = \text{const} > 0, t \in [0, T], U_0(x)$$

$$\begin{aligned} &\in C(R^n), \bigcup_{k=1}^n (0, l_k) \in R^n, U(t, x) \\ &\in R^n(D_T), \\ &U(t, x) \in C_{x,t}^{2,1}(D_T) \cap C(\bar{D}_T) \end{aligned}$$

Problem solution: Let us choose the desired function $U(x, t)$ by means of the separation of variables or the Fourier method in the form of production of one-variable functions [4, 5, 6].

$$U(x, t) = T(t) \prod_{k=1}^n X_k(x) \quad (4)$$

(4) will be said a special solution of the problem (1)-(3) [3]. Substituting (4) in (1), dividing each side of the equation

$$\frac{1}{a^2} T'(t) \prod_{k=1}^n X_k(x_k) = T(t) \sum_{k=1}^n X_k''(x_k) \quad (5)$$

to the product $T(t) \prod_{k=1}^n X_k(x_k) \neq 0$, equating the ratios

$$\frac{T'(t)}{a^2 T(t)} = \frac{\sum_{k=1}^n X_k''(x_k)}{\prod_{k=1}^n X_k(x)} \quad (6)$$

(6) to $-\lambda^2$, (according to finding the solution of a heat conductivity equation in

$n \leq 3$ -dimensional bodies), we obtain the following differential equations:

$$T'(t) + a^2 \lambda^2 T(t) = 0, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^n X_k''(x_k) + \lambda^2 \prod_{k=1}^n X_k(x_k) = 0, \quad (8)$$

It is clear that the general integral solution of the equation (7) is in the form

$$T(t) = A \cdot e^{-a^2 \lambda^2 t} \text{ or } T(t) = A \exp(-a^2 \lambda^2 t) \quad (7_1)$$

here A is an arbitrary integration constant.

The equation (8) consists of n number Helmholtz equations [3]. To find the general solution of the equation, we obtain differential equations dependent on n number constant coefficient arguments $(x_1, x_2, \dots, x_n)$. The general solutions of these equations compose a set of functions consisting of the following system of equations.

$$\begin{cases} X_1(x_1) = B_1 \cos \lambda_1 x_1 + C_1 \sin \lambda_1 x_1, \\ X_2(x_2) = B_2 \cos \lambda_2 x_2 + C_2 \sin \lambda_2 x_2, \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ X_n(x_n) = B_n \cos \lambda_n x_n + C_n \sin \lambda_n x_n, \end{cases} \quad (9)$$

$$U(x, t) = \sum_{k_1, k_2, \dots, k_n=1}^{\infty} U_{k_1, k_2, \dots, k_n}(x, t) = \sum_{k_1, k_2, \dots, k_n} A_{k_1, k_2, \dots, k_n} \cdot \exp\left(-a^2 t \sum_{k=1}^n \lambda_k^2\right) \cdot \prod_{m=1}^n \sin\left(\frac{\pi k_m}{l_m}\right) x_m, \quad (13)$$

or

here

$$(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \in \lambda \in R,$$

$$\lambda^2 = \sum_{k=1}^n \lambda_k^2, \quad B_1, C_1, \dots, B_n, C_n \text{ are located in the set}$$

of natural numbers and are arbitrary integration constants of the set of solutions (9). Taking into account boundary conditions (3) for the functions $X_1(x_1), X_2(x_2), \dots, X_n(x_n)$ composing this set of these solutions, we arrive at the solution of the following boundary value problem

$$\begin{cases} X_1(0) = X_1(l_1) = 0, \\ X_2(0) = X_2(l_2) = 0, \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ X_n(0) = X_n(l_n) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

As an identity satisfying the homogeneous boundary conditions (10), the finding of the solutions of non-zero solutions (9) is said to be a spectral problem or a special case of the Sturm-Liouville problem [3,4]

i.e. (10)-(9) $\Rightarrow$

$$X_1(0) = B_1 = 0, \quad X_1(l_1) = C_1 \sin \lambda_1 l_1 = 0 \Rightarrow$$

$$\lambda_1 = \pi k_1 / l_1, \quad k_1 \in Z^+$$

$$X_2(0) = B_2 = 0, \quad X_2(l_2) = C_2 \sin \lambda_2 l_2 = 0 \Rightarrow$$

$$\lambda_2 = \pi k_2 / l_2, \quad k_2 \in Z^+$$

As

last,

$$X_n(0) = B_n = 0, \quad X_n(l_n) = C_n \sin \lambda_n l_n = 0 \Rightarrow$$

$$\lambda_n = \pi k_n / l_n, \quad k_n \in Z^+$$

Here, writing the natural λ in the general form:

$$\lambda = \lambda_{k_1, k_2, \dots, k_n} = \pi \sum_{m=1}^n \left(\frac{k_m}{l_m} \right), \quad k_m \in Z^+, \quad m = \overline{1, n} \quad (11)$$

So, the eigen-values of the set of solutions (9) satisfying the homogeneous boundary conditions, (10) compose the set of numbers

$$\lambda_k = \left\{ \frac{\pi k_m}{l_m} \right\}_{m=1}^{\infty} \quad \lambda_k \in R, \quad k = \overline{1, n}$$

and the functions corresponding to these numbers compose the set

$$X_k(x_k) = \left\{ \sin \frac{\pi k_m}{l_m} \right\}_{m=1}^{\infty}, \quad k = \overline{1, n} \quad (12)$$

So, the non-trivial general solution of the boundary value problem (1)-(3) in the domain $(\bar{D})$ according to the set of eigen-functions (12)

$$U(x, t) = \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} A_{k_1, k_2, \dots, k_n} \exp \left(-a^2 t \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right)^2 \right) \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) x_m, \quad (13_1)$$

here $A_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ are common integration constants for the set of solutions (9) (2)-(9) $\Rightarrow$

$$U(x, 0) = \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} A_{k_1, k_2, \dots, k_n} \cdot \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) x_m = U_0(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (14)$$

For one-valued determination of the coefficients $A_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ from the formula (14) the function $U_0(x_1, x_2, \dots, x_n)$ should be t -fold expandable in Fourier series dependent on eigen functions $\{X_k(x_k)\}_{k=1}^{\infty}$ in the segments $[0, l_1], [0, l_2], \dots, [0, l_n]$ in the fixed values of t , i.e.

$$U_0(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} U_{0k_1, k_2, \dots, k_n} \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) x_m,$$

$$\text{Here } U_{0k_1, k_2, \dots, k_n} = \frac{2^n}{l_1 l_2 \dots l_n} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \dots \int_0^{l_n} U_0(x_1, x_2, \dots, x_n) \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) x_m dx_m, \quad (15)$$

Integrating the integral in the right hand side of (15)

$$\int_{(0, l_1) \times (0, l_2) \times \dots \times (0, l_n)} U_0(x) dx_1 dx_2 \dots dx_n = \int_{(0, l_1)} \left(\int_{(0, l_2) \times \dots \times (0, l_n)} U_0(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_2, \dots, dx_n \right) dx_1 \quad (15_1)$$

In a similar way, i.e. fixing x_1 , integrating the function U_0 with respect to $(x_2, \dots, x_n)$ on the parallelepiped $\bar{D}_T$, the obtained results should be calculated in the similar way with respect to the other faces of the parallelepiped.

Indeed, since the function $U_0(x_1, x_2, \dots, x_n)$ is continuous in $\bar{D}_T = [0, l_1] \times [0, l_2] \times \dots \times [0, l_n]$, we can symbolically write it as

$$\begin{aligned} \int_{\bar{D}_n} U_0(x) dx &= \int_{(0, l_1)} \left(\int_{(0, l_2) \times \dots \times (0, l_n)} U_0(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_2, \dots, dx_n \right) dx_1 = \dots \\ &= \int_0^{l_1} \left(\int_0^{l_2} \dots \left(\int_0^{l_n} U_0(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_{n-1} \right) \dots \right) \end{aligned} \quad (15_2)$$

Result 1. Using the equalities (15) and (15₁) we determine uniquely the constants $A_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ and this

$$U(x, t) = \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} U_{0k_1, k_2, \dots, k_n} \cdot \exp \left(-a^2 t \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right)^2 \right) \quad (16)$$

$$\text{here } A_{k_1, k_2, \dots, k_n} = \sqrt{A_{k_1}^2 + A_{k_2}^2 + \dots + A_{k_n}^2} = \left(\sum_{m=1}^n A_{k_m}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

Remark 1. If $k_1 = k_2 = \dots = k_n = 1$, the solution (16) in the special form is as follows

$$U_{1,1,\dots,1}(x, t) = A_{1,1,\dots,1} \exp \left(-a^2 t \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right)^2 \right) \cdot \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) x_m,$$

gives us the general form of the desired solution as follows.

Theorem 1. The system of eigen functions

$$\{X_k(x_k)\}_{k=1}^{\infty} = \left\{ \sin \frac{\pi k_m}{l_m} \right\}_{m=1}^{\infty} \text{ is orthohohogal in}$$

the domain $\bar{D}_n := \{R^n \times (0, T)\}$.

Proof. It is known that in the cases when eigenvalues are various, all the set of eigen-functions compose on orthogonal system i.e.

$$\int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \dots \int_0^{l_n} \sin\left(\frac{\pi k_1}{l_1} x_1\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi k_2}{l_2} x_2\right) \dots \sin\left(\frac{\pi k_n}{l_n} x_n\right) dx_1 dx_2 \dots dx_n =$$

$$= \begin{cases} 0, & k_1 \neq k_3 \neq \dots \neq k_{2n-1}, k_2 \neq k_4 \neq \dots \neq k_{2n} \\ \frac{l_1 l_2 \dots l_n}{2^n}, & k_1 = k_3 = \dots = k_{2n-1}, k_2 = k_4 = \dots = k_{2n} \end{cases}$$

Remark 3. When all the edges of n -dimensional cube, for that the corresponding solution takes the following form:

$$U(x, t) = \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{l}\right)^n \int_0^l \int_0^l \dots \int_0^l U_0(x_1, x_2, \dots, x_n) \prod_{m=1}^n \sin\left(\frac{\pi k_m}{l} x_m\right) dx_m \times$$

$$\times \exp\left(-at^2 \cdot \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l}\right)^2\right), \text{ burada } l_1 = l_2 = \dots l_n = l$$

Theorem 2. Since the equation (1) is linear and homogeneous, for the series (16) composed of its special solutions to satisfy this equation, the series should be convergent and it should be differentiable twice with

respect to $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ and must be term by term differentiable once with respect to t .

Proof. According to the condition it suffices to show that the series

$$\sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} \frac{\partial U_k(x, t)}{\partial t} \quad \text{vs} \quad \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} \frac{\partial^2 U_k(x, t)}{\partial x^2} \quad (*)$$

is regularly convergent.

$$\text{i.e., } \left| \frac{\partial U_k}{\partial t} \right| \leq |A_{k_1, k_2, \dots, k_n}| a^2 \cdot \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l} \right)^2 \cdot \exp\left(-a^2 t \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l} \right)^2\right) \times$$

$$\times \prod_{m=1}^n \left| \sin\left(\frac{\pi k_m}{l} x_m\right) \right| \leq 2M \cdot \sum_{m=1}^n \left(\frac{a \pi k_m}{l} \right)^2 \cdot \exp\left(-a^2 t_0 \cdot \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l} \right)^2\right) = \alpha_k (t \geq t_0)$$

here the function $U_0(x_1, x_2, \dots, x_n)$ is bounded, $|U_0(x_1, x_2, \dots, x_n)| \leq M$, then

$$|A_{k_1, k_2, \dots, k_n}| = \left| \left(\frac{2}{l} \right)^n \int_0^l \int_0^l \dots \int_0^l U_0(x_1, \dots, x_n) \prod_{m=1}^n \sin\left(\frac{\pi k_m}{l} x_m\right) dx_m \right| < 2M, \quad |A_{k_1, k_2, \dots, k_n}| < 2M$$

In a similar way,

$$\left| \frac{\partial^2 U_k(x, t)}{\partial x^2} \right| \leq 2M \left(\frac{\pi k_m}{l} \right)^2 \cdot \exp\left(-a^2 t \cdot \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l} \right)^2\right) \prod_{m=1}^n \sin\left(\frac{\pi k_m}{l} x_m\right) = \beta_k, (t \geq t_0)$$

So in all the values of $t \geq t_0$

$$\left| \frac{\partial^{p+q} U_k}{\partial t^p \partial x^q} \right| < 2M \left(\frac{\pi}{l} \right)^{2p+q} \cdot k^{2p+q} \cdot a^{2p} \cdot \exp\left(-a^2 t_0 \cdot \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l} \right)^2\right)$$

Studying the convergence of the majorant series $\{\alpha_k\}$ and $\{\beta_k\}$, for the series $\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k$ and $\sum_{k=1}^{\infty} \beta_k$

$$\alpha_k = M_1 k^r \cdot \exp\left(-a^2 t_0 \cdot \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l} \right)^2\right), \quad \beta_k = M_2 k^r \cdot \exp\left(-a^2 t_0 \cdot \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l} \right)^2\right),$$

It is known that since $t \geq 0$, taking into account the ratio $0 < \exp\left(-a^2 t \cdot \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l} \right)^2\right) \leq 1$ and recalling the D'Alembert sign on convergence of series, the series with common terms α_k and β_k are convergent, i.e.

$\lim_{k \rightarrow \infty} \left| \frac{\alpha_{k+1}}{\alpha_k} \right| = 0$, $\lim_{k \rightarrow \infty} \left| \frac{\beta_{k+1}}{\beta_k} \right| = 0$, then according to the Weierstrass sign the series (*) are regularly convergent.

Result. From the last relation, in the domain $t \geq t_0 > 0$ the series (16) can be term by term differentiated arbitrary times with respect to the variables $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ and t .

Using the superposition principle, we can say that the function $U(x, t)$ determined by this series is the solution of the equation (1) [7,8,10].

If the function $U_0(x_1, x_2, \dots, x_n)$ is continuous with respect to each argument and has a piecewise continuous derivative and satisfies the conditions

$$|U_{k_1, k_2, \dots, k_n}(x, t)| < |A_{k_1, k_2, \dots, k_n}|, \bar{D}_T := \{R^n \times (0, T)\}$$

Definition of the source function

Writing the constants $A_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ making transformation from the solution (13₁)

$$\begin{aligned} U(x, t) &= \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} A_{k_1, k_2, \dots, k_n} \exp \left(-at^2 \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right)^2 \right) \cdot \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) x_m = \\ &= \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} \left[\frac{2^n}{l_1 l_2 \dots l_n} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \dots \int_0^{l_n} U_0(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) \xi_m d\xi_m \right] \times \\ &\quad \times \exp \left(-at^2 \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right)^2 \right) \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) x_m = \\ &= \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \dots \int_0^{l_n} \left[\frac{2^n}{l_1 l_2 \dots l_n} \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} \exp \left(-at^2 \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right)^2 \right) \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) x_m \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) \xi_m \right] U_0(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \prod_{m=1}^n d\xi_m \end{aligned}$$

For $t \geq t_0 > 0$ since the series $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ in the square brackets are regularly convergent, as there is

a law for changing the place of the signs of integration and the sum, we accept the following new denotations and get

$$\begin{aligned} G(x_1, x_2, \dots, x_n, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, t) &= \frac{2^n}{l_1 l_2 \dots l_n} \sum_{k_1=1}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \dots \sum_{k_n=1}^{\infty} \exp \left(-at^2 \sum_{m=1}^n \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right)^2 \right) \times \\ &\quad \times \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) x_m \cdot \prod_{m=1}^n \sin \left(\frac{\pi k_m}{l_m} \right) \xi_m, \end{aligned} \quad (17)$$

Then the appropriate solution of problem (1)-(3) dependent on this function is

$$U(x, t) = \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \dots \int_0^{l_n} G(x_1, x_2, \dots, x_n, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) U_0(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \prod_{m=1}^n d\xi_m, \quad (18)$$

Definition: The accepted function $G(x_1, x_2, \dots, x_n, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, t)$ is said to be a conventional point source function or a heat effect function of the conventional point source. Sometimes this function is called the Green function.

Considering the Green function as a function of x , this function characterizes heat distribution on the surface of the parallelepiped at time t .

Conclusion. At the moment $t=0$, the Green function gives a temperature effect of conventional point source. Using its physical sense, this function always is accepted as positive.

References

$U_0(0)=0, U_0(l_1)=0, \dots, U_0(l_n)=0$ the series (16) is continuous for $t \geq 0$.

It is clear that since the function $U_0(x)$ is piecewise smooth, continuous, taking into account the convergence of its series made of absolute values of the constants of the Fourier series for $U_0(0)=0, U_0(l_1)=0, \dots, U_0(l_n)=0$,

1. Z.D. Abbasov, Mathematical physics equations Baku 2018, p. 380

2. Z. D. Abbasov, Application of the Fourier method to the mixed boundary value problem, DOI:10.3618 ESU.2413-9335, № 3(60) 2019, 4 p.42-45

3. Z. D. Abbasov A mixed boundary problem Fourier method inhomogeneous hyperbolic equation, International scientific conference Ganja -2022, 201-203

4. Z.D. Abbasov, Methods for solving heat conductivity problems for long hollow cylinder. Operators, functional and systems of mathematical physics conference. International conference, 10-14 June 2019, Khazar University, Baku, Azerbaijan

5. Z. D. Abbasov, Displacement of a string from finitely many points under the action of contralized forces instationary mode, Modern Problems of Mathematics and Mechanics PROCEEDINGS, Baku, 26-28 April 2023

6. F. Prof. Z.D. Abbasov., Ə.Z. Dumanlı, A mixed boundary value problem for heat propagation in an n-dimensional convex parallelepiped. International Scientific Conference dedicated to the 102nd anniversary

of the birth of the National Leader Heydar Aliyev, May 23-25, 2025

7. V.Ya. Arsenin, Mathematical phycics, Moscow 2006, p. 368

8. V. V. Shankov, Wave equations and heat equations, Moscow, 2017, p.44

9. V.S. Vladimirov, Equations of mathematical physics, Moscow 2010, p. 510

PHILOLOGY

NAXÇIVANDA KİTABXANA İŞİNİN TARİXİ

Nematova S.

Naxçıvan Dövlət Universiteti

Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0001-5682-1639>

Seyidli L.

Naxçıvan Dövlət Universiteti

HISTORY OF LIBRARY WORK IN NAKHCHIVAN

Nematova S.,

Seyidli L.

Nakhchivan State University

DOI: [10.5281/zenodo.17392518](https://doi.org/10.5281/zenodo.17392518)

Xülasə

Məqalədə Naxçıvan Muxtar Respublikasında kitabxana işinin tarixi inkişaf mərhələləri araşdırılır. Kitabxana işi ictimai maarifçiliyin və mədəni infrastrukturun mühüm komponenti kimi təqdim olunur.

Məqalədə əsas hissədə orta əsrlərdən müasir dövrdə kitabxanaların funksional dəyişimi, sovet dövründə dövlət nəzarətində mərkəzləşdirilmiş sistemin qurulması, müstəqillikdən sonra isə modernləşmə və rəqəmsallaşma meyilləri təhlil olunur. Tədqiqat arxiv materiallarına, mövcud kitabxana strukturlarına və elmi ədəbiyyata əsaslanır.

Nəticədə Naxçıvanda kitabxana işi tarixi inkişafı boyunca ictimai mədəniyyətin formalaşmasına və yayılmasına mühüm töhfə vermişdir. Sovet dövründə mərkəzləşdirilmiş, müstəqillikdən sonra isə daha çevik və texnoloji əsaslarla inkişaf edən bu sahə bu gün də öz funksionallığını qoruyur. Gələcəkdə kitabxanaların rəqəmsal imkanlarının daha da genişləndirilməsi, bibliografik xidmətlərin təkmilləşdirilməsi və oxucularla interaktiv iş metodlarının tətbiqi aktual məsələlər kimi qalmaqdadır.

Abstract

The article examines the historical development stages of library work in the Nakhchivan Autonomous Republic. Library work is presented as an important component of public education and cultural infrastructure.

The article analyzes in the main part the functional change of libraries from the Middle Ages to the modern period, the establishment of a centralized system under state control during the Soviet period, and the trends of modernization and digitalization after independence. The research is based on archival materials, existing library structures, and scientific literature.

As a result, library work in Nakhchivan has made a significant contribution to the formation and dissemination of public culture throughout its historical development. This field, which was centralized during the Soviet period and developed on a more flexible and technological basis after independence, still maintains its functionality today. In the future, further expansion of the digital capabilities of libraries, improvement of bibliographic services, and application of interactive methods of work with readers remain relevant issues.

Açar sözlər: Naxçıvan, kitabxana, kitabxana tarixi, filosof, Munisnamə.

Keywords: Nakhchivan, library, library history, philosopher, Munisname.

GİRİŞ

Aktuallıq. Kitabxana işi cəmiyyətin intellektual inkişaf səviyyəsinin göstəricilərindən biridir. Azərbaycanda, xüsusilə də Naxçıvan Muxtar Respublikasında bu sahə özünəməxsus inkişaf yolu keçmişdir. Regionun zəngin tarixi, maarifçilik ənənələri və mədəni irsi kitabxana sisteminin formalaşmasına birbaşa təsir göstərmişdir.

Məqalənin məqsədi: Naxçıvanda kitabxana işinin tarixi kontekstini araşdırmaq, əsas mərhələləri təhlil etmək və müasir vəziyyəti qiymətləndirməkdir.

Tədqiqat obyektı. Tədqiqat 2024-2025-cü illər ərzində muxtar respublikanın ərazisində aparılmışdır.

Təhlil və müzakirə

Azərbaycan kitab mədəniyyətinin keçdiyi uzun və keçməkeşli yolun zirvəsi olmaqla, yeni inkişaf mərhələsinin başlanğıcı oldu. Kitabın yeni humanist, dünyəvi məzmun kəsb etməsinə təkan verməklə, onun tirajının çoxalması, ictimai xarakter daşması üçün zəmin hazırladı. İlk dəfə olaraq kitabın əhmiyyəti, onun

elm, bilik, təhsil, tərbiyə vasitəsi olması haqqında qiymətli fikirlər meydana gəlib formalaşdı.

Kitab haqqında, onun cəmiyyətin inkişafındakı rolu haqqında, kitab mədəniyyəti haqqında, qabaqcıl dünya görüşü formalaşdı. Kitab fəlsəfəsinin əsası qoyuldu. Böyük şairlərimizin, alimlərimizin, mütəfəkkirlərimizin kitab haqqında fikirləri Azərbaycan kitabına böyük şöhrət gətirdi. Kitab ölkəni inkişafında mühüm vasitə olduğu bilik mənbəyi, tərbiyə və düşüncə, mühakimə mənbəyi, dərk etmə mənbəyi kimi qiymətləndirildi.

Azərbaycan mütəfəkkirlərinin əsərlərində kitabın şərinə deyilmiş çox qiymətli kəlamlarla yanaşı kitabı qoruyub – saxlayan, onu nəsillərin sərvətinə çevirən kitabxanalar haqqında, onların təşkili, formalaşması, cəmiyyətin inkişafındakı rolu haqqında, insanların təlim – tərbiyəsinə kömək edən bir müəssisə olması haqqında çox dəyərlı fikirlərə rast gəlmək olurdu. Məhz XII əsrdə söylənməmiş bu qiymətli ideyalarla kitabxanaların gələcək inkişafı üçün, onların haqqında

ictimai fikrin formalaşması üçün əsaslı zəmin hazırlanmışdır. Azərbaycan mütəfəkkirlərinin hələ 10 əsr bundan əvvəl kitab və kitabxana haqqında söylədikləri qiymətli fikirlər, qabaqcıl ideyalar bu dövrdə də öz əhəmiyyətini saxlamaqdadır. Məhz buna görə ki, dünyanın inkişaf etmiş xalqlarından biri kimi şöhrət tapmış Azərbaycan xalqı kitabı sevmiş, onu elm-mədəniyyətin əsas amili kimi qiymətləndirmiş, müqəddəs saymış, qoruyub saxlanması, nəsilə – nəsilə çatdırılması üçün səy göstərmişdi.

Professor A.Xələfov ölkəmizdə kitabxana işinin misilsiz tərəqqisini xalqımızın mədəni inkişaf sahəsindəki ən böyük nailiyyətlərindən biri kimi dəyərləndirir [6, s.3]. Tədqiqatlarda çox haqlı olaraq, kitabxanaların tarixi onu yaradan cəmiyyətin tarixi ilə əlaqələndirilir, araşdırma və təhlillərin bu müstəvidə aparıldığı vurğulanır [7, s.19].

Ən qədim sivilizasiya mərkəzlərindən olan Naxçıvanda kitabxana tarixi bu qədim bölgədə zaman-zaman baş verən proseslərlə, mədəniyyət tarixi ilə sıx bağlı olmuşdur. Həç şübhəsiz ki, bu kursun əhəmiyyəti də, məqsədi də kitabxana işinin tarixini bu şəkildə aşılamaqdır.

Məlumdur ki, hələ XI-XII əsrlərdə Naxçıvan çox sayda görkəmli şəxsiyyətlərin vətəni kimi tanınmışdı. Məhz elə bu, bölgənin elmi və mədəni mühitinin məhsuldarlığının, məşhurluq tezliyinin göstəricilərindən biri olaraq diqqəti cəlb edir. Həmin dövrdə naxçıvanlı filosof Əbu Ömər Əbu Əli ibn Sinanın “Qanun” əsərini şərh və təhlil edən Nəcməddin Naxçıvani, Həsən ibn Ömər Naxçıvani [8, s.214-215] öz kitabları ilə yetərinə nüfuz qazanmışdılar.

Qaynaqlardan bəlli olduğu kimi, başqa ölkələrdən gəlmiş, Naxçıvanda Atabəylər sarayında sığınacaq tapmış məşhur söz ustadlarından Əsirəddin Ağsunafi, Şərafəddin Şafrux və Zahirəddin Fərabi sənətdə silinməz izlər qoymuşdular [1, s.16]. Dahi Nizaminin həmyerlisi Əbu Bəkr Xosrov oğlu Atabəylərin diqqətini cəlb etmiş, onu Gəncədən Naxçıvana gətirmişdilər. 30 ildən artıq Naxçıvanda yaşayan sənətkar gənc şahzadələrin müəllimi və tərbiyəçisi olduğundan Əl-Ustad adı ilə tanınmışdır. Əl-Ustadın qələmindən çıxan 6 poemanın hamısı Atabəylərə həsr olunmuşdu. İyirminci və iyirmi altıncı hekayətləri Naxçıvana həsr olunan [1, s.20] “Munisnamə” əsərinin maraqlı taleyi vardır.

Əsərin yeganə əlyazması 800 il Naxçıvanda hiş olunmuş, 1920-ci ildə İngiltərəyə aparılaraq Britaniya muzeyində “Min bir gecə” adı ilə saxlanılmış, 50 il sonra bu əlyazma ingilis alimi Q.M.Mereditin diqqətini cəlb etmişdir [1, s.16].

Kitabın səkkiz əsr Naxçıvanda zədəsiz və itkisiz şəkildə qorunub-saxlanması bölgədə tarixən kitaba və kitabxanaya həssas münasibətə parlaq sübutdur. Bu cür faktlar kitabxana işinin tarixində çox dəyərlidir və fikrimizcə, onların gənc nəsə öyrədilməsi kitaba məhəbbət və münasibət hissini formalaşdırmaqla yanaşı, bir nümunə olaraq kitabxana tariximizlə bağlı qürur, iftixar yaradır.

Doğrudan da, “Kitabxana işinin tarixinə aid biliklər bizə təkcə keçmiş öyrənmək üçün yox, müasirliyi yaxşı başa düşmək, əhaliyə kitabxana xidmətini hərtərəfli yaxşılaşdırmaq üçün də zəruridir” [4, s.20]. Unutmaq olmaz ki, bu günün tələbəsi sabahın

mütəxəssisi, kitabxanaçısıdır.

Bölgənin çox qədim zamanlardan misilsiz sənət nümunələrinə malik olması ilə bağlı biliklər milli mədəniyyətə varislik hissənin möhkəmləndirilməsində misilsiz əhəmiyyətə malikdir. Ona görə də, gənc nəsə kitabxana tariximizi dərinləndirən öyrənməsi mühüm vəzifələrdəndir.

O da məlumdur ki, XIII yüzillikdə Naxçıvan mədrəsələrində kitabxanalar mövcud olub. Bu kitabxanalarda müxtəlif işçilər çalışıblar [8, s.264]. Bu işə kitabxana işinin idarəetmə strukturunun öyrənilməsində çox əhəmiyyətli faktordur. Bölgədə XII əsrin sonlarından məktəb və mədrəsələrin fəaliyyət göstərməsini nəzərə alsaq, Naxçıvanda kitabxana tarixi barədə müəyyən fikir və qənaətlər əldə edə bilirik.

Həmin mədrəsələrdə və onların kitabxanalarında olan dərslərləri tədqiqatçılar üç yerə bölürlər:

1. Azərbaycanca hazırlanan kitablar;
2. Azərbaycandan kənarda hazırlanan kitablar;
3. Başqa dillərdə olan kitablar [8, s.266].

Bu bölgüyə əsasən hansı ehtimalları ortaya qoymaq olar?

Deməli, həmin dövrdə Azərbaycanda, onun tərkib hissəsi olan Naxçıvanda kitablar hazırlanırdı. Başqa ölkələrlə mədəni əlaqələr o dərəcədə inkişaf etmişmiş ki, kənardan da mədrəsə kitabxanalarına kitab gətirilmiş. Onların arasında başqa dillərdə olan kitablar da var imiş. Fikrimizcə, kitabxana tariximizdə bu faktlar da çox əhəmiyyətlidir.

Başqa dillərdə olan kitablar o dövrün kitabxanalarında mövcud olan çoxdilli sistem haqqında danışmağa imkan yaradır.

H. Tağıyevin belə bir fikri də diqqəti çəkir: “Azərbaycan alimləri və şairləri yuxarıda izah edilən səbəb üzündən hansı dildə yazmaqlarından asılı olmayaraq doğma xalqının milli və mədəni xüsusiyyətlərini daim hişf edib saxlamışlar” [3, s.8]. Bu yönümdən kitabxana tarixinin ədəbiyyat tarixi ilə vəhdətdə araşdırılması və tədrisi çox zəruri məsələlərdən biridir. Bu zaman mədrəsə kitabxanaları ilə yanaşı saray kitabxanalarının da müstəsna əhəmiyyəti çox ciddi faktor kimi nəzərə alınmalıdır.

XIV əsrdə şair, tərcüməçi və alim Savəci Məhəmməd, ədəbiyyatşünas Fəxrəddin Hinduşah Naxçıvani, onun oğlu, tarixçi Məhəmməd ibn Hinduşah Naxçıvani (onun “Vəzifələrin müəyyən edilməsinə dair kitab təlimatı” və başqa kitabı var idi), təbii ki, mədəniyyət tariximizin görkəmli simaları idi [8, s.269].

Həmin dövrdə yaşamış məşhur şair Beyrək Quşçuoğlu da Naxçıvan mənşəli sənətkar kimi dəyərləndirilir. Orta əsrlərdə yaşamış sənətkarların çoxunun şəxsi kitabxanaya və ya kitab rəfinə malik olması [3, s.9] tədqiqatlarda öz əksini tapmışdır.

Professor A.Xəlilov yazır: “Cəmiyyətdə yaranan tələbatla əlaqədar olaraq kitabxanaların miqdarı durmadan artır, yeni-yeni kitabxana tipləri və növləri meydana gəlirdi [5, s.22].

Müxtəlif dövrlərdə kitaba və kitabxanaya milli tərəqqinin mühüm vasitələrindən biri kimi önəm verən görkəmli şəxsiyyətlər bu məsələdə əsl nümunə göstərmişlər. Yeni kitabxana tiplərinin və növlərinin meydana gəlməsi işə mədəni tərəqqinin mühüm göstəricisi kimi diqqəti cəlb edir.

Tədqiqatlardakı belə bir qeyd, əlbəttə, hər birimizdə təkcə təəssüf hissi yaratmır: “Xüsusi VII, IX və XIII əsrlərdə yadellilərin Azərbaycan torpağına basqınları xalqımız üçün böyük fəlakət törətmiş, mədəni abidələrin, o cümlədən kitabların məhv olmasına və oğurlanmasına səbəb olmuşdur. O dövrdə Azərbaycandan aparılan bir çox qiymətli əlyazmaların bu gün belə müxtəlif ölkələrin kitabxanalarında saxlanıldığını tarixi sənətlər sübut edir” [3, s.13]. Tarixdən məlumdur ki, Naxçıvan Azərbaycanın ən çox döyüş meydanına çevrilən bölgələrindən olmuşdur. Yuxarıda qeyd edildiyi kimi, 800 il Naxçıvanda hifz olunan “Munisnamə” də bölgənin ağır günlərində Britaniyaya aparılmışdır. Bu hadisələr milli mədəniyyətimizə ağır zərbələr vurmaqla yanaşı, onun tarixinin öyrənilməsində ciddi çətinliklər yaradır. Bütün bunlara baxmayaraq, Naxçıvan mühüm mədəniyyət mərkəzlərindən olmaqla zaman-zaman bəşər sivilizasiyasına öz töhfələrini vermişdir. Bu sahədə kitabxanaçılıq tarixi də misilsiz nailiyyətlərlə zəngin olmuşdur.

Qeyd olunmalıdır ki, Ordubad şəhərindəki Zəhir Əd-Dövlə Məhəmməd mədrəsəsi XVIII yüzillikdə nəinki Naxçıvanda, bütün Azərbaycanda əhəmiyyətli tədris müəssisəsi kimi tanınıb [8,s.320]. Bu isə çoxlu səbəbləri olan məsələlərdəndir. Əzizcə çox da böyük olmayan bu bölgə öz məşhur şəxsiyyətləri ilə həmişə seçilmişdir. XVI əsrdə Mirzə Sadıq Ordubadi, Ziyayi Ordubadi və başqaları [8, s.329] milli tərəqqiyə əvəzsiz xidmətlər göstərmişlər.

Təsədüfi deyil ki, xələfləri onların parlaq ənənələrinə həmişə sadıqlıq göstərmiş, mühüm işlər görmüşlər. Əlbəttə, Naxçıvanda kitabxana tarixindən söz açarkən bütün bunlara diqqət yetirmək çox zəruridir. 1905-ci ildə Ordubad şəhərində qiraətxana açılır. Bu barədə M.S.Ordubadinin “Həyatım və mühitim” əsərində də bəhs olunur. Mir Adilin evində açılan bu qiraətxana müxtəlif qəzetlər almış, burada dram dərnəyi də təşkil edilmiş.

Göründüyü kimi, qiraətxana şəhərdə əsl mədəni mərkəz rolunu oynayır. “M.S.Ordubadinin dediyinə görə, bu qiraətxana 1914-cü ilə qədər işləmişdir”[2, s.104].

Eləcə də “Molla Nəsrəddin” jurnalının 1907-ci il 6 yanvar nömrəsində Naxçıvandakı “Səadət” qiraətxanasından bəhs olunur.

Əlbəttə, bütün bunlar mədəniyyət xəzinəmizin özünəməxsus cəhətlərinin öyrənilməsində xüsusi əhəmiyyət kəsb edir

Hər bir ölkədə elmin, təhsilin, incəsənətin, mədəniyyətin inkişafında və təbliğində kitabın rolu əvəzsizdir.

Kitab xalqın mənəvi sərvətidir, onun tarixidir. Bu sərvəti gələcək nəsillər üçün qoruyub saxlayan, bəşəriyyətin sənəd yaddaşı sayılan kitabların və digər çap əsərlərinin qorunmasında kitabxanalar böyük rol oynayır. Kitabxana işi cəmiyyətimizdə daim diqqət mərkəzində olub. Bu sahəyə hər zaman böyük qayğı ilə yanaşılıb. Dahi Nizami Gəncəvi də əsərlərinin birində kitabxanaları və kitabı belə qiymətləndirir.

Dünyada nə qədər kitab var hələ

Çalışıb,əlləşib gətirdim ələ

Oxudum,oxudum,sonar da vardım

Hər gizli xəzinədən bir dür çıxardım

Kitabxanaların yaradılmasında zamanəsinin ağıllı hökmdar və ziyalıların xüsusi rolu olub. Belə ki, orta əsrlərdə Nəsirəddin Tusinin rəhbərlik etdiyi Marağa Rəsədxanasında 1258-1261-ci illərdə fəaliyyət göstərmiş kitabxana Azərbaycanın məşhur elmi kitabxanalarından sayılırdı. Naxçıvanda isə ilk kitabxananın yaradıcısı maarifpərvər ziyalı Eynəlibay Sultanov idi. Naxçıvanda ikinci zəngin kitabxanalardan biri də Məşədi Qurbanəli Şərifovun kitabxanası hesab edilirdi. Onun kitabxanasına Bağçasarayda və Kazan şəhərində nəşr olunan kitablar gəlirdi. Bununla yanaşı, bu mədəniyyət müəssisəsi Hindistanda çıxan “Həbulmətin” qəzetini və İstanbuldan müxtəlif kitablar alırdı. Qurbanəli Şərifovun kitabxanasında rus və dünya klassiklərinin əsərləri də özünə yer almışdı. Bu kitabxanadan nəinki o zamanlar yaranmış “Müsəlman incəsənət və dram cəmiyyəti”nin üzvləri, eləcə də elmlə maraqlanan başqa ziyalılar da istifadə edirdilər.

1905-ci ildə Naxçıvanda “Müsəlman maarif incəsənət cəmiyyəti” tərəfindən rəsmi kitabxana açılır. Bu kitabxana Şahbazağanın evində daha dəqiq desək Naxçıvan şəhərindəki “İstiqlal” küçəsində yerləşmişdi. Ancaq təəssüfki, kitabxana polis idarəsi tərəfindən ayrı-ayrı bəhanələr gətirilərək uzun müddət bağlı qalırdı. Səbəbi isə həmin kitabxanada “Molla Nəsrəddin” jurnalının olması idi. Çünki bu jurnal milli dirçəlişin güclənməsində, ideologiyanın formalaşmasında əhəmiyyətli rol oynayırdı.

1915-1916-cı illərdə ayrı-ayrı ziyalılar tərəfindən şəxsi kitabxanaların yaradılması daha da artır. Bu illərdə Şahbazağa Kəngərlinin, Şahbaz Kələntərovun, Rza Təhmasibin, Həsən Səfərlinin kitabxanalarını misal göstərmək olar. Arxiv mənbələrin qeyd etdiyinə görə 1917-ci ildə Naxçıvan şəhərində üç kitabxana fəaliyyət göstərirdi. Bunlardan biri “Hümmətçi”lərin, ikincisi “Çinovniklər klubu”nun, üçüncüsü isə “Müsəlman milli komitəsi”nin kitabxanası idi.

Naxçıvan Muxtar Respublikasında ən böyük kitabxana Məmməd Səid Ordubadi adına Naxçıvan Muxtar Respublika Kitabxanasıdır. Bu kitabxananın əsası 1922-ci ildə Xalq Maarif Komissarlığı tərəfindən qoyulub. 1930-cu ilə kimi Şəhər Kitabxanası adlandırılıb, həmin ildən isə Naxçıvan Muxtar Respublika Kitabxanası kimi fəaliyyətini davam etdirib. Kitabxana 1953-cü ildən Azərbaycan ədəbiyyatında tarixi romanlar müəllifi kimi tanınan yazıçı M.S.Ordubadinin adını daşıyır. Kitabxanalarda yaradılan şərait oxucular üçün rahatlığın təmin olunması, elmi biliklərimizin və dünyagörüşümüzün daha da artmasına köməklik göstərən həmin ünvanlara gələnlərin sayı da artır.

Məşhur hind kitabxanaçısı Rapqanatan deyirdi....

“Bir orqanizm kimi kitabxana daim inkişafda olmalı, kitabxana fondu aramsız olaraq yeni kitablarla zənginləşdirilməlidir. Kiçik su hövzələri, göllər ona tökülən çaylardan məhrum olduqda quruduğu kimi, hər hansı bir kitabxana da yeni kitablardan məhrum olarsa, öz elmi və mədəni əhəmiyyətini itirər”.

Bu gün muxtar respublikada kitabxana işinə qayğının nəticəsidir ki, kitabxana fondları yenilənir. Sevincirici haldır ki, bu gün muxtar respublikamızın bütün bölgələrində müaliə mərkəzləri sayılan belə mədəniyyət müəssisələrinin sayı gündən-günə artmaqdadır. Şəhər mərkəzlərindən tutmuş ucqar dağ

kəndlərinə qədər bütün yerlərdə müasir kitabxanalar fəaliyyət göstərir. Bir çanta kitab, bir geqabaytlıq flaşkart.

Ölkəmizdə, eləcə də muxtar respublikada müasir tələblər səviyyəsində həyata keçirilən layihələr və tədbirlər, bütün sahələrə göstərilən dövlət qayğısı kitabxana xidməti səviyyəsinin daha da yüksəlməsinə səbəb olub. Naxçıvanda müasir dövrün tələblərinə uyğun elektron kitabxanalarda fəaliyyət göstərir. İndi bir çanta dolu kitabı müəyyən daşıyıcı qurğularda saxlamaqda olar. Gənc nəslin daha çox üz tutduğu elektron kitabxanalar informasiya resurslarının sürətli və keyfiyyətli fəaliyyətinin təmin edilməsində, oxucuların informasiya tələbatının daha yüksək səviyyədə ödənilməsində mühüm əhəmiyyət daşıyır. Artıq M.S.Ordubadi adına Naxçıvan Muxtar Respublika Kitabxanasının, Naxçıvanşünaslıq mərkəzinin, Naxçıvan Dövlət Universitetinin elektron kitabxanasının, AMEA Naxçıvan Bölməsinin elektron kitabxanasının, Naxçıvan Regional İnformasiya Mərkəzində məhdud fiziki imkanlılar üçün audio və elektron kitabxanasının elektron xidmətləri oxucuların istifadəsinə verilib.

Kitab ənənəvi informasiya vasitəsi olaraq, bütün zamanlarda öz aktuallığını qoruyub saxlayıb. Nə baş verən informasiya inqilabları, nə yeni texnologiyalar, bəşəriyyətin ən böyük kəşflərindən biri olan kitabların əhəmiyyətini azaltmayıb. Kitablar və kitabxanalar bizim milli sərvətimizdir. Ümummilli liderimiz Heydər Əliyevin söylədiyi kimi: “Kitabxana xalq, millət üçün, cəmiyyət üçün müqəddəs yer, mədəniyyət, bilik, zəka mənbəyidir. Ona görə də kitabxanalara daimi hörmət xalqımızın mədəniyyətini nümayiş etdirən amillərdən biridir”.

Mədəni tərəqqi fasiləsiz və davamlı prosesdir. İctimai-siyasi hadisələr bu prosesa ciddi təsir göstərir. Bu yönümdən keçilən tarixi yolun dövrləndirilməsini zəruriləşdirir. Məhz bunu əsas götürərək deməliyik ki, Naxçıvanda kitabxana tarixini üç mərhələdə öyrənmək məqsədə uyğundur:

- 1.Qədim dövrlərdən 1920-ci ilə qədər;
- 2.Sovet dövrü;
- 3.Müstəqillik illəri.

Məlumdur ki, 1920-ci ilə qədərki dövrdə kitabxanalar, artıq dərəcədə, mədəniyyət ocaqları kimi fəaliyyət göstərirdilərsə, sovet dövründə onlar ideoloji mərkəzlərə çevrildilər. Hər bir kitab, tədbir təbliğat vasitəsi kimi dəyərləndirilir, kitabxanaçı isə mütəxəssisdən çox təbliğatçı qismində qəbul olunur, ondan ancaq bu sahədə fəaliyyət göstərmək tələb edilirdi. Onların fəaliyyətinə də bu baxımdan qiymət verilir.

Müstəqillik illərində isə kitabxanalara öz həqiqi-milləti mədəni mərkəz statusu qaytarıldı.1920-ci ilin 5 iyununda Azərbaycan Xalq Maarif Komissarlığının xalqa müraciətində əsas məqsəd evlərdə olan kitabların yeni yaradılan kitabxanalara verilməsi ilə bağlı idi. Həmin ilin 31 oktyabrında Azərbaycan İnkilab Komitəsi “Kitabxanaların Xalq Maarif Komissarlığına verilməsi haqqında” dekret verdi [2, s. 4] . Həmin dövrə bağlı aparılan araşdırmalarda bu siyasətin iki istiqaməti vurğulanır: Kitabxana işinin inqilabi yolla yenidən qurulması və bunun böyük dövlət əhəmiyyəti vardır [2, s. 5] . Qeyd olunur ki, bu illərdə kitabxana

işinə ayrılan vəsait az imiş, kitablar az tirajla nəşr edilmiş, ixtisaslı milli kadrlar yox imiş. Bütün bunlara baxmayaraq kitabxanalardan tələb olunurdu ki, dövlətin apardığı siyasətə yaxından kömək etsin.

1935-ci ilin iyun ayında Azərbaycan SSR Mərkəzi İcraiyyə Komitəsi və Azərbaycan Xalq Komissarları Soveti “Azərbaycan SSR-də kitabxana işi haqqında” qərar qəbul etdi. Eləcə də Azərbaycan SSR Xalq Komissarları Şurası “Kitabxana fondunun mühafizə olunması üçün məsuliyyət haqqında” qəbul etdiyi qərarla dövrün tələblərini gündəmə gətirdi. Dövrün əsas tələbi isə rejimə sədaqətlə qulluq etmək idi.

Uşaq və məktəb kitabxanalarının, elmi və xüsusi kitabxanaların şəbəkəsi formalaşmağa başladı. Əlbəttə, bütün kitabxanaların fəaliyyətində təbliğat-təşviyat işi əsas yer tuturdu.

1957-ci ildə “Azərbaycan SSR-in əməkdar kitabxanaçısı” adının təsisimüəyyənləşdirilən siyasətin mühüm tərkib hissəsi idi.

Sovet dönməində kitabxanaların qarşısına qoyulan vəzifələr

Məlumdur ki, dövlət kitabxana siyasəti dedikdə, dövlətin cəmiyyətdə kitabxana işi sahəsində müəyyənləşdirdiyi prinsip və normaların məcmusu nəzərdə tutulur [17, s. 87].

Bu illərdə formalaşan kitabxana-informasiya təminatı sisteminin əsaslarını sovet ideologiyası təşkil edirdi.

Ümumiyyətlə, müharibədən sonra kitabxana sahəsindəki işlər yeni müstəviyə çıxarıldı. Təkcə kütləvi kitabxanalara yox, elmi, elmi-texniki, xüsusi kitabxanalara ciddi diqqət yetirilirdi. Unudulmurdu ki, kitabxalar ideoloji mərkəz olaraq əhəmiyyət daşıyır.

1974-cü ildə Sov.İKP MK “Zəhmətkeşlərin kommunist tərbiyəsində və elmi-texniki tərəqqidə kitabxanaların rolunu artırmaq haqqında” qərar qəbul etdi. Söhbət yenə ideologiya ilə, kitabxanaların ideoloji mərkəz kimi fəaliyyətinin genişləndirilməsi ilə bağlı idi.Həmkarlar İttifaqı kitabxana şəbəkələri, partiya kitabxanaları da məlum siyasəti ardıcıl surətdə həyata keçirirdi.Doğrudan da, 50-ci illərdən başlayaraq kitabxanalarla bağlı yürüdülmən siyasət öz nəticələrini göstərdi. Belə ki, çox geniş, həyatın bütün sahələrini əhatə etmək gücündə olan kitabxana şəbəkəsi formalaşdırıldı. Ancaq bu şəbəkəni yaratmaqda əsas məqsəd kitabxanaları güclü təbliğat mərkəzinə çevirmək idi. Belə bir fakta diqqət yetirək. 1987-ci ildə nəşr olunan bir kitab “Elmi-texniki tərəqqi və kitabxanalar” adlanırdı. Yəni ad çox xeyirxah bir niyyətdən xəbər verirdi. İndisə həmin kitabdakı başlıqları nəzərdən keçirək:

- 1.Ölkənin sosial-iqtisadi inkişafının sürətləndirilməsi xəttini təbliğ etmək.
- 2.Sov.İKP-nin xarici siyasət xəttinin təbliği.
- 3.Aqrar sənaye birlikləri və kitabxana-informasiya xidməti.
- 4.Sov.İKPXXVII qurultayı və əks təbliğat.
- 5.Sovet qanunları humanist qanunlardır.
- 6.Sovet həyat tərzinin təbliği.
- 7.Sov.İKP XXVII və Azərbaycan KP XXXI qurultayları materiallarının kataloq və kartotekalarda əksi.
- 8.Sov.İKP XXVII qurultayı materiallarının təbliğində biblioqrafik metodlardan istifadə.

90 səhifəlik bu kitabda 11 səhifəlik “on ikinci beşillik və elmi-texniki tərəqqi” bölməsi olmasaydı [4, s. 17], yəqin ki, bu kitabın başlığında “elmi-texniki tərəqqi” sözləri tamam havadan asılı qalardı. Sovet dönməndə kitabxanalara münasibət bu və bunun kimi çoxsaylı nəşrlərdə öz əksini tapırdı.

“Birinci dərəcəli vəzifə qurultay qərarlarının mahiyyətini və ruhunu hər bir partiya təşkilatına, hər bir kommunistə, hər bir sovet adamına çatdırmaqdan ibarətdir. Kitabxanalar partiya təşkilatları ilə birlikdə bu işdə həlledici rol oynamalı, ölkəmizin tarixinin kəskin dönüş mərhələsində onların mübarizəsinə və əməyinə başçılıq etməlidirlər” [5, s. 10].

Kitabxanaların bu vəzifələrin öhdəsindən layiqincə gəlməsi barədə razılıqla danışıqlar, onların müxtəlif iş formalarından istifadə etməsi, müasir dövrün tələbləri səviyyəsində mühüm nəliyyətlər əldə etmələri göstərilirdi [2, s. 72].

Kitabxana tariximizin bu səhifələrindən bəhs edərkən yetərinə diqqətli olmalı, hadisələri də, yenilikləri, uğurlar da obyektiv mövqedən dəyərləndirməliyik. Görülən işlər nəticəsində qazanılan əməllərin müsbət tərəfləri də var idi.

Naxçıvan MR-də kitabxana tarixinin sovet dönməndəki vəziyyətinin də eynən bu şəkildə olması tamamilə təbii idi. Demək olar ki, bölgənin bütün yaşayış məntəqələrində kitabxanalar fəaliyyət göstərirdi. Onlar yeni kitablarla, qəzet-jurnallarla təmin

olunurdu. Kitabxanalarda müxtəlif məzmunlu tədbirlər verilir, kitabxana işinə dair normativ sənədlər rəhbərliyə alınır.

Bütün bunlar sovet həyat tərzinin üstünlükləri, nailiyyətləri kimi kütlələrə izah olunurdu.

Kitabxana işinin tarixini sovet hakimiyyəti illəri ilə məhdudlaşdırmaq da bu dövrün səciyyəvi cəhətlərindən idi.

Ədəbiyyat

1. Əbu Bəkr ibn Xosrov Əl-Ustad. “Munisnamə” [Tərcümə və ön söz Hacı Səbuhi İbrahimovundur]. Naxçıvan: 2008, 143 s.

2. Həsənov M. Kitabxana fondunun yaranması, formalaşması və idarə edilməsi. Bakı: 2004, 143 s.

3. Tağıyev H. Azərbaycanda kitabxanaçılıq işi. Bakı: Azər nəşr, 1964, 121 s.

4. Xəlilov A. Azərbaycanda kitabxana işinin tarixi [dərslik]. 2 hissədə, I hissə. Bakı: Bakı Universiteti Nəşriyyatı. 2004, 328 s.

5. Xəlilov A. Kitabşünaslığa giriş [dərslik]. Bakı: Bakı Universiteti Nəşriyyatı, 2001, 400 s.

6. Kitabxana işi. Bakı: Bakı Universiteti Nəşriyyatı, 1996, 212 s.

7. Kitabxanaşünaslıq. Bakı: Bakı Universiteti nəşriyyatı, 1996. 212 s.

8. Naxçıvan tarixi. Üç cildə, I c., Naxçıvan: Əcəmi, 2013, 452 s.

PSYCHOLOGY

ERKƏN UŞAQLIQ DÖVRÜNDƏ SƏRHƏDLƏRİN QOYULMASININ EMOSİONAL ZƏKANIN İNKİŞAFINA TƏSİRİ

Ramazanova K.

Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universitetinin Şəki filiali

Psixologiya müəllimi

Azərbaycan, Şəki

<https://orcid.org/0009-0004-5225-3779>

THE IMPACT OF SETTING BOUNDARIES IN EARLY CHILDHOOD ON THE DEVELOPMENT OF EMOTIONAL INTELLIGENCE

Ramazanova K.

Sheki branch of Azerbaijan State Pedagogical University

Psychology teacher

Azerbaijan, Sheki

<https://orcid.org/0009-0004-5225-3779>

DOI: [10.5281/zenodo.17392533](https://doi.org/10.5281/zenodo.17392533)

Xülasə

Erkən uşaqlıq dövrü emosional və sosial bacarıqların formalaşmasında həlledici əhəmiyyətə malikdir. Bu dövrdə uşaqlar emosiyalarını tanıma, ifadə etmə və tənzimləmə bacarıqlarını əsasən ailə və tərbiyə mühitində öyrənirlər. Tədqiqatlar göstərir ki, bu bacarıqların inkişafında valideynlərin qoyduğu davranış və emosional sərhədlər mühüm rol oynayır. Sərhədlər uşağa təhlükəsizlik hissi və sosial normativləri anlama imkanı yaratmaqla yanaşı, onun özünütənzimləmə və empatiya qabiliyyətlərini də təşviq edir.

Məqalədə erkən uşaqlıq dövründə psixoloji sərhədlərin emosional zəkanın (EZ) inkişafına təsiri elmi və nəzəri əsaslarla təhlil olunur. Araşdırmalar və klassik nəzəriyyələr (Freyd, Erikson, Rogers, Piaje, Bandura, Maslou və d.) göstərir ki, uşaqlara aydın, ardıcıl və şəfqətli şəkildə qoyulan sərhədlər onların təhlükəsizlik ehtiyacını qarşılıyır, sosial normaları mənimsəməsinə və özünü tənzimləmə bacarığının formalaşmasına zəmin yaradır. Baumrindin tərbiyə üslubu modeli əsasında aparılan təhlillər göstərir ki, demokratik və ardıcıl yanaşmalarla böyüdülən uşaqlarda emosional zəka göstəriciləri daha yüksək olur. Əksinə, avtoritar və icazəverici yanaşmalar emosional sabitlik və sosial uyğunluq baxımından risk daşıyır. Demokratik valideynlik tərz, həm emosional dəstək, həm də strukturlaşdırılmış davranış çərçivələri təqdim etməklə EZ-nin inkişafına ən optimal mühit yaradır. Məqalə bu kontekstdə sərhədlərin EZ-nin əsas komponentləri olan empatiya, emosional tənzimləmə və sosial uyğunlaşmaya töhfəsini elmi əsaslarla şərh edir.

Abstract

Early childhood is a critical period for the development of emotional and social skills. During this period, children learn to recognize, express, and regulate their emotions primarily in the family and upbringing environment. Research shows that behavioral and emotional boundaries set by parents play an important role in the development of these skills. Boundaries not only provide a child with a sense of security and an opportunity to understand social norms, but also promote self-regulation and empathy.

The article analyzes the impact of psychological boundaries on the development of emotional intelligence (EI) in early childhood on scientific and theoretical grounds. Research and classical theories (Freud, Erikson, Rogers, Piaget, Bandura, Maslow, etc.) show that clear, consistent and compassionate boundaries set for children meet their need for security, create a basis for their assimilation of social norms and the formation of self-regulation skills. Analyses based on Baumrind's parenting style model show that children raised with democratic and consistent approaches have higher emotional intelligence indicators. In contrast, authoritarian and permissive approaches carry risks in terms of emotional stability and social adaptation. Democratic parenting style creates the most optimal environment for the development of EZ by providing both emotional support and structured behavioral frameworks. In this context, the article interprets the contribution of boundaries to empathy, emotional regulation, and social adaptation, which are the main components of EZ, on scientific grounds.

Açar sözlər: erkən uşaqlıq, sərhədlər, emosional zəka, tərbiyə üslubu, emosional tənzimləmə.

Keywords: early childhood, boundaries, emotional intelligence, parenting style, emotional regulation.

GİRİŞ

Erkən uşaqlıq dövrü insan şəxsiyyətinin formalaşmasında əsaslı mərhələlərdən biri hesab olunur. Bu dövrdə uşaqlar həm emosional, həm də sosial bacarıqların təməlini qazanır və onların gələcək münasibətləri, davranış modelləri məhz bu mərhələdə formalaşır. Emosional zəka (EQ) anlayışı uşağın öz

hisslərini dərk etməsi, idarə etməsi və başqalarının emosiyalarını anlama bacarığı kimi izah edilir və müasir psixoloji tədqiqatlarda sosial adaptasiya, akademik uğur və sağlam münasibətlərin qurulmasında həlledici amil hesab olunur.

Uşağın emosional inkişafında valideynlərin və tərbiyəçilərin qoyduğu sərhədlərin rolu xüsusi

əhəmiyyət daşıyır. Sərhədlər uşağa davranışlarının nəticələrini anlamağa, özünü və başqalarını qorumağa, sosial qaydalara uyğunlaşmağa yardım edir. Bu çərçivələr uşağın emosional sabitliyini gücləndirməklə yanaşı, empatiya və özünüidarə bacarıqlarının inkişafına da şərait yaradır.

Mövcud tədqiqatlar göstərir ki, sərhədlərin olmaması uşaqlarda aqressiv davranış, özünüidarə çətinlikləri və sosial münasibətlərdə problemlərə səbəb ola bilər, həddindən artıq sərt sərhədlər isə özünəinamın zəifləməsinə və emosional ifadənin məhdudlaşmasına gətirib çıxara bilər (Baumrind, 1991). Buna görə də balanslı və ardıcıl sərhədlərin qoyulması erkən uşaqlıq dövründə emosional zəkanın inkişafı üçün mühüm şərt kimi dəyərləndirilir.

Bu məqalənin məqsədi erkən uşaqlıq dövründə sərhədlərin qoyulmasının uşaqların emosional zəka bacarıqlarına təsirini elmi ədəbiyyata əsaslanaraq təhlil etməkdir.

Tədqiqat

Sərhəd (psixoloji baxımdan) – insanın özünü və başqalarını tanımasına, fərqləndirməsinə, şəxsi məkan və emosional ehtiyaclarını qorumasına xidmət edən daxili və xarici davranış çərçivələridir. Erkən uşaqlıq dövründə sərhədlər uşağın davranışlarını tənzimləməsinə, impulsiv reaksiyalarını idarə etməsinə və başqalarının hüquqlarına hörmət etməyə imkan verən əsas struktur rolunu oynayır (Mackenzie, 2020). Bundan əlavə, sərhədlər uşağa sosial normaları mənimsəmək üçün dayanıqlı çərçivə təqdim edir, belə ki, uşaq həm fərdi, həm də sosial davranış standartlarını öyrənir. Psixoloji tədqiqatlar göstərir ki, sərhədlərin ardıcıl və məntiqli tətbiqi uşaqların emosional sabitliyi və sosial adaptasiyasını gücləndirir, həmçinin EQ-nun erkən mərhələdə inkişafına şərait yaradır.

Sərhədlər uşağın özünü təhlükəsiz və başa düşülən bir dünyada hiss etməsinə şərait yaradır. Denham və Burton (2006) qeyd edirlər ki, valideynlərin uşaqlara yönəlik emosional münasibəti onların emosional dünyasının formalaşmasında həlledici rol oynayır. Uşaqlar valideynlərinin onları dinlədiyini, hissələrini adlandırdığını və emosiyalarına hörmət etdiyini gördükdə, öz emosiyalarını ifadə və tənzimləmə sahəsində daha bacarıqlı olurlar. Bu proses, uşağın sosial qarşılıqlı əlaqələrdə empatiya göstərməsi, konflikt vəziyyətlərini idarə etməsi və duyğularını məqsədyönlü şəkildə ifadə etməsi üçün mühüm zəmin yaradır. Beləliklə, sərhədlər yalnız davranış tənzimləmə vasitəsi deyil, həm də emosional öyrənmənin əsasını təşkil edir.

Morris və əməkdaşlarının (2007) ailə konteksti və emosional tənzimləmə üzrə tədqiqatı göstərir ki, sərhəd qoyma davranışı uşaqlarda özünü tənzimləmə bacarığının inkişafı üçün vacibdir. Sərhədlər uşağın davranışlarını yalnız idarə etməyə deyil, həm də sosial olaraq qəbul edilən davranış formalarını mənimsəməyə yönəldir. Bu mərhələdə valideyn və tərbiyəçilər tərəfindən ardıcıl və izahlı sərhədlərin tətbiqi, uşağa səbəb-nəticə əlaqəsini öyrədir və nəticədə uşaq öz hərəkətlərinə nəzarət etməyi bacarır. Eyni zamanda, sərhədlər uşağın sosial normativ davranış modellərini təqlid etməsinə şərait yaradır və beləliklə, həm fərdi, həm də sosial adaptasiya bacarıqlarını artırır.

Baumrindin (1991) tərbiyə üslubları modelinə görə, demokratik valideynlik EZ inkişafı üçün ən əlverişli mühitdir. Valideyn və ya baxıcı tərəfindən aydın və ardıcıl sərhədlərin qoyulması, uşağın nə gözlənildiyini və hansı davranışların qəbulolunmaz olduğunu dərk etməsinə kömək edir. Bu, tədricən özünüidarə və emosional nəzarət bacarıqlarını inkişaf etdirir. Əksinə, sərhədsiz və qeyri-ardıcıl münasibət uşaqlarda qeyri-müəyyənlik, güvənsizlik və emosional qarışıqlığa səbəb ola bilər. Demokratik (nəzarətlə yanaşı dəstək göstərən) tərbiyə üslubu sərhəd qoyma ilə emosional yaxınlığı birləşdirərək EZ inkişafına ən çox töhfə verən tərz hesab olunur (Baumrind, 1991).

Thompson və Meyer (2007) qeyd edirlər ki, erkən dövrdə prefrontal korteksin inkişafı emosional tənzimləməni mümkün edir. Prefrontal korteks uşağın qərarvermə, diqqəti yönəltmə və impulsiv davranışları nəzarət etmə qabiliyyətinə cavabdehdir. Sərhədlər bu inkişafı dəstəkləyən əsas xarici struktur rolunu oynayır, çünki uşağın ətrafdan aldığı ardıcıl qaydalar və tələblər onun neyroloji inkişafını məqsədyönlü şəkildə formalaşdırır. Məsələn, valideynin ardıcıl “yaxşı” və “pis” davranışlara verdiyi reaksiyalar uşaqlarda davranışların nəticələrini öyrənməyi stimullaşdırır. Beləliklə, sərhədlər neyrobioloji inkişaf və emosional tənzimləmə arasında bir körpü funksiyası görür, uşağın EQ-nun erkən mərhələdə formalaşmasına şərait yaradır.

Əlavə olaraq, tədqiqatlar göstərir ki, sərhədlərin mövcudluğu uşağın stress reaksiyalarını da tənzimləyir. Prefrontal korteksin güclü olması uşağın emosional qarışıqlıq vəziyyətində özünü sakitləşdirməsinə və problemi məqsədyönlü həll etməsinə imkan verir. Sərhədlərin olmaması və ya qeyri-ardıcıl tətbiqi isə əksinə, uşağın stressə qarşı həssaslığını artırır və emosional sabitliyini zəiflədir.

Z. Freyde görə, uşağın şəxsiyyəti id, eqo və superego arasındakı balansla formalaşır. Sərhədlər bu balansın tənzimlənməsində vacib rol oynayır. Anal mərhələdə (təqribən 1,5–3 yaş) uşaq nəzarəti öyrənməyə çalışır və məsələn, tualet vərdisini mənimsəyir. Sərhədlərin düzgün qoyulması nəticəsində uşaq öz impulslarını tənzimləməyi, vicdanını inkişaf etdirməyi və sosial normalara riayət etməyi öyrənir (Cherry, 2025).

Əlavə olaraq, sərt və ya qeyri-ardıcıl sərhədlər uşağın id və eqo arasındakı balansını poza bilər. Bu, nəticədə uşağın ya aşırı itaətkar, ya da inadkar şəxsiyyət xüsusiyyətləri formalaşmasına səbəb olur. Ona görə də, sərhədlərin keyfiyyəti və tətbiq ardıcılığı uşağın psixoseksual inkişafı və emosional davranışlarının formalaşması üçün həlledici əhəmiyyət kəsb edir. Uşağın vicdanının (superego) inkişafı həm də sosial münasibətlərdə empatiya və məsuliyyət hissinin güclənməsinə birbaşa təsir göstərir.

E. Eriksonun psixososial inkişaf nəzəriyyəsinə görə, 2–3 yaş dövrü avtonomluq və şübhə/utanc mərhələsi kimi tanınır. Bu mərhələdə uşağın sərhədlərlə qarşılaşması onun davranışa cavabdehlik hissinin inkişaf etdirməsi üçün həyati əhəmiyyət kəsb edir (Ergin & Köseoğlu, 2020). Sərhədlərin ardıcıl, şəfqətli və izahlı şəkildə tətbiqi uşağın öz hərəkətlərinin nəticələrini anlamağa, sosial normaları mənimsəməyə və impulsiv davranışlarını tənzimləməyə kömək edir.

Eriksonun nəzəriyyəsinə əsasən, uşağın bu dövrdə əldə etdiyi avtonomiya hissi gələcəkdə özünə inam və sosial bacarıqların inkişafına əsas təşkil edir. Əgər sərhədlər düzgün tətbiq edilməzsə, uşaqlarda etibar problemləri, qorxu və qeyri-müəyyənlik yaranır. Bu isə uzun müddətli emosional zəkanın zəifləməsinə gətirib çıxara bilər. Bu baxımdan, erkən uşaqlıqda sərhədlərin balanslı qoyulması uşağın sosial və emosional inkişafının təməlini formalaşdırır.

Karl Rogers uşağın inkişafında "şərtsiz qəbul" prinsipinin əhəmiyyətini vurğulayır, yəni uşaq özünü olduğu kimi qəbul edilərək sevildiyini hiss etməlidir. Lakin Rogers bu prinsipi sərhədsiz mühtilə eyniləşdirmir; əksinə, sərhədlər hörmət və şəfqət daxilində qoyulduqda, uşaq həm sevildiyini, həm də davranışlarının nəticələrini öyrənir (Gürəni, 2022). Elmi araşdırmalar göstərir ki, şərtsiz qəbul və balanslı sərhədlər birləşdirildikdə, uşaqlar öz emosiyalarını daha yaxşı idarə edir, sosial münasibətlərdə empatiya göstərir və EQ bacarıqlarını inkişaf etdirirlər. Bu yanaşma, uşağın özünü təhlükəsiz və dəstəklənmiş hiss etməsini təmin etməklə yanaşı, sosial qaydaları və məsuliyyət hissini də öyrədir.

Maslounun tələbatlar ierarxiyası nəzəriyyəsi göstərir ki, uşaqların ilkin ehtiyacları təmin edilmədən daha yüksək səviyyəli bacarıqlar – məsələn, özünü reallaşdırma, empatiya və kreativlik – inkişaf edə bilməz (Maslow, 1943). Bu baxımdan, sərhədlər uşağın təhlükəsizlik ehtiyacını təmin edir: uşaq qaydaların mövcudluğunu görür və nəticədə özünü qorunmuş hiss edir. Təhlükəsizlik hissi uşağın emosional sabitliyini artırır və EZ-nin daha yüksək səviyyələrinə doğru inkişafını mümkün edir. Bundan əlavə, sərhədlər uşağa məsuliyyət və davranışların nəticələrini anlama qabiliyyəti qazandırır, bu da sosial və emosional bacarıqların formalaşmasına yardım edir.

Albert Banduranın sosial öyrənmə nəzəriyyəsinə görə, insanlar — xüsusilə də uşaqlar — davranışları təkcə birbaşa təcrübə və nəticələr yolu ilə deyil, həm də müşahidə və təqlid vasitəsilə öyrənirlər (Bandura, 1977). Bu nəzəriyyəyə əsasən, uşaqlar ətraflarında gördükləri davranış modellərini, xüsusilə də valideynlərini, müəllimlərini və digər böyükləri izləyərək, onları təqlid edirlər. Bu öyrənmə prosesi "model öyrənmə" adlanır və burada diqqət, yadda saxlama, icra və motivasiya komponentləri mühüm rol oynayır. Banduraya görə, sosial öyrənmə prosesində müsbət model davranışlar uşaqların sərhədləri mənimsəməsinə və daxili nəzarət mexanizmi qurmasına daha effektiv şəkildə yardım edir.

J.Piajeyə görə uşaqların koqnitiv inkişafı mərhələli şəkildə baş verir və erkən uşaqlıq dövrü (təqribən 2–7 yaş) onun "əməliyyataqədərki mərhələ" adlandırdığı dövrə uyğundur (Piajet, 1952). Bu mərhələdə uşaqlar ətraf aləmi anlamaqda hələ məntiqi əməliyyatlara tam qadir olmasalar da, artıq simvolik düşünmə qabiliyyəti formalaşmağa başlayır. Uşaqlar bu dövrdə əsasən eqosentrik düşüncə tərzinə malik olur, yəni onlar dünyanı yalnız öz baxış bucaqlarından qiymətləndirirlər və başqalarının perspektivlərini anlamaqda çətinlik çəkirlər.

Bu mərhələdə uşaqlar sərhədlərin və sosial qaydaların mövcudluğunu tədricən dərk etməyə başlayırlar. Məhz bu yaş dövründə onlara təqdim

olunan davranış sərhədləri, səbəb-nəticə əlaqəsinin qurulmasında mühüm rol oynayır. Məsələn, sərhədlər uşağa müəyyən davranışın hansı nəticələri doğura biləcəyini öyrədir və nəticədə uşaq davranışlarını tənzimləməyi öyrənir. Sərhədlər eyni zamanda uşağın sosial normaları qəbul etməsinə və özünüidarə bacarıqlarının təməlini formalaşmasına dəstək verir.

Sərhədlər uşağın emosional zəka bacarıqlarının inkişafına bir neçə mexanizm vasitəsilə töhfə verir. Birincisi, sərhədlər uşağa davranışların səbəb-nəticə əlaqəsinə öyrədir və özünüidarə bacarıqlarını gücləndirir. İkincisi, sərhədlər sosial davranış normativlərini mənimsəməyə şərait yaradır və empatiya inkişafını dəstəkləyir. Üçüncüsü, sərhədlər stresslə qarşılaşdıqda uşağın emosional reaksiyalarını idarə etməyi öyrədir, yəni uşaqların EQ-nun üç əsas komponenti – özünü-idarə, empatiya və sosial bacarıqlar – balanslı şəkildə inkişaf edir (Mackenzie, 2020; Denham & Burton, 2006).

Tədqiqatlar göstərir ki, sərhədlərin ardıcıl tətbiqi uşaqlarda özünüidarə bacarıqlarını artırır, sosial qarşılıqlı münasibətlərdə müsbət davranışların formalaşmasına kömək edir və emosional tənzimləməni gücləndirir. Beləliklə, sərhədlər yalnız davranış tənzimləmə vasitəsi deyil, həm də uşağın emosional öyrənməsini stimullaşdıran vacib bir psixoloji struktur hesab olunur.

NƏTİCƏ

Aparılmış elmi ədəbiyyat təhlilləri və nəzəri yanaşmaların müqayisəli təhlili göstərir ki, erkən uşaqlıq dövründə qoyulan sərhədlər uşağın emosional zəka (EZ) bacarıqlarının inkişafında strukturlaşdırıcı və qoruyucu bir çərçivə rolunu oynayır. Sərhədlər təkcə davranışları tənzimləmək üçün deyil, həm də uşağın emosional ehtiyaclarının tanınması, emosiyaların adekvat ifadə edilməsi və başqalarının hissələrinə qarşı empatik münasibətin formalaşdırılması üçün mühüm vasitədir. Emosional tənzimləmə, empatiya və sosial uyğunluq kimi əsas EZ komponentləri, ilk növbədə ailə mühitində qoyulan qaydalar, münasibət tərzii və modelləşdirilmiş davranışlar vasitəsilə formalaşır.

Tərbiyə üslubu baxımından demokratik və istiqamətləndirici valideynlik, uşaqlarda həm təhlükəsizlik hissini gücləndirir, həm də avtonomiyayı təşviq edir. Bu cür yanaşma uşağın sərhədləri qəbul etməsini asanlaşdırır və daxili nəzarət mexanizmlərinin inkişafına töhfə verir.

Yekun olaraq, emosional zəka anadangəlmə mövcud olan sabit bir xüsusiyyət deyil, əksinə erkən sosial və emosional təcrübələrin təsiri ilə inkişaf etdirilən çevik bir bacarıqdır. Bu inkişafın təməli isə ailədə və təhsil mühitində qoyulan sabit, ardıcıl və dəstəkləyici sərhədlər üzərində qurulur. Sərhəd qoymaq uşağı məhdudlaşdırmaq deyil, ona təhlükəsizlik, istiqamət və özünü ifadə etmək üçün zəmin yaratmaqdır. Bu baxımdan, valideynlərin və tərbiyəçilərin rolu təkcə davranışın yönləndirilməsi deyil, həm də emosiyaların tənzimlənməsi və sosial əlaqələrin sağlam təməllərlə qurulması baxımından olduqca önəmlidir.

İstinadlar

1. Arslan, E. (2008). Erikson'un psikososyal inkişaf dövrələri ölçəğinin türkçə'ye uyarlama, güvənirlik və geçerlik çalışması . Selçuk Üniversitesi

Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi (19), 53-60.
https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1723849?utm_source

2. Bandura, A. (1977). *Social Learning Theory*. Englewood Cliffs. NJ: Prentice-Hall.
https://www.asecib.ase.ro/mps/Bandura_SocialLearningTheory.pdf

3. Baumrind, D. (1991). The influence of parenting style on adolescent competence and substance use. *Journal of Early Adolescence*, 11(1), 56–95. <https://doi.org/10.1177/0272431691111004>

4. Cherry, K. (2025, January 29). *Freud's stages of human development*. Verywell Mind. https://www.verywellmind.com/freuds-stages-of-psychosexual-development-2795962?utm_source

5. Denham, S. A. (2006). Social-emotional competence as support for school readiness: What is it and how do we assess it? *Early Education and Development*, 17(1), 57–89. https://doi.org/10.1207/s15566935eed1701_4

6. Ergin, H., Köseoğlu, A.(2020) Gelişim psikolojisi, Ankara Nobel yayıncılık s. 290

7. Gürkan, U.(2022) *Gelişim psikolojisi* 1. Ankara, Nobel yayıncılık.

8. Mackenzie, R. J., (2020) *Çocuğunuza sınır koyma*. Yakamoz yayınları.

9. Maslow, A. H. (1943). A Theory of Human Motivation. *Psychological Review*, 50(4), 370–396
https://psychclassics.yorku.ca/Maslow/motivation.htm?utm_source

10. Morris, A. S., Silk, J. S., Steinberg, L., Myers, S. S., & Robinson, L. R. (2007). The role of the family context in the development of emotion regulation. *Social Development*, 16(2), 361–388. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9507.2007.00389.x>

11. Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children*. New York: International Universities Press. https://sites.pitt.edu/~strauss/origins_r.pdf?utm_source

12. Thompson, R. A., & Meyer, S. (2007). Socialization of emotion regulation in the family. In J. J. Gross (Ed.), *Handbook of emotion regulation* (pp. 249–268).

https://www.researchgate.net/publication/274458048_Socialization_of_emotion_regulation_in_the_family

№100, 2025
Slovak international scientific journal

The journal has a certificate of registration at the International Centre in Paris – ISSN 5782-5319.

The frequency of publication – 12 times per year.

Reception of articles in the journal – on the daily basis.

The output of journal is monthly scheduled.

Languages: all articles are published in the language of writing by the author.

The format of the journal is A4, coated paper, matte laminated cover.

Articles published in the journal have the status of international publication.

The Editorial Board of the journal:

Editor in chief – Boleslav Motko (Bratislava) Slovakia

The secretary of the journal – Milica Kovacova (Bratislava) Slovakia

- Lucia Janicka – (Bratislava) Slovakia
- Stanislav Čerňák – (Bratislava) Slovakia
- Miroslav Výtisk – (Nitra) Slovakia
- Dušan Igaz – (Nitra) Slovakia
- Terézia Mészárossová – (Banská Bystrica) Slovakia
- Peter Masaryk – (Rzeszów) Poland
- Filip Kocisov – (Wrocław) Poland
- Andrej Bujalski – (Košice) Slovakia
- Jaroslav Kovac – (Trnava) Slovakia
- Paweł Miklo – (Bratislava) Slovakia
- Jozef Molnár – (Bratislava) Slovakia
- Tomajko Milaslavski – (Nitra) Slovakia
- Natália Jurková – (Bratislava) Slovakia
- Jan Adamczyk – (Prague) Czech Republic
- Boris Belier – (Bratislava) Slovakia
- Stefan Fišan – (Bratislava) Slovakia
- Terézia Majercakova – (Wien) Austria
- Ekaterina Semko (Kyiv) Ukraine

1000 copies

Slovak international scientific journal

Partizanska, 1248/2

Bratislava, Slovakia 811 03

email: info@sis-journal.com

site: <http://sis-journal.com>