

# ИЗВЕСТИЯ

---

на Съюза на учените – Варна

---

Серия “ТЕХНИЧЕСКИ НАУКИ” - 1’2025



UNION  
OF SCIENTISTS  
VARNA

**ИЗВЕСТИЯ**

на Съюза на учените – Варна

**СЪДЪРЖАНИЕ**

	Стр.
<b>Александър Марков, Ангел Димитров</b> Повишаване на точността при струговане чрез използване на режещи инструменти със сменяеми пластини .....	4
<b>Ярослав Аргиров, Диляна Георгиева</b> Проектиране на инструмент за студено формообразуване на цилиндрични тънкостенни детайли .....	7
<b>Николай Вълчев, Татяна Мечкарова</b> Структурни особености на стоманено-бронзови биметали, получени чрез леене или наваряване .....	10
<b>Ярослав Аргиров, Апостол Учърджиев</b> Фазови изменения в повърхностната зона при процес на наваряване на стомана 42CRMO4 с електрод аустенитен клас .....	14
<b>Татяна Мечкарова, Селиме Исмаилова</b> Разработване на установка за динамично изпитване на композитни материали .....	17
<b>Невена Милева, Крум Яназов</b> Анализ на топлоизолационни материали при реални експлоатационни условия за енергийно ефективно строителство .....	20
<b>Невена Милева, Крум Яназов</b> Сравнителен анализ на топлофизичните характеристики на леките бетони за енергийно ефективно и устойчиво строителство .....	25
<b>Дамянка Димитрова</b> Сравнение на параметрите и потенциала на вятъра в локации от североизточна България с приложение на продукта WINDPRO .....	30
<b>Веселин Петров, Кръстин Йорданов</b> Научно-приложен анализ на технологии за повишаване на ефективността на фотоволтаични и хибридни системи .....	38
<b>Николай Колев</b> Сравнителен технико-икономически анализ на технологии за оползотворяване на отпадна топлина за производство на електроенергия спрямо топлинни приложения в промишлеността .....	42
<b>Боян Карамилев</b> Особености на интелигентните транспортни системи във връзка с прогнозирането на тяхната надеждност .....	46
<b>Ангелина Димитрова</b> Надеждността на ултразвуковата апаратура и нейното влияние върху устойчивостта на системата на общественото здраве .....	52
<b>Мирослава Робинсон, Даниела Тонева</b> Приложение на дрон технологиите в мониторинга на морски опадъци .....	57

**Ярослав Аргиров, Павел Петков**

Разработване на методика за определяне дрейфа на ветроходна лодка ЯЛ 6 ..... 64

**Владимир Йорданов, Николай Петров**

Определяне параметрите на работа на противопожарна система на спасителен кораб ..... 69

**Надя Стаматова, Елиф Гюмюш, Анупама Шиджи**

От дигитална документация до XR музейна среда: интегриран подход за представяне на културното наследство със средства на фотограмметрия, дигитално възстановяване, XR и 3D печат на храни ..... 73

**Надя Стаматова**

Генеративен AI при интерпретацията на художествени прояви с медицински ограничения: казус от 2025 г. .... 83

**РЕДАКЦИОНЕН СЪВЕТ**

капитан I ранг проф. д-р Недко Димитров  
 проф. д-р Драгомир Димитров  
 доц. д-р инж. Тончо Папанчев  
 доц. д-р инж. Иван Иванов  
 доц. д-р инж. Радостин Димитров  
 доц. д-р инж. Мария Консулова-Бакалова  
 инж. Нели Велева

**РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ НА БРОЯ**

доц. д-р инж. Радостин Димитров  
 доц. д-р инж. Мария Консулова-Бакалова  
 инж. Нели Велева

**СЪЮЗ НА УЧЕНИТЕ – ВАРНА**

Пощенски адрес: гр.Варна 9000,  
 ул. “Васил Друмев” № 73  
 Съюз на учените -Варна  
 тел:052/978576

Авторите носят отговорност за своите материали .  
 Текстовете, които се представят в редакцията,  
 следва да са във форма на MS Word.  
 Ръкописи не се връщат.

**Предпечатна подготовка**

Съюз на учените - Варна  
**Координатор на СУ-Варна:**  
 тел:052/978576  
**E-mail:** [su-varna@abv.bg](mailto:su-varna@abv.bg)  
**Банкова сметка:** BG82 CECB 9790 1097 1239 00  
**BIC:** CECBBSF  
**Банка:** ЦКБ АД

Настоящото издание е  
 посветено на  
**Науката в служба на  
 обществото**  
 и се осъществява по  
 проект, в рамките на  
 присъщата на  
**Технически  
 Университет - Варна**  
 научноизследователска  
 дейност, финансирана  
 целево от държавния  
 бюджет.

*обновена лаборатория на  
 ТУ-ВАРНА по рентгенов  
 спектрален анализ*



**ДЕЙНОСТ**  
 Изследване, изпитване и  
 сертифициране на структурата,  
 състава, механичните и физико-  
 химичните свойства на  
 инженерни метални и неметални  
 материали; Безразрушително  
 изследване на метални  
 археологически находки



**СЕРИЯ  
 “ТЕХНИЧЕСКИ НАУКИ”  
 1’2025**



**9. СЪЩНОСТ И ПРИМЕНЕНИЕ**  
 Принципът на рентгеновото излъчване е основан на взаимодействието на рентгенови лъчи с вещество. При попадане на рентгенови лъчи в вещество, атомите на веществото се възбудят и излъчват рентгенови лъчи с определена дължина на вълната. Тези лъчи са използвани за определяне на химичния състав на веществото. Рентгеновото излъчване е широко използвано в металургията, химията, физиката, археологията и други области. Рентгеновото излъчване е основният метод за определяне на химичния състав на веществото. Рентгеновото излъчване е широко използвано в металургията, химията, физиката, археологията и други области. Рентгеновото излъчване е основният метод за определяне на химичния състав на веществото.

**КОНТАКТИ**  
 ВАРНА-9010, ул.Студентска №1,ТУ-Варна Тел.: 052/385 711

## ПОВИШАВАНЕ НА ТОЧНОСТТА ПРИ СТРУГОВАНЕ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА РЕЖЕЩИ ИНСТРУМЕНТИ СЪС СМЕНЯЕМИ ПЛАСТИНИ

Александър Марков<sup>1</sup>, Ангел Димитров<sup>1</sup>

### IMPROVING TURNING ACCURACY USING INDEXABLE INSERT TOOLS

Alexander Markov<sup>1</sup>, Angel Dimitrov<sup>1</sup>

**Резюме:** Струговането е един от най-широко използваните процеси за механична обработка в производството, при който размерната точност и качеството на повърхността са от ключово значение. В настоящата статия са разгледани стругарски ножове със сменяеми пластини с различна конструкция и геометрия. Изследването се фокусира върху влиянието на геометрията на инструмента и вида на инструменталния материал върху размерната точност на обработваните детайли. Проведени са експериментални изследвания върху стоманени заготовки чрез използване на стругарски ножове с различна геометрия на режещата част.

**Ключови думи:** струговане, стругарски нож, режещ инструмент, режеща пластина, размерна точност.

**Abstract:** Turning is one of the most widely used machining processes in manufacturing, where dimensional accuracy and surface quality are of critical importance. This article examines indexable insert turning tools with different designs and cutting-edge geometries. The study focuses on the influence of tool geometry and the type of cutting tool material on the dimensional stability of the machined parts. Experimental investigations were conducted on steel workpieces using tools with different geometric parameters.

**Keywords:** turning, turning tool, cutting tool, cutting insert, dimensional accuracy.

#### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

Основната цел е да се оцени влиянието на вида на режещия инструмент върху точността (фиг.1) при вътрешно разстъргване на отвор Ø65 мм при постоянни режими на рязане и без използване на охлаждаща течност (COT). Изследването обхваща три инструмента:

- VСMT – остра сменяема пластина с връх 35°,
- ССMT – универсална сменяема пластина 80°,
- Т5К10 – инструмент със запоена твърдосплавна пластина.

#### II. МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

Експерименталните изследвания са проведени на универсален струг SU-502, оборудван с държач за обработка с квадратно сечение 25×25 mm, осигуряващ стабилност и минимална деформация при натоварване.

Избраният детайл е цилиндричен прът от стомана 40Х, закалена и отвърната до твърдост около НВ 220–240, което я прави подходяща за изследване на точност на честота при разстъргване.

Пробите са обработвани без използване на охлаждаща течност (сухо рязане), за да се оцени поведението на различните инструменти при естествено топлинно натоварване. Този подход позволява по-ясно разграничаване на геометричните ефекти, породени от формата и стабилността на режещия ръб. [1]

Режимите на рязане са подбрани така, че да осигурят оптимално съотношение между чистота на повърхността и минимална конусност:

- Скорост на рязане ( $V_c$ ): 120 m/min
- Подаване ( $f$ ): 0.08 mm/об
- Дълбочина на рязане ( $a_p$ ): 0.3 mm
- Дължина на обработвания участък ( $L$ ): 50 mm [2, 3]

Всеки инструмент е използван за два последователни прохода, като между тях не е извършвана корекция на позицията на държача, за да се оцени реалната повтораемост на процеса.

По време на експеримента са измерени два характерни диаметъра за всеки инструментален проход – Двход, и Дизход.

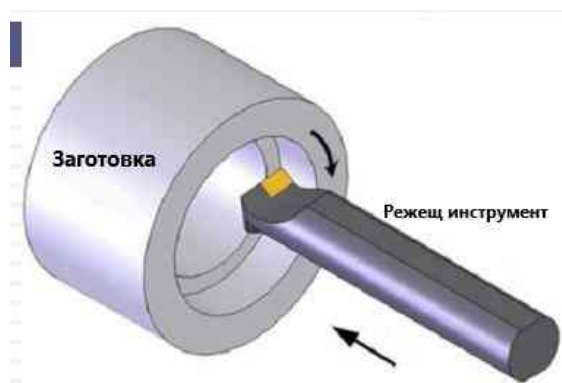
Измерванията са извършени с вътрешен микрометър с точност 0.01 mm[4].

$$K = D_{изход} - D_{вход} \quad (1)$$

Където: Основният показател за оценка на точността е конусният индекс (K), определен като разлика между диаметъра в края и в началото на отвора.

$$T_{отклонение} = \max |D - D_0| \quad (2)$$

Където:  $D_0$  – е номиналният диаметър.



Фиг.1-Обработка на вътрешен диаметър [5]

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

От анализа на резултатите (табл.1) се установява, че точността на разстъргване при вътрешни цилиндрични повърхности Ø65mm се определя основно от стабилността на геометрията на инструмента и условията на рязане. [6, 7]

Сменяемите пластини тип VCMT и CCMT показват по-стабилно поведение поради доброто балансиране на силите на рязане и оптималната форма на върха. При VCMT геометрията с ъгъл 35° осигурява плавен преход на натоварването и намалява вибрациите, докато CCMT (ъгъл 80°) поддържа по-висока здравина на ръба и е подходяща при по-дълбоки и по-груби проходи. [8, 9]

Таблица.1 Резултати от измерване на вътрешния диаметър [10]

Вид на пластина	Инструмент	Двход (mm)	Дсреда (mm)	Дизход (mm)	K = Дизход – Двход (mm)
VCMT -1	VCMT	65.000	65.000	65.000	0.000
CCMT -1	CCMT	65.600	65.600	65.600	0.000
T5 K10 -1	T5K10	66.200	66.200	66.21	0.01

Инструментът с твърдосплавна пластина T5K10 показва конус индекса K - 0.01 mm, което може да се обясни с:

- По-голямата твърдост на връзката между държача и пластината, водеща до по-малка еластична деформация;
- По-висок коефициент на триене при суха обработка (без СОТ), което повишава локалните температури в зоната на рязане;
- Термични напрежения, които предизвикват микродеформация на повърхността при изхода от отвора.

Визуалният контрол на повърхността показва, че при сменяемите пластини, обработената зона е по-хомогенна и с равномерна текстура, докато при T5K10 се наблюдават леки следи от изтегляне на материала в края на отвора.

Това е показател, че при по-продължителна работа или при по-високи скорости разликата между инструментите може да стане по-изразена.

Основните фактори, които влияят върху стойността на конусния индекс, са:

- Температурното разширение на инструмента и детайла;
- Износването на режещия ръб;
- Твърдостта на закрепване на държача;
- Наличието (или отсъствието) на охлаждаща течност.

При въвеждане на СОТ (емулсионна или синтетична) се очаква намаляване на

термичните напрежения и стабилизиране на геометрията, което би довело до  $K < 0.001$  mm.

**Финансиране:** Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са извършени по проект КД4/2025г. в рамките на присъщата на ТУ- Варна научноизследователска дейност, финансирана целево от държавния бюджет.

#### IV. ЛИТЕРАТУРА

[1] Volodymyr Kalchenko, Vitaliy Kalchenko, Olha Kalchenko, Antonina Kolohoida, Nataliia Sira., In book: „Advanced Manufacturing Processes II“, (February 2021).

[2] Sandip Subrao Kanase, Jaydeep Patil, Sainand Jadhav; “Improvement Of Ra Value Of Boring Operation Using Passive Damper”, (July 2013).

[3] Nely Georgieva, Pavel Petrov, Mihail Karshakov, Zlatin Dimitrov Zlatev; “A study of precision in turning external cylindrical surfaces with mov-able two-blade block” “Engineering review 39(2):205-212 “(April 2019)”

[4] Sergey N. Krivoschapko; “Analytical Calculation of Cylindrical Shells in the Form of Second-Order Algebraic Surfaces” “Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings 20(6):567-592” (December 2024)

[5] Baohua Chen, Quanying Wu, Yunhai Tang, Fei Wang; “Optimal D-Shaped Toolpath Design for Minimizing X-Axis Servo Following Error in Turning the Off-Axis Optical Surfaces”( September 2025)

[6] M. Shyadul Fiqri., Syamsul Bahri Widodo;” Analysis of Spindle Rotation Speed on Turning Results in CQ 6236 Lathe Machine”( June 2025)

[7] Muhamad Jafri;” EFFECT OF SPINDLE ROTATION IN TURNING HIGH CARBON STEEL USING HSS LATHE BLADES ON SURFACE ROUGHNESS AND INTEGRITY OF LATHE BLADES”( June 2023)

[8] Vivek Joshi, Harish Kumar; “Optimization of CNC Lathe Turning: A Review of Technique, Parameter and Outcome”( January 2021)

[9] Alexandra Stanimirescu Soica, Susana Apostu, “The Influence of Execution Technology on the Precision Turning of Mechanical Parts: Case Study on Manufacturing a Complex Component Using a Three-Axis CNC Lathe with Active Tooling”( March 2025)

[10] Bassem Gassara, W. Bouzid Saï; “Modeling of spindle speed and feed rate considering the kinematic behavior of CNC lathe in face turning”( January 2025)

**За контакти (Affiliation):**

<sup>1</sup> ас. инж. Александър Марков  
катедра „ТМММ”

Технически Университет – Варна  
e-mail: o.markov@tu-varna.bg<sup>1</sup>

## ПРОЕКТИРАНЕ НА ИНСТРУМЕНТ ЗА СТУДЕНО ФОРМООБРАЗУВАНЕ НА ЦИЛИНДРИЧНИ ТЪНКСТЕННИ ДЕТАЙЛИ

Ярослав Аргиров<sup>1</sup>, Диляна Георгиева<sup>2</sup>

DESIGN OF A DIE FOR COLD FORMING OF CYLINDRICAL THIN-WALLED TUBES

Yaroslav Argirov<sup>1</sup> Dilyana Georgieva<sup>2</sup>

**Резюме:** Изследването на допълнителното формообразуване при тънкостенни тръби в доставно състояние, включва изменение на геометрията на тръбата и промяна на механичните свойства на материала и, което е предизвикателство, базиращо се на формата и структурата на базовия метал. Предвид тези предизвикателства в доклада е представен инструмент, който е проектиран и изработен, с възможност за дефиниране на пластичните и якостни характеристики на материала, в зависимост от схемата на натоварване.

**Ключови думи:** тънкостенни тръби, студено формообразуване, инструмент.

**Abstract:** The study of additional forming in thin-walled tubes in the as-supplied condition includes changes in the tube's geometry and alterations to the mechanical properties of the material, which is a challenge based on the shape and structure of the base metal. Given these challenges, the report presents a die for cold forming that has been designed and manufactured with the capability to determine the plastic and strength characteristics of the material depending on the loading scheme.

**Keywords:** thin-walled pipes, cold forming, die.

### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

Изследването на допълнителното формообразуване при тънкостенни тръби в доставно състояние представлява предизвикателство поради присъщите промени в геометрията и механичните свойства на материала, които са пряко зависими от формата и структурата на изходния метал.

Въпреки тези предизвикателства, възможността за работа със стандартни тръби в доставно състояние значително разширява техния потенциал за приложение в практиката. Използването на масово произвеждани, лесно достъпни материали елиминира нуждата от скъпи и времеемки индивидуални поръчки, което прави процеса икономически ефективен и лесен за внедряване в различни индустриални сектори.

Това позволява стандартните тръби, първоначално предназначени за линейни приложения, да бъдат трансформирани чрез допълнително формообразуване в сложни компоненти със специфични извивки

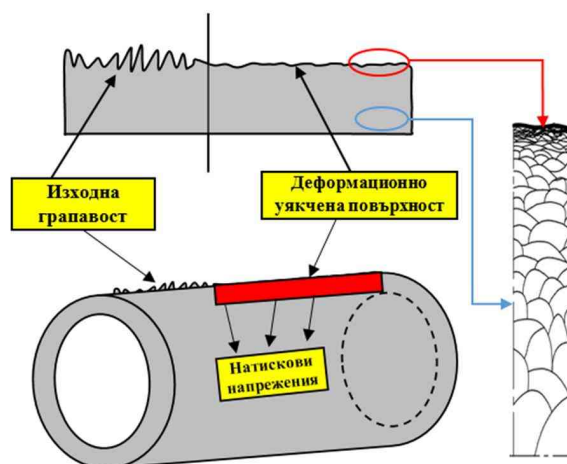
За да се отговори на предизвикателствата при формообразуването на тези стандартни тръби и да се гарантира надеждността на крайния продукт, в доклада е представен специално проектиран и изработен

инструмент, който дава възможност за дефиниране на пластичните и якостни характеристики на материала при различни схеми на натоварване.

### II. МЕТОДИКА НА РАБОТА

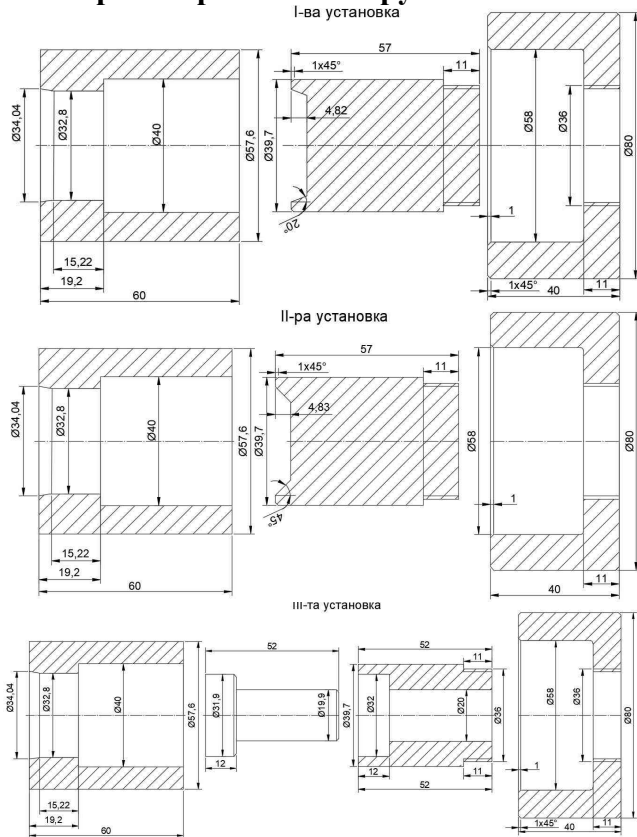
#### 2.1. Дефиниране целта на изследването

Целта на изследването е да се осъществи формообразуване на тънкостенни тръби от неръждаема стомана клас 304 в студено състояние, като едновременно се намалява грапавостта и се уякчава повърхността.

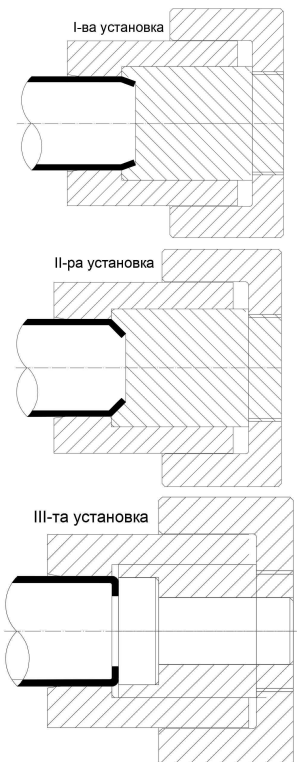


Фиг. 1. Схема показваща структурните и якостни изменения при студена пластична деформация с цел формообразуване

2.2. Проектиране на инструмента



Фиг. 2. Проектиране на инструменталната екипировка



Фиг. 3. Проектиране на формованата тънкостенна тръба

III. ИЗРАБОТВАНЕ НА ИНСТРУМЕНТА



Фиг. 4. Инструментална екипировка за формоване чрез студена пластична деформация на тънкостенни тръби

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Разработената технологична екипировка постигна целта си - формоване на тънкостенни тръби в сложно релефни повърхнини. Допълнително са получени точни цилиндрични размери в зоната на обработката, като е компенсирана първоначалната неточност по окръжния размер на тръбите в доставното им състояние. При челно въздействие и деформация в напречно сечение, включително при получаване на обръщане на челото на тръбата, не се нарушава точният цилиндричен размер в зоната на обработка. Обработените повърхности се характеризират с висока твърдост и ниска грапавост. В зоната на обръщане, където се създава тримерно напрегнато натисково състояние, не се наблюдава поява на пукнатини, което потвърждава ефективността и надеждността на приложената технология.

**V. ЛИТЕРАТУРА :**

- [1] Palengat, R., Palumbo, G., Halgand, J. N., & Oudin, J. (2014). Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: Experiments and finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(1), 118-125.
- [2] Rubio, E. M., Camacho, A., Pérez, R., & Marín, M. (2017). Guidelines for Selecting Plugs Used in Thin-Walled Tube Drawing Processes of Metallic Alloys. *Materials*, 7(12), 572.
- [3] Sadok, L., & Pietrzyk, M. (2023). Cold Drawing of AISI 321 Stainless Steel Thin-Walled Tubes in an Arbitrarily Curved Die. *Materials*, 16(16), 5684.
- [4] Hussain, G., Gao, L., & Zhang, Z. Y. (2008). Experimental study on cold metal shaping of circular tube into a structural profile using plastic pressure-building medium. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 920-926.
- [5] Miller, G. G. (2002). *Tube Forming Processes: A Comprehensive Guide*. Society of Manufacturing Engineers.
- [6] Blazynski, T. Z. (2012). *Design of Tools for Deformation Processes*. Springer Science & Business Media.
- [7] Hosford, W. F., & Cadell, R. M. (2007). *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy* (3rd ed.). Prentice Hall.
- [8] Picas, I., et al. (2014). Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: Experiments and finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(1), 118-125.
- [9] Rubio, E. M., et al. (2017). Guidelines for Selecting Plugs Used in Thin-Walled Tube Drawing Processes of Metallic Alloys. *Materials*, 7(12), 572.
- [10] Hussain, G., Gao, L., & Zhang, Z. Y. (2008). Experimental study on cold metal shaping of circular tube into a structural profile using plastic pressure-building medium. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 920-926.
- [11] A review of emerging hydroforming technologies: design considerations, parametric studies, and recent innovations (2025). ResearchGate
- [12] Янков, Е. Х., & Николова, М. П. (2013). Фазово превръщане на аустенитни листови материали при едномерен опън на студена пластична деформация.
- [13] Гъшов, С. (2009). Изследване на управляеми ударни процеси (Автореферат на дисертация). Институт по информационни и комуникационни технологии, БАН
- [14] Тончев, Н. Материалознание 2, Глава 5: Технологични особености при получаване на изделия и заготовки чрез пластична деформация

**За контакти:**

<sup>1</sup> инж. Диляна Георгиева  
катедра „МТМ”  
Технически Университет – Варна  
e-mail: [diweina@abv.bg](mailto:diweina@abv.bg)

<sup>1</sup> Eng. Dilyana Georgieva  
Department „МТМ”  
Technical University of Varna

## СТРУКТУРНИ ОСОБЕНОСТИ НА СТОМАНЕНО-БРОНЗОВИ БИМЕТАЛИ, ПОЛУЧЕНИ ЧРЕЗ ЛЕЕНЕ ИЛИ НАВАРЯВАНЕ

Николай Вълчев<sup>1</sup>, Татяна Мечкарова<sup>2</sup>

### STRUCTURAL FEATURES OF STEEL-BRONZE BIMETALS OBTAINED BY CASTING OR SURFACE LAYERING

Nikolay Valchev<sup>1</sup> Tatyana Mechkarova<sup>2</sup>

**Резюме:** Докладът анализира структурата, получавана след леене или наваряване на биметални материали, получени между конструкционна стомана и алуминиев бронз. Разглеждат се количество и вид на структурните фази и дефекти, като се набляга на трудоемкост на различните технологии.

**Ключови думи:** биметал, алуминиев бронз, леене, наваряване.

**Abstract:** The report analyzes the structure obtained after casting or surface layering of bimetallic materials between structural steel and aluminum bronze. The quantity and type of structural phases and defects are examined, with emphasis on the labor intensity of the different technologies.

**Keywords:** bimetal, aluminum bronze, casting, surface layering .

#### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

Биметалните материали намират широко приложение в различни индустрии:

- **Електроника и електричество:** използват се за кабелни съединители (клеми и гилзи Al/Cu), дънни платки, конектори и радиатори, където е необходимо надеждно свързване на различни проводници или ефективно разсейване на топлината;

- **Автомобилна индустрия:** прилагат се в компоненти на двигатели, изпускателни системи и спирачни системи;

- **Аерокосмическа промишленост:** позволяват разработването на модерни двигатели и системи за термична защита, които издържат на екстремни условия;

- **Инструменти:** биметалните свредла и триони съчетават здравина и издръжливост, което ги прави подходящи за рязане на различни материали като дърво, метални листове и пластмасови тръби;

- **Биметални пластини (термостати):** служат като основни елементи в температурни сензори, прекъсвачи и терморегулатори.



а)



б)

**Фиг. 1.** Приложение на биметални втулки:  
а) биметални втулки за двигател;  
б) фланец втулки без масло.

Характерно за изделията показани на фиг. 1, е че съчетават якостта на стоманата с висока износоустойчивост и корозионна устойчивост на бронзовите сплави.

## II. СТРУКТУРНИ ОСОБЕНОСТИ НА СТОМАНЕНО-БРОНЗОВИ БИМЕТАЛИ, ПОЛУЧЕНИ ЧРЕЗ ЛЕЕНЕ ИЛИ НАВАРЯВАНЕ

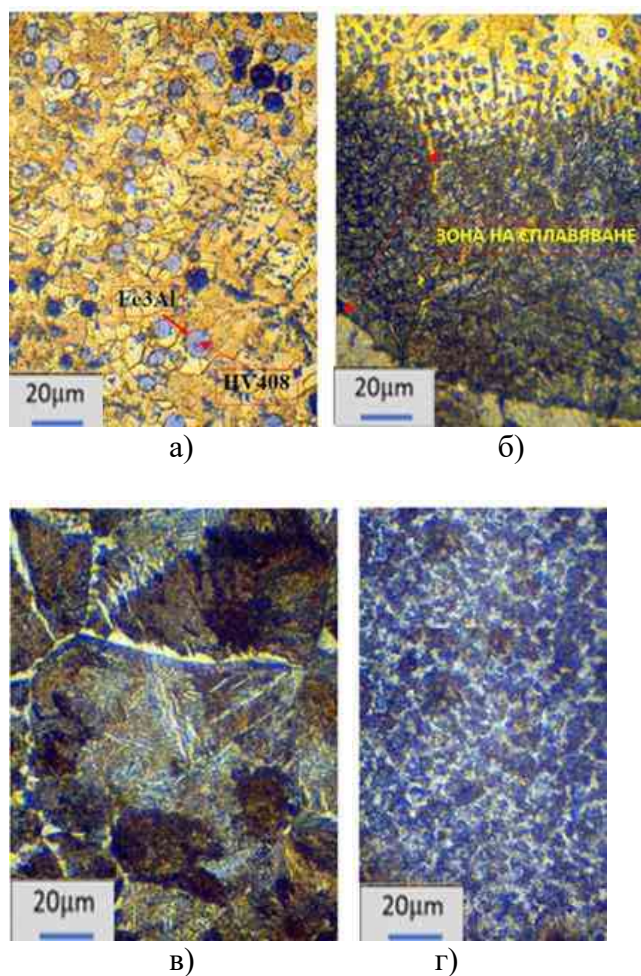
### 2.1. Структура на наварени биметални образци (Фиг.2)

Наваряването е заваръчен процес при който върху базов метален образец се напластява отгоре добавъчен метал, най-често тел чрез ВИГ или РЕДЗ-метод на заваряване. В случая е използван ВИГ-метод с волфрамов нетопим електрод и добавъчен метал - бронзова сплав със съдържание на алуминий до 8%. Марка на добавъчния материал CuAl8Ni2. За основен метал върху който се наварява е избрана констрикционна стомана, използвана за валове и оси, марка 40X.



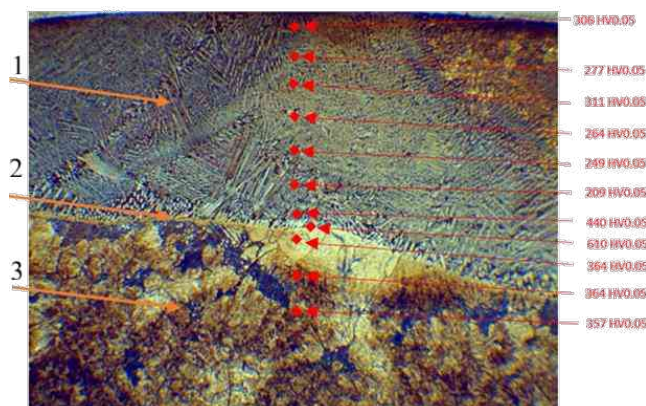
Фиг. 2. Наварени с алуминиев бронз биметални образци от стомана 40X

От получените биметални пробни образци (фиг.2) след наваряването са изработени микроструктури (фиг. 3), които са последователно шлифовани, полирани и разядени с подходящ реактив ( $FeCl_3 + HCl + H_2O$ - за бронза и  $3\%HNO_3$ - за стоманата).



Фиг. 3. Микроструктури в: а) наварен метал; б) зона на сплавяване; в) зона на термично влияние; г) основен метал

На наварените биметални образци е измерена и микротвърдостта по метода на Викерс (фиг.4).



Фиг. 4. Микро твърдosti HV0,05 в структурата на наварени биметални образци

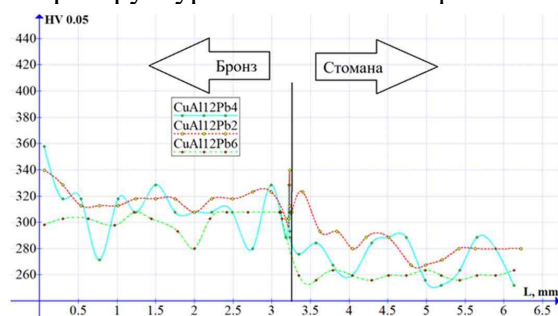
## 2.2. Структура на заляти биметални образци (Фиг.4)

Биметалните образци, получени чрез заливане са изработени чрез технология наречена кокилно леене в метални форми, в които се залага сърцевина от конструкционна стомана марка 40X. Същността се състои в подгриване на металната кокила със металната сърцевина на подгревна маса, следва преместването им върху вибро маса и заливане в кухината на предварително стопения алуминиев бронз със съдържание на алуминий 12%.



Фиг. 4. Заляти с алуминиев бронз образци от стомана 40X за получаване на биметали

От получените биметални пробни образци (фиг.4) са изработени микроструктурите показани на фиг. 5.



Фиг. 5. Микротвърдост на заляти биметални образци с различно съдържание на олово в славта и съдържание на алуминий 12%

Основните изводи са:

1. Предложеният триизмерен модел при извършения компютърно-симуляционен анализ показва, че е стабилен и безопасен при приложеното вътрешно и външно налягане.
2. Предложената методика е подходяща за динамични изпитания на композитни тръбопроводи, подводни или високо атмосферни корпуси на летящи или гмуркащи се съоръжения.
3. Следващата стъпка е изграждането на физически прототип на стенда и изпитване при симулиране на реални работни условия.

## III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Изследването на структурните особености на наварените и залетите биметални образци от алуминиево-оловни бронзи, показва значително повишаване на твърдостта в повърхностните зони, липса на дефекти, които вероятно ще окажат благоприятно влияние на износоустойчивостта при триене. Залети образци са от алуминиев бронз над 8%, които може да се уякчава термично и след това може да се уякчи и чрез ППД, което ще подобри износоустойчивостта, но образците които са наварени (<8% Al) не са термично уякчаеми, а могат само да се уякчават чрез ППД), което е в минус за тях. Също така при наваряване алуминият образува химично съединение с желязото  $Fe_3Al$ , което е с много висока твърдост  $\approx 600 HV0.05$ . Това нарушава хомогенността на навареното съединение и влошава малко износоустойчивостта поради неравномерното износване.

## IV. ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Wang, H. et al. “Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Bronze Weld Overlay on Steel Substrates.” *Materials & Design*, 2020.
- [2] García, C., et al. “Interfacial Characteristics of Steel–Bronze Bimetallic Castings.” *Journal of Materials Processing Technology*, 2014.
- [3] Sahin, Y. “Functionally Graded Bimetallic Materials: Manufacturing Methods and Properties.” *Composites Part B: Engineering*, 2017.
- [4] Shanmugam, S. et al. “Microstructure Evolution in Aluminum Bronze during Welding.” *Materials Science and Engineering A*, 2016.

[5] Li, X., Zhou, Z. “Solidification and Phase Transformations in Aluminium Bronze Alloys.” Journal of Alloys and Compounds, 2018.

[6] Davis, J. R. (Ed.) Metals Handbook: Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, 1993.

[7] Davis, J. R. (Ed.) Copper and Copper Alloys. ASM Specialty Handbook. ASM International, 2001.

[8] Totten, G., Tiryakioglu, M., and Campbell, J. Handbook of Aluminum Casting Technology, 2019.

[9] Schneider, C. Bimetallic Structures: Properties, Manufacturing, and Applications, Springer, 2016.

[10] Kutz, M. (Ed.) Handbook of Materials Selection. Wiley, 2002.

**За контакти:**

<sup>1</sup> ас. инж. Николай Вълчев

катедра „МТМ”

Технически Университет – Варна

e-mail: [nikolay.valchev@tu-varna.bg](mailto:nikolay.valchev@tu-varna.bg)

<sup>1</sup> Ass. prof. Eng. Nikolay Valchev

Department „МТМ”

Technical University of Varna

## ФАЗОВИ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЪРХНОСТНАТА ЗОНА ПРИ ПРОЦЕС НА НАВАРЯВАНЕ НА СТОМАНА 42CRMO4 С ЕЛЕКТРОД АУСТЕНИТЕН КЛАС

Ярослав Аргиров<sup>1</sup> Апостол Учърджиев<sup>2</sup>

### PHASE TRANSFORMATIONS IN THE SURFACE ZONE DURING THE OVERLAY WELDING PROCESS OF 42CRMO4 STEEL USING AN AUSTENITIC-CLASS ELECTRODE

Yaroslav Argirov<sup>1</sup> Apostol Ucherdzhiev<sup>2</sup>

**Резюме:** Статията изследва промените, които настъпват в структурата и механичните свойства на конструкционна стомана 42CrMo4 наварена по ръчно електродъгов метод (РЕД) с аустенитен клас електроди AISI 316. Изследването е насочено към избор на технология за ремонтно-възстановителен процес на износени валове, работещи в условия на корозионна среда.

**Ключови думи:** наваряване, конструкционна стомана, аустенитен електрод.

**Abstract:** The article explores the changes occurring in the structure and mechanical properties of 42CrMo4 structural steel surfaced by manual electric arc method with AISI 316 austenitic class electrodes. The study is aimed at selecting a technology for the repair and restoration process of worn shafts operating in a corrosive environment.

**Keywords:** surface, manual electric arc, austenitic class electrodes.

#### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

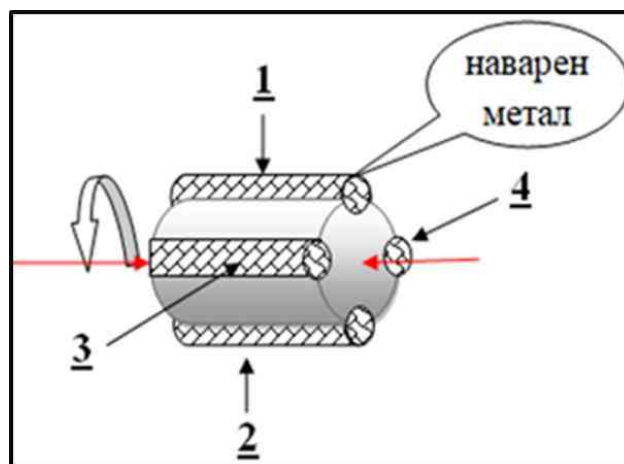
Конструкционната стомана 42CrMo4 е легирана стомана, широко използвана за изработка на натоварени машинни елементи като валове и оси. Наваряването ѝ е предизвикателство поради съдържанието на въглерод, хром и молибден, които увеличават риска от появата на пукнатини при кристализационните процеси. Често тези машинни елементи се подлагат на възстановителни ремонти вследствие на износване, като основен метод за възстановяване на геометричните им размери и работоспособност е именно наваряването.

Използването на неръждаеми електроди аустенитен клас позволява получаване на пластичен и устойчив на термични напрежения слой. Чрез подходящ избор на електрод и контрол на технологичните параметри (подгръване, междупластова температура, охлаждане) може да се осигури качествена и надеждна заваръчна връзка.

Настоящата статия анализира промените в структура и механични свойства на наварена стомана 42CrMo4 с аустенитен клас електрод AISI 316.

#### II. МЕТОДИКА НА ЕКСПЕРИМЕНТА

За целите на изследването предварително са струговани цилиндрични образци от стомана 42CrMo4 с диаметър 30mm. След това се извърши надлъжно полагане на наварен метал върху цилиндричната повърхност по РЕД метод, като шевът се нанася шев по шев, като всеки следващ шев е на 180°C спрямо предишния, за да се намалят термичните опънови напрежения (фиг.1).



Фиг. 1. Схема показваща метода на полагане на надлъжни шевове

На фиг.2 е показан наварения слой метал в работни условия.



Фиг. 2. Наварен слой метал

След процеса на наваряване се извършва механична обработка на образеца за да се прецизира цилиндричната форма на детайла и да се изравни дебелината на наварения слой по цялата повърхност до 2mm (фиг.3)

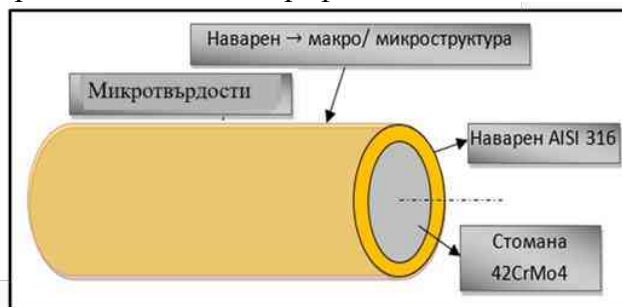


Фиг. 3. Механична обработка на наварения образец

Така подготвения образец е нарязан на по малки пробни тела, на които се извършват металографски изследвания след тяхното шлифване с различни по зърнестост водни шкурки, полиране с полираща паста КОЙ и проявяване с подходящ реактив: царска вода за неръждаемия наварен слой и 3% азотна киселина (HNO<sub>3</sub>) за конструкционната стомана.

### III. ИЗСЛЕДВАНИЯ НА СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

На фиг.4 е показана схема на проведените металографски изследвания.

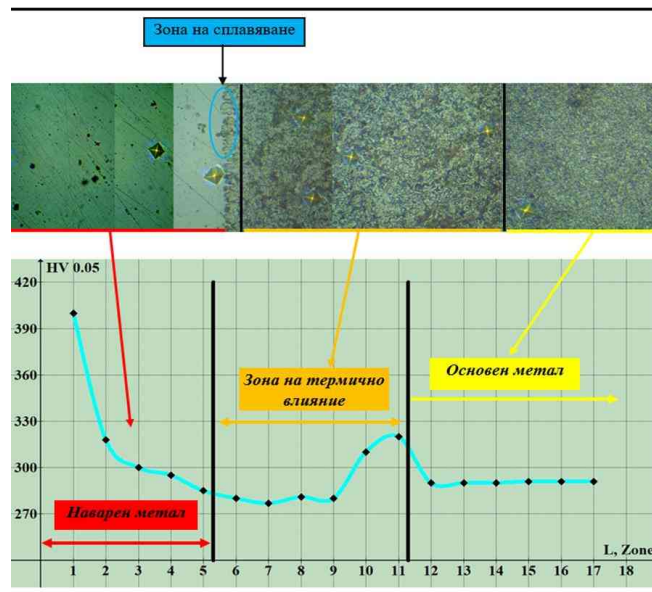


Фиг. 4. Схема на методиката на експерименталното изследване

На фигура 5 е показана проявената макроструктура.



Фиг. 5. Макроструктура



Фиг. 4. Микротвърдости

От проведения процес на наваряване, очаквано в структурата се получи образуване на аустенитна матрица с карбидни включвания, които според направените проучвания в литературните източници се осигурява висока твърдост на наварения слой.

В зоната на термично влияние се наблюдава частично отделяне на карбиди, което води до умерено увеличение на твърдостта.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Изследванията на структурата и механичните свойства на наварена с аустенитен клас електрод конструкционна стомана 42CrMo4 се правят с цел бъдещи изследвания на износоустойчивост и корозионна устойчивост, обект на дисертационен труд. С настоящото изследване е доказано формирането на пасивиращ слой, който повишава корозионната устойчивост, а наличните карбиди допринасят за по-добра износоустойчивост.

Комбинацията от пластична аустенитна матрица и твърди карбидни осигурява баланс между твърдост, износоустойчивост и ударна якост, подходящ за динамично натоварени детайли.

#### V. ЛИТЕРАТУРА :

[1] Miller, B. A., Taylor, R. O., Swartzentruber, P. D., Kelly, B. P. "Failure of Steel Shafts Due to Improper Repair Welding"

Journal of Failure Analysis and Prevention, Springer, Vol. 23, Issue 2, pp 894–909, 2023.

[2] B. Miller, P. Swartzentruber, J. Perdomo, "Failures of Shafts" / "Failures Related to Welding", Volume 11A ASM Handbook: Analysis and Prevention of Component and Equipment Failures, ASM International, pp 349–378 / pp 266–306, 2021.

[3] Sadeghi, M., & Shamanian, M.; "Abrasive Wear Behavior of Surface Hardfacing on Propeller Shaft Made of AISI 4140 Alloy Steel"; Applied Surface Science, ScienceDirect; Vol. 425, pp 146–152; 2017.

[4] Osman, A. A., & Mashmouhy, H. A.; "Study of the Effects of Welding Process on the Microstructure of Worn Carbon Steel Shaft" (Focuses on low carbon steel repair); Journal of Failure Analysis and Prevention, Springer; Vol. 20, pp 115–122; 2020.

[5] Beretta, S., Carboni, M., & Sciuccati, F.; "Renovation of 42CrMo4 Shaft Blade" (Industrial Case Study); Aciero Welding Case Studies.

[6] Tarasov, S. Y., & Balyakin, I. S.; "Development of High-Strength Corrosion Resistant Austenitic Steel for Oil Equipment Shafts"; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; Vol. 1215, 012028; 2021.

[7] Al-Feky, M. S., & El-Batahgy, A. L.; "Hardness and Microstructure Characterization of Hardfacing Alloys for AISI 1045 Steel Shafts using SMAW Method"; 2024.

#### За контакти:

<sup>1</sup> инж. Апостол Учърджиев  
катедра „МТМ”  
Технически Университет – Варна  
e-mail: [Ucherdzhiev@tu-varna.bg](mailto:Ucherdzhiev@tu-varna.bg)

<sup>1</sup> Eng. Apostol Ucherdzhiev  
Department „МТМ”  
Technical University of Varna

## РАЗРАБОТВАНЕ НА УСТАНОВКА ЗА ДИНАМИЧНО ИЗПИТВАНЕ НА КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ

Татяна Мечкарова<sup>1</sup>, Селиме Исмаилова<sup>2</sup>

DEVELOPMENT OF A STAND FOR DYNAMIC TESTING OF COMPOSITE MATERIALS

Tatyana Mechkarova<sup>1</sup> Selime Ismailova<sup>2</sup>

**Резюме:** Настоящата статия разглежда разработването на лабораторен стенд за динамично изпитване на тръбен тип конструкции от композитни материали под въздействието на вътрешно и външно налягане. Представени са съществуващите методи за механични изпитвания, концепцията за проектиране на изпитвателния стенд, компютърно-симулационния модел и резултатите от него. Симулацията е проведена върху тръба от въглеродни влакна с диаметър 80mm и дебелина 5 mm с фланш, захванат между стоманени фланци. Резултатите показват, че напреженията и деформациите остават в рамките на допустимите стойности, което потвърждава устойчивостта на конструкцията и валидността на предложената методика.

**Ключови думи:** стенд, динамични тестове, композитни материали.

**Abstract:** The current article discusses the development of a laboratory setup for dynamic testing of tubular composite structures under internal and external pressure. The analysis of existing mechanical testing methods, the concept for designing the setup, the computer simulation model, and its results are presented. The simulation was conducted on a carbon fiber tube with a thickness of 5 mm with a flange clamped between steel flanges. The results show that the stresses and deformations remain within acceptable values, which confirms the stability of the structure and the validity of the proposed methodology materials. A computer simulation analysis of the possibilities for creating test pressure and simulating a fatigue cycle of the material was also performed.

### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

Композитните материали заемат ключово място в напредналите инженерни конструкции благодарение на своята комбинация от висока механична якост, ниско тегло и устойчивост на агресивна среда. Тяхното приложение обхваща широк спектър: авиационни структури, компоненти за автомобили, преносни тръбопроводи, вятърни турбини, подводни конструкции и др.

Въпреки предимствата си, композитите са силно анизотропни материали, чието поведение при натоварване зависи от:

- ориентацията на влакната;
- типа матрица;
- начина на производство;
- градиента на налягането;
- условията на закрепване.

Поради това е необходимо тяхното поведение да бъде изследвано в условия, които максимално точно отразяват реалната експлоатация. Често стандартните тестове: опън, натиск, огъване, удар са недостатъчни,

защото не отчитат специфичните натоварвания, произтичащи от вътрешно или външно налягане, каквото се наблюдава при тръбни и кухи корпусни конструкции.

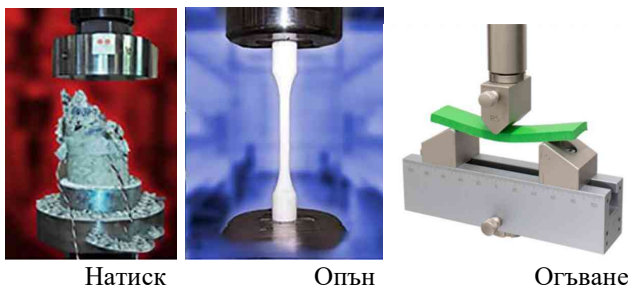
В последните години стана актуално определяне якостта на композитни полимерни съоръжения, използвани в условия на динамични напрежения. Поради случаите на имплозия на дълбоководни подводници и недостатъчни данни за поведението на тези материали в екстремни условия.

Това определя необходимостта от разработване на специализирана лабораторна установка, чрез която да се симулират реалните условия на работа на такива композитни изделия, с цел събиране на данни за динамичната им якост.

### II. СЪЩЕСТВУВАЩИ МЕТОДИ ЗА МЕХАНИЧНИ ИЗПИТВАНИЯ:

Стандартните механични изпитвания са основен инструмент за определяне на механичните характеристики на композитите:

- Изпитване на опън – определя модула на еластичност, якостта при опън, пределната деформация;
- Изпитване на натиск – оценява устойчивост при аксиално натоварване и склонност към изкривяване;
- Огъване (три- и четириточково) – използва се при многослойни композити;
- Ударни изпитвания – показват поведението при внезапни натоварвания.



Фиг. 1. Стандартни механични изпитвания

Ограничения на стандартните методи, поради, които не се отчитат:

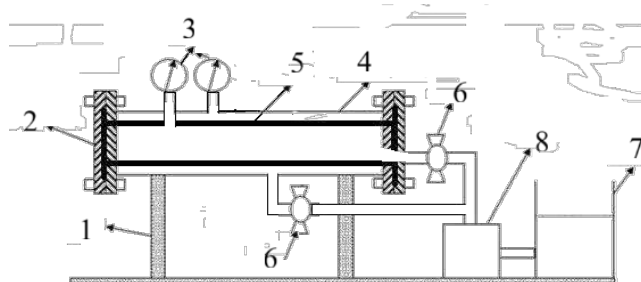
- сложните гранични условия при реални конструкции;
- комбинирано вътрешно и външно налягане;
- локални напрежения в областите на закрепване;
- формоизменения вследствие на динамична промяна на налягането.

Ето защо е необходимо разработването на стенд, който да може да възпроизведе натоварване чрез налягане, а не само механично натиск или опън.

### III. ПРОЕКТИРАНЕ НА СТЕНД ЗА ДИНАМИЧНО ИЗПИТВАНЕ

Целите на разработката са:

1. Да се симулират реалните експлоатационни условия върху тръбни композитни изделия;
2. Да се подаде контролируемо вътрешно и външно налягане;
3. Да се измерят напрежения, деформации и премествания;
4. Да се създаде конструкция, устойчива на високи натоварвания;
5. Да се осигури възможност за динамично (променливо във времето) налягане.



Фиг. 2. Схема на лабораторния стенд:

1-стойка; 2-фланци; 3-манометри мерещи външно и вътрешно налягане; 4-стоманен цилиндър; 5- композитна тръба с фланш; 6- редуцир вентили; 7- резервоар за течност; 8- хидравлична помпа с високо налягане;

Предимства на предложената конструкция:

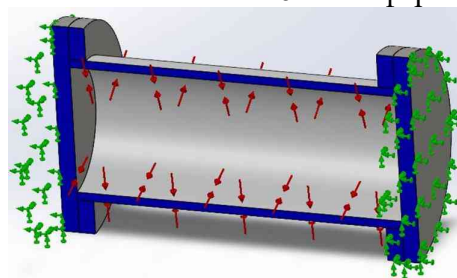
- позволява прилагане на едновременно вътрешно и външно налягане;
- може да работи в динамични условия;
- подходяща е за различни диаметри и материали на тръбите от композитни материали;
- осигурява висока надеждност и възпроизводимост на резултатите.

### IV. КОМПЮТЪРЕН СИМУЛАЦИОНЕН АНАЛИЗ ЗА ПРЕДВАРИТЕЛНО УТОЧНЯВАНЕ НА ПОДХОДЯЩ РЕЖИМ НА РАБОТА НА СТЕНДА

В програма SolidWORKS е направен компютърен триизмерен модел на тръба от полимерен композит с диаметър 80 mm и дебелина 5 mm, закрепена между стоманени фланци.

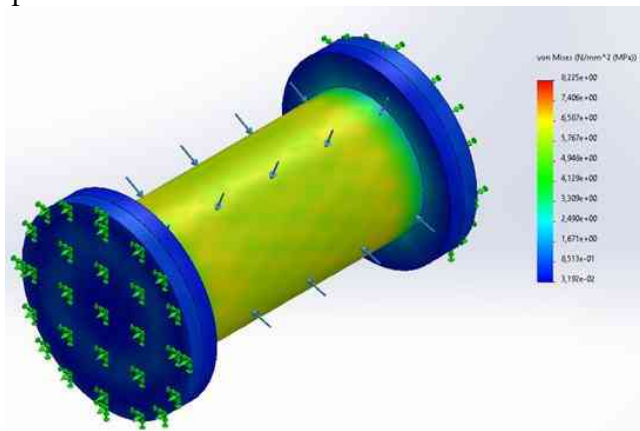
Входни данни за симулацията:

- избор на материал за полимерния композит от въглеродни влакна, чрез въвеждане на механичните и термични параметри в библиотеката на стандартните материали;
- вътрешно налягане: 1 атмосфера;
- външно налягане: 16 атмосфери .

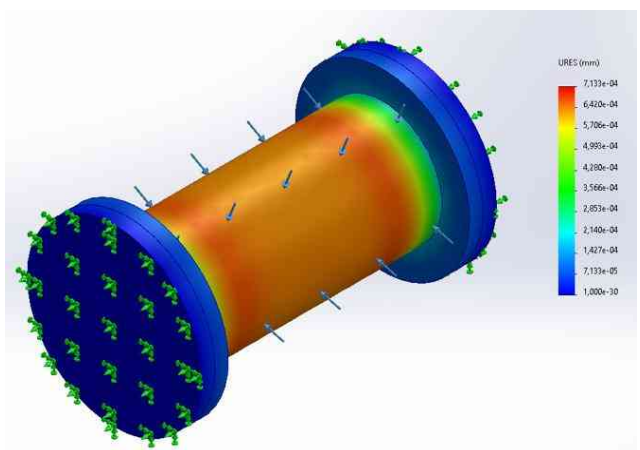


Фиг. 3. Прилагане на ограничителни условия на 3D модела

Резултатите от проведения компютърно-симулативен анализ за разпределението на напреженията и деформациите в 3D модела са показани на фиг. 4 и 5.



Фиг. 4. Разпределение на напреженията:  
Максимални: 8,22 N/mm<sup>2</sup>



Фиг. 5. Разпределение на деформациите:  
Максимални: 0,00007mm

Основните изводи са:

1. Предложеният триизмерен модел при извършения компютърно-симулационен анализ показва, че е стабилен и безопасен при приложеното вътрешно и външно налягане.

2. Предложената методика е подходяща за динамични изпитания на композитни тръбопроводи, подводни или високо атмосферни корпуси на летящи или гмуркащи се съоръжения.

4. Следващата стъпка е изграждането на физически прототип на стенда и изпитване при симулиране на реални работни условия.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Разработката представлява ценен принос към инженерната практика в областта на композитните материали и предлага методологична рамка за бъдещи изследвания.

## VI. ЛИТЕРАТУРА :

[1] Ballard, Robert D., and Will Hively. *The Eternal Darkness: A Personal History of Deep-sea Exploration*. Princeton University Press, 1999.

[2] Marx, Robert F. *The History of Underwater Exploration*. Dover Publications, 1989.

[3] Geyer, R. A. (Editor). *Submersibles and Their Use in Oceanography and Ocean Engineering*. Elsevier, 2011.

[4] Streever, Bill. *In Oceans Deep: Courage, Innovation, and Adventure Beneath the Waves*. Hachette UK, 2019.

[5] Society for Underwater Technology (SUT). *Submersible Technology*. Springer Science & Business Media, 2012

[6] Sun, K., Cui, W., & Chen, C. "Review of Underwater Sensing Technologies and Applications" (*Journal of Marine Science and Engineering*), 2021.

[7] Yang, C., et al. "A failure analysis of the cylinder and connection bolts in a buoyancy regulator of an underwater glider" (*Engineering Failure Analysis*), 2023.

[8] Zimmerman, S., & Abdelkefi, A. "Review of marine animals and bioinspired robotic vehicles: Classifications and characteristics" (*Progress in Aerospace Sciences*), 2017

[9] Cui, W., Zhang, L., & Zhang, Y. "Current Status and Technical Challenges in the Development of Deep-sea Manned Submersibles" (*Ocean-Land-Atmosphere Research*), 2024

[10] MDPI. "Deep-Sea Underwater Cooperative Operation of Manned and Unmanned Submersibles" (*Journal of Marine Science and Engineering*), 2022.

### За контакти:

<sup>1</sup> доц. д-р инж. Татяна Мечкарова  
катедра „МТМ”

Технически Университет – Варна  
e-mail: [t.mechkarova@tu-varna.bg](mailto:t.mechkarova@tu-varna.bg)

<sup>1</sup> Assoc. prof. Eng. Tatyana Mechkarova PhD  
Department „МТМ”

Technical University of Varna

# АНАЛИЗ НА ТОПЛОИЗОЛАЦИОННИ МАТЕРИАЛИ ПРИ РЕАЛНИ ЕКСПЛОАТАЦИОННИ УСЛОВИЯ ЗА ЕНЕРГИЙНО ЕФЕКТИВНО СТРОИТЕЛСТВО

Невена Милева<sup>1</sup>, Крум Яназов

## ANALYSIS OF THERMAL INSULATION MATERIALS UNDER REAL OPERATING CONDITIONS FOR ENERGY-EFFICIENT CONSTRUCTION

Nevena Mileva<sup>1</sup>, Krum Yanazov

**Резюме:** В публикацията е направен анализ на основните топлоизолационни материали и тяхното поведение при реални експлоатационни въздействия – влажност, температурни колебания и стареене. Акцентирано е върху леките бетони като неорганични композити, които съчетават топлоизолационни и конструктивни свойства. Разгледани са връзките между обемната плътност, топлопроводността и устойчивостта при хигротермични натоварвания, както и влиянието на екологичните и икономическите фактори върху тяхната ефективност. Резултатите потвърждават, че леките бетони представляват устойчиво и технологично обосновано решение за енергийно ефективно и екологично строителство.

**Ключови думи:** топлоизолационни материали, леки бетони, топлопроводност, енергийна ефективност, устойчиво строителство

**Abstract:** An analysis of the main thermal insulation materials and their behavior under real operating conditions—such as moisture, temperature variations, and aging—is presented. Emphasis is placed on lightweight concretes as inorganic composites that combine thermal insulation and structural properties. The relationships between bulk density, thermal conductivity, and stability under hygrothermal loads are examined, along with the influence of ecological and economic factors on their efficiency. The results confirm that lightweight concretes represent a sustainable and technologically justified solution for energy-efficient and environmentally friendly construction.

**Keywords:** thermal insulation materials, lightweight concrete, thermal conductivity, energy efficiency, sustainable construction.

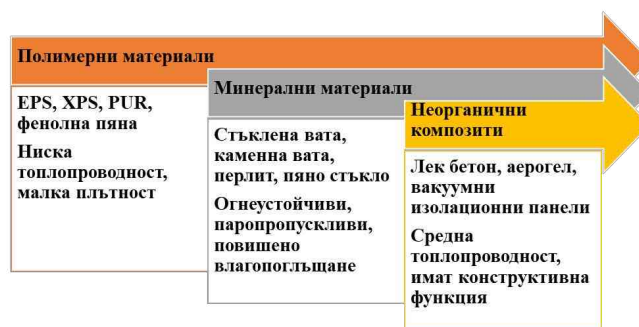
### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

Повишаването на енергийната ефективност в сградния сектор е приоритет на Европейския съюз (ЕС), заложен в редица нормативни документи [1,2]. Строителният сектор е отговорен за над 36% от емисиите на въглероден диоксид и приблизително 40% от общото крайно енергопотребление в Европа [2]. Една от най-ефективните мерки за ограничаване на енергийните загуби е оптимизирането на топлинната защита на ограждащите конструкции, чрез прилагането на високоефективни изолационни материали.

Топлоизолационните материали са неразделна част от сградната обвивка, като ограничават топлинните потоци между вътрешната и външната среда и по този начин подобряват микроклимата, повишават комфорта и намаляват енергопотреблението. Изборът на подходящ материал се определя не само от неговата номинална

топлопроводност, но и от устойчивостта му при реални експлоатационни въздействия – влажност, замърсяване, температурни градиенти, циклични натоварвания и стареене [3].

В съвременната практика основните групи изолации включват полимерни материали, минерални материали и неорганични композити. (Фиг.1).



Фиг. 1. Основно разпределение на топлоизолационни материали

Първите две групи са добре проучени и утвърдени, новите композитни материали с пореста структура или наномодифицирани състави представляват активна изследователска област. Те съчетават висока ефективност, механична здравина и по-нисък екологичен отпечатък [4].

В статията са обобщени основните групи изолации, анализирано е тяхното поведение при променливи климатични фактори и са подчертани предимствата на леките бетони като решение за енергийно ефективно строителство.

## II. МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

Топлоизолационните материали могат да бъдат класифицирани по различни признаци, например по произход, по структура и по експлоатационни характеристики. Всеки от тези параметри оказва влияние върху дългосрочната експлоатация на изолационната система [5].

### 2.1. Полимерни материали

Най-разпространените полимерни изолации са експандираният (EPS) и екструдираният (XPS) полистирен, полиуретановата пяна и фенолният пенопласт. Характерно за тях е ниска обемна плътност и топлопроводност в диапазона  $\lambda = 0.030-0.040$  W/m·K. Сред основните им предимства са ограничена хигроскопичност, ниска маса и са лесни за обработка. Основният недостатък е ограничената им устойчивост на високи температури и UV лъчение, както и зависимостта им от петролната индустрия [6].

### 2.2. Минерални изолации

Минералната и стъклената вата са класически представители на неорганичните влакнести изолации. Те имат по-висока плътност от полимерните материали и топлопроводност  $\lambda = 0.035-0.045$  W/m·K, отличават се с висока огнеустойчивост и акустични свойства. Основен проблем при тях е високата хигроскопичност, което води до влошаване на топлинните характеристики при продължително излагане на влага [7].

### 2.3. Неорганични композити и иновативни материали

През последните години значителен интерес предизвикват порестите неорганични композити – леки бетони, пено стъкло, аерогели и вакуумни изолационни панели.

Имат добра механична устойчивост и термична ефективност. Например, аерогелите имат изключително нисък коефициент на топлопроводност ( $\lambda \approx 0.015$  W/m·K), което ги прави едни от най-ефективните изолационни материали в света [8].

Леките бетони представляват специфична група композитни материали, заемаща междинно място между класическите топлоизолационни и конструктивни системи. Тяхната пореста структура и контролирана обемна плътност осигуряват благоприятен баланс между механична якост и термична ефективност, което ги прави подходящи за приложение в енергийно ефективни фасадни решения, пълнежи на сандвич-панели и производството на термоизолиращи зидарски елементи. Материалите от този тип се отличават с висока огнеустойчивост, добра влагоустойчивост и силно изразени акустични характеристики, способстващи за подобряване на топлинния комфорт и звукоизолацията в сградите.

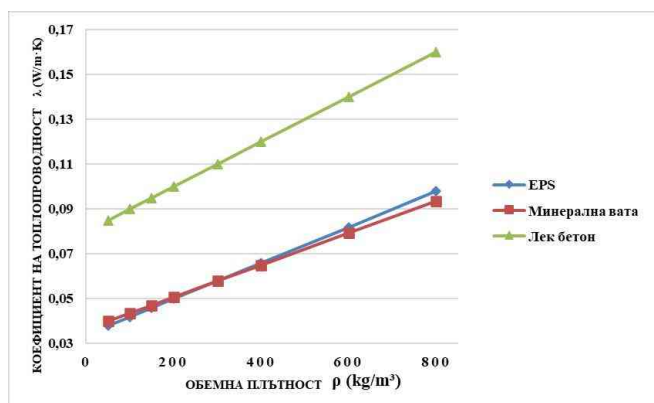
Типични характеристики и стойностите им са представени в Таблица 1, а Фиг.2 представя сравнение на зависимостта между коефициента на топлопроводност и обемната плътност на различни топлоизолационни материали и лек бетон.

Леките бетони могат да се произвеждат с различен тип пълнители, минерални и химически добавки, които целенасочено модифицират порестата структура и съответно влияят върху топлоизолационните и механичните им характеристики. Изборът на порообразуващ агент, размерът и равномерността на порите са определящи за величината на коефициента на топлопроводност и за дълготрайното поведение на материала. Внедряването на микроаератори и наноструктурни добавки, като силициев диоксид (SiO<sub>2</sub>) или алуминиев прах, допринася за оптимизиране на микроструктурата и постигане на ниски стойности на коефициентите на топлопроводност при запазена якост и устойчивост на натиск.

През последните години редица експериментални изследвания потвърждават, че топлофизичните свойства на леките бетони се запазват стабилни дори при продължително овлажняване и температурни промени [9–11].

**Таблица 1.** Типични физико-механични характеристики на леки бетони

Показател	Стойности
Обемна плътност ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )	400–800
Топлопроводност ( $\lambda$ , W/m·K)	0.08–0.16
Водопоглъщане (%)	8–12%
Якост на натиск ( $\sigma$ , МПа)	2–6
Порьозност (%)	50–80



**Фиг. 2.** Зависимост между коефициента на топлопроводност и обемната плътност

От **Фиг.2** може да се каже, че леките бетони заемат позиция между класическите изолации и конструктивните материали, като осигуряват добро съотношение между плътност и топлопроводност.

При лабораторни изпитвания, проведени при различни влажност на околната среда (30–90%), изменението на коефициента на топлопроводност е под 10% [9-11]. Тази стабилност се обяснява с капилярната структура и способността на материала да регулира влажностния баланс. Освен това при реални фасадни приложения в умерено-континентален климат леките бетони показват намаление на топлинните загуби с 18–25% спрямо традиционни минерални изолации със същата дебелина на слоя. Това потвърждава тяхната приложимост в системи с интегрирана топлоизолационна функция.

Едно от съществените предимства на леките бетони е тяхната стабилност при дълготрайна експлоатация и променливи климатични условия. При многократни цикли на овлажняване и изсушаване изменението на

топлопроводността остава минимално, което предполага добра структурна устойчивост на порите и ограничено капилярно проникване на влага. В резултат на високата им способност за дифузия на водни пари, тези материали позволяват естествено „дишане“ на стените и намаляват риска от вътрешноконструктивен конденз и развитие на микроорганизми, като по този начин подобряват микроклимата на помещенията.

От гледна точка на пожарната безопасност леките бетони се класифицират като негорими материали, което ги прави особено подходящи за приложение във високи, обществени и енергийно ефективни сгради. Освен това, в сравнение с полимерните изолации, те имат значително по-нисък екологичен отпечатък, тъй като не отделят летливи органични съединения и подлежат на пълно рециклиране като пълнител в нови строителни смеси. Използването на вторични суровини – пепел, шлага или микросиликати – допринася за намаляване на емисиите на CO<sub>2</sub> при производството и съответства на принципите на кръговата икономика и устойчивото управление на ресурсите в строителството.

#### 2.4. Влияние на експлоатационните фактори върху ефективността на топлоизолационните материали

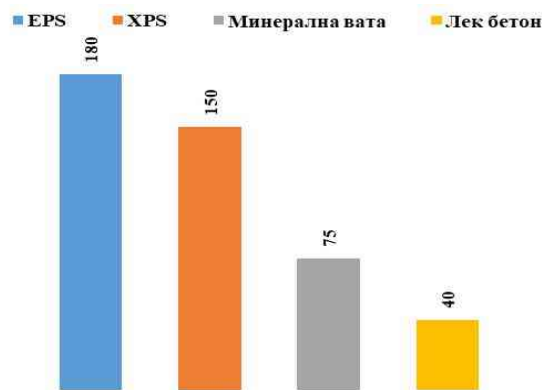
Реалните експлоатационни условия често се различават съществено от лабораторните параметри, при които се определят термофизичните характеристики на изолационните материали. Ефективността на изолационната система се определя от номиналната ѝ топлопроводност и от стабилността при комбинирани климатични и механични въздействия. Сред основните фактори, влияещи върху топлинната ефективност, влагата заема водещо място. Повишаването на влагосъдържанието води до увеличение на коефициента на топлопроводност, особено при влакнести и капилярно активни материали. При полимерните изолации ефектът е по-слабо изразен поради затворената клетъчна структура, докато при леките бетони влагата се разпределя неравномерно, като основно се задържа в пори с диаметър над 0.1 mm, които не участват активно в топлообмена.

Температурните колебания предизвикват циклично разширение и свиване на материалите. Полимерните изолации, поради високия си коефициент на термично разширение, са по-податливи на микродеформации и стареене. Минералните изолации и леките бетони демонстрират по-добра термична стабилност – изменението на коефициента на топлопроводност в диапазона 0–40°C обикновено не надвишава  $\pm 3\%$ . При материали със затворена порестост, каквито са голяма част от леките бетони, не се наблюдават големи изменения дори след многобройни температурни цикли.

Процесите на стареене оказват най-силно влияние върху полимерните изолации, при които UV лъчението и окислението предизвикват влошаване на структурата. Минералните и неорганичните материали са химически устойчиви, но при продължително овлажняване е възможна частична промяна в микроструктурата.

Оценката на устойчивостта на топлоизолационните материали включва не само техните експлоатационни свойства, но и екологичния им отпечатък през целия жизнен цикъл. Производството на лек бетон, особено при използване на вторични суровини като пепел или стъклен прах, намалява емисиите на CO<sub>2</sub> с до 40–45% и редуцира количеството индустриални отпадъци [9,11,12,13].

Сравнението на емисиите CO<sub>2</sub>, свързани с производството, е важен показател за оценка на устойчивостта на материалите от гледна точка на екологичният им отпечатък. **Фиг.3** представя сравнителен анализ на специфичните емисии на CO<sub>2</sub>, генерирани при производството на четири основни топлоизолационни материала - EPS, XPS, минерална вата и лек бетон. Полимерните изолации (EPS и XPS) показват най-високи въглеродни емисии — съответно около 180 и 150 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, което се дължи на енергоинтензивните технологични процеси и използването на нефтопродукти като суровина. Минералната вата има приблизително два пъти по-нисък въглероден отпечатък спрямо полистиреновите материали.



**Фиг. 3.** Сравнение на емисиите на CO<sub>2</sub> на различни топлоизолационни материали при производството, kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>

Лекият бетон демонстрира най-ниски емисии (приблизително 40 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>) благодарение на използването на минерални суровини, възможността за влагане на вторични материали и по-ниската енергийна интензивност на производствения процес. Резултатите подчертават неговия потенциал като устойчив алтернативен материал в енергийно ефективното строителство, особено в контекста на нарастващите екологични изисквания и стремежа към намаляване на въглеродния отпечатък на сградите.

От икономическа гледна точка, леките бетони имат по-дълъг експлоатационен живот и минимални разходи за поддръжка. Макар първоначалната инвестиция да е малко по-висока, тя се компенсира в рамките на 10–12 години чрез спестена енергия за отопление и охлаждане. Високата пожарна безопасност, ниската топлопроводност и възможността за рециклиране ги определят като устойчиво и рентабилно решение за съвременното енергийно ефективно строителство [12,13].

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Енергийната ефективност в сградния сектор зависи в значителна степен от избора на топлоизолационни материали, които запазват стабилни свойства при реални експлоатационни условия. Полимерните изолации осигуряват висока първоначална ефективност, но са ограничени по отношение на устойчивостта и дълготрайността. Минералните материали се отличават с добра пожарна и акустична устойчивост, но повишената им хигроскопичност води до временна загуба на изолационна ефективност.

Леките бетони се характеризират като група неорганични композити, съчетаваща ниска топлопроводност, висока пожарна безопасност и структурна стабилност. Пореста им структура и контролирана плътност осигуряват минимални промени при изменението на коефициентите на топлопреминаване в условия на променлива влажност и температура, а високата паропропускливост допринася за хигротермичен баланс на ограждащите конструкции.

От екологична гледна точка леките бетони имат нисък въглероден отпечатък, не отделят вредни съединения и позволяват рециклиране и влагане на вторични суровини. Тези характеристики ги определят като устойчиво и технологично оправдано решение за бъдещи енергийно ефективни и пожаробезопасни сгради.

#### IV. ЛИТЕРАТУРА:

[1] Директива 2010/31/ЕС на Европейския парламент и на Съвета относно енергийните характеристики на сградите. Официален вестник на ЕС, L 153, 18.06.2010, 13–35. [Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings. Official Journal of the EU, L 153, 18 June 2010, pp. 13–35.] Директива (ЕС) 2018/844 на Европейския парламент и на Съвета относно изменение на Директива 2010/31/ЕС и Директива 2012/27/ЕС относно енергийната ефективност. Официален вестник на ЕС, L 156, 19.06.2018, 75–91. [Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the EU, L 156, 19 June 2018, pp. 75–91.]

[2] Ali, A., Issa, A., & Elshaer, A. (2024). A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings. *Sustainability*, 16(20), 8782

[3] Mohamed, A. M., Kareem, A. M., Elshafie, A., & Youssef, A. (2024). Ultra-light foamed concrete mechanical properties and thermal insulation perspective: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 92, 109222.

[4] Korniejenko, K., Mikuła, J., Brudny, K., Aruova, L., Zhakanov, A., Jexembayeva, A., &

Zhaksylykova, L. (2025). A Review of Industrial By-Product Utilization and Future Pathways of Circular Economy: Geopolymers as Modern Materials for Sustainable Building. *Sustainability*, 17(10), 4536.

[5] Nasr, Y., El Zakhem, H., Hamami, A. E. A., El Bachawati, M., & Belarbi, R. (2023). Comprehensive Review of Innovative Materials for Sustainable Buildings' Energy Performance. *Energies*, 16(21), 7440.

[6] Egnatosyan, S., Hakobyan, D., & Sargsyan, S. (2022). Comparative analysis of the use of thermal insulation materials depending on climatic conditions and comfort microclimate supply systems. *Key Engineering Materials*, 906, 99–106.

[7] Vanderschelden, B., Van Den Bossche, N., & Steeman, M. (2021). Hygrothermal performance of bio-based insulation material in wood-frame walls exposed to unintended moisture sources. In *Proceedings of the 1st International Conference on Moisture in Buildings (ICMB 2021)*.

[8] Iqbal, M., Asif, M., Muneer, M., & Samad, A. (2022). Life-cycle assessment of building insulation materials: environmental and economic impact. *Journal of Cleaner Production*, 331, 129891.

[9] Ba, L., Trabelsi, A., Ngo, T. T., Pliya, P., El Abbassi, I., & Kane, C. S. E. (2025). Thermal Performance of Bio-Based Materials for Sustainable Building Insulation: A Numerical Study. *Fibers*, 13(5), 52.

[10] Fedorik, F., Zach, J., Lehto, M., Alitalo, S. (2021). Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials. *Energy and Buildings*, 253, 111528.

[11] Resende, D. M., Carvalho, J. M. F., Paiva, B. O., Peixoto, R. A. F., et al. (2024). Sustainable structural lightweight concrete with recycled polyethylene terephthalate waste aggregate. *Buildings*, 14(3), 609.

#### За контакти (Affiliation):

<sup>1</sup> ас. д-р инж. Невена Милева  
катедра „Топлотехника”  
Технически Университет – Варна  
e-mail: [n.mileva@tu-varna.bg](mailto:n.mileva@tu-varna.bg)

<sup>1</sup> Assist. prof. Eng. Nevena Mileva PhD  
Department „Thermal Engineering”  
Technical University of Varna

## СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ТОПЛОФИЗИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЛЕКИТЕ БЕТОНИ ЗА ЕНЕРГИЙНО ЕФЕКТИВНО И УСТОЙЧИВО СТРОИТЕЛСТВО

Невена Милева<sup>1</sup>, Крум Яназов

### COMPARATIVE ANALYSIS OF THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF LIGHTWEIGHT CONCRETES FOR ENERGY-EFFICIENT AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION

Nevena Mileva<sup>1</sup>, Krum Yanazov

**Резюме:** В публикацията е извършен сравнителен анализ на топлофизичните характеристики на различни видове леки бетони, използвани за енергийно ефективно и устойчиво строителство. Представени са зависимости между обемната плътност, топлопроводността и якостта на натиск, както и влиянието на микроструктурата върху термичната ефективност. Резултатите показват, че чрез оптимизиране на порестата структура и използване на подходящи добавки може да се постигне благоприятен баланс между изолационни и конструктивни свойства. Леките бетони се очертават като екологично и технологично устойчиво решение за модерното строителство.

**Ключови думи:** леки бетони, топлопроводност, обемна плътност, енергийна ефективност, устойчиво строителство

**Abstract:** The paper presents a comparative analysis of the thermophysical properties of various types of lightweight concrete applied in energy-efficient and sustainable construction. The relationships between bulk density, thermal conductivity, and compressive strength are examined, along with the effect of pore structure on thermal performance. The results demonstrate that optimizing porosity and admixture composition enables a favorable balance between insulation efficiency and mechanical strength. Lightweight concretes are identified as an environmentally and technologically sustainable solution for modern building applications.

**Keywords:** lightweight concrete, thermal conductivity, bulk density, energy efficiency, sustainable construction

### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

Строителният сектор е сред най-големите потребители на енергия и ресурси, като допринася за над една трета от въглеродните емисии и около 40% от крайното енергопотребление в Европейския съюз [1,2]. Последните промени в европейските директиви въвеждат по-строги изисквания за ограничаване на оперативните и вложените емисии на CO<sub>2</sub>, продължителния експлоатационен живот на материалите и тяхната роля в устойчивото обновяване на сградния фонд [1]. Това налага използването на материали с висока енергийна ефективност, добра пожаробезопасност, конструктивна стабилност и нисък въглероден отпечатък.

В този контекст леките бетони се утвърждават като особено значима група строителни материали. Притежават хибриден характер, комбинирайки функции на изолационни и конструктивни системи. Чрез контролирана пореста структура и подходящ избор на агрегати могат да се постигнат

намалена плътност и ниски стойности на коефициента на топлопроводност, което води до икономии на енергия и редуциране на общото тегло на ограждащите елементи [3,4]. Последните проучвания показват, че параметрите на микроструктурата – включително размер, морфология и свързаност на порите – определят както топлинния пренос, така и механичната якост, поведението при овлажняване и устойчивостта на цикли на замръзване-размразяване [3–5]. Материали с по-голям дял затворени пори демонстрират по-ниска топлопроводност и по-добро поведение при овлажняване, което е критично за климатични зони с чести температурни колебания [4].

Модифицирането на леките бетони чрез добавки като микросилика, фибри или наночастици осигурява по-равномерно разпределение на порите и по-добър контрол на влагоабсорбирането, като същевременно се подобряват якостните показатели и се редуцират микропукнатини, свързани с

термични натоварвания [5]. Комбинацията от микроструктурна стабилност и намалена топлопроводност позволява постигане на по-висока енергийна ефективност на сградните ограждащи конструкции без необходимост от допълнителни изолационни слоеве.

От екологична гледна точка леките бетони предлагат значителни предимства. Използването на вторични суровини, намаленото количество цимент и по-ниската енергийна интензивност на производството водят до съществено намаляване на вложените въглеродни емисии. Последните анализи на жизнения цикъл (LCA) показват, че определени видове леки бетони с рециклирани материали могат да понижат екологичния отпечатък на конструктивните елементи с 30–45% спрямо традиционните системи [6]. Това обуславя тяхната приложимост в рамките на кръговата икономика и политиките за постигане на въглеродна неутралност.

Настоящата статия представя сравнителен анализ на различни видове леки бетони чрез оценка на връзката между микроструктура, обемна плътност, топлофизични свойства и хигротермично поведение. Анализирани са основните механизми, които влияят върху топлопроводността, влагоабсорбиране и устойчивостта на материала, с цел формулиране на научно обосновани критерии за избор на леки бетони, подходящи за енергийно ефективни и устойчиви конструктивни решения.

## II. МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

### 2.1. Класификация на леките бетони

Според начина на получаване на порестата структура и вида на използваните агрегати, леките бетони се делят на четири основни групи (Таблица 1) [7,8]. Основната цел при разработването им е да се постигне ниска плътност при запазване на достатъчна механична устойчивост и дълготрайност. Тези материали се отличават със значително по-добра топлоизолация и по-нисък екологичен отпечатък в сравнение с обикновеният бетон.

Бетони с леки агрегати – това са материали, в които се използват естествени или изкуствени порести агрегати като експандирана глина, пемза, перлит, вермикулит или шлакови гранули. Те се

характеризират с плътност от 1400 до 2000 kg/m<sup>3</sup> и сравнително висока якост, което ги прави подходящи за носещи и фасадни елементи [7].

Таблица 1. Класификация на леки бетони

Вид бетон	Плътност (kg/m <sup>3</sup> )	Основни съставки	Област на приложение
С леки агрегати	1400–2000	Експандирана глина, пемза	Носещи и фасадни елементи
Клетъчен	400–800	Газобетон, пенобетон	Ограждащи панели, зидарии
Полистирол-бетон	300–1000	Цимент + EPS гранули	Изолации, запълващи слоеве
Геополимерен	800–1200	Летяща пепел, шлака, алкални активатори	Еко-бетони с висока трайност

Порьозността при клетъчните бетони се създава изкуствено чрез въздух или газообразуващи агенти в циментовата смес. Най-често използваните са газобетонът и пенобетонът - имат ниска обемна плътност (400–800 kg/m<sup>3</sup>), добра топлоизолация и акустични свойства. Основното им приложение е при изграждане на ограждащи стени и панели.

Полистиролбетон – представлява композитен материал, при който част от въздушните мехури се заменят с гранули от експандиран полистирен (EPS). В резултат на това се получава бетон с ниска плътност (300–1000 kg/m<sup>3</sup>) и добри топлоизолационни свойства. Използва се за подови замазки, покривни изолации и пълнежни конструкции, като осигурява добро съчетание между лекота и изолационни качества.

Геополимерните бетони използват алкални активирани материали (летяща пепел, шлака) и се отличават с висока химическа устойчивост и намалени емисии на въглероден диоксид (CO<sub>2</sub>) [8]. Влакнестите композити съдържат синтетични влакна, които повишават якостта и деформационната устойчивост.

### 2.2. Физико-механични и топлофизични свойства

Характеристиките на леките бетони (Таблица 2) зависят основно от структурата на порите, вида на агрегатите, химическия състав и използваното свързващо вещество [3,5]. Колкото по-висока е порьозността,

толкова по-ниска е плътността и топлопроводността, но също така се намалява и якостта на натиск. Поради това при разработването на леки бетони е необходим баланс между маса, якост и топлоизолационни свойства, който да осигурява едновременно конструктивна устойчивост и енергийна ефективност.

Таблица 2. Някои свойства на различните видове леки бетони

Вид бетон	$\sigma$ (МПа)	$\lambda$ (W/m·K)	$C_p$ (J/kg·K)
Лек агрегатен	20-40	0.45-0.70	900
Газобетон	4-10	0.12-0.25	950
Пенобетон	5-15	0.25-0.35	960
Полистирол-бетон	5-10	0.05-0.20	1200
Геополимерен	25-50	0.35-0.55	920

Плътността е основен показател за класификацията на леките бетони. Тя варира в зависимост от състава и технологията на производство. Порестата структура влияе не само върху топлинните свойства, но и върху поведението при овлажняване, замръзване и механични натоварвания. Затворените пори подобряват изолацията и устойчивостта на замръзване, докато отворените увеличават паропропускливостта, но водят до по-висока влагоабсорбция [4,5].

Якостта ( $\sigma$ ) на натиск е основен конструктивен параметър и е свързана с плътността и вида на използваните въздушни смеси. За агрегатните бетони якостта варира между 15 и 40 МПа, за клетъчните – между 2 и 10 МПа, а за полистиролбетоните – в границите 5–10 МПа [7]. Геополимерните леки бетони, благодарение на своята минерална структура, могат да достигнат якост над 40 МПа при плътност под 1200 kg/m<sup>3</sup> [8].

Коефициентът на топлопроводност е основен критерий за оценка на термичната ефективност на леките бетони. Той показва колко топлина преминава през единица дебелина на материала и варира от 0.05 до 0.7 W/m·K, докато при обикновения бетон е около 1.8 W/m·K [3,7]. Най-ниски стойности се наблюдават при клетъчните и полистиролните бетони, заради на наличието на въздушни пори и полимерни включвания.

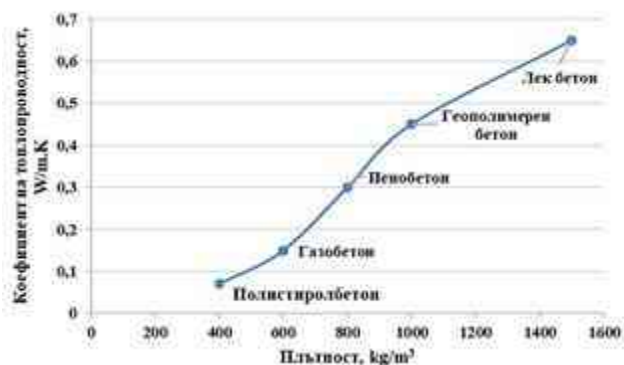
Специфичният топлинен капацитет на леките бетони варира между 900 и 1200 J/kg·K, което позволява натрупване и отдаване на топлина, подпомагайки стабилизацията на вътрешния микроклимат в сградите и намалявайки амплитудите на дневните температурни колебания [5].

Хигроскопичните свойства също имат влияние върху експлоатационните параметри на лекия бетон. Материалите с висока отворена порьозност, като пенобетон, могат да абсорбират големи количества влага, което повишава коефициента на топлопроводност временно и намалява изолационната ефективност. Геополимерните и влакнестите бетони имат по-ниска влагопропускливост и устойчивост при цикли на замръзване и размразяване, заради по-плътната си структура [4,5].

### 2.3. Анализ на резултатите

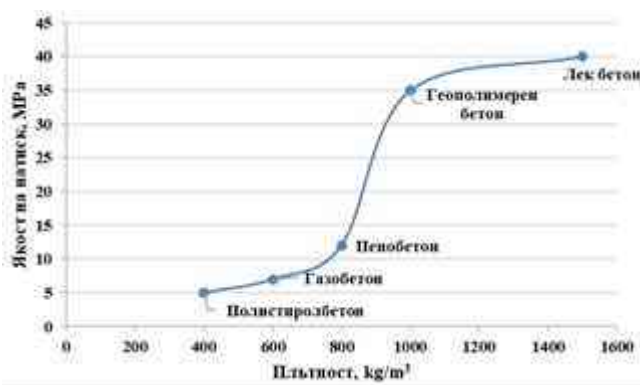
Анализът на различните групи леки бетони показва, че техните свойства са в тясна зависимост от структурата на материала и начина на производство. Зависимостите между плътност, топлопроводност и якост определят приложимостта на всеки тип бетон за конкретни строителни цели. Основната закономерност се състои в това, че с намаляването на плътността се понижава якостта, но значително се подобряват топлоизолационните качества [3,7].

На Фиг.1 е представена зависимостта между плътност и топлопроводност за различните видове леки бетони. Наблюдава се ясно изразена тенденция към увеличаване на топлопроводността с повишаване на плътността, което потвърждава колко е важна порестата структура за енергийните характеристики [3,5]. Материалите с по-ниска плътност (газобетон, полистиролбетон) имат многократно по-добра изолационна способност и по-ниска механична устойчивост.



Фиг. 1. Връзка между плътността и топлопроводността на различни видове леки бетони

На Фиг.2 е показано съотношението между якост и плътност. Клетъчните и полистиролните бетони са разположени в зоната на ниска якост и ниска плътност. Тази зависимост потвърждава необходимостта от комбиниран подход при избора на материал – в зависимост от това дали се цели да се постигне конструктивна здравина или енергийна ефективност [5,7].



Фиг. 2. Зависимост между плътност и якост на натиск при различни видове леки бетони

Освен физико-механичните показатели, анализът показва и различия в екологичните и енергийните параметри. Производството на лек агрегатен и геополимерен бетон е свързано с по-ниска енергийна консумация и по-малко въглеродни емисии спрямо традиционния бетон [6,8]. Клетъчните и полистиролните бетони допринасят за по-ниски експлоатационни разходи поради ниската си топлопроводност.

Изборът на конкретен тип лек бетон следва да отчита механичните и топлофизичните показатели, а също и цялостното въздействие върху жизнения цикъл на сградата [4,6].

## 2.4. Микроструктурни механизми и влияние върху топлопроводността

Микроструктурата на леките бетони представлява система, съставена от свързваща матрица, минерални или полимерни агрегати и въздушни пори, разположени в различна степен на свързаност. Последните изследвания върху порести строителни композити показват, че именно разпределението, формата и връзката на порите имат водещо влияние върху топлопреноса, докато ефектът на плътността е вторичен [3,5]. Порите с малък диаметър (под 0.1 mm) ограничават топлопреминаването поради доминиращ топлообмен чрез неподвижен въздух, докато по-големите, свързани пори увеличават ефективната топлопроводност чрез конвективни процеси [3,7].

Експериментални данни за клетъчни и полистиролни бетони, показват, че при увеличаване на дела на затворените клетки с над 15% се постига намаляване на коефициента на топлопроводност с 10–18%, без да се компрометира механичната устойчивост [5,7]. Това подчертава необходимостта от контролиране на порите в структура с цел подобряване термофизичните свойства на лекия бетон. Микроструктурните наблюдения на композити с наномодификация показват по-равномерно разпределение на порите, повишена структурна стабилност и ниска чувствителност на навлажняване при реални климатични въздействия [5,8].

## III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Повишаването на енергийната ефективност в сградния сектор е пряко свързано с избора на материали, които запазват топлофизичните си характеристики при реални климатични въздействия. Леките бетони демонстрират значителен потенциал като неорганични композити, съчетаващи ниска топлопроводност, достатъчна механична устойчивост и благоприятно хигротермично поведение. Техният порест строеж, контролирана плътност и висока паропропускливост осигуряват устойчиво поведение при променлива влажност и температурни колебания, като рискът от

конденз и микробиологично увреждане се редуцира.

От екологична гледна точка леките бетони предлагат предимства спрямо полимерните изолации, тъй като не съдържат летливи органични съединения, подлежат на рециклиране и позволяват използването на вторични суровини, което намалява въглеродния отпечатък и подкрепя принципите на кръговата икономика. Новите тенденции в разработването им, включително оптимизация на пореста структура и прилагане на функционални добавки, показват възможност за допълнително подобряване на изолационните характеристики без компромис с механичните свойства.

Въз основа на техните физико-механични, термофизични и екологични характеристики може да се заключи, че леките бетони представляват устойчиво и технологично обосновано решение за бъдещи енергийно ефективни и нисковъглеродни строителни системи.

#### IV. ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Директива (ЕС) 2024/1275 на Европейския парламент и на Съвета от 24 април 2024 година относно енергийните характеристики на сградите [Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (recast)], 2024.
- [2] International Energy Agency (IEA). Global Status Report for Buildings and Construction 2023.
- [3] Janssen, H., & Van De Walle, W. The impact of pore structure parameters on the thermal conductivity of porous building blocks. *Construction and Building Materials*, 324, 126681, 2022.
- [4] Bendekhis, M., Fezzioui, N., Benyamine, M., Kaid, N., Largueche, S., Bayram, M., Menni, Y., & Ozer, S. Hygrothermal behavior at the junction of cement mortar and biobased materials: Finite element study of hempcrete, date palm concrete, and clay brick. *Thermal Science*, 26(6A), 4601–4613, 2022.
- [5] Shill, S.K.; Garcez, E.O.; Al-Deen, S. Influence of Foam Content and Concentration on the Physical and Mechanical Properties of Foam Concrete. *Applied Sciences*, 14(18), 8385, 2024.
- [6] Marsh, A., Velenturf, A., & Bernal, S. A. Circular economy strategies for concrete: Implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132486, 2022.
- [7] Agrawal, Y., Gupta, T., Sharma, R. K., Siddique, S., & Mehta, A. A Comprehensive Review on the Performance of Structural Lightweight Aggregate Concrete for Sustainable Construction. *Construction Materials*, 1(1), 39–62, 2021.
- [8] Ding, Y.; Zhang, W.; Thomas, B.S. Lightweight Geopolymer Concrete: Materials, Mix Design and Performance. *Materials*, 15(22), 7852, 2022.

#### За контакти (Affiliation):

<sup>1</sup> ас. д-р инж. Невена Милева  
катедра „Топлотехника”  
Технически Университет – Варна  
e-mail: [n.mileva@tu-varna.bg](mailto:n.mileva@tu-varna.bg)

<sup>1</sup> Assist. prof. Eng. Nevena Mileva PhD  
Department „Thermal Engineering”  
Technical University of Varna

## СРАВНЕНИЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ И ПОТЕНЦИАЛА НА ВЯТЪРА В ЛОКАЦИИ ОТ СЕВЕРОИЗТОЧНА БЪЛГАРИЯ С ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРОДУКТА WINDPRO

Дамянка Стоянова Димитрова

### COMPARISON OF WIND PARAMETERS AND POTENTIAL IN LOCATIONS IN NORTHEASTERN BULGARIA USING THE WINDPRO PRODUCT

Damyanka Stoyanova Dimitrova

**Резюме:** Вятърът е чист, безплатен и неизчерпаем източник на енергия. За оценка на ветропотенциала на даден район се провеждат поне едногодишни измервания на параметрите му. По проект на ТУ - Варна са монтирани метеорологични мачти в Северна България. Направено е сравнение на измерените параметри на вятъра и на потенциала му. Приложена е една от най-известните и точни програми - WindPRO.

**Ключови думи:** Вятър, Скорост на вятъра, Параметри на вятъра, Потенциал на вятъра, WindPRO.

**Abstract:** The wind is a clean, free and inexhaustible source of energy. To assess the wind potential of a given region, at least one-year measurements of its parameters are carried out. According to a project of TU - Varna, meteorological masts have been installed in Northern Bulgaria. A comparison of the measured wind parameters and its potential has been made. One of the most famous and accurate programs - WindPRO - has been applied.

**Keywords:** Wind, Wind speed, Wind parameters, Wind potential, WindPRO.

#### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

В последните десетилетия нарасна сериозно интересът към ВЕИ и в частност към възможностите и усвояването на вятърната енергия. Бизнесът и учените насочват внимание към ветровите параметри и потенциал. По проект на ТУ - Варна в Северна България са разположени 15 метеорологични мачти. За образователни цели е предвидена и една 34m мачта за района на университета.

#### II. ИЗЛОЖЕНИЕ:

##### II.1. Основни параметри на вятъра.

Основните параметри на ветровата енергия са скорост и посока на вятъра, както и температура на околната среда. Енергийният потенциал на дадено място се определя в резултат на системните им измервания /за минимум 1 година/. Спазва се утвърденият и прилаган в цял свят стандарт IEC 61400-12.

Определянето на параметрите на вятъра се осъществява с помощта на сензори, монтирани на различни височини върху метеорологична мачта, като отчитането е на 1 или 2s. Средните стойности се определят на

10min. Стандартните отклонения на скоростта и посоката на вятъра са съществени като индикатори на турбулентността и атмосферната стабилност. Максималните и минималните стойности на скоростта и температурата трябва да се определят най-малко веднъж дневно. Посоката, съответстваща на максималната /минималната/ скорост на вятъра, трябва да бъде регистрирана [1].

##### II.2. Ветрови потенциал.

Ветровият потенциал може да бъде разгледан като:

- **разполагаема, теоретична ветрова мощност /мощност на течението през ветротурбина/,  $W$  [2];**

- **ветрови ресурси,  $W/m^2$ ;**

Ветровите ресурси се намират чрез интегриране на диференциалната функция за разпределение на Вейбъл в диапазона на работните скорости. Разглежда се ветротурбина с условна площ на ветроколелото  $1 m^2$  [3], [4].

- **потенциални запаси,  $Wh/m^2$ ;**

Има се предвид единица условна площ на ветроколелото за период от време [5].

**- ветрови енергиен потенциал, Wh;**

Представява условна производителност на ветроагрегата при следните условия: период от време - 1 г.; условен диаметър на ветроагрегата  $D = 1 \text{ m}$ ; мощностен коефициент  $C_p = 0,3$ ; механичен КПД на ветроагрегата  $\eta_m = 1$  [6].

**- технически /достъпен/ ветрови потенциал, TWh.**

Енергийният ветропотенциал е свързан с три разновидности ресурси. *Природните /теоретичните, тоталните, потенциалните/ ресурси* включват кинетичната енергия на въздушните течения. Енергийните ресурси на вятъра са определени за скорости в интервала от 0 до 40 m/s. *Техническият /достъпният/ потенциал* представлява ресурсите, подходящи за използване при съвременно ниво на развитие на техническите средства и съблюдаване на екологичните норми. *Икономическите ресурси /потенциал/* са част от техническия потенциал, за която е икономически оправдана трансформацията в традиционен вид енергия при съпоставяне с обикновените енергоресурси. [7], [8], [9], [10].

В метеорологичните станции скоростта на вятъра се мери на височина 10 m, но хъбната височина обикновено е няколко пъти по-голяма от нея. По проекта на ТУ – Варна са проведени измервания на 10 m, 40 m, 50 m и 60 m.

**II.3. Описание на оборудването към метеорологичната мачта.**

- Шест чашковидни анемометри, NGR #40, разположени на височини: два на 60 m, два на 50 m, един на 40 m и един на 10 m – за измерване на скоростта на вятъра.
- Два ветропоказателя, NGR #200P, разположени на височини 60 m и 50 m.
- Температурен сензор, NRG #110S, разположен на височина 3 m.
- Дата логер, NRG Symphonie Plus с 5 аналогови и 10 цифрови входа, снабден с iPack модул за безжично предаване на данни посредством клетъчна мобилна интернет връзка и две акумулаторни батерии със захранващ слънчев модул /10W/.

Измерванията се записват чрез дата логера, като интервалът на отчитане е 2 s [11]. Суровите данни се изтеглят от електронната поща на мачтата. После се обработват в програмния продукт Symphonie Data Retriever.

Файловете се експортират като текстови за работа в продукта WindPRO.

**II.4. Приложение на софтуерния продукт WindPRO.**

Приложена е една от най-известните и точни програми WindPRO, версия 2.6.

**II.4.1. Техническа спецификация и резултати от измерванията за мачта с инвентарен номер 6052 в периода от 13.01.2010 г. до 13.01.2011 г.**

*1. Техническа спецификация.*

**• Мачта тип: NRG Now 60 m**

Табл. 4.1.1. Данни за мачта 6052 – 1

Инвентарен номер	Номер даталогер
6052	01314

Геодезични координати	Населено място
N043°46.980'	Е027°07.281'
	с. Раздел

Табл. 4.1.2. Данни за мачта 6052 - 2

Посока място	Община	Област
юг, 100 m	Дулово	Силистра

Експлоатационен срок	SIM карта
13.01.2010 г. - 13.01.2011 г.	0884011521

Анемометрите и сензорът за слънчева радиация /пиранометър/ са калибрирани [11].

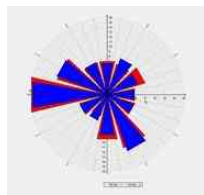
*2. Ветрови характеристики и температура на въздуха:*

WindPRO генерира графики за скоростта и турбулентната интензивност на вятъра, разпределени според посоките за четирите измервателни височини.



Фиг. 4.1.1. Скорост и турбулентност на вятъра по посока /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6052, m/s

За мачта 6052 най-високите скорости на вятъра са измерени на височина 60 m. Отчетени са в западна /W/, южна /S/ и югоизточна /SSE/ посока, както и най-ниските турбулентности на вятъра /фиг. 4.1.1/.



Фиг. 4.1.2. Роза на вятъра /60 m и 50 m/ за мачта 6052, %

Съгласно розата на вятъра преобладаващата посока и на двете измервателни височини е запад /W/, юг-югоизток /SSE/ и запад-северозапад /WNW/ - фиг. 4.1.2. Западните ветрове /W/ са с най-значителна повтораемост – 16,178% на височина 60 m /канал 1/.

С най-големи средногодишни скорости се отличават ветровете от юг-югоизток /SSE/ на височина 60 m - 7,238 m/s /канал 1/ и 7,357 m/s /канал 2/.

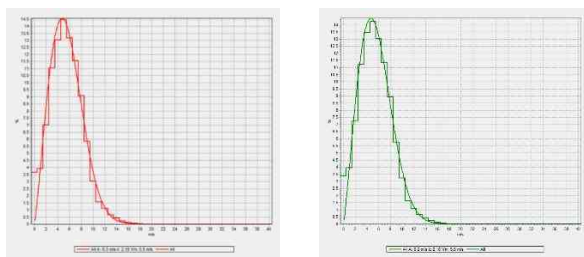
Най-често духат ветрове със скорост 2,50 - 8,49 m/s. Посоките са главно запад /W/, запад-северозапад /WNW/, север-северозапад /NNW/ и юг-югоизток /SSE/.

В табл. 4.1.3 са представени честотите на ветровете от диапазона 2,50 - 8,49 m/s като част от всички записи /52200/. С най-голяма честота са ветровете от градациите: 2,50 - 3,49 m/s; 3,50 - 4,49 m/s; 4,50 - 5,49 m/s; 5,50 - 6,49 m/s за всички измервателни височини. Тук влизат и градациите 6,50 - 7,49 m/s /за 60 m и 50 m – 3/ и 1,50 - 2,49 m/s /за 10 m/.

Таблица 4.1.3. Честота на скоростите от градацията 2,50 - 8,49 m/s за мачта 6052, %

Мачта 6052	60 m - 1	60 m - 2	50 m - 3
Честота на скоростите от градацията 2,50 - 8,49 m/s, %	72,34	72,22	74,97

50 m - 4	40 m - 5	10 m - 6
74,87	75,62	65,97



Фиг. 4.1.3. Честотно и Weibull разпределение на височина 60 m за мачта 6052

При Вейбъл разпределението на скоростта на вятъра /фиг. 4.1.3/ параметърът на мащаба  $A/c$  е в диапазона 4,3 - 6,3 m/s, а параметърът на формата  $k$  се движи в интервала 1,90 - 2,19, както е показано в табл. 4.1.4. Ниските стойности на двата параметъра съответстват на най-ниската измервателна височина – 10 m. Високите стойности са при височина 60 m /канал 1/, а при параметъра  $A$  това означава и по-висока средна стойност на скоростта на вятъра.

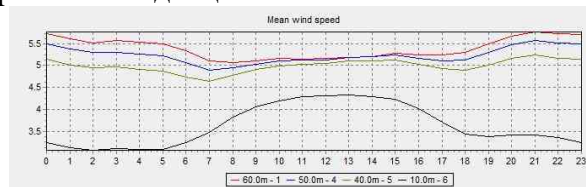
Определена е също плътността на ветровата мощност /ветропотенциалът/ за всяка измервателна височина и е представена в табл. 4.1.4.

Таблица 4.1.4. Плътност на ветровата мощност и параметри на разпределението на Вейбъл за мачта 6052

Мачта 6052	60 m - 1	60 m - 2	50 m - 3
Плътност на ветровата мощност, W/m <sup>2</sup>	183,2	184,3	166,7
Параметър на формата $k$	2,19	2,16	2,18
Параметър на мащаба $A/c$ , m/s	6,3	6,2	6,1

50 m - 4	40 m - 5	10 m - 6
164,5	145,4	66,4
2,17	2,13	1,90
6,0	5,8	4,3

Най-високи средни дневни стойности на скоростта на вятъра са измерени на височина 60 m /канал 1/ във вечерните и нощните часове, а най-ниски са сутрин /8 ч./ и поддържат стойности, малко над дневния минимум през светлата част от денонощието /фиг. 4.1.4/. На височина 10 m се забелязва обратната тенденция.

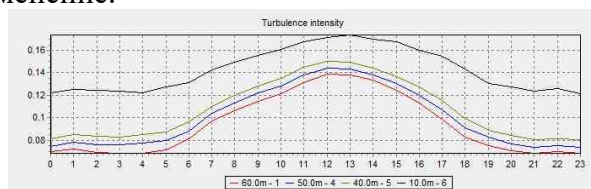


Фиг. 4.1.4. Средни дневни стойности на скоростта на вятъра /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6052, m/s

Средните дневни стойности на посоката на вятъра са с почти пълно съвпадение на двете измервателни височини – 60 m /канал 1/ и 50 m /канал 13/. До 15 - 16 ч. е плавно изменението на посоката, почвайки от полунощ – от запад-югозапад през юг до

изток. По-бърза е промяната във вечерните часове – от изток през север до запад-югозапад.

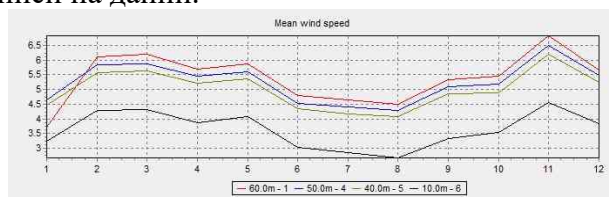
Според фиг. 4.1.5 средните дневни стойности на турбулентната интензивност са с най-големи стойности по обяд и през околообедните часове. Кривите им са подчинени на една и съща тенденция на изменение.



**Фиг. 4.1.5.** Средни дневни стойности на турбулентността на вятъра /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6052/s

Температурата на въздуха е най-висока през юли и август, а най-ниска през януари. Представлява интерес с оглед влиянието ѝ върху изменението на плътността, а оттам и върху мощността на въздушното течение. Минималната средномесечна стойност е измерена в началото на януари и е  $-5^{\circ}\text{C}$ , а в началото на август е отчетен максимумът –  $25^{\circ}\text{C}$ .

Най-високите скорости на вятъра са отчетени през зимния сезон с месечни пикове през февруари, март и ноември, 2010 г. на височина 60 m /канал 1/ /фиг. 4.1.6/. Най-голямата средномесечна стойност за едногодишния период е  $6,82\text{ m/s}$  през ноември, 2010 г. Средногодишната скорост за височина 60 m е  $5,39\text{ m/s}$  /канал 1 и 2/ на база всички записи на данни.

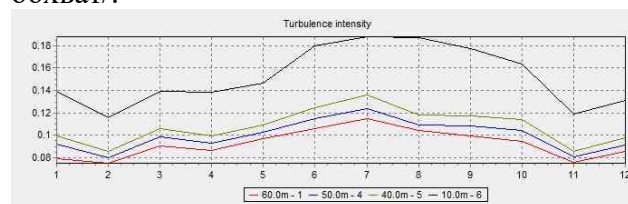


**Фиг. 4.1.6.** Средни месечни стойности на скоростта на вятъра /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6052, m

Средните месечни стойности на посоката на вятъра имат почти пълно съвпадение през цялата година на височина 60 m /канал 1/ и 50 m /канал 13/. В началото на годината вятърът е източен и постепенно става юг-югозападен през първото тримесечие. Следва преминаване към запад-северозападна посока, за да се достигне до юг-югоизток през лятото.

Следва изток, север-северозапад и юг-югозапад в края на годината.

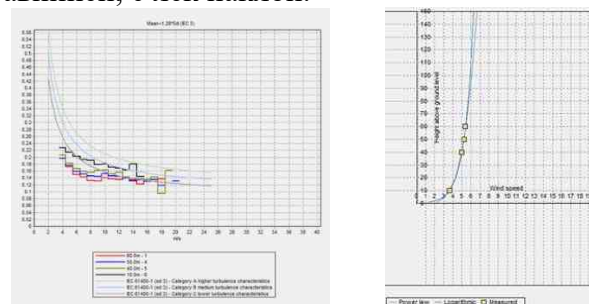
През зимата се наблюдават минималните стойности на турбулентността – през февруари и ноември, както е видно на фиг. 4.1.7. Най-голяма турбулентност е измерена през лятото /през периода от юни до септември/. През юни, 2010 г. средномесечната турбулентност е  $17,96\%$ , през юли, 2010 г. –  $18,77\%$ , през август, 2010 г. –  $18,66\%$ , а през септември, 2010 г. –  $17,72\%$  на височина 10 m /на база записите без дублирани и извън обхват/.



**Фиг. 4.1.7.** Средни месечни стойности на турбулентността на вятъра /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6052

Турбулентността по стандарта IEC 61400-1, 3-то издание е в стандартните стойности, както е представена на фиг. 4.1.8.

Скоростният профил на вятъра е на база средните стойности на едновременните данни за всички височини. В случая теренът е равнинен, с лек наклон.



**Фиг. 4.1.8.** Ниво на турбулентността и скоростен профил на вятъра от за мачта 6052 , m/s

**Ц.4.2. Техническа спецификация и резултати от измерванията за мачта с инвентарен номер 6054 в периода от 15.12.2009 г. до 15.12.2010 г.**

*1. Техническа спецификация.*

• Мачта тип: **NRG Now 60 m**

Табл. 4.2.1. Данни за мачта 6054 - 1

Инвентарен номер	Номер даталогер
6054	01356

<b>Геодезични</b>	<b>координати</b>	<b>Населено място</b>
N043°27.523'	E026°40.104'	с. Веселина

Табл. 4.2.2. Данни за мачта 6054 - 2

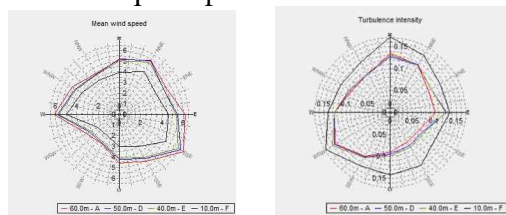
<b>Посока място</b>	<b>Община</b>	<b>Област</b>
запад, 650 m	Лозница	Разград

<b>Експлоатационен срок</b>	<b>SIM карта</b>
15.12.2009 г. - 15.12.2010 г.	0884015300

Анемометрите и сензорът за слънчева радиация /пиранометър/ са калибрирани [11].

2. **Ветрови характеристики и температура на въздуха:**

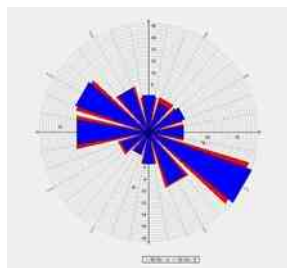
И за мачта 6054 най-високите скорости на вятъра са отчетени на височина 60 m. В посока изток-югоизток /ESE/ са измерени най-високите скорости и най-ниските турбулентности на вятъра. В разпределението по посока турбулентната интензивност намалява с повишаване на скоростта на вятъра във височина поради тревистия и равнинен терен /фиг. 4.2.1/.



Фиг. 4.2.1. Скорост и турбулентност на вятъра по посока /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6054, m/s

Според розата на вятъра преобладаващата посока и на двете височини е от изток-югоизток /ESE/, запад /W/ и запад-северозапад /WNW/. Ветровете от изток-югоизток /ESE/ са с най-значителна повтораемост –17,734% на 60 m /канал 1 и 2/, а на 50 m - 18, 623% /канал 3 и 13/.

С най-големи средногодишни скорости са ветровете от изток-югоизток /ESE/ на височина 60 m – 7, 131 m/s /канал 1/ и 7,025 m/s /канал 2/.



Фиг. 4.2.2. Роза на вятъра /60 m и 50 m/ за мачта 6054, %

Най-често духат ветрове със скорост 1,50 - 7,49 m/s на всички измервателни височини. Посоките са главно запад-северозапад /WNW/, изток-югоизток /ESE/, юг-югоизток /SSE/ и север-северозапад /NNW/ за височина 60 m, 50 m и 10 m. На 60 m се проявяват силно и западните ветрове /W/.

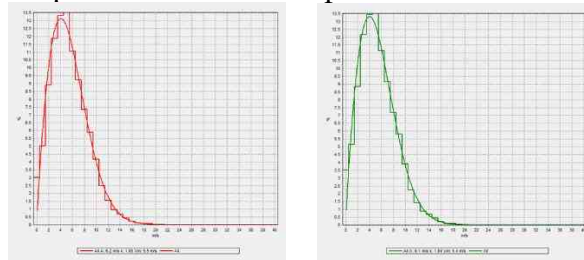
В табл. 4.2.3 са представени честотите на ветровете от диапазона 1,50 - 7,49 m/s като част от всички записи /52595/. С най-голяма честота са ветровете от градациите: 2,50 - 3,49 m/s; 3,50 - 4,49 m/s; 4,50 - 5,49 m/s; 5,50 - 6,49 m/s за всички измервателни височини, както и градацията 1,50 - 2,49 m/s /за 10 m/.

Таблица 4.2.3. Честота на скоростите от градацията 1,50 - 7,49 m/s за мачта 6054, %

<b>Мачта 6054</b>	<b>60 m - A</b>	<b>60 m - B</b>
Честота на скоростите от градацията 1,50 - 7,49 m/s, %	67,91	68,28

<b>50 m - C</b>	<b>50 m - D</b>	<b>40 m - E</b>	<b>10 m - F</b>
68,27	68,57	70,03	71,89

При съпоставянето на честотата на скоростта на вятъра спрямо разпределението на Вейбъл резултатите са около или над стандартните стойности - фиг. 4.2.3.



Фиг. 4.2.3. Честотно и Weibull разпределение за височина 60 m за мачта 6054

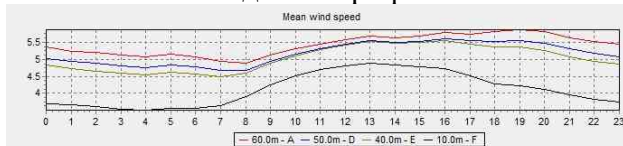
Параметърът на мащаба *A* /с/ от разпределението на Вейбъл е в диапазона 4,8 - 6,2 m/s, а параметърът на формата *k* се движи в интервала 1,69 - 1,85. Ветропотенциалът /плътността на ветровата мощност/ варира от 110,2 W/m<sup>2</sup> до 214,0 W/m<sup>2</sup> и е отразен в таблица 4.2.4 заедно с параметрите на мащаба и формата.

Таблица 4.2.4. Плътност на ветровата мощност и параметри на разпределението на Вейбъл за мачта 6054

<b>Мачта 6054</b>	<b>60 m - A</b>	<b>60 m - B</b>	<b>50 m - C</b>
Плътност на ветровата мощност, W/m <sup>2</sup>	214,0	205,1	194,8
Параметър формата <i>k</i>	1,85	1,84	1,81
Параметър на мащаба <i>A</i> /с/, m/s	6,2	6,1	6,0

50 m - D	40 m - E	10 m - F
191,3	177,3	110,2
1,81	1,79	1,69
5,9	5,8	4,8

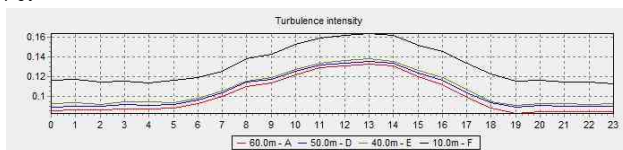
На всички измервателни височини скоростта на вятъра е най-ниска през нощта, а най-висока - по обяд и вечер /фиг. 4.2.4/.



Фиг. 4.2.4. Средни дневни стойности на скоростта на вятъра /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6054, m/

Графиката на средните дневни стойности на посоката на вятъра показва изменение на посоката от запад-северозапад до юг-югозапад в 6 - 7 ч. на височина 60 m /канал 1/, след което се достига изток към 14 ч. След интервала 14 - 15 ч. посоката плавно се изменя от изток до север-северозапад. Налице е съвпадение на посоките в по-голямата част от денонощието за двете измервателни височини – 60 m и 50 m.

На четирите измервателни височини средните дневни стойности на турбулентността показват една и съща тенденция /фиг. 4.2.5/. През обедните часове е най-висока стойността й - на височина 10 m - над 16%, а най-малка - на височина 60 m – над 13%.

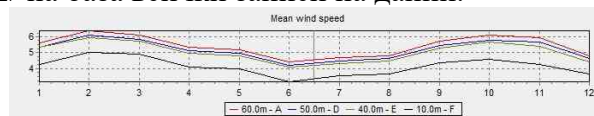


Фиг. 4.2.5. Средни дневни стойности на турбулентността на вятъра /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6054

Температурата на въздуха се покачва от януари до август, спада до октомври, отново леко расте и сериозно намалява през последните месеци на годината. Минималната средномесечна температура е в началото на годината – -2<sup>0</sup>C. Повишението е най-голямо в началото на август – до около 25<sup>0</sup>C.

През различните месеци от годината изменението на скоростта на вятъра за отделните измервателни височини следва едно и също развитие /фиг. 4.2.6/. Най-високите скорости са отчетени през зимния

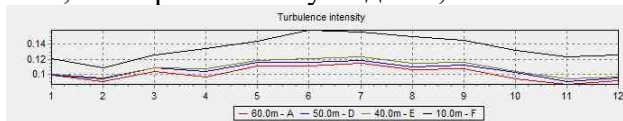
сезон с месечни пикове през февруари и октомври, 2010 г. Средногодишната скорост е 5,43 m/s и 5,34 m/s за височина 60 m /канал 1 и 2/ на база всички записи на данни.



Фиг. 4.2.6. Средни месечни стойности на скоростта на вятъра /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6054, m/s

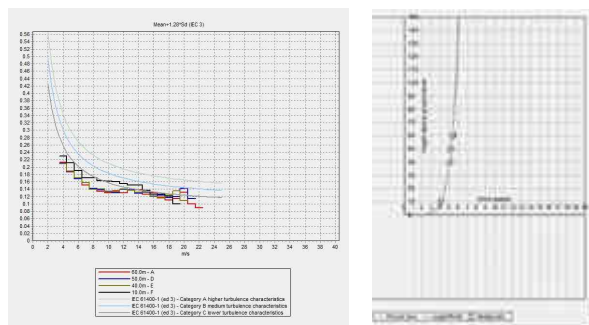
Годината започва с ветрове от север-североизток, преминава през север и запад, за да стане от юг-югозапад в началото на март. След това през запад посоката вече е север в началото на април. До юни ветровете са с променяща се посока – през запад до юг. Южните ветрове доминират през юни, но през юли посоката се изменя до изток, през запад и север. От август до края на годината отново се изменя разглежданият параметър - през север и запад до юг-югозапад за височина 60 m, но за 50 m е до изток.

На фиг. 4.2.7 са отразени средномесечните стойности на турбулентната интензивност за мачта 6054. Кривите на изменението на този ветрови параметър са с приблизително един и същ характер. През зимата са отчетени минималните стойности на турбулентността. За месец декември, 2009 г. това е 8% на ниво 60 m /канал 2/. Най-ниска е турбулентната интензивност на височина 60 m, а най-висока - на височина 10 m: 15,87% за юни, 2010 г. И на тази локация през лятото е отчетена най-голяма турбулентност – от май до септември – от 14,37% през максимума до 14,55%.



Фиг. 4.2.7. Средни месечни стойности на турбулентността на вятъра /60 m, 50 m, 40 m, 10 m/ за мачта 6054

Турбулентността по стандарта IEC 61400-1, 3-то издание попада в стандартните стойности, както е представено на фиг. 4.2.8. Скоростният профил на вятъра е на база средните стойности на едновременните данни за всички височини. Теренът, на който е разположена мачтата, е равнинен.



Фиг. 4.2.8. Ниво на турбулентността и скоростен профил на вятъра за мачта 6054, m/s

### II.5. Корелационен анализ на получените чрез продукта WindPRO стойности на ветропотенциала.

При направения корелационен анализ са включени 3 мачти: с. Раздел /6052/, с. Веселина /6054/ и гр. Две Могили /6057/ в североизточната част на страната. Използват се множествени корелационни коефициенти на Пирсън  $r$  /коефициенти на обикновена линейна корелация/.

Полученият коефициент на корелация между ветропотенциала на мачта 6054 и ветропотенциала на мачта 6052 е 0,99631, което съответства на много силна връзка между потенциалите на двете мачти [12].

### **III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:**

Мачти 6052 и 6054, намиращи се в Силистренска и Разградска области, не са разположени в планинските области и северното крайбрежие, където е най-висок ветроенергийният потенциал. Мачта 6052 - до с. Раздел, общ. Дулово, обл. Силистра - е с по-голяма средномесечна скорост 6,82 m/s, през ноември, 2010 г. при височина 60 m. Мачта 6054 - до с. Веселина, общ. Лозница, обл. Разград - е със средномесечна скорост скорост 6,38 m/s, през февруари, 2010 г. и през октомври, 2010 г. - 6,11 m/s на височина 60 m /канал 1/. Така местата и на двете мачти са със най-значителен ветрови потенциал през зимата, а с най-нисък - през лятото.

С по-голяма средногодишна скорост на височина 60 m се представя районът на мачта 6054 - 5,43 m/s, следван от тези на мачта 6052 - 5,39 m/s.

Ветропотенциалът /плътността на ветровата мощност/ е по-висок при мачта 6054 /110 – 214 W/m<sup>2</sup> за височина 10 m, 40 m, 50 m и 60 m/. При мачта 6052 стойностите са

по-ниски - 66,4 – 183,2 W/m<sup>2</sup>. Получените резултати показват, че разгледаните локации са от зоната със среден ветрови потенциал - зона Б /В/ [13].

Направеният корелационен анализ между изчислените чрез софтуера WindPRO стойности на ветровите потенциали показва много силна положителна корелация между тях.

### **IV. ЛИТЕРАТУРА:**

[1] Проект №Д002-48/10.12.2008 на ТУ-Варна на тема: „Развитие на специализирана научна инфраструктура за изследване потенциала на слънцето и вятъра“, Фонд „Научни изследвания“ на MOMH. [Proekt №Д002-48/10.12.2008 на TU-Varna na tema: „Razvitiie na spetsializirana nauchna infrastruktura za izsledvane potentsiala na slantseto i vyatura“, Fond “Nauchni izsledvaniya” na MOMN] [http://www.tu-varna.bg/tuvarnapren/index.php?option=com\\_content&task=view&id=20&Itemid=34](http://www.tu-varna.bg/tuvarnapren/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=34)

[2] Йонова, Детелина, “Екологосъобразни възобновяеми енергийни източници”, ТУ - Варна, Варна, 2010, с. 120. ISBN:978-954-20-0476-9. [Yonova, D. Ekologosobrazni vazobnovyaemi energiyani iztochnitsi, TU – Varna, Varna, 2010, s. 120]

[3] Годев, Никола, Ем. Георгиева, „Съвременни аспекти на проблема за използване на ветровата енергия - състояние и перспективи у нас“, Българско геофизично списание, т. 8, №4, София, 1982. [Godev, Nikola, Em. Georgieva, “Savremenni aspekti na problema za izpolzuvane na vetrovata energiya – sastoyanie i perspektivi u nas”, Bulgarsko geofizichno spisanie, t. 8, №4, Sofia, 1982]

[4] Шакир, Ердаль, „Ветровете в България“, Презентация. Достъпна от: <https://materiali.org/download/813361> [Shakir, Erdal, “Vetrovete v Bulgaria”, Prezentatsiya. Dostupna ot <https://materiali.org/download/813361>]

[5] Иванов, Петър, „Оценка на ресурсите на вятъра за производство на електроенергия в България“, ”Проблеми на географията”, №4, София, 1984. [Ivanov, Petar, “Otsenka na resursite na vyatura za proizvodstvo na elektroenergiya v Bulgaria”, “Problemi na geografiyata” №4, Sofia, 1984]

[6] Атанасова, Стаменка Минчева, Ал. Киров, “Основни параметри, определящи производителността на ветроагрегатите”, Сборник доклади от четвърта научно-приложна конференция при ВСУ „Черноризец Храбър”, ИК „Геа Принт”, Варна, 2007. с. 422 - 428. [Atanasova, Stamenka Mincheva, Al. Kirov, "Osnovni parametri, opredelyashti proizvoditelnosta na vetroagregatite", Sbornik dokladi ot chetvarta nauchno-prilozhna konferentsiya pri VSU "Chernorizets Hrabar", IK "Gea Print", Varna, 2007, s. 422 - 428]

[7] Пазвантов, Тодор, „ВЕИ, I част, Ветро-електро задвижвания и автоматизация“, ТУ - Варна, Варна, с. 17. ISBN - 10: 954-200357-9. ISBN - 13: 978-954-20-0357-1. [Pazvantov, Todor, "VEI, I chast, Vetro-elektro zadvizhaniya i avtomatizatsiya, TU - Varna, Varna, s. 17]

[8] Безруких, Павел Павлович, „Ветроенергетика“, Справочное и методическое пособие, ИД "Энергия", Москва, 2010. 320 с. ISBN 978-5-98908-032-8. [Bezrukih, Pavel Pavlovich, "Vetroenergetika", Spravochnoe i metodicheskoe posobie, ID "Energiya", Moskva, 2010. 320 s.]

[9] Дългосрочна програма за насърчаване използването на енергия от възобновяеми източници и биогорива, Лозница, 2013 - 2023. Достъпна на: [https://old.loznitsa.bg/files/energiina\\_efektivnost/dulgostrochna\\_programa.pdf](https://old.loznitsa.bg/files/energiina_efektivnost/dulgostrochna_programa.pdf) [Dalgostrochna programa za nasarchavane izpolzvaneto na energiya ot vazobnovyaemi iztochnitsi i biogoriva, Loznitsa, 2013 - 2023. Dostapna ot: [https://old.loznitsa.bg/files/energiina\\_efektivnost/dulgostrochna\\_programa.pdf](https://old.loznitsa.bg/files/energiina_efektivnost/dulgostrochna_programa.pdf)]

[10] Иванов, Петър, „Оценка на ресурсите на вятъра за производство на електроенергия в България“, ”Проблеми на географията”, №4, София, 1984. [Ivanov, Petar, "Otsenka na resursite na vyatura za proizvodstvo na elektroenergiya v Bulgaria", "Problemi na geografiyata" №4, Sofia, 1984]

[11] Проект №Д002-48/10.12.2008 на ТУ-Варна на тема: „Развитие на специализирана научна инфраструктура за изследване потенциала на слънцето и вятъра“, Фонд „Научни изследвания” на MOMH. [Proekt №D002-48/10.12.2008 na TU-Varna na tema: „Razvitie na spetsializirana nauchna infrastruktura za izsledvane potentsiala na sluntseto i vyatura“, Fond “Nauchni izsledvaniya” na MOMN] [http://www.tu-varna.bg/tuvarnapren/index.php?option=com\\_content&task=view&id=20&Itemid=34](http://www.tu-varna.bg/tuvarnapren/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=34)

[12] <https://soringpcrepair.com/multiple-correlation-coefficient-in-excel/>

[13] Краткосрочна програма за насърчаване използването на енергия от възобновяеми източници и биогорива на община Лозница 2020 - 2023 г. Достъпна на: [http://old.loznitsa.bg/viewpage.php?page\\_id=109](http://old.loznitsa.bg/viewpage.php?page_id=109) [Kratkosrochna programa za nasarchavane izpolzvaneto na energiya ot vazobnovyaemi iztochnitsi i biogoriva na obshtina Loznitsa, 2020 - 2023. Dostapna ot: [http://old.loznitsa.bg/viewpage.php?page\\_id=109](http://old.loznitsa.bg/viewpage.php?page_id=109)]

**За контакти (Affiliation):**

<sup>1</sup> преп. инж. Дамянка Стоянова Димитрова  
катедра „Топлотехника”

Технически Университет – Варна  
e-mail: [d.tomanova@tu-varna.bg](mailto:d.tomanova@tu-varna.bg)

<sup>1</sup> Eng. Damyanka Stoyanova Dimitrova  
Department „Thermal Engineering”  
Technical University of Varna

## НАУЧНО-ПРИЛОЖЕН АНАЛИЗ НА ТЕХНОЛОГИИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ФОТОВОЛТАИЧНИ И ХИБРИДНИ СИСТЕМИ

Веселин Петров<sup>1</sup>, Кръстин Йорданов<sup>2</sup>

### SCIENTIFIC-APPLIED ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC AND HYBRID SYSTEMS

Veselin Petrov<sup>1</sup>, Krastin Yordanov<sup>2</sup>

**Резюме:** Предмет на това изследване е аналитичен обзор на съвременни технологии, които повишават ефективността на фотоволтаични (PV) и хибридни енергийни системи. Разгледани са тенденции в развитието на PV технологиите и принципите на работа на клетките, както и предимствата на хибридните фотоволтаични термални (PV/T) системи. Акцент е поставен върху това как температурата влияе върху ефективността и необходимостта от оптимални охлаждащи технологии. Направен е анализ на пасивни и активни методи за охлаждане, включително фазово-преходни материали и термоелектрически технологии. Представени са инженерни решения за внедряване в различни климатични зони, насочени към постигане на по-висока ефективност и надеждност на енергийните системи.

**Ключови думи:** фотоволтаични системи, хибридни енергийни системи, охлаждащи технологии, енергийна ефективност, PV/T технологии.

**Abstract:** The subject of this study is an analytical review of modern technologies aimed at improving the efficiency of photovoltaic (PV) and hybrid renewable energy systems. It examines trends in PV technology development and the fundamental operating principles of solar cells, highlighting the advantages of hybrid PV/T systems. Special attention is given to the impact of temperature on efficiency and the necessity of optimal cooling solutions. Both passive and active cooling methods, including phase change materials (PCM) and thermoelectric technologies, are analysed. Furthermore, engineering guidelines for implementation in various climatic zones are presented to achieve higher system performance and energy sustainability.

**Keywords:** photovoltaic systems, hybrid energy systems, cooling technologies, energy efficiency, PV/T systems.

### I. ВЪВЕДЕНИЕ

Фотоволтаичните (PV) и хибридните възобновяеми енергийни системи представляват стратегическо направление в съвременната енергетика и играят съществена роля в прехода към устойчиво и производство с нисък въглероден отпечатък. През последните десетилетия развитието на PV технологиите се характеризира с интензивен научно-технически напредък, изразяващ се в повишаване на ефективността на трансформация на енергията, намаляване на разходите за производство и разширяване на приложните области [1]. Тези постижения утвърждават фотоволтаичните решения като основен компонент на бъдещата енергийна инфраструктура, съчетаваща икономическа ефективност и екологична устойчивост.

Наред с постигнатия прогрес обаче, пред индустрията продължават да стоят съществени предизвикателства, свързани с

температурната стабилност и деградацията на PV модулите. Повишаването на работната температура води до намаляване на ефективността и съкращаване на експлоатационния срок, което налага разработването на нови охлаждащи технологии и материали с висока топлопроводимост [2]. В този контекст интеграцията на пасивни и активни охлаждащи системи, комбинирането на фотоволтаични и термални решения (PV/T), както и използването на наноматериали се очертават като ключови направления за бъдещо развитие [3].

Целта на настоящата статия е да представи последователен анализ на основните технологични решения, материали и иновации, които повишават ефективността на фотоволтаичните и хибридни системи.

## II. МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Настоящото изследване е с предмет да се направи подреждането и анализът на съвременните технологични подходи, материали и иновационни разработки, повишаващи ефективността и надеждността на фотоволтаичните (PV) и хибридните енергийни системи.

Фотоволтаичните технологии представляват едно от най-бързо развиващите се направления в областта на възобновяемата енергия. От първите нискоефективни силициевы клетки до съвременните модули с ефективност над 25%, развитието им е белязано от значителен технологичен напредък [4]. Внедряването на тънкослойни, перовскитни и хибридни PV/T системи повишава общата енергийна ефективност на системата, чрез производство на електрическа и топлинна енергия в едно и също време.

Подобренията в материалите, производствените процеси и охлаждащите технологии – включително използването на наноструктурирани и фазово-преходни материали – допринасят за по-голяма надеждност и дълъг експлоатационен живот на системите [5]. Благодарение на тези иновации, фотоволтаичните решения намират все по-широко приложение в индустрията и играят ключова роля в прехода към устойчива и нисковъглеродна енергийна икономика.

### 1. Развитие на фотоволтаичните технологии

Фотоволтаичната технология се развива устойчиво, като начало от първите модули с ефективност под 10%, достигайки до съвременни монокристални клетки с ефективност над 25%. Преходът от класически силициевы модули към по-ефективни приложими решения, като тънкослойни, перовскитни клетки и комбинирани PV/T системи е от голямо значение в развитието на PV технологиите.

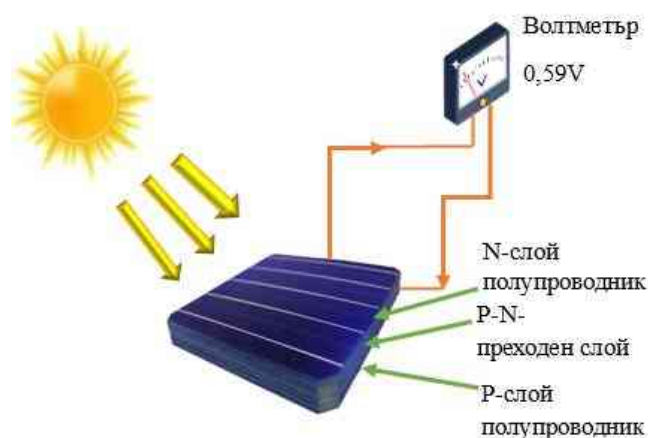
Производствените процеси са се развили изключително много: подобрени методи за легиране, по-добрият контрол на дефекти в кристалната решетка на материалите и новите антирефлекторни покрития допринасят за по-ниски производствени разходи и по-висока енергийна плътност. Допълнително, употребата на двулицеви модули увеличава

производство на енергия, чрез улавяне на отразена светлина.

### 2. Принципи на работа и материали на PV системите

Слънчевата енергия се преобразува директно в електрическа във фотоволтаичните клетки, чрез фотоелектричен ефект. Материалите, които се използват най-много са монокристален и поликристален силиций, CdTe, CIGS и нови хибридни структури.

Фотоелектричният ефект се базира на получаването на двойки електрони–дупки под влиянието на слънчевата радиация. Носителите на заряд се разделят на два слоя от съществуваща електрическа област в p-n прехода и се генерира електродвижещо напрежение, което е показано на фиг. 1.



Фиг. 1. Принцип на работа на фотоволтаична клетка

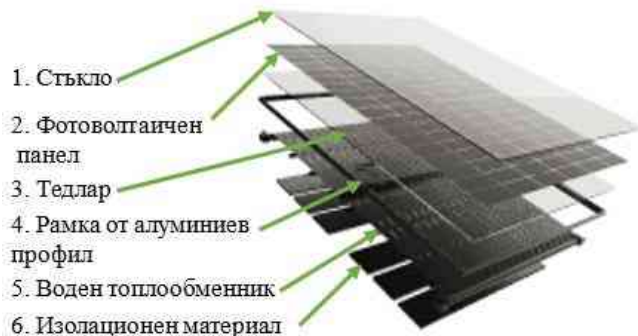
Производителността на клетката зависи от:

- качеството на полупроводниковия материал,
- спектралното съответствие между клетката и слънчевата светлина,
- температурата на работа.

### 3. Хибридни възобновяеми енергийни системи

Обединяването на PV с вятърни турбини, акумулатори или топлинни модули в хибридните системи, води до постигане на по-стабилно енергоснабдяване. Въвеждането на тези технологии позволява много по-добро оползотворяване на количеството енергия и намалява зависимостта от външни източници.

В хибридните PV/T системи се комбинира преобразуването на слънчевата енергия в електрическа с улавянето на отпадната топлина. Получената топлина е възможно да бъде използвана за отопление на помещения, подгръване на вода или промишлени процеси – фиг. 2. Така нараства общата енергийна ефективност на системата и се намалява нуждата от допълнителни енергийни източници.



Фиг. 2. Примерна хибридна PV/T система

#### 4. Индуриални приложения на слънчевата енергия

PV системите намират широко приложение в индустрията – от локални решения до интегрирани енергийни системи за цели предприятия.

Типични приложения са:

- подгръване на технологична вода и пара;
- захранване на производствени линии и автоматизирани системи;
- обезпечаване на резервно захранване;
- изграждане на енергийно независими обекти.

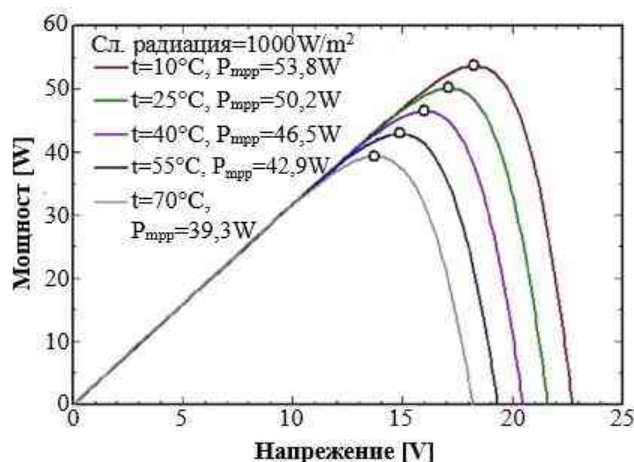
Слънчевите системи са много важна част от енергийния преход в индустрията, чрез тях се намаляват въглеродните емисии.

#### 5. Влияние на температурата върху ефективността на PV системите

Производството на енергия от PV модулите се влияе осезаемо от температурата. Изменение на температурата над стандартните условия (25 °C), води до понижаване на ефективността с 0,4–0,5% на градус.

При по-високи работни температури напрежението на отворена верига намалява поради увеличената вътрешна температура на

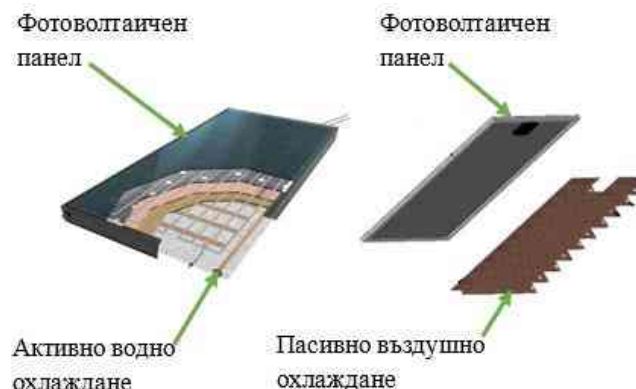
фотоелементите. Това води до спад в общата произведена електрическа мощност и ефективността на преобразуване се понижава. В резултат не може системата да достигне номинални показатели при достатъчна слънчева радиация. Поради тази причина осигуряването на ефективно охлаждане е от значение за надеждната и оптимална работа на инсталацията. В горещи климатични зони, където температурните натоварвания са постоянни и високи е особено важно използването на такива способности, което е показано на фиг. 3.



Фиг. 3. Влияние на температурата върху ефективността на PV модул

#### 6. Охлаждащи технологии за PV панели

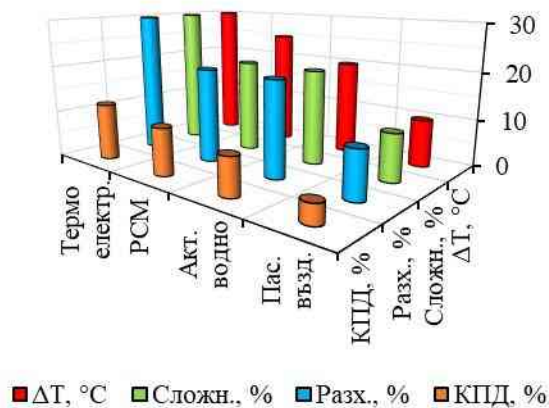
Охлаждането на фотоволтаичните панели може да бъде пасивно или активно. Пасивното се осъществява, чрез естествена вентилация и материали с голяма топлопроводност, а активното се извършва чрез, принудително охлаждане с въздух, вода или термоелектрическо охлаждане – фиг. 4.



Фиг. 4. Сравнение на охлаждащи технологии за PV модули

Сравнителен анализ на различни охладителни технологии, показва отчетливи различия в тяхната ефективност и техническа сложност – фиг. 5.

Пасивното въздушно охлаждане осигурява температурна разлика в диапазона от 5 до 10 °С и води до повишаване на коефициента на полезно действие с 2–4 %, като се характеризира с ниска конструктивна сложност и минимални разходи.



Фиг. 5. Сравнителен анализ на охладителни технологии за PV

При активното водно охлаждане се наблюдава по-висока ефективност, при ΔT от 10 до 20 °С КПД нараства с 5–8 %, при умерено увеличение на сложността и разходите. Системите с материали с фазов преход (PCM) имат подобни стойности – температурна разлика от 15 до 25 °С и увеличаване на КПД с 6–10 %. Термоелектрическото охлаждане е с най-високи показатели – ΔT от 20 до 30 °С и повишаване на КПД с 8–12 %, конструктивно сложно за изпълнение и високи разходи.

#### 7. Нови материали и нанотехнологии в PV охлаждането

Наноструктурираните материали и композити на основата на графен, сребърни наночастици, въглеродни нанотръби и фазово-преходните материали (PCM), показват значително повишение на топлопроводността, правейки ги изключително подходящи за приложения в управление на температурния режим на PV модули. Интегрирането на фазово-преходни материали (PCM) с подобни

наноструктури води до ускорено отвеждане на топлината и подобрява значително температурната стабилност при производството на енергия и удължава живота на PV панелите.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повишаването на ефективността на PV и хибридните енергийни системи представлява съществен фактор за ускоряване на енергийния преход към устойчиви технологии.

Охлаждащите технологии и иновативните материали оформят ключовите направления за напредък, като интеграцията с водородни решения, приложението на интелигентни алгоритми за управление и развитието на наноматериали и термални композити. Те допринасят за подобряване на експлоатационната надеждност и енергийната производителност.

Комбинирането на охлаждането с технологии за енергийно съхранение допълнително увеличава стабилността на системите.

### IV. ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.V. Tyagi et al., “Progress in solar PV technology: Research and achievement,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
- [2] P. Dwivedi et al., “Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art,” *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020.
- [3] A. Mahesh and K. Sandhu, “Hybrid wind/photovoltaic energy system developments,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.
- [4] F. Khan et al., “Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
- [5] G.K. Singh, “Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review,” *Energy*, 2013

#### За контакти (Affiliation):

<sup>1</sup> маг. инж., докторант Веселин Петров  
катедра „Топлотехника“

Технически Университет – Варна  
e-mail: [veselin.petrov@tu-varna.bg](mailto:veselin.petrov@tu-varna.bg)

<sup>1</sup> M. Eng. Veselin Petrov  
Department „Thermal engineering“  
Technical University of Varna

<sup>2</sup> доц. д-р инж. Кръстин Йорданов  
катедра „Топлотехника“

Технически Университет – Варна  
e-mail: [krystin\\_yordanov@tu-varna.bg](mailto:krystin_yordanov@tu-varna.bg)

<sup>2</sup> Assoc. prof. Eng. Krastin Yordanov PhD  
Department „Thermal engineering“  
Technical University of Varna

# СРАВНИТЕЛЕН ТЕХНИКО-ИКОНОМИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ТЕХНОЛОГИИ ЗА ОПОЛЗОТВОРЯВАНЕ НА ОТПАДНА ТОПЛИНА ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ СПРЯМО ТОПЛИННИ ПРИЛОЖЕНИЯ В ПРОМИШЛЕННОСТТА

Николай Жечев Колев<sup>1</sup>

## COMPARATIVE TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR WASTE HEAT UTILIZATION FOR ELECTRICITY GENERATION VERSUS THERMAL APPLICATIONS IN INDUSTRY

Nikolay Zhechev Kolev<sup>1</sup>

**Резюме:** Промисленият сектор генерира огромни количества неоползотворена отпадна топлина. В настоящото изследване е направен сравнителен технико-икономически анализ на две стратегии за оползотворяването ѝ: преобразуване в електроенергия (SRC, ORC) и директни топлинни приложения (термопомпи, абсорбционни чилъри). Целта е да се определи коя от тези две стратегии осигурява по-висока технико-икономическа ефективност и по-значима дългосрочна полза в характерните за българската промишленост условия. Предложената методика, базирана на показатели като PBP и LCOE, се прилага към три представителни сценария. Получените резултати показват, че производството на електроенергия, осигурява по-висока финансова възвръщаемост. Изследването подпомага избора на подходящи технологии за оползотворяване на отпадната топлина и улеснява планирането на енергийно ефективни решения.

**Ключови думи:** Оползотворяване на отпадна топлина, технико-икономически анализ, органичен цикъл на Ренкин, термопомпи, промишлена енергийна ефективност, абсорбционни чилъри.

**Abstract:** The industrial sector generates significant unutilized waste heat. This study performs a comparative techno-economic analysis of two recovery strategies: power generation (SRC, ORC) versus direct thermal applications (heat pumps, absorption chillers). Aiming to identify the optimal approach for the Bulgarian industry, we apply a methodology based on PBP and LCOE to three representative scenarios. Results indicate that power generation yields superior financial returns. This research guides the selection of efficient waste heat recovery technologies.

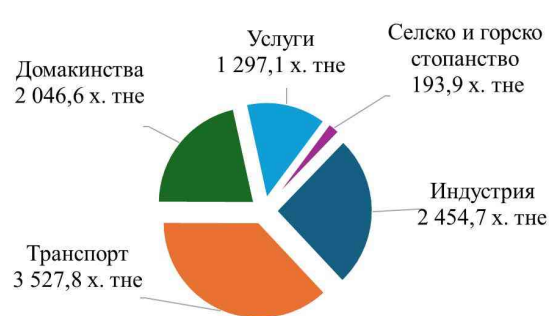
**Keywords:** Waste heat recovery, techno-economic analysis, Organic Rankine Cycle, heat pumps, industrial energy efficiency, absorption chillers.

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ:

Промисленият сектор е един от основните консуматори на енергия в световен мащаб, като същевременно генерира значителни количества отпадна топлина (ОТ). Според редица изследвания, между 20% и 50% от вложената енергия в индустриалните процеси се губи в околната среда [1]. За България, където промишлеността е отговорна за 26% от крайното енергийно потребление [2], ефективното управление на този ресурс е от критично значение за конкурентоспособността и декарбонизацията на икономиката.

Основният инженерен и икономически проблем при утилизацията на ОТ е изборът на подходяща технология спрямо температурния

потенциал на източника и пазарните цени на енергоносителите.



Фиг. 1. Крайно енергийно потребление по сектори, България 2023 г. в хил. т.н.е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> х.т.не. – хиляди тона нефтен еквивалент; 1 т.не. = 11 630 kWh;

Техническите характеристики на наличните технологии варират значително според работния им диапазон и ефективност.

Най-достъпният метод за утилизация е директното оползотворяване чрез топлообменници. Тази зряла технология оперира в изключително широк температурен диапазон (от 20 до над 1100 °C) и постига ефективност между 80% и 95%. Предимствата ѝ включват ниска първоначална инвестиция и кратък срок на изкупуване (често под една година), но приложението е силно зависимо от наличието на подходящ консуматор в непосредствена близост и усложняването на такива системи идва от рискове свързани със замърсяване на топлообменните повърхности и в някои случаи изключване на смесване на топлоносители.

За генериране на електроенергия се прилагат различни термодинамични цикли. При температури над 350 °C, Парният цикъл на Ренкин (SRC) е утвърденият стандарт, осигуряващ висок електрически КПД (20–40%) при големи мощности. Той обаче е неефективен при по-ниски температури и изисква скъпа поддръжка. За средно- и нискотемпературния диапазон (80–350 °C) се прилага Органичният цикъл на Ренкин (ORC). Въпреки по-ниските си КПД (10–20%) и високата специфична инвестиция, ORC системите предлагат висока надеждност, пълна автоматизация и ефективна работа при частични товари, което ги прави подходящи за променливи източници на отпадна топлина.

При утилизацията на нископотенциална топлина (20–150 °C) се използват технологии за активна трансформация. Термопомпите повишават температурното ниво на отпадния поток с коефициент на трансформация (COP) между 3.0 и 5.0, но тяхната икономическа ефективност зависи от цената на консумираната електроенергия. Алтернатива са абсорбционните чилъри, които използват топлинна енергия (>80 °C) за производство на студ с COP 0.7–1.4. Тяхното главно предимство е, че преобразуват отпадната топлина в полезен студ с минимална консумация на ток, макар че се характеризират с по-големи габарити спрямо конвенционалните компресорни охладители [1,3].

Освен утвърдените термодинамични цикли, съществуват и иновативни подходи за специфични приложения. Термоелектрическите генератори (TEG)

предлагат директно преобразуване на топлина в електричество без движещи се части, подходящо за малки мощности и високи изисквания за надеждност. За източници с температура над 1000 °C се изследват термофотоволтаични системи (TPV), а за повишаване на ефективността при средни температури все по-голям интерес предизвикват циклите със свръхкритичен CO<sub>2</sub> (sCO<sub>2</sub>)

## II. МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

Методологията на изследването се базира на сравнително технико-икономическо моделиране на три дефинирани сценария, представителни за енергоинтензивната промишленост в България. Сценариите са конструирани така, че да покриват пълния спектър на температурния потенциал на отпадната топлина (OT) и да отразяват реални индустриални условия в страната:

1. Сценарий 1: Среднотемпературна утилизация (Стъкларска промишленост). Разглежда се оползотворяване на топлината на димни газове от стъкларски пещи с температура около 350 °C. Избраната технология за конверсия е Органичен цикъл на Ренкин (ORC) с мощност 5 MWe, като сценарият е адаптиран към условията на големи производители на плоско стъкло в България (напр. "Шиседжам")

2. Сценарий 2: Нискотемпературна утилизация (Хранително-вкусова промишленост).

Моделира се поток с нисък потенциал <100 °C, наличен като вторичен продукт от термични процеси. Тук сравнителният анализ разглежда две алтернативи за използване на топлинен поток с мощност 2 MWth: (2a) повишаване на температурното ниво чрез индустриална термопомпа за нуждите на отопление или (2б) трансформация в студ чрез абсорбционен чилър за технологично охлаждане.

3. Сценарий 3: Високотемпературна утилизация (Циментова промишленост).

Този сценарий моделира оползотворяването на високопотенциална топлина от димни газове с температура на източника >800 °C. Технологичното решение се базира на класически Парен цикъл на Ренкин (SRC) с инсталирана електрическа мощност от 9 MWe. Моделът реферира към

машаба и оперативните параметри, характерни за циментовите заводи (напр. "Девня Цимент").

Икономическата оценка се базира на метода на простия срок на изкупуване (PBP) и нормираната цена на енергията (LCOE). Ключовите допускания за цените на енергоносителите в България (H2 2024) са: цена на електроенергия за промишлеността 0.190 €/kWh и цена на природен газ 0.043 €/kWh [4, 5]. Моделът приема непрекъснат производствен режим с 8000 работни часа годишно, експлоатационен живот на активите 20 години и дисконтов процент от 8%. Капиталовите разходи (CAPEX) са определени на база осреднени стойности от актуални пазарни проучвания, както следва: 1 800 €/kWe за SRC, 2 500 €/kWe за ORC, 800 €/kWh за термopомпени системи и 550 €/kWh за абсорбционни чилъри [3].

### III. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ:

Резултатите от изследването показват отчетлива зависимост на икономическата ефективност от вида на заместваната енергия. Обобщените данни са представени в Таблицы 1 и 2.

Таблица 1. Обобщени технико-икономически резултати от сценарии 1 и 2а

Показател	Сценарий 1	Сценарий 2а
Технология	ORC	Термopомпа
Мощност	5 MWe	2 MWth
Инвестиция	12,5 млн.€	1,6 млн.€
Год. енерг. спестявания	40 000 MWh	16 000 MWh
Год. фин. спестявания	7 600 хил.€	688 хил.€
Срок на изкупуване	~1,6 год.	~2,3 год.
LCOE / Цена на енергия	~38 €/MWh	~13 €/MWh (спестена)
Год. редукция на CO <sub>2</sub>	19 200 тона	1 312 тона

Таблица 2. Обобщени технико-икономически резултати от сценарии 2б и 3

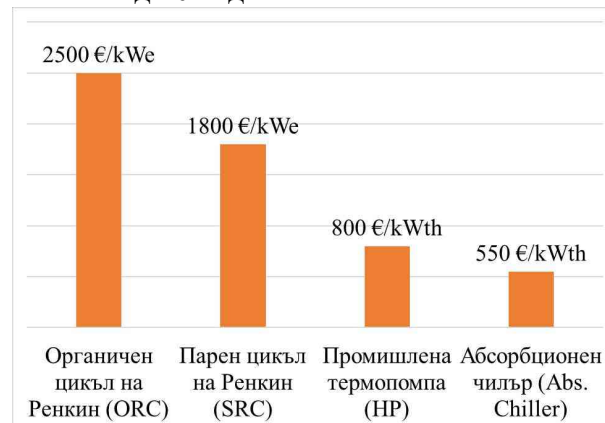
Показател	Сценарий 2б	Сценарий 3
Технология	Абс. чилър	SRC
Мощност	2 MWth	9 MWe
Инвестиция	1,1 млн.€	16,2 млн.€
Год. енерг. спестявания	8 000 MWh	72 000 MWh

Год. фин. спестявания	1 520 хил.€	13 680 хил.€
Срок на изкупуване	~0,7 год.	~1,2 год.
LCOE / Цена на енергия	~18 €/MWh (спестена)	~31 €/MWh
Год. редукция на CO <sub>2</sub>	3 840 тона	34 560 тона

Анализът показва, че сравнително високата цена на промишлената електроенергия \$0,190 €/kWh спрямо ниската цена на природния газ \$0,043 €/kWh създава специфични стимули за инвестиции в енергийна ефективност.

При реализиране на системи за производство на електричество от ОТ (Сценарии 1 и 3) Технологиите за производство на електроенергия демонстрират най-висока дългосрочна рентабилност.

Въпреки че системите ORC и SRC изискват значителни първоначални инвестиции (съответно 12,5 и 16,2 млн. €), те осигуряват бърза възвръщаемост благодарение на генерирания продукт с висока добавена стойност. Сроковете на изкупуване от 1,6 и 1,2 години са безпрецедентно кратки за енергийни проекти с живот над 20 години.



Фиг. 2. Специфични капитални разходи

LCOE предимство: Нормираната цена на произведената електроенергия (LCOE) варира между 31 и 38 €/MWh. Това е многократно по-ниско от пазарната тарифа, което осигурява на предприятията стратегически буфер срещу колебанията на енергийните пазари.

Екологичен ефект: Сценарий 3 (Циментова промишленост) показва най-мощния екологичен ефект с редукция на

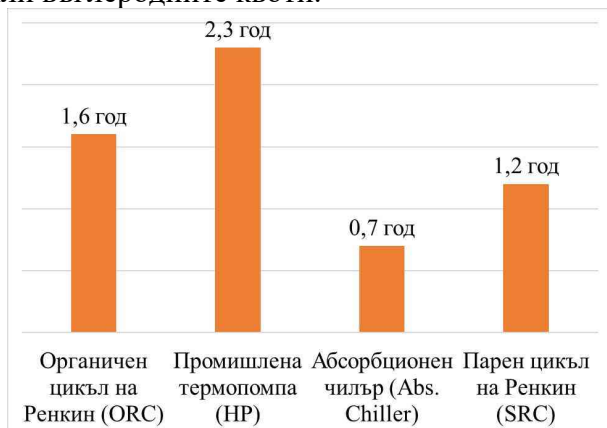
въглеродни емисии от над 34 500 тона годишно, което генерира допълнителни парични потоци при цена на квотите от 70€/tCO<sub>2</sub>.

Стратегия за термична оползотворяване (Сценарий 2)

При нискотемпературните източници <100 °С се наблюдава фундаментална разлика в икономическата логика между отоплението и охлаждането:

Охлаждане (Сценарий 2б):  
Инсталирането на абсорбционни чилъри се оказва най-ефективната краткосрочна инвестиция (РВР ~0,7 години). Причината е термодинамична и икономическа: чилърът използва „безплатна“ отпадна топлина, за да замени работата на електрически компресори в конвенционалните климатични системи, спестявайки скъпа електроенергия.

Отопление (Сценарий 2а):  
Индустриалните термопомпи показват по-дълъг срок на възвръщаемост (~2,3 години). Макар че технологията е високоефективна (COP > 3), икономическата полза е ограничена от факта, че тя най-често замества котли, работещи на евтин природен газ. Този сценарий става по-атраکتивен при очаквано повишаване на цените на изкопаемите горива или въглеродните квоти.



Фиг. 3. Срок на откупуване

Анализът на резултатите показва, че, докато всички разгледани технологии са икономически жизнеспособни, то текущата пазарна структура в България фаворизира проектите, които директно елиминират консумацията на електроенергия – било чрез собствено производство (ORC/SRC), било чрез термично задвижвано охлаждане, Фигура 3.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Въз основа на получените резултати са формулирани следните основни изводи:

1. Икономическите условия в България – високи цени на електроенергията и сравнително ниски цени на газа – благоприятстват технологиите за производство на електроенергия и студ от отпадна топлина.

2. Процесите с високи и средни температури на отпадната топлина е необходимо да се насочат към генериране на електроенергия, тъй като този подход предлага кратък период на възвръщаемост и осигурява по-висока степен на енергийна независимост за предприятията.

3. В нискотемпературния диапазон абсорбционното охлаждане е по-подходящо от отоплителните приложения, когато техническите условия го позволяват.

В заключение, оползотворяването на отпадната топлина в българската промишленост представлява едновременно екологично необходимо и икономически обосновано направление, което допринася за повишаване на енергийната ефективност и конкурентоспособността на предприятията.

#### V. ЛИТЕРАТУРА:

[1] Turek, V., Kilkovský, B., Daxner, J., Babička Fialová, D., & Jegla, Z., Industrial Waste Heat Utilization in the European Union-An Engineering-Centric Review, *Energies*, 17(9), 2084, 2024.

[2] Национален статистически институт (НСИ), Крайно енергийно потребление по сектори, 2023 [Natsionalen statisticheski institut (NSI), Krayno energiyno potreblenie po sektori, 2023]

[3] Brückner, S., et al., Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies, *Applied Energy*, 151, 157–167, 2015.

[4] Eurostat, Electricity price statistics, *Statistics Explained*, 2024.

[5] TradingEconomics, Bulgaria - Gas Prices: Medium Size Households, Eurostat Data, 2024.

#### За контакти (Affiliation):

<sup>1</sup> ас. инж. Николай Жечев Колев  
катедра „Топлотехника”

Технически Университет – Варна  
e-mail: nikolay.zh.kolev@tu-varna.bg

<sup>1</sup> Assist. Prof. Eng. Nikolay Zhechev Kolev  
Department „Thermal engineering”

## FEATURES OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS IN RELATION TO THEIR RELIABILITY PREDICTION

Боян Карамилев<sup>1</sup>

### ОСОБЕНОСТИ НА ИНТЕЛИГЕНТНИТЕ ТРАНСПОРТНИ СИСТЕМИ ВЪВ ВРЪЗКА С ПРОГНОЗИРАНЕТО НА ТЯХНАТА НАДЕЖДНОСТ

Boyan Karamilev<sup>1</sup>

**Резюме:** В тази статия са разгледани особеностите на интелигентните транспортни системи (ИТС) и техните основни типове - системи, използвани в превозните средства, и системи, интегрирани в транспортната инфраструктура, по отношение на оценката на надеждността им. ИТС са от ключово значение за развитието, оптимизацията и екологичната устойчивост на съвременните транспортни мрежи. При анализа на хардуерните и софтуерните компоненти в състава на ИТС се установи, че архитектурата на ИТС е изключително сложна и изисква непрекъснат мониторинг и комплексни подходи за надеждностен анализ. Представените методи за оценка се отнасят основно до електронните (хардуерни) компоненти на ИТС, но тези методи не са директно приложими при оценяване на софтуерните аспекти на системите.

**Ключови думи:** Интелигентни транспортни системи, електронни компоненти, инфраструктура, превозни средства, надеждност, оценка

**Abstract:** This paper examines the characteristics of Intelligent Transportation Systems (ITS) and their main types - systems used in vehicles and systems integrated into transportation infrastructure, in relation to the assessment of their reliability. ITS are of key importance for the development, optimization, and environmental sustainability of modern transport networks. An analysis of the hardware and software components within ITS shows that their architecture is highly complex and requires continuous monitoring as well as comprehensive approaches to reliability evaluation. The assessment methods presented in the paper apply primarily to the electronic (hardware) components of ITS; however, these methods are not directly applicable to the evaluation of the software aspects of the systems.

**Keywords:** Intelligent Transportation Systems, electronic components, infrastructure, vehicle, reliability, evaluation

### I. INTRODUCTION:

The 21st-century challenge of transportation is no longer just about building more roads or railways; it is about making existing infrastructure smarter, safer, and more sustainable. The basis of this are Intelligent Transport Systems (ITS)—a complex structure of information, communication, and sensor technologies into transportation infrastructure and vehicles. ITS represents a transformative force, crucial for the development, optimization, and environmental protection of our transport networks. However, the very complexity of ITS can also create significant challenges in evaluating its fundamental attribute: reliability.

directly related to: traffic management systems, mobile information systems, vehicle management systems, and vehicle control and safety systems.

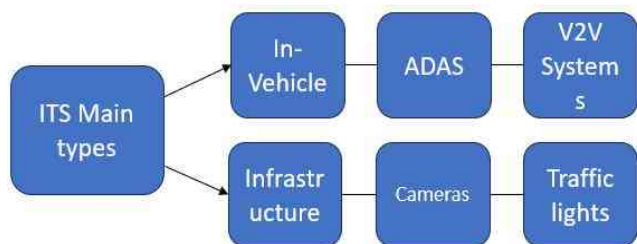
Operating with better transportation infrastructure users will be better informed, while using existing public transportation in a safer, more coordinated, and "smarter" way. However, ITS are not used only in the public transportation they are related with vehicles. Electronic car systems can help with the driver in the driving process. Different sensors and telecommunications can provide better connectivity and information about the environment.

### II. MAIN TYPES OF ITS

ITS are used in two main structures, mainly in automobiles and in the transportation infrastructure. These main types of systems are

**Table 1.** Main types of ITS

Main Types	System Type	Primary Function
In-Vehicle	ADAS, V2X Systems, Telematics	systems that enable safety and cooperative driving and situational awareness beyond sensors, providing better connectivity and information
Infrastructure	Traffic Management, Public transport	optimizing traffic flow and providing real-time information for improving efficiency, traffic congestion and ecology



**Fig. 1.** Block scheme of Main type ITS

In this block scheme is shown the main two type of ITS and is shown the systems types for each main type of ITS. In which both cases these systems have its necessary hardware and software devices for it to communicate with the road, as its primary function is to provide safety and better cooperative driving which can help with connectivity and real-time data information (V2X) device. As for the infrastructure there are various hardware and software devices like various cameras, traffic lights, smart signals and AI powered applications that can improve, optimize traffic flow, reduce traffic congestion and ecology inside of a city.

### III. HARDWARE AND SOFTWARE TECHNOLOGIES IN ITS

There is a wide range of technologies used in ITS, from basic traffic management systems like: GPS and traffic lights to monitoring applications and cameras like CCTV and

automatic incident detection or stopped vehicle detection to more complex ones like parking guidance that integrate real-time data and feedback from multiple sources/sensors. Important characteristics of these systems both in-vehicle and infrastructure are

- Hardware:

A variety of devices designed to collect, process and transmit transport-relevant data are part of the hardware components of ITSs. These include: sensors, cameras, traffic signals, IoT-based transportation devices vehicle detection systems, all of which are essential for the efficient operation of modern ITSs. IoT are the main hardware components that are used and ITS, it can modify the business processes, strategies, and competencies across the transportation sector through a new computing paradigm. Through the adoption of IoT, objects, and machines may correspond with each other, locate, sense, and control via the global internet platform in which most sensors can connect with each other. Using the IoT will increase driving comfort and safety. In addition, this technology will collect data on the vehicle and provide information in areas such as fuel filling, early detection of possible malfunctions, and regular maintenance indicators. IoT prevents collisions with autonomous vehicles and greatly reduces transportation problems. It has helped reduce accidents, especially by simultaneously monitoring the location and directions of autonomous vehicles from security systems. Hardware part of IoT systems in ITS uses interconnected devices like sensors on vehicles and infrastructure to collect and transmit real-time data for better traffic management, safety, and efficiency. Key applications of IoT include smart traffic signals with a lot of sensors, communication devices such as microprocessor and various indicators that can adapt in real time to congestion, route optimization, and electronic tolling. This integration creates a very complex network of electronic hardware devices which collect data-driven information and can make decision-making that optimizes transportation based on that information both for drivers and city official.

- Software:

ITS processes and analyses data collected information by hardware components. That can include a wide range of applications for traffic management, public transit optimization, safety,

leveraging data analysis, AI and connectivity, which can improve efficiency and safety, that also can enable, improved and optimized real-time decision-making which can enable more efficient management of the road traffic. With this information it can control the vehicle flows, optimization of routes and can make reductions in environmental impacts. The software aspect is very essential to help with vehicle-to-everything (v2x) communication, ADAS systems and C-ITS, which are systems that use to share collective data from vehicles and infrastructure via software applications. Key examples for better software applications in ITS can include AI-powered tools implemented inside the software system for predictive analytics of the information gathered from the sensors. ADAS systems uses improved AI software application in vehicles that can provide analytic information about collision avoidance, also can provide lane-keeping assistance, and automated braking in the most vehicles, which can prevent accidents. The ATMS systems are the main part of the infrastructure, using AI-powered computer software that can make various calculations in real time and adapt traffic signals, detect various incidents and reduce urban congestions. This can enable better route optimization, and real-time traffic signal controls, and as well software for better commercial vehicle operations like automated monitoring, fleet administration, and electronic toll collection.

Knowing how both hardware and software works we can analyze that both hardware and software devices in ITS are very essential for the proper work a system like this, as well as that to happen both aspect needs to work in harmony through a continuous cycle that can provide better, faster, reliable and secured software applications, like AI powered tools for predictive analytics and hardware electronic devices like sensors, microprocessors and microcontrollers as both hardware and software needs to work in sync and it can analyze and communicate with various different information on the road for both infrastructure and vehicles.

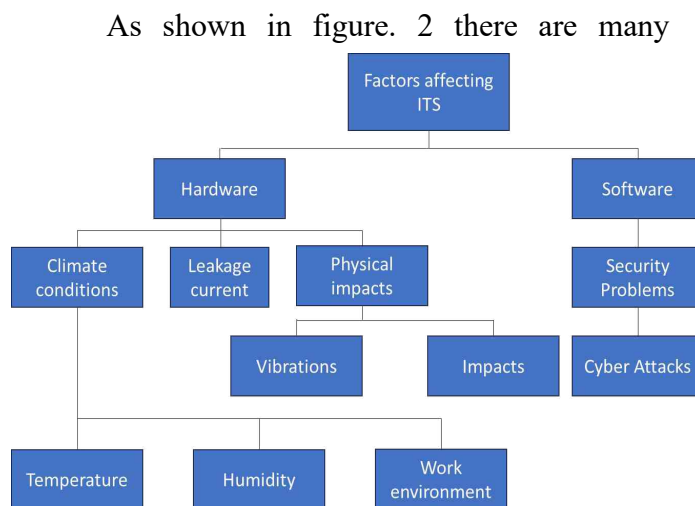
**IV. FACTORS AFFECTING HARDWARE AND SOFTWARE UNITS IN ITS**

The core problems of ITS comes from their complex system nature, and various factor which

can create new problems for traditional evaluation methods, problems such as:

- Inside a sub-system, failure or data error in one component can occur, making it hard to isolate and measure the reliability of a single part.
- Software application security problems can be possible from cyber attack vectors or a bug in the software system, as these are aimed at stopping, shutting down, or completely crashing the system.
- ITS are operates in a non-stationary environment with changing conditions, as factors for the hardware devices can be various climate conditions like humidity, temperature, weather
- Factors from the working environments, such as impacts, vibrations can lead to breaking essential electronic components in the system, which can stop the entire system from working
- Current leakage can occur due to damaged insulation, moisture, or faulty components, which can lead to fire hazards, electric shock or equipment failure, this can also cause inaccurate measurements of the data information about the traffic.

Fig. 2. Factors affecting ITS’ reliability



factors that can occur in a singular intelligent transportation system which be very complex and hard for us to estimate the reliability of all these factors. It can be very demanding and time consuming to isolate a specific electronic component or a network connection to predict the reliability of the entire system, as ITS can be reliable under one condition but may fail under another, requiring continuous evaluation with different methods. In all cases reliability

prediction is necessary to have a better estimation of the security and safety on the entire system.

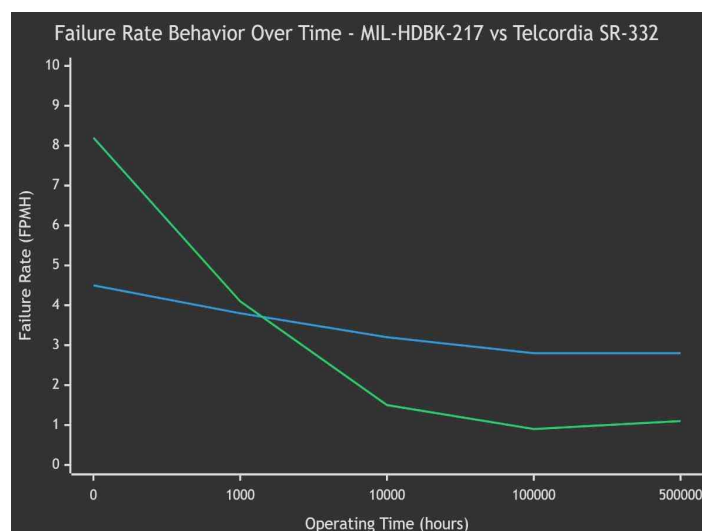
## V. Methods for troubleshooting affecting factors in ITS

Various methods for eliminating problems in ITS can be qualitative and semi-quantitative methods, such as FMEA and FTA, are using structured worksheets or diagrams (fault trees), that can detect a possible failure, cause and effects. Burn-in electrical tests are a type of accelerated stress test used to identify early failures in electronic components and systems by operating them under high stress conditions like elevated temperature, voltage, or power cycling. This method is necessary to estimate the reliability of each electronic component, which needs to pass this test in order to operate in intense weather conditions or in a case with current leakage, because of the non-stationary environment. Various standards like - MIL-HDBK 217, FIDES 2009 or TELCORDIA SR-332 are used for failure data collection and classification, which can be mostly used depending on the evaluation of the hardware parts inside an ITS. These different methodologies provide mostly component level predictions. Creating a sheet with materials for ITS and using a detailed models to predict failure rates of each electronic parts in a system. These various standards like MIL-HDBK-217 and Telcordia SR-332 are very similar between and are mostly used for evaluation of a specific electronic component. As similar they can be these methodologies are also very different between each other, and each methodology can practically represent different spreadsheets with various models and brands of electronic components, as well those standards have its own functions and formulas for the evaluation of various electronic components, which can be used in various different working environments, some more intense than others.

When comparing both standards in Fig. 3 is shown how each standard models failure rate is operating based on its operating times (hours) and its failure rate (FPMH). FPMH is represented as failure rate per million hours, which is a metric for product and system reliability, indicating the expected number of failures for every one million hours of operation. This calculation is based on factors like temperature,

stress, and environment, and is a key indicator of a system's performance and longevity, especially in safety-critical industries. As for the both standards we can see a very different graph from each other, in the green line is shown MIL-HDBK-217 and in the blue is Telcordia SR-332 both graphs are based on the bath curve model, that has three phases: infant mortality (decreasing), useful life (constant), and wear-out (increasing), and is shown horizontal dashed lines in the useful life region: one at 20 FPMH which is for (MIL-HDBK-217) and one at 5 FPMH for (Telcordia SR-332). With the information based on the pattern of the bath curve it can be said that MIL-HDBK is relatively more stable for over operational lifetime of the electronic component, as it can assume constant failure rate after the initial burn-in of the electronic part, which this methodology is very good to use for systems that are used in extreme conditions and the operation needs to be in a worst-case scenario. Other standard like SR-332 is displaying a way more stable bath curve, which focuses on the early life of the electronic component, that can be more relevant in a real-world alignment, which match better observed field data for commercial electronics and for products with expected reliability growth over time.

Fig. 3. Failure rate behavior over time



## VI. UNCOVERED ISSUES WITH RELIABILITY PREDICTION IN ITS

While methodologies like MIL-HDBK 217, FIDES 2009 or TELCORDIA SR-332 are excellent for predicting the reliability of the electronic and electrical components, they fall short on the software aspect (bugs, glitches, memory leaks) can cause a system to crash.

Fig. 4. Block diagram of a software crash



Which is shown on figure 4 how a software crash can occur if the security has been bypassed. A traffic signal controller's microprocessor might be perfectly reliable (per FIDES or SR-332), but this type of problems can lead the software algorithm controlling its timing to fail catastrophically, which that can cause gridlock or chain of traffic accidents. When comparing the various methodologies, for example FIDES can fall short if a system that can be "up" but behaving dangerously. In these case standards like: IEC 61508, are used as they focuses on ensuring that the entire system's specified behavior is safe and that potential hazards are mitigated with better isolation and monitor. In this paper when comparing SR-332 and MIL-HDBK 217 is shown that MIL-HDBK is better for safety critical applications that require worst case scenario analysis and if the system is operating in extreme environmental condition.

For SR-332 its designing is better for commercial markets and gives access to a better field failure data for based components, as with this information this methodology is better for more accurate early-life predictions of the components in moderate environmental stresses.

## VII. CONCLUSION

ITS is crucial for the development, optimization, and environmental protection of our transport networks. However, the very complexity that grants ITS also creates significant challenges in evaluating its reliability. The methods like (FTA, FMEA) can detect a possible failure, cause and effect of a specific sub-system of a system. On the other standards like MIL-HDBK-217, IEC, SR-332 or FIDES can cover a lot of factors about its reliability for each electronic component of a sub-system. For methodologies like MIL-217 and SR-332 many

industries are moving toward to Telcordia for commercial products while maintaining MIL standards are better used for extreme environment applications. In summary, the reliability of Intelligent Transportation Systems (ITS) is not a standalone attribute but a direct outcome of its core technological features. The shift from traditional, isolated transportation components to a connected, fully data-driven ecosystem fundamentally redefines how reliability is achieved, measured and predicted.

## ACKNOWLEDGMENT

The results of the research presented in this publication have been carried out under the National Program “Young Scientists and Postdoctoral Fellows - 2”, second stage, module “Young Scientists”, within the framework of the intrinsic research activities of TU-Varna, funded by the national budget.

## VIII. REFERENCES

- [1] Isa Avci and Murat Koca, *Appl. Sci.* 2024, 14(11),4646;doi.org/10.3390/app14114646
- [2] Nicolae Cordos, Irina Duma, Dan Moldovanu, Adrian Todorut, and Istvan Barabas, *Appl. World Electr. Veh. J.* **2025**, 16(7), 387; doi.org/10.3390/wevj16070387
- [3] FIDES guide 2009 Edition A, September 2010, Reliability Methodology for Electronic Systems, www.fides-reliability.org
- [4] Walch, M., Schirrer, A. & Neubauer, M. Impact assessment of cooperative intelligent transport systems (C-ITS): a structured literature review. *Eur. Transp. Res. Rev.* **17**, 11 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00702-9>
- [5] Guido,G. , Shaffiee Haghshenas,S. , Vitale,A. , Astarita,V. and Geem,Z. W. (2023). A Quantitative and Qualitative Review of the Role of Intelligent Transportation Systems in Road Safety Studies through Three Decades. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 7(4), 93-109. doi: 10.22115/scce.2023.382320.1597
- [6] T. M. Bojan, U. R. Kumar and V. M. Bojan, "An internet of things based intelligent transportation system," *2014 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, Hyderabad, India, 2014, pp. 174-179, doi: 10.1109/ICVES.2014.7063743.
- [7] Georgiev, Anton & Papanchev, Toncho. (2020). Надеждност на електронна апаратура.
- [8] Hao, J.; Pei, M. Reliability Assessment via Combining Data from Similar Systems. *Stats* 2025, 8, 35. <https://doi.org/10.3390/stats8020035>

[9] MIL-HDBK-217F, *Reliability Prediction of Electronic Equipment*, 1991. Notice 1 (1992) and Notice 2 (1995).

[10] SR-332, Issue 2, *Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment*, Telcordia, September 2006.

[11] SR-332, Issue 1, *Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment*, Telcordia, May 2001.

[12] *Production capability management*, Gerhard Greeff, Ranjan Ghoshal, *Practical E-Manufacturing and Supply Chain Management*, Newnes, 2004, Pages 214-242, ISBN 9780750662727, <https://doi.org/10.1016/B978-075066272-7/50011-7>

[13] Zhang, X., Li, J., Zhou, J. *et al.* Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy. *Automot. Innov.* 8, 13–45 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42154-024-00310-2>

**За контакти (Affiliation):**

<sup>1</sup> Ас. инж. Боян Карамилев

Катедра „Електронна техника и микроелектроника”

Технически Университет – Варна

e-mail: [b.karamilev@tu-varna.bg](mailto:b.karamilev@tu-varna.bg)

<sup>1</sup> Assist. prof. Eng. Boyan Karamilev

Department „Electronic equipment and microelectronics”

Technical University of Varna

## RELIABILITY OF ULTRASOUND EQUIPMENT AND ITS IMPACT ON PUBLIC HEALTH SYSTEM SUSTAINABILITY

Ангелина Димитрова<sup>1</sup>

### НАДЕЖНОСТТА НА УЛТРАЗВУКОВАТА АПАРАТУРА И НЕЙНОТО ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ УСТОЙЧИВОСТТА НА СИСТЕМАТА НА ОБЩЕСТВЕНОТО ЗДРАВЕ

Angelina Dimitrova<sup>1</sup>

**Резюме:** Системата на обществено здравеопазване все по-силно зависи от надеждни диагностични технологии, като ултразвуковите системи са основен инструмент в медицинската практика. Настоящият анализ изследва взаимодействието между стратегиите за управление на здравеопазването и надеждността на ултразвуковата апаратура, с акцент върху устойчивостта, икономическата ефективност и качеството на грижите за пациентите. Въз основа на насоки на СЗО, данни за обществени поръчки и опит от 45 държави се показва, че ниската надеждност на оборудването води до прекъсване на диагностични услуги с 15–25% в ресурсоограничени региони. Предложените решения подчертават поддържането, ориентирано към надеждността, като ключов подход за намаляване на разходите с до 40% и подобряване на резултатите при пациентите с около 25% в развиващите се здравни системи.

**Ключови думи:** обществено здравеопазване; надеждност на ултразвуковата апаратура, устойчивост на здравеопазването, насоки на СЗО.

**Abstract:** Public healthcare management increasingly depends on reliable diagnostic technologies, with ultrasound systems serving as essential tools in medical delivery. This analysis explores the interaction between healthcare management strategies and ultrasound device reliability, emphasizing sustainability, cost efficiency, and patient outcomes. Drawing on WHO guidelines, procurement data, and reports from 45 countries, the study demonstrates that poor equipment reliability disrupts diagnostic services by 15–25% in resource-limited regions. Evidence-based recommendations highlight reliability-centered maintenance as a core strategy that can reduce healthcare costs by up to 40% and improve patient outcomes by about 25% in developing health systems.

**Keywords:** public health management, ultrasound devices reliability, healthcare sustainability, WHO guidelines.

### I. INTRODUCTION:

The management of public health has become a highly regarded discipline that deals with such health-related issues as necessitating coordinated international actions to give the entire world an equal right to proper medical services of good quality. Within this concept, the reliability of medical diagnostic equipment is one of the main driving forces behind the provision of health care in an eco-friendly way, especially in poor areas where the malfunctioning of the equipment could lead to disastrous things for patient care [1]. Ultrasound technology is regarded as a major player in global health management because of its versatility, non-invasive qualities, and general application to medical fields [2]. Due to the primary diagnostic tools in about 70% of the world's healthcare facilities, ultrasound systems are used from obstetric care in rural clinics in Africa to emergency trauma assessment in disaster-affected areas [3]. However, the issue of

unreliability of these systems in various global contexts has not yet been properly dealt with by the existing international health management frameworks. The World Health Organization (WHO) has pointed out that medical equipment reliability is an important factor for achieving sustainable development of healthcare systems [4]. In spite of this acknowledgment, the systematic evaluation of the connection between global health management strategies and ultrasound equipment reliability is still very limited. This creates a situation where there are no clear guidelines for policy formulation, procurement choices, and operational sustainability planning. In this research, these lacunae are filled with a detailed analysis of the impact of ultrasound equipment reliability on global health management objectives, drawing upon evidence from different healthcare settings around the world and even proposing evidence from diverse healthcare settings.

## II. GLOBAL HEALTH MANAGEMENT FRAMEWORK

### A. WHO Health Technology Assessment (HTA) Guidelines

The Health Technology Assessment framework of the World Health Organization forms the basis for the evaluation of medical technologies within the context of global health [5]. HTA guidelines underline safety, efficacy, cost-effectiveness, and social impact as the four main principles. Nevertheless, the existing HTA frameworks do not properly account for the long-term reliability aspects, especially for the instruments used in harsh environmental conditions.

### B. Global Health Security and Equipment Resilience

Medical equipment reliability is progressively acknowledged by global health security frameworks as a necessity for emergency readiness and response [6]. The COVID-19 outbreak exposed major weaknesses in global healthcare systems, where ultrasound machines were very important in the areas of respiratory evaluation, cardiac monitoring, and procedures guidance.

### C. Sustainable Development Goals Integration

The United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) framework has specifically mentioned the reliability of health care technology as one of the factors that could help achieve the overall development goals through their interrelation [7]. Universal health coverage as per SDG Target 3.8 will be accomplished through the provision of quality essential health care services while the scientific research is to be improved and the technological capabilities in the developing countries upgraded according to SDG Target 9.5.

The reliability of ultrasound machines has a direct effect on the achievement of these goals because unreliable diagnostics restrict both the access to and the quality of health care. An economic study shows that every 1% increase in the reliability of the ultrasound systems is associated with a 0.3% rise in the overall healthcare access measurements in developing nations [8].

## III. CRITICAL ROLE OF ULTRASOUND IN GLOBAL HEALTHCARE

### A. Point-of-Care Diagnostics in Resource-Limited Settings

Ultrasound technology is the main method for diagnosis in imaging in healthcare that have few resources and where access to CT, MRI or advanced laboratory facilities is restricted [9]. In rural healthcare facilities throughout sub-Saharan Africa, ultrasound systems are the only source of diagnostic imaging in 68% of cases, thus, the reliability of the equipment becomes a life-or-death issue for millions of patients yearly.

### B. Emergency Medicine and Trauma Care

The FAST (Focused Assessment with Sonography in Trauma) protocol has become the standard practice in emergency medicine globally, and thus the rapid trauma assessment would be done with reliable ultrasound systems specifically designed for this purpose [10].

### C. Obstetric and Maternal Health

The accuracy of ultrasound has a significant role in determining the health outcomes of mothers and infants all over the world, especially in developing nations where obstetric ultrasound might just be the sole means of fetal monitoring [11].

## IV. POLICY RECOMMENDATIONS AND IMPLEMENTATION STRATEGIES

### A. WHO Guidelines Enhancement

According to the present guidelines developed by WHO regarding medical devices, there is an urgent need to totally revamp them, especially to deal with the issue of ultrasound reliability in the context of global health [12]. The suggestions for improvements are as follows:

Environmental specifications:

- Extended temperature ranges:  $-10^{\circ}\text{C}$  to  $+60^{\circ}\text{C}$
- Humidity tolerance: 20% to 95% RH
- Dust and particulate resistance: IP54 minimum rating
- Power supply flexibility:  $\pm 30\%$  voltage tolerance

Reliability requirements:

- Minimum MTBF: 2500 hours for basic systems
- Maximum MTTR: 4 hours for critical components
- Uptime requirements:  $>95\%$  for emergency-designated systems

• Preventive maintenance intervals:  
Clearly defined protocols

#### *B. International Procurement Standards*

Reliability is the primary concern, not the initial cost, in the standard procurement frameworks which are going to be used by the global health organizations [13]. The suggested procurement criteria are as follows:

Reliability scoring system:

- Climate adaptation: 25% weight
- MTBF rating: 20% weight
- Local service availability: 20% weight
- Training program quality: 15% weight
- Total cost of ownership: 20% weight

Vendor qualification requirements:

• Demonstrated deployment in similar environments

- Local service network establishment

• Comprehensive training program delivery

- Warranty and support commitments

#### *C. Technology Transfer and Local Capacity Building*

One of the prerequisites for the reliability of sustainable ultrasounds is the development of the local capacity via the transfer of technology programs [14]. The strategies for implementation are such:

Regional service centers:

• Establishment of 5-6 regional maintenance hubs per continent

- Local technician training programs
- Spare parts inventory management
- Remote diagnostic capabilities

Educational partnerships:

• University-industry collaboration for technical training

• Certification programs for local maintenance personnel

• Research partnerships for climate-adaptive technology development.

## **V. CASE STUDIES FROM GLOBAL IMPLEMENTATION**

### *A. Sub-Saharan Africa Deployment Program*

A complete five-year project that rolled out 2,400 ultrasound systems in 12 countries across sub-Saharan Africa has given great insights for global health management [15]. Some of the main findings are the following:

Reliability performance:

• High-specification systems: 94.2% uptime achieved

• Standard systems: 76.8% uptime in same environments

• Climate-adapted designs: 40% fewer failures than standard units

Economic outcomes:

• 35% reduction in patient referral rates

• 50% improvement in diagnostic accuracy

• \$12.3 million in healthcare cost savings over 5 years

Lessons learned:

• Local training programs essential for success

• Climate adaptation requirements underestimated initially

• Regional service networks crucial for sustainability

### *B. Emergency Response in Natural Disasters*

The examination of the ultrasound machines' performance in the course of the extensive natural disasters has brought up the indispensable reliability needs for emergency use [16]. The case of Hurricane Maria (2017) in Puerto Rico was a clear example.

Equipment survival rates:

• Ruggedized systems: 78% remained operational

• Standard hospital systems: 23% remained operational

• Portable battery-powered units: 89% remained operational

Response effectiveness:

• Functioning ultrasound sites provided care for 340% more patients

• Diagnostic capabilities maintained emergency care standards

• Mobile units enabled healthcare delivery in damaged facilities

These findings emphasize the importance of disaster-resilient medical equipment design for global health security.

### *C. Telemedicine Integration in Remote Areas*

The use of state-of-the-art ultrasound equipment for telehealth consultations and diagnostics is becoming one of the necessities where remote healthcare delivery is reliable [17]. A project in rural Alaska shows:

Technology requirements:

- Satellite communication integration
- High-resolution image transmission
- Remote expert consultation capabilities
- Extreme cold weather operation (-40°C to +30°C)

Clinical outcomes:

- 67% reduction in medical evacuation requirements
- 89% diagnostic accuracy for expert-guided examinations
- \$2.8 million annual cost savings for remote communities.

## VI. CONCLUSION

This thorough assessment affirms the essential connection between global health management and ultrasound equipment reliability, proving that the latter is the factor which influences healthcare access, costs, and quality of care globally. The proof categorically shows that the existing international health management structures overlook reliability issues to a great extent thus contributing to the unsustainability of the healthcare delivery system.

The proposed framework for integrating reliability considerations into global health management includes updating the WHO guidelines, setting up standard international procurement criteria, and establishing technology transfer programs for building the local capacity. If these recommendations are put into effect, then the annual number of preventable deaths could be reduced by thousands, and the global healthcare cost savings could be in billions of dollars.

Future studies should concentrate on the creation of climate-adaptive ultrasound technologies, the application of IoT-based reliability monitoring systems, and the setting up of elaborate training programs for universal use. The collaboration of artificial intelligence for predictive maintenance and the invention of modular, field-serviceable designs signify major technological breakthroughs that are required for sustainable global health equipment deployment.

## VII. ACKNOWLEDGEMENTS

The scientific research, the results of which are presented in this publication, was carried out under a project ПД6/2025 within the framework of the scientific research activity inherent to TU-Varna, funded specifically from the state budget.

## VIII. REFERENCES:

[1] Jamison et al., "Disease Control Priorities: Improving Health and Reducing Poverty," 3rd ed., World Bank Publications, Washington DC, 2017.

[2] Tran, M. Hlaing, and M. Krause, "Point-of-Care Ultrasound: Applications in Low- and Middle-Income Countries." *Curr Anesthesiol Rep* 11, 69–75 (2021).

[3] United Nations Development Programme, "The Sustainable Development Goals Report 2024," New York, NY, USA, 2024.

[4] World Health Organization, "Medical Device Regulations - Global Overview and Guiding Principles," Geneva, Switzerland, 2003.

[5] WHO, "Health technology assessment of medical devices, second edition", WHO medical device technical series, Geneva, 2025.

[6] N. H. Rahman, A. Ibrahim, K. Hasikin, and N. Razak, "Critical Device Reliability Assessment in Healthcare Services," *Journal of Healthcare Engineering*, Vol. 2023, Article ID 3136511, 2023.

[7] L. Ann Galdamez, 'The Evolving Role of Ultrasound in Emergency Medicine', *Essentials of Accident and Emergency Medicine*. IntechOpen, Jan. 10, 2019.

[8] A. Zamzam, A. Wahab, M. Azizan et al., "A Systematic Review of Medical Equipment Reliability Assessment in Improving the Quality of Healthcare Services", *Frontiers Public Health*, Sec. Digital Public Health, Vol. 9, 2021.

[9] J. Cheshire, L. Jones, L. Munthali, et al., "The FAST-M Complex Intervention for the Detection and Management of Maternal Sepsis in Low-resource Settings: A Multi-site Evaluation." *Obstetric Anesthesia Digest*. 42. 76-77, 2022.

[10] V. Stefanovic, "Role of Obstetric Ultrasound in Reducing Maternal and Neonatal Mortality in Developing Countries: From Facts to Acts", *Donald School Journal of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, Vol. 14, 1, 43-49, 2020.

[11] B. Lentz, T. Fong, R. Rhyne, N. Risko, "A systematic review of the cost-effectiveness of ultrasound in emergency care settings." *Ultrasound J*. 13(1):16, 2021.

[12] WHO, "Stengthening medical imaging capacity", (EB156/17), Geneva, 2025.

[13] Technology transfer: A collaborative approach to improve global health, IFPMA, 2021

[14] J. Maktoubian, K. Ansari, "An IoT architecture for preventive maintenance of medical devices in healthcare organizations." *Health Technol*. 9, 233–243 (2019).

[15] M. Daton, L. Fagbemi, C. Houessouvo, T. Jossou, et al., "Medical devices in Sub-Saharan Africa: optimal assistance via a computerized maintenance

management system (CMMS) in Benin.”, Health and Technology, 2019.

[16] G. Mellgard, D. Abramson, C. Okamura, H. Weerahandi, “Hurricanes and healthcare: a case report on the influences of Hurricane Maria and managed Medicare in treating a Puerto Rican resident.”, BMC Health Services Research, 2019.

[17] A. Woldaregay, S. Walderhaug, G. Hartvigsen, “Telemedicine Services for the Arctic: A Systematic Review,” JMIR Medical Informatics, Volume 5, Issue 2, 2017.

**За контакти (Affiliation):**

<sup>1</sup> ас. инж. Ангелина Димитрова  
катедра „Електронна техника и  
микроелектроника”

Технически Университет – Варна  
e-mail: angelina\_sd@tu-varna.bg

<sup>1</sup> Assist. prof. Eng. Angelina Dimitrova  
Department „Electronic equipment and  
microelectronics”

Technical University of Varna

## ПРИЛОЖЕНИЕ НА ДРОН ТЕХНОЛОГИИТЕ В МОНИТОРИНГА НА МОРСКИ ОПАДЪЦИ

Мирослава Робинсон, Даниела Тонева

DRONE TECHNOLOGIES APPLICATION IN MARINE LITTER MONITORING

Miroslava Robinson, Daniela Toneva

**Резюме:** Настоящият доклад разглежда възможностите и ефективността на дрон технологии спрямо конвенционалният мониторинг на морски отпадъци отложени по брега. Представени са резултати от проведен мониторинг с въздушен дрон през 2024 г. и сравнителен анализ с паралелни полеви наблюдения на морски отпадъци в експериментален полигон „Орлово блато“, Северно Черноморско крайбрежие. Ефективният мониторинг е ключов елемент за разбиране на количественото разпределение, пространствено-времевата динамика, установяване на източниците на морски отпадъци и оценка на прилаганите мерки за ограничаване на тяхното разпространение. Изведени са основните възможности и предизвикателства на дрон технологиите по отношение на традиционният метод за мониторинг чрез ръчен способ. Формулирани са препоръки за бъдещо прилагане на дрон технологиите в мониторинга на морски отпадъци.

**Ключови думи:** Морски отпадъци, дрон технологии, РДМС 2008/56/ЕС.

**Abstract:** (This report examines the opportunities and effectiveness of drone technologies in comparison to conventional monitoring of marine litter deposited on the coast. Results are presented from monitoring conducted with an aerial drone in 2024 and comparative analysis with parallel field observations of marine litter at an experimental polygon “Orlovo blato”, North Black sea coast. Effective monitoring is a key element for understanding quantitative distribution, spatio-temporal dynamics, identifying sources of marine litter and evaluating measures for limiting its distribution. The main opportunities and challenges of drone technology are outlined regarding traditional manual method for monitoring. Recommendations are formulated for the future application of drone technologies in marine litter monitoring.

**Keywords:** Marine litter, drone technology, MSFD 2008/56/EC.

### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

Морските отпадъци са признати като екологичен проблем в глобален план със значително негативно въздействие върху икономиката, човешкото здраве, естетиката и устойчивото управление на крайбрежните зони, приоритизиран от организации в регионален и световен мащаб [1, 2, 3, 4, 5]. Организацията на обединените нации (ООН) и конкретно Програмата за устойчиво развитие до 2030 г. „Да преобразим нашият свят“, приета през 2015 г., формулира 17 глобални цели за устойчиво развитие (Sustainable Development Goals, SDGs) групирани в три направления - икономическо, социално и екологично с действия насочени към хората, и планетата за постигане на устойчив просперитет. С акцент върху опазването на морската околна среда е основна цел 14 „Живот под водата“. Две от подцелите са фокусирани върху

предотвратяване и значително намаляване до 2025 година на замърсяването на морската среда от всякакъв вид, по-специално от наземни източници и дейности, в това число намаляване на морските отпадъци и биогенното замърсяване (подцел 14.1), както и постигане на устойчиво управление и защита на морските и крайбрежните екосистеми с оглед минимизиране на значителни неблагоприятни въздействия, предприемане на действия за тяхното възстановяване, с цел превръщането им в здрави и продуктивни морета и океани (подцел 14.2.).

На европейско ниво усилията за намаляване на морските отпадъци са адресирани в Рамковата директива за морска стратегия 2008/56/ЕО (РДМС 2008/56/ЕО), която изисква от европейските държави-членки да разработят морски стратегии, водещи до програми от мерки за постигане

или поддържане на добро състояние на околната среда в европейските морета [6] Оценката на състоянието на морската околна среда се извършва на база 11 качествени дескриптора, с конкретна формулировка за Дескриптор 10: *„Отличителните качества и количествата на отпадъци в морските води не нанасят вреда на крайбрежната и морската среда“*. През 2017 г. Европейската Комисия с ревизирано решение [7] установява специфични критерии, методологични стандарти, спецификации и стандартизирани методи за мониторинг и оценка, и дефинира прагови стойности [8, 9]. Важен етап от процеса по прилагане на РДМС 2008/56/ЕО е изготвянето и прилагането на мониторингови програми, позволяващи периодично на всеки 6 години да се оценява състоянието на морската околна среда. Регионалните морски конвенции осигуряват прилагането на принципите и целите на ООН и РДМС на басейново ниво за отделните морски региони чрез съвместни действия, мониторинг, планове и програми от мерки за предотвратяване и намаляване на замърсяването с морски отпадъци [6, 10, 11, 12, 13].

Настоящата разработка представя резултати от проведен мониторинг на морски отпадъци с въздушен дрон в експериментален полигон „Орлово блато“, Северно Черноморско крайбрежие. Паралелно е извършен конвенционален полеви мониторинг съгласно изискванията на [8, 9, 14, 15]. Изготвен е сравнителен анализ на резултатите от двата подхода, изведени са основните възможности и предизвикателства на дистанционният метод, както и препоръки за бъдещо прилагане на дрон технологиите в мониторинга на морски отпадъци

## II. МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

Мониторингът е ключов елемент за разбиране на количественото разпределение, пространствено-временната динамика, идентифициране на източниците на морски отпадъци, проследяване на тенденции и оценка на прилаганите мерки за ограничаване на тяхното разпространение, и изисква систематизирано регистриране на отпадъците. Традиционният метод за мониторинг на морски отпадъци отложени по брега включва

визуален оглед, обход и оразмеряване на избраният участък, ръчно пробонабиране, преброяване и претегляне, морфологичен анализ, категоризация и класификация по основни групи материали. Като слабост на конвенционалният мониторинг се отбелязват ограничеността му по обхват, трудоемкост и времеотнемаш, неподходящ за труднодостъпни пространства. В този контекст прилагането на дистанционни методи за наблюдение с безпилотни летателни апарати (БЛА) с оглед тяхното доказано приложение в редица сектори - селско стопанство и земеделие, морски транспорт, сигурност и спасителни операции [16, 17], се очертава като перспективна технология за мониторинг на морски отпадъци [18]. БЛА, популярни като „дронове“, предлагат възможности за повишаване ефективността и оперативността на мониторинга на морски отпадъци отложени по брега [19] Съвременните дистанционни подходи за наблюдение на морски отпадъци са насочени към използването на дрон технологии, спътникови системи и алгоритми на изкуственият интелект съвместно с технологии за машинно обучение. БЛА оборудвани с фото- и видеокамери с висока резолюция предоставят възможности за ефективно набиране на данни за морски макроотпадъци и биха могли да бъдат утвърдени като ефективен инструмент за наблюдение и картографиране. След заснемане изображенията преминават през етап на обработка, който включва геореферирание и създаване на ортофотомозайка. Следващият етап е идентификация и картографиране на морските отпадъци по основни групи материали, тяхното местоположение и плътностно разпределение. Процесът се извършва ръчно от оператор - визуален анализ, или автоматизирано чрез прилагане на алгоритми и изкуствен интелект. Пример за автоматизирана идентификация е разработената от Европейският Съюз платформа iMagine [20], която предоставя безплатен достъп до базирани на изкуствен интелект услуги за анализ на изображения от дронове при наблюдение на отпадъци по морската повърхност, крайбрежни зони, реки и езера. Автоматизираният подход значително

намалява времето за обработка, но при задължително условие за ясно заснети обекти и добра осветеност. Прецизното заснемане на различна подстилаща повърхност – плажове, дюни, скали, плитки крайбрежни води следва да бъде осигурено чрез висока пространствена и времева резолюция за създаване на надеждни и сравними данни за морски отпадъци, които да послужат за последваща оценка на състоянието на морската колна среда. При сравнително изследване на плажно-дюнни системи с БЛА резултатите отчитат несъществуващи обекти при сравнение на различни техники за автоматична обработка на изображения с висока резолюция спрямо визуален преглед от оператор, което води до некоректни стойности в плътностното разпределение на отпадъците [21].

Изследвания провеждани за наблюдения на морски отпадъци чрез дрон технологии и спътникови данни комбинират високорезолюционни изображения от БЛА и сателитни снимки, допълнително обработени за атмосферни корекции. Проеждани са изследвания с изкуствено поставени отпадъци (мрежи, бутилки, полиетиленови торбички) и изображения с много висока геопропространствена резолюция от БЛА, които са приложени за подобряване геореферането и оценка на процентното покритие от сателитни данни. [22]. Анализът показва, че при спокойни морски условия, ясна видимост могат да бъдат различени отпадъци от групата на изкуствените полимерни материали чрез наблюдение от сателит и дрон при достатъчно висока концентрация. Ограниченията на метода произтичат от хидрометеорологичните условия – вълнение, наличие на морска пяна, приливно-отливни процеси, отблясъци, пространствено-разделителна способност на сателита за засичане на по-малки обекти и невъзможността за регистриране на отпадъци частично заринати в пясъка или покрити с биомаса. Методът засега не предоставя количествена оценка за масата на отпадъците, единствено детекция и разпознаване [23, 24].

Настоящото проучване представя резултати от едногодишно наблюдение на морски отпадъци отложени върху по бреговата линия експериментален полигон

„Орлово блато“, разположен на Северно Черноморско крайбрежие. Обект на мониторинг са конкретно отпадъци по плажната ивица с размер над 2,5 см, съгласно класификацията на РДМС 2008/56/ЕС, Дескриптор D10, критерии D10C1 [1, 2]. Експерименталният полигон е избран съобразно изискванията на Ръководството за мониторинг на морските отпадъци в европейските морета, ЕК, РДМС, Техническа група „Морски отпадъци“ [8, 9]. Отговаря на поставените критерии – дължина над 1 км, достатъчна за 2 секции с дължина по 100 м всяка, по водната линия. Избраният участък е достъпен през всички годишни сезони за непрекъснато наблюдение за да отразява различни видове натиск и нива на експозиция на морски отпадъци. [8, 9, 11, 14, 15].



Фиг. 1. Географско положение и геореферирани изображения на експериментален полигон „Орлово блато“.

Експериментален полигон „Орлово блато“ попада в две защитени зони от мрежата НАТУРА 2000 - „Дуранкулашко езеро“, код BG0002050, съгласно Директива 79/409/ЕЕС за опазване на дивите птици и „Дуранкулашко езеро“, код BG0000154, съгласно Директива 92/43/ЕЕС за опазване на природните местообитания и дивата флора и фауна [25, 26] Експозицията на експерименталният полигон е с ориентация E-NE (Фиг. 1), в непосредствена близост до водолинията, изключително изложена на вълнение и преобладаващи ветрове от N-NE [27]. В рамките на годишен четирисезонен мониторинг са обследвани 2 секции с дължина 100 м, Секция 1 - Север и Секция 2 - Юг, обхващащи цялата зона между водолинията и дюните. Ширината на всяка секция е измерена перпендикулярно на

бреговата линия при провеждането на всяко сезонно наблюдение (Фиг. 1. и Фиг. 2).

При сезонните наблюдения са извършени облитания с дрон на експерименталният полигон за получаване на геореферирани изображения и конвенционален мониторинг на всяка от секциите (Фиг. 1). Заснемането на участъка е извършено с безпилотен летателен апарат модел UAV Phantom 4 Pro V2.0, оборудван с GPS за прецизиране на координатите, камера 20 мегапиксела (Фиг. 2).



Фиг. 2. Технически средства за провеждане на мониторинг на морски отпадъци.

При височина на облитане 25 м и ъгъл на заснемане 90° спрямо земната повърхност са получени геореферирани изображения на плажната ивица с разделителна способност 0,68 см/пиксел, с площ 5,342 км<sup>2</sup>.

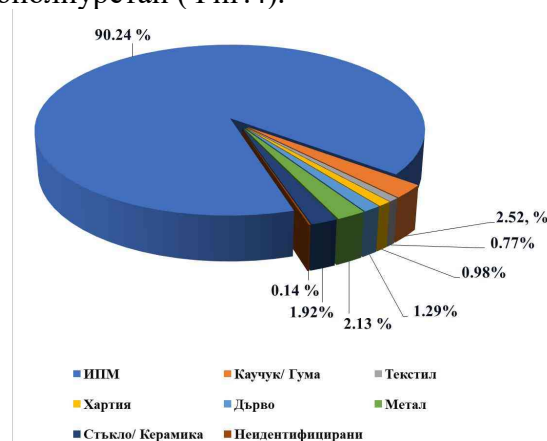


Фиг. 3. Провеждане на конвенционален мониторинг на морски отпадъци.

При провеждане на традиционният мониторинг количествата морски отпадъци са отбрани за всяка секция по отделно, описани, категоризирани в 8 основни категории според вида на материала: „Изкуствени полимерни материали“, „Каучук“, „Плат/ Текстил“, „Хартия/ Картон“, „Обработен дървен

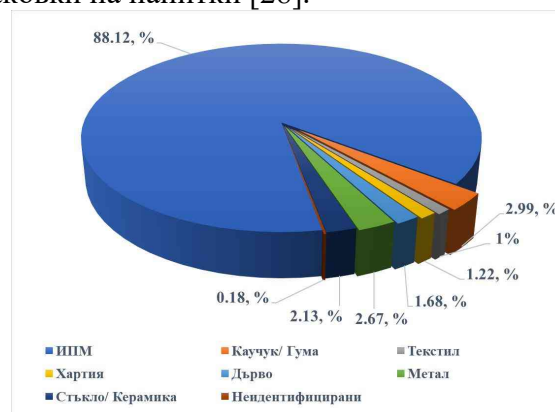
материал“, „Метал“, „Стъкло/ Керамика“ и „Неидентифицирани“ (Фиг.3).

Класификацията, преброяването и измерването на теглото са извършени в съответствие с указанията и изискванията на [8, 9, 11, 14, 15]. Преобладаващата част от събраните морски отпадъци са от групата на отпадъците от изкуствени полимери, свързани основно с храни и напитки - бутилки, чаши, капачки, опаковки, торбички, сламки, цигарени фасове и филтри, полистирол, пенополиуретан (Фиг.4).



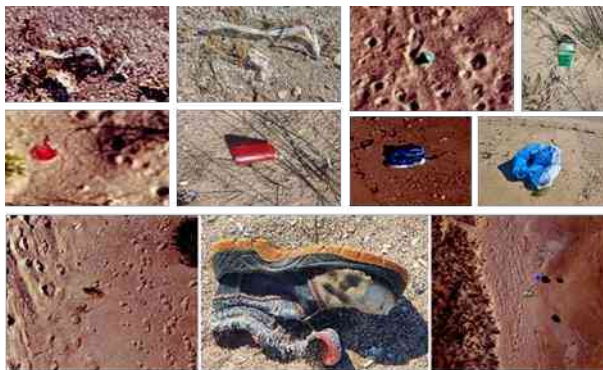
Фиг. 4. Дялово разпределение на основни групи отпадъци, конвенционален мониторинг.

Въпреки отдалечеността от силно урбанизирани райони, е установен трансграничен пренос на морски отпадъци - пластмасови капачки от напитки, етикети и опаковки на напитки [28].



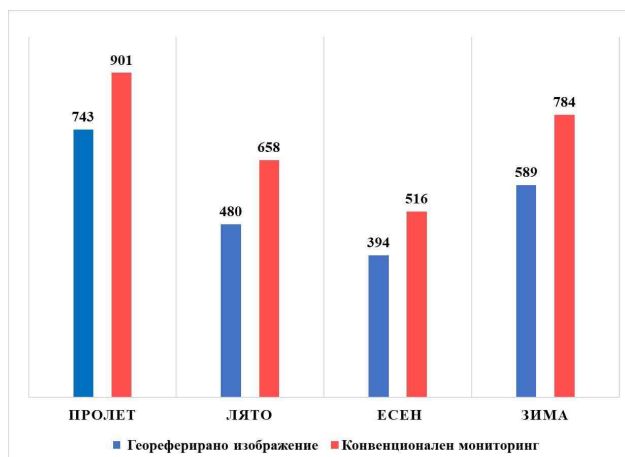
Фиг. 5. Дялово разпределение на морски отпадъци, преглед на геореферирано изображение.

Извършен е преглед и ръчно идентифициране на изображенията получени от заснемане с дрон, както и сравнителен анализ на количествата отпадъци по двата метода – конвенционален и с БЛА.



Фиг. 7. Сравнителен анализ на идентифицирани отпадъци с дрон и конвенционален мониторинг.

При преглед на ортофото изображенията резултатите отчитат по-ниски стойности във всеки от сезоните и за двете секции на експериментален полигон „Орлово блато“, но се запазва дяловото разпределение по основни категории материали (Фиг. 5 и Фиг. 6).



Фиг. 6. Количества идентифицирани морски отпадъци, брой/сезон.

При визуален преглед на ортомозайката се констатира до 27 % по-малък брой морски отпадъци спрямо количествата от конвенционалният мониторинг, като най-голяма разлика е отчетена в категория „Изкуствени полимерни материали“. Резултатите показват, че най-разпознаваеми са отпадъци в бял, червен, син, оранжев, ярко зелен цвят, рязко отличаващи се на фона на бреговата ивица [29].

Приложената комбинация за мониторинг на морски отпадъци с дрон технологии и физически обход позволи обстойно наблюдение на целият експериментален полигон, въпреки че територията попада в защитени природни

зони с нормативно установени ограничения. Като основни недостатъци на метода с БЛА са констатирани високата стойност на първоначалната инвестиция за закупуване на дрон, нерегистриране на дребни отпадъци под 2,5 см, невъзможност за идентифициране на прозрачни и полупрозрачни предмети, трудно разграничаване на отпадъци в естествени цветове – бежово, кафяваво, пясъчно жълто. При конвенционалният мониторинг финансовият ресурс за оборудване физическо пробонабиране е незначителен, времеемещ, но се извършва качествен и количествен анализ на отпадъците отложени по брега. БЛА технологиите и изображенията от тях не предоставят разграничение по материали и информация за тегло. За прецизен анализ е необходима съпоставимост с традиционният мониторинг на морски отпадъци [30].

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

При проведеният мониторинг в експериментален полигон „Орлово блато“ е извършен анализ на количественото разпределение и пространствено-времевата динамика на акумулацията на морски отпадъци. Изследвани са възможностите на приложимостта на дрон технологиите при обследване на морски отпадъци отложени по брега - варират в зависимост от височината на облитане, различни типове камери, последващи методи за анализ и обработка на изображенията за разпознаване на отпадъците. Това разнообразие затруднява директното сравнение на резултатите от различните изследвания и идентифицира необходимостта от стандартизация на метода. Поради различните условия на обследваната брегова или плажна ивица, метеорологичните и морфологичните фактори на средата е трудно е да бъде предложен универсален подход.

Въпреки недостатъците на автоматизираният метод за преглед на ортофотомозайки, използването на дрон технологии е предимство по отношение мониторинга на участъци с ограничен достъп, отнема много по-кратко време, позволява по-голяма честота на наблюдение, спестява спестява оборудване, времеви и човешки ресурс при ръчно събиране на морските отпадъци. Визуалният ръчен преглед на видеоизображения и конвенционалният

мониторинг следва да бъдат предпочитани методи с оглед постигане на точност и прецизност на данните при идентифициране и отчитане на полузаровени, счупени или части от предмети, обезцветени, прозрачни или полупрозрачни материали.

Изведените ограничения на дрон технологиите могат да бъдат превъзможнати частично чрез допълване с мултиспектрални сензори, максимална резолюция на камерите, обхват в инфрачервеният спектър. Въпреки, че се очертават като перспективен метод за съвременно наблюдение на морски отпадъци следва да се изпълняват в комбинация с конвенционален мониторинг.

#### IV. ЛИТЕРАТУРА:

- [1] United Nations Environment Programme, “Marine Litter: A Global Challenge”, UNEP, Nairobi, ISBN 978-92-807-3029-6, 2009 (United Nations Environment Programme, “From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution”, UNEP, Nairobi, ISBN: 978-92-807-3881-0, 2021.
- [2] G20, “Report on Actions Against Marine Plastic Litter”, Fourth Information Sharing based on the G20 Implementation Framework, Ministry of the Environment, Japan, 2022.
- [3] G20, “Report on Actions Against Marine Plastic Litter”, Fifth Information Sharing based on the G20 Implementation Framework, Ministry of Environment, Forest and Climate Change, New Delhi, India, 2023.
- [4] Convention for the Prevention of Marine Pollution from Land-Based Sources, Paris, June 4th, 1974, as amended by the Protocol of 26 March 1986. <https://www.bits.de/ac-archive/konventionen/on/marine1974.html>
- [5]GESAMP (2021). “Sea-based sources of marine litter”, (Gilardi, K., ed.) (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP No. 108, 109 p. ISSN 1020-4873 Published by the International Maritime Organization.
- [6]European Commission, “Directive 2008/56/EC of the European parliament and of the council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive)”, Off. J. Eur. Union 1–21 (L 164/ 1, 25.6.2008).
- [7] EC, 2017. Commission Directive (EU) 2017/845 of 17 May 2017 amending Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council as regards the indicative lists of elements to be taken into account for the preparation of marine strategies.
- [8] Joint Research Centre, “Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas”, Publications Office of the European Union, MSFD Technical Subgroup on Marine Litter (TSG-ML), EUR 26113, 2013, <https://doi:10.2788/99816>.
- [9] Joint Research Centre, “Guidance on the Monitoring of Marine Litter in European Seas”, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-21445-8, doi:10.2760/127473, JRC133594, 2023, <https://doi:10.2760/59137>.
- [10]Black Sea Commission, “Marine Litter in the Black Sea Region: A review of the problem”, Black Sea Commission Publications, Istanbul, Turkey, ISBN 978-9944-245-32-6, 2007.
- [11]OSPAR Convention, “Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area”, OSPAR, Agreement number 2010-02, ISBN 90 3631 973 9, 2010.
- [12]Barcelona convention <https://www.unep.org/unepmap/who-we-are/barcelona-convention-and-protocols>
- [13]Baltic action plan <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/10/Baltic-Sea-Action-Plan-2021-update.pdf>
- [14]A. M. Addamo, P. Laroche, G. Hanke, “Top Marine Beach Litter Items in Europe”, EUR 29249 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-87711-7, doi:10.2760/496717.
- [15]Joint Research Centre, “A Joint List of Litter Categories for Marine Macrolitter Monitoring”, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC121708, 2021, <https://doi:10.2760/127473>
- [16]Atanasov, Asparuh & Bankova, Aleksandrina. (2024). The influence of location accuracy on the estimation of crops with a budget UAV in Dobrudja. 10.1109/EEAE60309.2024.10600617
- [17]Коритаров, Т., Трансформиране на морските операции с безпилотни летателни

апарати: текущо състояние и бъдещ потенциал. Известия на Съюза на учените – Варна, серия „Морски науки”, Съюз на учените – Варна, 2024. ISSN 1314-3379, с. 13-22

[18] Bekova R and Prodanov B (2024) Spatiotemporal variation in marine litter distribution along the Bulgarian Black Sea sandy beaches: amount, composition, plastic pollution, and cleanliness evaluation. *Front. Mar. Sci.* 11:1416134. doi: 10.3389/fmars.2024.1416134

[19] Martin, C., Parkes, S., Zhang, Xiangliang Zhang, Matthew F. McCabe, M., M. Duarte, C., Use of unmanned aerial vehicles for efficient beach litter monitoring, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 131, Part A, 2018, Pages 662-673, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.045>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X18302765>)

[20] <https://www.imagine-ai.eu/case-study/aquatic-litter-drones-aquatic-litter-monitoring-system-using-drones>

[21] Gonçalves, G., Umberto Andriolo, Pinto, L., Duarte, D., Mapping marine litter with Unmanned Aerial Systems: A showcase comparison among manual image screening and machine learning techniques, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 155, 2020, 111158, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111158>

[22] Topouzelis, K., Papakonstantinou, A., Shungudzemwoyo P. Garaba, Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018), *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 79, 2019, Pages 175-183, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.011>.

[23] Gonçalves, G. Andriolo, U., M.S. Gonçalves, L., Sobral, P., Bessa, F., Beach litter survey by drones: Mini-review and discussion of a potential standardization, *Environmental Pollution*, Volume 315, 2022, 120370, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120370>.

[24] Gayathri, K., Dash, S. K., Usha, T., Thanabalan, P., Nimalan, K., Mayamanikandan, T., ... & Murthy, M. V. R. (2025). Marine litter assessment using remote sensing techniques—a review. *CURRENT SCIENCE*, 129(2), 118-128.

[25] Информационна система за защитени зони от екологична мрежа, НАТУРА 2000, Защитена зона езеро Дуранкулак, BG0000154 <https://natura2000.egov.bg/EsriBg.Natura.Public.Web.App/Home/ProtectedSite?code=BG0000154&siteType=HabitatDirective>

[26] Информационна система за защитени зони от екологична мрежа, НАТУРА 2000, Защитена зона езеро Дуранкулак, BG0002050 <https://natura2000.egov.bg/EsriBg.Natura.Public.Web.App/Home/ProtectedSite?code=BG0002050&siteType=BirdsDirective>

[27] Годишен доклад за оценка на актуалното състояние на водите в Черноморски район - 2022 г., БДЧР, МОСВ <https://www.bsbd.bg/UserFiles/File/annual%20reports/2022/2022.pdf>

[28] Toneva, D. and Robinson, M., 2025. Marine Litter Accumulation and Distribution on Durankulak Beach (Black Sea coast, Bulgaria). In *Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference* (Vol. 1, pp. 547-554). DOI: 10.17770/etr2025vol1.8689 <https://www.scopus.com/pages/publications/105011727741>

[29] Merlino, S., Paterni, M., Massetti, L., Cocchi, L., & Locritani, M. (2025). A Citizen Science Approach to Supporting Environmental Sustainability and Marine Litter Monitoring: A Case Study of USV Mapping of the Distribution of Anthropogenic Debris on Italian Sandy Beaches. *Sustainability*, 17(11), 5048. <https://doi.org/10.3390/su17115048>

[30] Isobe, A., et al. (2024). *The Guidelines for Harmonizing Marine Litter Monitoring Methods Using Remote Sensing Technologies Version 1.0*. Tokyo, Japan, Ministry of the Environment Japan, 89 pp. (including Annex and Appendix). DOI: <https://doi.org/10.25607/OBP-2042>.

**За контакти:**

<sup>1</sup>Мирослава Робинсон  
кафедра ЕООС  
Технически Университет – Варна  
e-mail: [miroslava.robinson@tu-varna.bg](mailto:miroslava.robinson@tu-varna.bg)

<sup>2</sup>доц. д-р Даниела Тонева  
кафедра ЕООС  
Технически Университет – Варна  
e-mail: [dtoneva@abv.bg](mailto:dtoneva@abv.bg)

## РАЗРАБОТВАНЕ НА МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ДРЕЙФА НА ВЕТРОХОДНА ЛОДКА ЯЛ 6

Ярослав Аргиров<sup>1</sup>, Павел Петков<sup>2</sup>

### DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE DRIFT OF A SAILING BOAT YAL 6

Yaroslav Argirov<sup>1</sup> Pavel Petkov<sup>2</sup>

**Резюме:** Статията анализира изработване на методика за определяне дрейфа на ветроходна лодка ЯЛ-6 с отчитане на външни фактори като, вятър, течение и вълна. Данните използвани при изчисленията в методиката се отчитат със специализирана апаратура, като GPS антена за глобално позициониране на лодката в реално време, OBSCAPE сензорна апаратура за измерване на течение и вълна, дигитална навигационна карта тип (Open SPN 5.12.4), която дава възможност да се свърже със GPS антената и ни дава в реално време координати, курс и да се прави корекция на курс. Изследването е насочено към избор на технология за ремонтно възстановителен процес на износени валове работещи в условия на корозионна среда.

**Ключови думи:** методика, дрейф, лодка ЯЛ-6.

**Abstract:** The article analyzes the development of a methodology for determining the drift of the sailing boat YAL-6, taking into account external factors such as wind, current, and waves. The data used in the calculations within the methodology are recorded using specialized equipment, including a GPS antenna for global positioning of the boat in real-time, OBSCAPE sensor equipment for measuring current and waves, and a digital navigation chart type (Open CPN 5.12.4), which allows connection to the GPS antenna and provides real-time coordinates and course for course correction. The study is aimed at selecting a technology for the repair and restoration process of worn shafts operating in a corrosive environment.

**Keywords:** methodology, drift, YAL-6 boat.

#### I. ВЪВЕДЕНИЕ:

След направени проучвания са установени различни методики за определяне на дрейфа на лодки, вариращи от традиционни навигационни техники до съвременни научни модели и експерименти. Те могат да бъдат разделени на две основни категории: директни (емпирични) методи събиране на данни в реални условия, чрез наблюдения и измервания и индиректни (теоретични/числени) методи използващи математически модели и симулации за предсказване на дрейфа.

##### • Директни (емпирични) методи

- Наблюдение на разликата между компасния курс и курса спрямо дъното (COG): Един от най-лесните начини за оценка на дрейфа е чрез сравняване на курса, който лодката поддържа по компас (Heading), с действителния ѝ курс спрямо земята/дъното (Course Over Ground - COG), измерен с помощта на GPS. Ъгълът между тези два курса представлява ъгъла на дрейф.

- Измерване на дрейфа с помощта на GPS и сензорна апаратура: Подобно на методиката, описана във вашето резюме, съвременните изследвания използват специализирана апаратура (GPS антени с висока точност, сензори за вълни и течения като OBSCAPE, и цифрови навигационни карти като OpenCPN) за проследяване на позицията и движението на лодката в реално време. Това позволява точно измерване на вектора на дрейф, причинен от външни фактори.

- Метод на "Leeway" (странично отместване) в полеви експерименти: Този метод, широко използван при операции по търсене и спасяване (SAR), включва провеждане на контролирани полеви експерименти с различни обекти. Измерват се скоростта и посоката на вятъра и течението, както и действителната траектория на обекта. Чрез регресионен анализ се определят специфични коефициенти на дрейф за различни типове плавателни съдове.

### • Индиректни (теоретични и числени) методи

Модели, базирани на физичните закони: Разработени са теоретични модели, които прилагат законите на физиката за движението на плаващо тяло в дадено поле на вятър и повърхностно течение. Тези модели отчитат аеродинамичните и хидродинамичните сили, действащи върху корпуса, кила, руля и надводната част на лодката.

- Метод на “удължения” кил (Extended Keel Method - ЕКМ): Тази методика, представена от Gerritsma през 1971 г., се фокусира върху изчисляването на страничната сила върху кила и руля (и корпуса) на ветроходна яхта. Използва се за оценка на цялостната странична сила и ефективността на намаляване на дрейфа.

- Използване на числени модели за прогнозиране (напр. Монте Карло симулации): В съвременните системи за търсене и спасяване се използват стохастични (вероятностни) модели като метода Монте Карло. Тези модели симулират хиляди възможни траектории на дрейф, като вземат предвид неопределеността на външните фактори (прогнози за вятър и течения) и характеристиките на обекта, за да генерират вероятностна зона на местоположение.

- Хидродинамични симулации (CFD - Computational Fluid Dynamics): Използват се сложни компютърни симулации за анализ на динамичното поведение на кораби и лодки. Те позволяват детайлно изследване на взаимодействията между корпуса и водата при различни ъгли на дрейф и условия на вълнение.

**Ключови фактори**, които се отчитат във всички методики за определяне на общият дрейф:

- Течения (повърхностни и дълбочинни).
- Вятър (аеродинамични сили).
- Вълни (включително "Stokes drift").

## II. МЕТОДИКА НА ЕКСПЕРИМЕНТА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОБЩИЯ ДРЕЙФ

**Аеродинамични сили върху ветрилата.** Движението на ветроходната лодка започва от взаимодействието на вятъра с ветрилата. Вятърът създава аеродинамични сили, които могат да бъдат разложени на две основни компоненти: Теглителна сила (тяга):

Компонента по посока на движението на лодката, която я задвижва напред. Странична сила (дрейфова сила): Компонента, перпендикулярна на движението на лодката, която я избутва встрани. Теоретичните изследвания разглеждат как формата (профилът) и ъгълът на атака на ветрилото спрямо видимия вятър влияят на тези сили. При курсове срещу вятъра (Бейдивинт), ветрилото работи като крило на самолет, генерирайки подемна сила чрез разликата в налягането от двете страни, което е основният двигател.

**Хидродинамични сили върху корпуса и шверта/кила.** За да се противодейства на страничната сила от вятъра, корпусът и особено подводната част (кил или шверт при ЯЛ 6) генерират хидродинамични сили: Странична подемна сила: Тази сила се генерира от шверта, когато лодката се движи под ъгъл на дрейф спрямо водата. Тя е насочена обратно на аеродинамичната странична сила и цели да поддържа лодката по зададения курс. Хидродинамично съпротивление: Сила, насочена срещу посоката на движение, която включва съпротивление на триене и вълново съпротивление. Теорията налага изискването за баланс между аеродинамичните и хидродинамичните сили. Лодката се движи с постоянна скорост и ъгъл на дрейф, когато силите са в динамично равновесие.

**Теория на дрейфа и "Роза на ветровете"** Дрейфът е основният обект на теоретично и практическо изследване в този проект. В теоретичен план ъгълът на дрейф зависи пряко от: Курса спрямо вятъра: При курсове Бейдивинт (остър и пълен) и Халфвинт, страничната сила е най-голяма и съответно дрейфът е най-изразен. При плаване по вятъра (фордевинд), страничната сила е минимална и дрейфът клони към нула. Сила на вятъра: С увеличаване на силата на вятъра, аеродинамичните сили растат непропорционално, което може да увеличи ъгъла на дрейф, ако хидродинамичният баланс не е адекватен. Дизайн на корпуса и шверта: Ефективността на подводния профил пряко влияе на способността за генериране на странична подемна сила и минимизиране на дрейфа. Теоретичните изследвания ще

използват концепцията на Полярната диаграма на скоростта (Polar Diagram).

Тази диаграма е графично представяне, което теоретично описва оптималните скорости и ъгли на дрейф, които даден съд може да постигне при различни скорости на вятъра и ъгли на плаване. Емпиричните данни, събрани с лодката ЯЛ 6, ще бъдат нанесени върху теоретична полярна диаграма, за да се верифицира моделът и да се оцени реалната ефективност на съда.

**Навигационна теория за определяне на дрейфа.**

Теоретичната основа за измерване на дрейфа се корени в навигацията. Движението на лодката във водата е различно от движението ѝ спрямо дъното. Курс по компас (СС): Посоката, в която е насочен носът на лодката. Истински курс (ТС или СМГ): Реалната посока на движение на лодката спрямо неподвижна отправна точка (дъното), отчетена чрез GPS. В идеални условия, без дрейф и течения,  $(\alpha = TC - CC)$ . В реалността разликата между двата курса дава ъгъла на дрейф:  $(\alpha = TC - CC)$ . Този навигационен принцип е в основата на експерименталната методология за количествено определяне на дрейфа във Варненското езеро.

**III. АПАРАТУРА**

На фиг.4 е показана схема на проведените металографски изследвания.



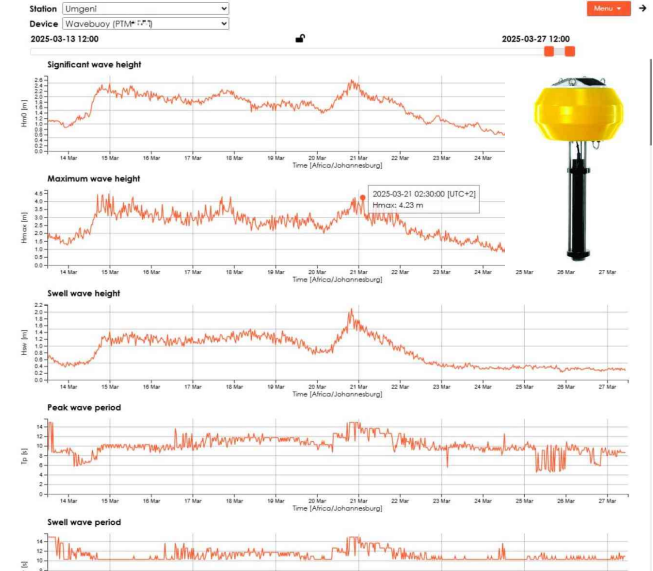
Фиг. 4. GPS антена „quescan gps receiver“

На фигура 5 е показана проявената макроструктура.

Етапи на провежданото изследване за определяне ъгъла на дрейфа при различен

курс на лодката спрямо вятъра относно розата на ветровете. Изследването се провежда на остри курсове (бейдивинд до халф винд).

Експеримента се провежда в езерото с цел да се пренебрегне влиянието на вълната, като важен фактор влияещ върху изместване на лодката от ИК.



Фиг. 5. Шамандура оборудвана със сензори за мерене на вълни и течения в реално време, със сваляне на графични данни в data portal на фирма OBSCAPE

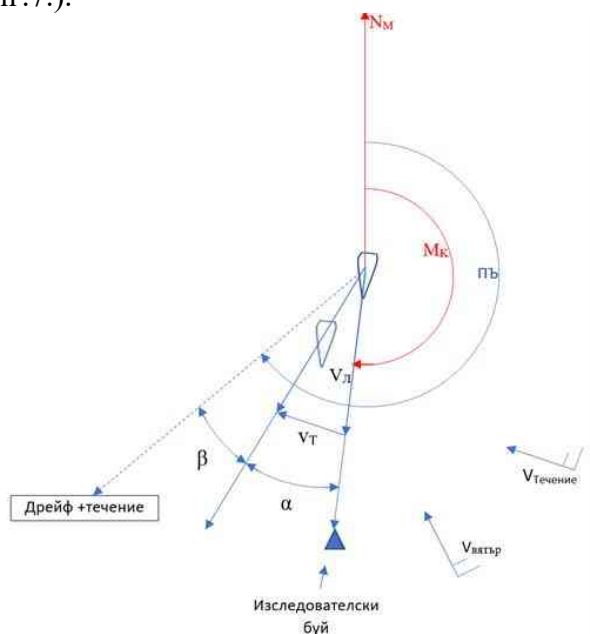
За отчитане на течението се използва наличната система (ADCP Acoustic Doppler Current Profiler – уред за измерване на скоростните компоненти на течението по X, Y, Z) за неговото определяне като се поставя в изследователски буй (шамандура) разположен на крайната точка, към която се насочва лодката чрез отчитане курса по компаса от пресметнатия  $МК = МП$ . Изследването предварително е зададено и посочен истинския курс към крайната точка буй, показан на фиг.6.



Фиг. 6. Дигитална навигационна карта (Open SPN 5.12.4)

Задаването на курса е проведено на навигационна карта “OpenCPN5.12”. Използваната карта е дигитална и дава възможност освен предварително нанасяне на

пътя на кораба и да следи новите координати при провеждане на плаването. Записа от координати изчертава истинския път на кораба. Ъгловото отклонение между предварително зададения МК с поправката от склонението ( $\delta$ -отчетено от навигационната карта и коригирано за конкретната година), който отговаря на МП към изследователския буй и реалното местоположение след проплаване на 5 кабелта по МК, (отчетено от GPS координатите на дигиталната навигационна карта) дава отчет за общата грешка на проплаването разстояние по изчисления курс. Натрупаната грешка може да се отчете графично, като ъгъл  $\alpha^\circ + \beta^\circ$  (фиг.7.).



Фиг. 7. Графично представяне на грешката натрупана от течението

За да отчетем изместването на лодката предизвикано само от дрейфа, трябва да премахнем изместването предизвикано от течението ( $\alpha^\circ$ ). Грешката натрупана от течението се определя графично (векторно), представена на фиг.2. Данните необходими за определяне на скоростта и посоката на течението при векторното пресмятане се вземат от апаратурата монтирана в изследователския буй.

Определяне дрейфа в сравнително тихи води (варненското езеро) при липса на морско вълнение използвайки табличните данни от ъгъла на дрейфа при различни скорости на вятъра и ъгъла спрямо курса на лодката, можем да включим влиянието на вълнението спрямо изместване на лодката от

линията на зададения КЪ спрямо зададена координатна точка (изследователски буй оборудван с апаратура за измерване на течението ADCP Acoustic Doppler Current Profiler – уред за измерване на скоростните компоненти на течението по X, Y, Z и апаратура за измерване на вълнението Aquadop Current Profiler 600 продукт на Nortek, Норвегия).

Задачата с влияние на вълнението при определени предварително сумарния дрейф от влияние на течение и вятър, можем да определим влиянието на вълнението върху подводната част на изследваната лодка

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Разработената методология позволява изолирането на "чистия" аеро-хидродинамичен дрейф, предизвикан единствено от взаимодействието на вятъра с ветрилата и водата с корпуса/шверта. Това се постига чрез:

Провеждане на основните експерименти в контролирана среда (Варненското езеро) с минимално вълнение и течение.

Прилагане на векторен (графичен) метод за корекция, който използва данни от специализиран изследователски буй. Чрез този метод се изчислява и изважда векторът на изместване, причинен от течението, за да се получи само ъгълът на дрейф, дължащ се на вятъра и дизайна на лодката.

Чрез събиране на таблични данни за ъгъла на дрейф при различни скорости на вятъра и ъгли спрямо курса на лодката (Бейдивинт, Халфвинт), проучването ще генерира емпирични данни с висока научна стойност. Тези данни ще позволят:

Съставяне на прецизна полярна диаграма на лодката ЯЛ 6, която служи, като научен модел за оценка на ефективността на този конкретен тип съд.

Верификация на съществуващи теоретични хидродинамични модели за малотонажни съдове.

Изследването предлага иновативен подход за диференцирано изследване на въздействието на вълнението. След като "сумарният дрейф" (от вятър и течение) бъде предварително определен и коригиран в тихи води, данните от апаратурата за измерване на вълнението (Aquadop Current Profiler 600) на буй ще позволят да се изчисли специфичният

принос на вълнението към страничното изместване на лодката. Това е резултат с приложен и чисто научен характер, тъй като позволява:

Идентифициране на хидродинамичните сили, породени от колебателното движение на водата върху подводната част на лодката.

Разработване на корекционни коефициенти за навигационни изчисления при плаване в условия на вълнение

Практическо приложение на измервателна апаратура: Студентите ще придобият уникални умения за работа с високотехнологично оборудване като ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) и методология за обработка на сложни гидрографски данни от изследователския буй.

Стандартизирана методика за изпитване: Проектът ще установи вътрешна за клуба и университета методика за провеждане на ходови изпитания на малотонажни съдове. Тази методика може да бъде приложена и при оценка на други лодки или яхти, с които клубът или ТУ-Варна разполагат в бъдеще.

Подобряване на учебния процес: Резултатите ще бъдат интегрирани в практическите занятия и курсови работи на студентите от морските специалности. Нагледното демонстриране на "теорията на практика" значително повишава качеството на обучението.

Стимулиране на екипната работа: Приложната насоченост на проекта изисква

координирана работа на екипа (навигатори, рулеви, инженери, техници), което развива ключови умения за работа в екип и съгласуваност в дейностите.

#### V. ЛИТЕРАТУРА :

[1] Gerritsma, J., & Keuning, J. A. (1971). Performance of Sailing Yachts: Final Report of the Delft Systematic Yacht Hull Series. Technical Report, Delft University of Technology, Department of Shipbuilding and Aeronautics.

[2] Keuning, H. A., & Gerritsma, J. (1991). Resistance and Propulsion of Sailing Yachts. In: Proceedings of the Fourteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, Ann Arbor, Michigan. Линк към възможен достъп/цитат в Google Books/ResearchGate

[3] Aymérich, F., & Piferrer, F. (2011). Leeway and the extended keel method: Review and future perspectives. Journal of Engineering for the Maritime Environment, 225(4), 319-328. Линк към резюме/достъп (DOI: 10.1177/1475090211425114).

[4] Allen, A., & Doherty, M. (1998). Search and Rescue Leeway Project: Final Report. U.S. Department of Transportation, U.S. Coast Guard, Office of Search and Rescue.

[5] Breivik, Ø., Allen, A. A., & Olagnon, M. (2011). On the estimation of leeway drift for search and rescue. Ocean Dynamics, 61, 959–971. Линк към статията (DOI: 10.1007/s10236-011-0391-9).

[6] Papanikolaou, A. D., & Zaraphonitis, G. N. (2007). Modern developments in ship design and operations: Theoretical and experimental methods. In: Proceedings of the 9th International Marine Design Conference (IMDC), Istanbul, Turkey.

#### За контакти:

<sup>1</sup> доц. д-р инж. Ярослав Аргиров  
катедра „МТМ”

Технически Университет – Варна  
e-mail: [Jaroslav.1955@abv.bg](mailto:Jaroslav.1955@abv.bg)

<sup>2</sup> Assoc. prof. Eng. Yaroslav Argirov PhD  
Department „МТМ”  
Technical University of Varna

## ОПРЕДЕЛЯНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТА НА ПРОТИВОПОЖАРНА СИСТЕМА НА СПАСИТЕЛЕН КОРАБ

Владимир Йорданов<sup>1</sup>, Николай Петров<sup>2</sup>

DETERMINATION OF THE OPERATING PARAMETERS OF A RESCUE SHIP FIRE SYSTEM

Vladimir Yordanov, Nikolai Petrov

**Резюме:** В работата се предлага гравитационен метод за определяне водния дебит на свободно изтичаща във въздушната среда струя. Този гравитационен метод за определяне на водния дебит, е приложен за експериментална проверка на експлоатационните параметри на противопожарната система на спасителен кораб.

**Ключови думи:** воден дебит, гравитационен метод, параметри, корабна противопожарната система, спасителен кораб.

**Abstract:** The report provides a gravitational method for determining the water flow, freely flowing into the air environment. This gravitational method for measuring of the water flow rate, is applied during the experimental verification of the operating parameters of a rescue ship fire system.

**Keywords:** water flow, gravitational method, parameters, ship fire system. rescue ship

### I. ВЪВЕДЕНИЕ :

Изследването на работата на корабните системи в експлоатационни условия с цел проверка достигането на проектните параметри налагат определянето на моментната производителност на системите при изменящи се условия на засмукване и нагнетяване.

Измерването на тази производителност с добре известните дебитомери от типа на блендите, ротаметри и въртушечни дебитомери е силно затруднено на практика поради необходимостта от спиране работата на системите, на монтаж-демонтажните операции в стеснените корабни условия, върху силно преплетени, евентуално корозирали части от дебелостенни тръбопроводи и т.н. Това най-често довежда до отклоняване от изпитвания и замервания, които биха дали ценни данни за ефективността и надеждността на корабните системи [1].

### II. МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

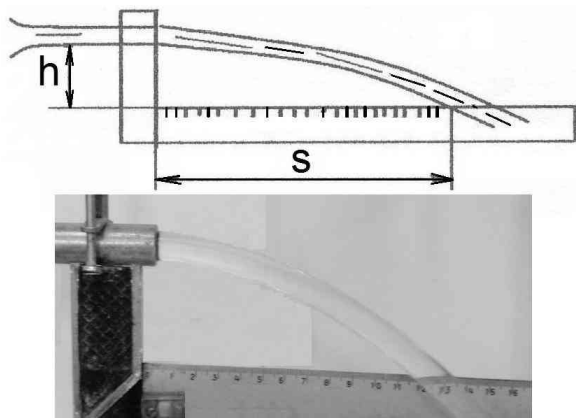
За преодоляване на посочените по-горе затруднения, в работата се предлага разработения гравитационен метод за определяне дебита на свободно изтичаща във въздушната среда струя. Подобно струйно изтичане над морското ниво може да бъде осъществено при противопожарните, осушителните и баластните системи, а също така и при товаро-зачистващите системи на наливните кораби, при изпитване с морска вода. Чрез използването на този гравитационен метод може да се извърши експериментална проверка на експлоатационните параметри на спасителен кораб.

противопожарната система и противопожарната помпа. При много от корабните системи като: осушителни, баластни, противопожарни, а също така рефулерни системи за транспортиране на пулпа съдържаща пясък или скални материали, транспортираният поток излиза през финално отворстие във вид на струя чиито параметри могат да бъдат използвани

за определяне на обемната производителност (дебит).

Предложеният метод се състои в следното: транспортираният флуид който може да бъде многофазна смес се оставя да изтича свободно в посока близка до хоризонталната. Независимо, че свободните струи изменят напречното си сечение в резултат на съпротивлението на въздушната среда на достатъчно голямо разстояние изменението е незначително, тоест струята остава компактна. В същото време поради гравитацията струята променя посоката си и в резултат на земното ускорение описва траектория близка до парабола. Определяйки величината на хоризонталното и вертикалното отклонение на известно разстояние от ръба на изходния отвор може да бъде определен дебита на транспортирания поток.

За извеждане уравненията описващи работата на гравитационния способ изхождаме от следните обстоятелства и фиг.1 :



Фиг. 1. Параметри на свободно изтичаща водна струя

2.1. След излизане от изходното отворстие струята продължава да се движи равномерно напред и изминава определено разстояние -  $S$  за време -  $t$  при скорост -  $V$  съгласно уравнение (1):

$$t = \frac{S}{V} \quad (1)$$

2.2. Вертикалното отклонение -  $h$  в резултат на земното ускорение предизвикващо равноускорително движение се получава от израза (2):

$$h = \frac{g \cdot t^2}{2} \quad (2)$$

където:

$h$  — вертикално отклонение, m;

$t$  — време, s;

$g$  — земното ускорение ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

2.3. Замествайки ( $t$ ) в уравнението (2) получаваме израза (3) и от там получаваме уравнението (4) за скоростта -  $V$  :

$$h = \frac{g \cdot S^2}{2 \cdot V^2} \quad (3)$$

$$V = \sqrt{\frac{g \cdot S^2}{2 \cdot h}} \quad (4)$$

2.4. Чрез израза (4) за дебита -  $Q$  получаваме израза (5):

$$Q = (\pi \cdot d^2 \cdot V) / 4 = 3,14159 \cdot d^2 \cdot S \sqrt{\frac{g}{32 \cdot h}} \quad (5)$$

2.5. Ако всички мерни единици за дължина са в mm, тогава получаваме израза (6) за дебита  $Q$  в литри за сек

$$Q = \pi \cdot d^2 \cdot V / 4 = 0,553681 \cdot 10^{-4} \cdot d^2 \cdot S \sqrt{\frac{1}{h}} \quad (6)$$

При измерванията от гледна точка на практиката отчитането на  $h$  и  $S$  става не спрямо оста на струята и тръбата, а спрямо периферията на струята и долната образуваща на диаметралното сечение на изходния отвор на тръбата. Предполага се също отсъствие на триене при изтичане на струята във въздушната среда, отсъствие на разширение или свиване на струята при излизане от тръбата, а също така еднакви скорости на отделните частици в сечението на тръбата и т.н. За проверка на изведената зависимост и отчитане комплексното влияние на всички фактори е проведено експериментално изследване на стенд показан на фиг.2.

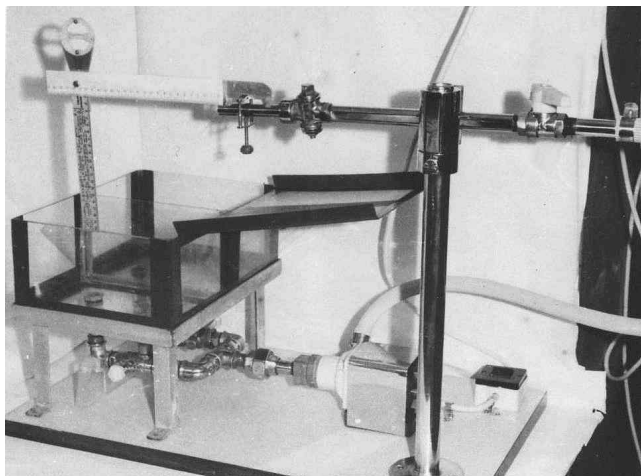
При изследването бе приет следният модел (7) на взаимовръзка между параметрите подлежащи на експериментално определяне:

$$Q = k \cdot d^\alpha \cdot S^\beta \cdot h^\lambda \quad (7)$$

След логаритмуване бе приет линеен модел (8) на взаимовръзка между логаритмите на

дебита  $Q$  и геометричните размери  $d, S, h$  чрез неизвестните коефициенти  $\alpha, \beta$  и  $\lambda$ .

$$\lg Q = \lg k + \alpha \cdot \lg d + \beta \cdot \lg S + \lambda \cdot \lg h \quad (8)$$



Фиг. 2. Стенд за измерване на дебит посредством водна струя

Всеки опит е повторен по 10 пъти, като резултатите за дебита, които са показани в табл.1 и са средни стойности за съответната комбинация от  $d, S$  и  $h$ .

Таблица 1. Резултати от експеримента

№	Диаметър $d, \text{mm}$	Разстояние $S, \text{mm}$	Вертикално отклонение $h, \text{mm}$	Среден дебит $Q, \text{l/s}$
1	14,15	100	50	0,1639
2	8,30	200	50	0,1090
3	8,30	100	100	0,0390
4	14,15	200	100	0,2299
5	14,15	100	50	0,1636
6	8,30	200	50	0,1092
7	8,30	100	100	0,0387
8	14,15	200	100	0,2310

За проверка на зависимостта (8) бе използван последователен квази-Д-оптимален план [2] за три фактора, състоящ се от 8 опита. След обработката на резултатите чрез регресионен анализ и антилогаритмуване, зависимостта (7) приема вида представен от формулата (9):

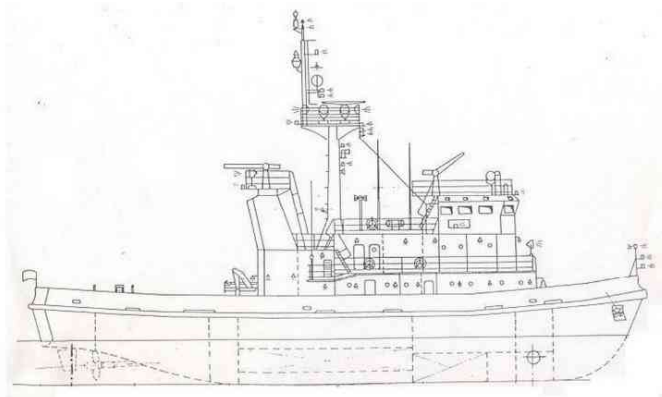
$$Q = \frac{0,578 \cdot d^{21,999} \cdot S^{1,029}}{10000 \cdot h^{0,534}} \quad (9)$$

T

Вижда се, че зависимостта (9) е много близка до зависимостта (6). Коефициентът на корелация за съответствието на този модел с експерименталните данни е 0,998, като максималната абсолютна грешка е по-малка от 2,5 %, а средноквадратичната грешка е 1,4 %.

Зависимостта (6) бе приложена при експериментална проверка на експлоатационните параметри на противопожарната система и противопожарната помпа на спасителен кораб, при следните условия:

- Височина на лафетния ствол над водолинията е  $h=10 \text{ м}$
- Разстояние до точката на съприкосновение на струята с водната повърхност -  $S=100 \text{ м}$
- Диаметър на изхода –  $d=65 \text{ mm}$ .



Фиг. 3. Общ вид на спасителния кораб

При всички размери в мм съгласно формулата (6) се получава:

$$Q = 0,553681 \cdot 10^{-4} \cdot d^2 \cdot S \sqrt{\frac{1}{h}} = 232,4 \text{ л/с} \quad (10)$$

Получената стойност съответства на дебита на противопожарната помпа за задбордна вода, която е тип 250Д140М.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Предимствата на разработения гравитационен метод за измерване на водния дебит се състоят в следното:

1/ В сравнение с обемния способ, който е много трудоемък и продължителен предложеният метод дава моментна стойност на дебита.

2/ В сравнение с методите използващи бленди или ротаметри, предложеният способ е приложим за многофазни потоци включващи пясък, глина и дори скални късове;

3/ Предложеният метод е изключително прост, изисква елементарни средства и е приложим в корабни и всякакви други производствени условия.

### IV. ЛИТЕРАТУРА :

1. Петров Н.И., Георгиев К.В. Неконтактен метод за измерване дебита на корабни системи, I национална конференция по диагностика и безразрушителен контрол на машини и съоръжения, Варна 1988, с.443-449.

2. Вучков И.Н. Оптимално планиране на експерименталните изследвания. София, Техника, 1978.

#### За контакти (Affiliation):

<sup>1</sup> д-р инж. Владимир Йорданов  
катедра „ККММ”

Технически Университет – Варна  
e-mail: v\_jord2@abv.bg

<sup>2</sup> доц. д-р инж. Никола Петров  
катедра „ККММ”

Технически Университет – Варна  
e-mail: n\_petrov@abv.bg

# FROM DIGITAL DOCUMENTATION TO AN XR MUSEUM ENVIRONMENT: AN INTEGRATED APPROACH TO CULTURAL HERITAGE REPRESENTATION THROUGH PHOTOGRAMMETRY, DIGITAL RECONSTRUCTION, XR, AND 3D FOOD PRINTING

Nadya Stamatova, Elif Gümüş, Anupama Shiji

ОТ ДИГИТАЛНА ДОКУМЕНТАЦИЯ ДО XR МУЗЕЙНА СРЕДА:  
ИНТЕГРИРАН ПОДХОД ЗА ПРЕДСТАВЯНЕ НА КУЛТУРНОТО НАСЛЕДСТВО  
ЧРЕЗ ФОТОГРАМЕТРИЯ, ДИГИТАЛНА РЕКОНСТРУКЦИЯ, XR И 3D ПЕЧАТ НА ХРАНИ

Надя Стаматова, Елиф Гюмюш, Анупама Шиджи

**Abstract:** This study proposes an integrated approach to the digital presentation of cultural heritage through Heritage Building Information Modelling (HBIM), Extended Reality (XR), and interpretative methods related to dietary practices in antiquity. The case study focuses on the archaeological site known as the Small Roman Thermae in ancient Odessos (present-day Varna, Bulgaria), with particular emphasis on a space in the north-western part of the building, which is assumed to have been associated with the provision of food and beverages (*thermopolium*). A concept for an XR museum exhibition is being developed, in which the visual environment is complemented by a multisensory component based on archaeogastronomic interpretations and experimental edible “flavour blocks.”

**Keywords:** thermopolium, Roman thermae, archaeonutrition, archaeogastronomy, 3D food printing, HBIM, photogrammetry, extended reality (XR), Varna, Odessos, immersive environment

**Резюме:** Настоящото изследване предлага интегриран подход към дигиталното представяне на културното наследство чрез цифрово моделиране на такива обекти (HBIM), разширена реалност (XR) и интерпретационни методи, свързани с храненето в античността. Казусът е фокусиран върху археологическия обект „Малки римски терми“ в античния Одесос (дн. Варна, България), с акцент върху помещение в северозападната част на сградата, за което се предполага, че е било свързано с предлагане на храна и напитки (*thermopolium*). Разработва се концепция за XR музейна експозиция, в която визуалната среда се допълва от мултисензорен елемент, базиран на архео-гастрономически интерпретации и експериментални „вкусови блокчета“.

**Ключови думи:** термопилиум, римски терми, археогастрономия, 3D печат на храни, HBIM, фотограметрия, разширена реалност (XR), Варна, Одесос, имерсивна среда

## I. INTRODUCTION

The digital presentation of archaeological heritage increasingly relies on integrated methodologies that combine precise documentation, interpretative modelling, and immersive technologies. In recent years, approaches such as Heritage Building Information Modelling (HBIM) [1], including photogrammetry based on the Structure from Motion (SfM) methodology [2], and the visualization of digital models through various forms of Extended Reality (XR) [3] have significantly expanded the possibilities for documenting, analysing, and communicating archaeological sites, particularly in cases where

the available evidence is fragmentary or functionally ambiguous.

The present study focuses on the archaeological site known as the Small Roman Thermae in ancient Odessos (present-day Varna, Bulgaria) (fig.1). In contrast to the Imperial Roman Thermae (also known as the Large Roman Thermae) [4] of the city, which constitute one of the largest bath complexes in Europe, the Small Roman Thermae represent a comparatively compact building with a limited number of spaces. Despite their smaller scale, the site presents serious interpretative challenges, primarily due to the absence of published excavation diaries and primary archaeological documentation from the

excavations carried out in the mid-twentieth century. As a result, functional interpretations rely mainly on the preserved architectural structures, spatial configuration, and later museum interpretations.



Fig.1 The Small Roman Thermae archaeological site (aerial photo: I. Atanasov, 2024, combined drawing: N.Stamatova, 2024)

Particular attention is given to a space (fig.2,3,4), located in the north-western part of the building, which has direct access from the adjacent street and is spatially separated from the main bathing circulation. Based on its plan layout, access pattern, and architectural characteristics, this space has been hypothetically associated with the provision of food and beverages, corresponding to what is described in the Roman urban context as a *thermopolium*. This functional attribution, however, remains interpretative rather than definitive, as no direct archaeological evidence, such as in situ finds or stratigraphic documentation, is currently known to the authors. In this context, the study does not aim to establish a final functional identification of the space. Instead, it adopts an interpretative framework in which uncertainty is regarded as an integral part of the research process. The photogrammetric documentation of the site is treated as a fundamental stage within an HBIM-oriented workflow, providing a precise geometric and spatial basis for subsequent interpretative modelling. Building upon this digital foundation, a conceptual approach to XR-based museum presentation is developed, focusing on the visualization of alternative spatial and functional scenarios rather than the assertion of a single historical interpretation.



Fig.2 Exposed plan of the Small Roman Thermae (photo: N.Stamatova, 2024)



Fig.3 The thermopolium, view from north (photogrammetric model: Elif Gümüő, 2025)



Fig.4 The thermopolium, view from south-east  
(photogrammetric model: Elif Gümüş, 2025)



Fig.5 Examples of “flavour blocks”  
(AI-assisted design: Nadya Stamatova, 2025)

A distinctive feature of the proposed XR exhibition concept is the inclusion of a multisensory component informed by archaeogastronomic research. Experimental “flavour blocks” (fig.5), produced through 3D food printing [5], are introduced as a means of extending the visitor experience beyond visual immersion. In this way, the study explores the potential of combining digital and sensory technologies to communicate both architectural space and aspects of everyday life in antiquity, while maintaining full transparency regarding the hypothetical nature of the proposed interpretations.

## II. ARCHAEOLOGICAL AND SPATIAL CONTEXT

The Small Roman Thermae are located in the eastern part of ancient Odessos, within the present-day urban fabric of Varna. The site is situated in an area integrated into the urban infrastructure of the Roman and Late Antique periods and connected to the ancient street network. Archaeological evidence indicates that the building functioned between the 3rd and 6th centuries AD, undergoing several construction phases and spatial transformations during this period.

In contrast to the so-called Large Roman Thermae of Odessos, which represent a monumental bath complex with an extensive spatial and technical layout, the Small Roman Thermae constitute a comparatively compact building with a limited number of rooms and a simplified circulation scheme. Their functioning begins and develops during a period that coincides with the gradual decline and restriction of activity at the Large Thermae. In this context, the Small Roman Thermae may be considered part of a broader process of transformation of urban infrastructure during the Late Antique period.

There are grounds to suggest that the construction and use of the Small Roman Thermae are also related to changes in the techno-economic possibilities for maintaining heating systems in larger public baths. The reduction or discontinuation of heating in the Large Thermae likely necessitated the construction of a smaller bath building capable of fulfilling basic hygienic and social functions under lower maintenance and resource requirements. This hypothesis corresponds to well-documented processes of adaptation and reduction of public facilities in Late Antique cities.

The preserved architectural fabric of the Small Roman Thermae reveals a layout organised around a large hall, interpreted as the main bathing or communal space, complemented by auxiliary rooms arranged along the perimeter of the building (fig.2). The orientation of the structure shows a slight deviation from the cardinal directions, reflecting adaptation to the existing urban fabric and local topography [6].

Within the scope of the present study, analytical attention is directed towards a space located in the north-western corner of the building. It is distinguished by direct access from the adjacent street and by the absence of a functional connection to the internal bathing circulation. Its position at the interface between the public street space and the interior of the building suggests activities that were not strictly integrated into the main bathing route. The room is approximately rectangular in plan and differs in floor level from the neighbouring spaces, indicating a certain degree of functional autonomy.

Based on its plan configuration, access pattern, and architectural characteristics, this space is hypothetically associated with the provision of food and beverages, corresponding to what is described in the Roman urban context as a thermopolium. This interpretation, however, remains conditional and non-definitive. The absence of excavation diaries and published archaeological reports from the excavations conducted in the 1950's significantly limits the possibility of establishing a secure functional attribution for the individual spaces within the building. Consequently, the spatial analysis presented in this study relies primarily on observable architectural characteristics, the relative position of the examined space within the building, and analogies with better-documented Roman sites. This state of interpretative uncertainty constitutes a key premise for the adopted methodological approach, in which digital modelling and XR-based visualisation are used to explore and present alternative spatial and functional scenarios rather than to impose a single, final interpretation.

### III.METHODOLOGICAL FRAMEWORK: HBIM, INTERPRETATIVE MODELLING, AND THERMOPILIUM CONCEPT

The methodological framework of the present study is grounded in an integrated HBIM-oriented approach that combines photogrammetric documentation, interpretative digital modelling, and Extended Reality (XR) - based visualisation. Rather than aiming at a definitive reconstruction, the methodology is designed to accommodate

uncertainty and to support the exploration of alternative spatial and functional interpretations.

The photogrammetric survey of the Small Roman Thermae constitutes the foundational layer of the HBIM workflow [1]. Using the Structure from Motion (SfM) methodology [2], (fig.6), a detailed three-dimensional model of the preserved architectural fabric was produced, providing accurate geometric and spatial data. This digital documentation serves as a stable reference framework for subsequent interpretative operations, including spatial analysis, hypothetical reconstruction, and immersive visualisation.



Fig.6 Structure from Motion (SfM) process  
(photogrammetric model: Elif Gümüş, 2025)

Within this framework, the space located in the north-western corner of the building is examined through an interpretative lens. Its architectural configuration (fig.7), access pattern, and relationship to the surrounding urban space allow it to be discussed in relation to the Roman thermopolium (Greek for “hot-selling place”) - a type of small-scale establishment associated with the preparation and sale of food and beverages in urban contexts. In Roman cities, thermopolia typically functioned as semi-public spaces positioned along streets or at points of high pedestrian circulation, often operating independently from adjacent buildings while remaining closely integrated into everyday urban life (fig.8). The present study seeks to employ the thermopolium concept as an interpretative model that enables the exploration of specific experiential and sensory dimensions of the site. In this sense, the thermopolium serves as a methodological construct rather than a fixed historical attribution. This interpretative

flexibility is essential for the development of the XR-based museum concept proposed in the study. The digital reconstruction does not aim to present a single, authoritative version of the past, but to visualise plausible scenarios grounded in architectural evidence and comparative analysis. XR technologies are employed to immerse the user within these scenarios, allowing spatial hypotheses to be experienced rather than merely observed.



Fig.7 Functional interpretation of the inner space (sketch: N.Stamatova, 2025)



Fig.8 Example of a thermopolium (AI-assisted design: Elif Gümüş, 2025)

A distinctive component of this approach is the integration of archaeogastronomic research into the immersive framework. The concept of the thermopolium provides a suitable context for introducing gustatory elements as part of the

interpretative experience. Experimental edible “flavour blocks,” produced through 3D food printing, are conceived as abstract sensory references rather than literal reconstructions of ancient recipes. Their role is to enhance engagement and to evoke aspects of everyday life associated with food consumption in antiquity, while remaining accessible to a broad museum audience.

Through this combination of HBIM-based documentation, interpretative modelling, XR visualisation, and multisensory experimentation, the methodological framework supports a form of heritage presentation that foregrounds interpretation, transparency, and experiential engagement. The thermopolium, understood as a hypothetical and flexible concept, becomes a focal point for testing how digital and sensory tools can expand contemporary approaches to archaeological storytelling.

#### IV. MUSEUM CONCEPT AND MULTISENSORY EXPERIENCE

The proposed XR museum concept builds upon the HBIM-based documentation and interpretative modelling discussed in the previous sections, translating analytical results into an immersive and accessible form of cultural heritage presentation. The XR environment is not conceived as a virtual replica of the archaeological site, but rather as an interpretative medium that allows visitors to explore spatial hypotheses and sensory dimensions of the past.

The concept is designed to operate in multiple modes, including on-site augmented reality (AR) and virtual reality (VR) in museum or remote settings. In the on-site scenario, XR content can be superimposed onto the existing ruins of the Small Roman Thermae, enabling the perception of reconstructed spatial relationships while visitors are physically present at the site. In off-site or museum scenarios, VR allows the reconstructed environment to be experienced independently of its physical location, thereby expanding access and interpretative possibilities.

Within the XR experience of the Small Roman Thermae, the space interpreted as a thermopolium functions as a narrative anchor through which broader aspects of everyday life, social

interaction, and urban practices in Late Antiquity can be explored.

A distinctive feature of the proposed XR concept is the integration of multisensory elements, in particular gustatory experiences informed by archaeogastronomic research. Experimental edible “flavour blocks,” produced through 3D food printing, are integrated as complementary components of the XR narrative. They are not intended to reproduce specific ancient dishes, but rather to act as abstract sensory stimuli that evoke associations with food consumption, ingredients, and culinary practices of the period.

The inclusion of gustatory elements extends the XR experience beyond visual and spatial immersion, encouraging active engagement and embodied perception. By combining digital visualisation with controlled sensory stimuli, the concept aims to establish a deeper emotional and cognitive connection between the visitor and the archaeological site, while maintaining full transparency regarding the hypothetical nature of the interpretations presented.

In conclusion, the proposed XR museum concept demonstrates how digital technologies can be employed not only to visualise archaeological spaces, but also to experiment with new forms of multisensory storytelling. Within this framework, interpretation is presented as an open and exploratory process that allows visitors to perceive the past as a dynamic and experiential construct rather than a fixed historical narrative.

**Appendix: Roman Thermopolium Menu  
(Adapted for XR Multisensory Interpretation)**

Outlines the methodology and technical specifications for translating these elements into VR Flavor Blocks using advanced 3D printing for tactile prototyping.

**1. Roman Thermopolium Menu**

The menu items were selected based on archaeological finds and historical recipes, focusing on the cheap, quick, and warm dishes served from the embedded *dolia* (large earthenware jars) on the counter.

Dish Name	Simple Description	Primary Historical Source
Puls Frumenti	Thick Grain Porridge: A hot, basic porridge made from wheat (emmer or spelt), seasoned with herbs or cheese. The primary Roman staple food.	Literary/Archaeological: Cited by Roman authors (e.g., Pliny the Elder) as the original Roman diet. Its constant presence is implied by the <i>dolia</i> (storage jars) embedded in thermopolium counters.
Isicia Omentata	Roman Meat Patty/Burger: Minced meat (often pork, sometimes fish in coastal regions like Varna/Moesia Inferior), mixed with pine nuts, wine-soaked bread, and pepper, then formed into a patty.	Literary: Recipe preserved in the Roman cookbook Apicius ( <i>De re Coquinaria</i> , Book II). This is the key textual source defining its ingredients and preparation.
Legumes & Fowl Stew	Hot Pot/Stew: A hearty mix of legumes (lentils, chickpeas, fava beans) with cheap cuts of pig, goat, or duck. It was kept warm and served by the ladle from the <i>dolia</i> .	Archaeological: Residue analysis of <i>dolia</i> contents from the recently excavated Pompeii thermopolium (Regio V) confirmed the presence of duck, pig, goat, and fish fragments cooked together.
Lomentum (Barley Water)	The Restorative Draught: A nutritious, non-alcoholic beverage made by simmering	Nutritional/Historical: Widely cited by Hippocrates and Pliny the Elder as a "ptisan" (medicinal tea). It

Dish Name	Simple Description	Primary Historical Source
	hulled barley with water, then straining and chilling the liquid. Often lightly sweetened with a touch of honey or brightened with a squeeze of lemon (or vinegar-alternative).	was used to sustain physical labor and soothe the digestive system, making it the "ancient electrolyte drink" for both laborers and the elite.

### 2.Methodology: Incorporating Flavor into VR Blocks

The goal is to translate the food’s complex material properties into simple, quantitative data that can be coded into a VR asset (the "Flavor Block"). This involves quantifying the sensory experience.

Concept to Encode	Simplified Translation for VR	Technical Rationale
Flavor/ Aroma	Nutrient and Spice Profile: Assign a simple variable Garum Ratio (e.g., High, Medium, Low) to simulate the intensity of the Garum (fish sauce) flavor.	Food Chemistry: Assigning relative values to historical key ingredients (e.g., Garum, Defructum (reduced wine)) allows the VR experience to trigger a specific sensory response within the software.
Texture/ Mouthfeel	Rheological Mapping (G' and G'' values): Translate the food's stiffness (e.g., the chewiness of the meat) and	Food Rheology: Scientific fields use storage modulus (G'-elasticity/stiffness) and loss modulus (G''- viscosity/flow) to quantify a food's texture. This data is

Concept to Encode	Simplified Translation for VR	Technical Rationale
	fluidity (e.g., the viscosity of the porridge) into numerical values.	the direct input for VR haptic feedback.
Nutritional Impact	Estimated Caloric Density (E.C.D.): The "block" is assigned a simple numerical E.C.D. value based on a modern analysis of the ancient recipe's ingredients.	Dietary Science: A core function of the VR block is to simulate Energy Value (e.g., Puls provides High Carbs, Isicia provides High Protein, which drives gameplay effects (stamina/health).

### 3.Technical Characteristics for 3D Printing Prototypes


A Multi-Material Fused Deposition Modeling (MM-FDM) or PolyJet system is required to create physical models of the Flavor Blocks that accurately reflect the textures derived from the rheological data, thus ensuring the VR haptic feedback is realistic.

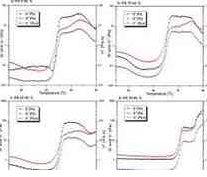
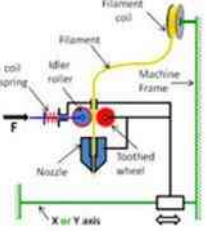
Technical Parameter	Specification	Purpose in Prototyping	Key Source
Extrusion System	Dual or Quad Extrusion Head (MM-FDM)	Allows simultaneous printing with Multiple Materials (e.g., a rigid core and a soft outer layer) to simulate the layered	Engineering/ Additive Manufacturing: Fundamental requirement for combining materials with different Shore Hardness (Durometer) in a single print job.

Technical Parameter	Specification	Purpose in Prototyping	Key Source
		structure and varying hardness of the food items (like the Isicia patty wrapped in caul fat).	
Resolution	≤ 50 Micron Layer Thickness	Essential for capturing Micro-Surface Topography . High-resolution printing ensures the prototype has the tactile roughness of coarse-ground grain or a crisped-up meat exterior, which directly informs VR texture mapping.	Technical: Standard benchmark for high-fidelity multi-material printers to achieve the fine detail needed for Haptic Assessment.
Materials	Variable Durometer Polymers (TPU & PLA)	The use of Thermoplastic Polyurethane (TPU) for soft/viscous parts (like Puls and Polylactic Acid (PLA) for	Polymer Science: TPU offers high flexibility (low G', while PLA offers high stiffness (high G').

Technical Parameter	Specification	Purpose in Prototyping	Key Source
		hard/rigid parts (like Isicia or Panis Quadratus) allows direct physical testing of the G' and G'' values.	
Integrated Process	Closed-Loop Control / In-Line Rheometer Port	A future ideal state where the printing process can be monitored or even adjusted based on real-time rheological data, ensuring the print matches the encoded G'/G'' values.	Advanced Food Printing Research: Highlighted by researchers as the necessary step to bridge the gap between material property data and physical fabrication.

**Illustration samples**

Concept	Description	Direct Image URL
1. Historical Context: Roman Thermopolium	A photo of the counter from the recently excavated Thermopolium in Pompeii (Regio V), showing the embedded <i>dolia</i> (large storage	 <a href="https://pompeiiites.org/en/comunicati/the-">https://pompeiiites.org/en/comunicati/the-</a>

Concept	Description	Direct Image URL
	jars) where hot food was served. This visualizes the origin of the "Flavor Block."	ancient-snack-bar-of-regio-v-resurfaces-in-its-entirety-with-scenes-of-still-life-food-residues-animal-bones-and-victims-of-the-eruption/
2. Scientific Quantification: Rheology	A technical diagram illustrating the relationship between <b>Storage Modulus (G')</b> and <b>Loss Modulus (G'')</b> over time or frequency. This is crucial for explaining how you quantify food texture for haptic feedback.	 <a href="https://www.researchgate.net/figure/Rheological-results-showing-changes-of-storage-modulus-G-loss-modulus-G-and_fig3_40040773">https://www.researchgate.net/figure/Rheological-results-showing-changes-of-storage-modulus-G-loss-modulus-G-and_fig3_40040773</a>
3. Technical Prototyping: 3D Printing	A diagram of a <b>Multi-Material FDM</b> (Fused Deposition Modeling) 3D printer extrusion head. This shows the mechanism that allows combining different polymers (like flexible TPU and rigid PLA) to model varied food textures.	 <a href="https://www.researchgate.net/figure/Basic-diagram-of-FDM-3D-printer-extruder-a-Direct-extruder-b-Bowden-extruder_fig1_343539037">https://www.researchgate.net/figure/Basic-diagram-of-FDM-3D-printer-extruder-a-Direct-extruder-b-Bowden-extruder_fig1_343539037</a>

## V.CONCLUSIONS

The present study demonstrates the potential of an integrated approach combining HBIM-based digital documentation, interpretative modelling, and Extended Reality (XR) technologies for the contemporary presentation of archaeological heritage. The case study of the Small Roman Thermae in ancient Odessos illustrates how sites characterised by limited primary documentation and uncertain functional attribution can be analysed and communicated through methodologies that treat interpretative uncertainty as a starting point rather than a limitation.

The focus on a hypothetically defined space associated with the provision of food and beverages enables the development of an interpretative scenario in which architectural evidence is combined with comparative analysis and archaeogastronomic research. In this context, the thermopolium is not approached as a definitively proven function, but rather as a methodological tool for exploring aspects of everyday life and urban practices in Late Antiquity.

The proposed XR museum concept extends traditional visual modes of presentation by incorporating multisensory elements, in particular gustatory experiences realised through experimental edible “flavour blocks.” This approach seeks to enhance audience engagement and to encourage experiential modes of perception, while maintaining scientific rigour and transparency regarding the hypothetical nature of the interpretations presented.

More broadly, the study highlights how contemporary digital technologies can be employed not only for reconstruction and visualisation, but also for experimentation with new forms of archaeological storytelling, in which interpretation remains an open, process-oriented, and dialogical act between scholarly research, the digital environment, and the visitor

### III. REFERENCES

1. Стаматова, Н., Василев, В., Гавраилов, С., Разликите между BIM и NBIM, XII Международна научна конференция по архитектура и строителство ArCive 2025, 31 май 2025, Варна, България, DOI: 10.13140/RG.2.2.25155.26406, <https://events.vfu.bg/arcive/files/2025/Proceedings%20ArCive%202025.pdf>
2. Stamatova, N., Gümüş, E., 2025 Photogrammetric Model of the Archaeological Site Small Roman Thermae, Varna, Conference: Cultural Heritage of Varna and the Black Sea Region'2025, annual conference of the Union of Scientists -Varna DOI: 10.13140/RG.2.2.18631.97443
3. Стаматова, Н., 2024, AR vs. VR, или защо да предпочетем добавената пред виртуалната реалност, Международна научно-практическа конференция „Дигитални технологии в архитектурата, дизайна и визуалните изкуства“, Нов български университет, София DOI: 10.13140/RG.2.2.24882.52168
4. Stamatova, N., 2019. Digitization of the archaeological site of the Imperial Roman Thermae of the Ancient Odessos – Part I. In: Digitization of Cultural-Historical Heritage. National Center for Digitization of the Balkans, Black Sea Region and Caucasus – NNEK-UNESCO, Sofia, Chapter 6, pp.111–122. ISBN 978-954-8405-71-3
5. Shiji, A., Reconstructing a 14th-Century Varna Merchant's Feast through 3D Food Printing: A Digital Humanities Approach, 2025, Conference: Cultural Heritage of Varna and the Black Sea Region'2025, annual conference of the Union of Scientists -Varna DOI: 10.13140/RG.2.2.26011.32803
6. Dimitrov, O., Vacheva, K., Korzhenkov, A., 2022, et al. Seismic Deformations in the Archaeological Sites of Varna, Bulgaria. *Izv., Phys. Solid Earth* 58, 127–147. DOI: 10.1134/S1069351322010013

**Affiliation:**

Nadya Stamatova. Ph.D, M.Arch.  
Architectural Spies EOOD, Director  
e-mail: [nadya.stamatova@gmail.com](mailto:nadya.stamatova@gmail.com)  
mobile: +359 894 318113

Elif Gümüş, B.Arch.  
Architectural Spies EOOD, Intern Architect  
[elifgumus429@gmail.com](mailto:elifgumus429@gmail.com)  
mobile: +90 536 7926067

Anupama Shiji  
Architectural Spies EOOD, Intern Architect  
[anupamashiji14@gmail.com](mailto:anupamashiji14@gmail.com)  
mobile: +48 579 117770

## GENERATIVE AI IN THE INTERPRETATION OF MEDICALLY-CONSTRAINED ARTISTIC EXPRESSION: A 2025 CASE STUDY

Nadya Stamatova

ГЕНЕРАТИВЕН AI ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИЯТА НА ХУДОЖЕСТВЕНИ ПРОЯВИ  
С МЕДИЦИНСКИ ОГРАНИЧЕНИЯ: КАЗУС ОТ 2025 Г.

Надя Стаматова

**Abstract:** This paper presents a 2025 case study examining the use of generative AI in interpreting a hand-drawn sketch created under severe communicative limitation following tracheostomy. An iterative human–AI prompting process was applied to reconstruct possible semantic interpretations of an abstract, dynamically structured drawing. While object-level elements (horse, rider, helmet) were successfully generated under hypothesis-guided prompting, the system consistently failed to preserve the kinetic tension encoded in the original sketch, particularly the diagonal propulsion axis and pre-leap compression. The results suggest that contemporary generative architectures prioritize symbolic object reconstruction over embodied dynamic inference. The study highlights the boundary between probabilistic semantic generation and phenomenological meaning attribution, demonstrating that generative AI can support semantic exploration but cannot access experiential intention. Interpretative responsibility therefore remains human.

**Keywords:** Generative AI; Human–AI interaction; Prompt engineering; Semantic reconstruction; Dynamic representation; Kinetic tension; Medically constrained communication; Diffusion models; Interpretative limits.

**Резюме:** Статията представя казус от 2025 г., разглеждащ използването на генеративен изкуствен интелект при интерпретация на ръчно създадена графика, възникнала при тежко комуникационно ограничение след трахеостомия. Чрез итеративно взаимодействие човек–AI бяха реконструирани възможни семантични прочити на абстрактна рисунка с ясно изразена динамична структура. Макар обектните елементи (кон, ездач, шлем) да бяха успешно възпроизведени при хипотезно насочено промптиране, системата не съхрани кинетичното напрежение на оригинала, включително диагоналната ос на отскок и компресията преди скока. Резултатите показват, че съвременните генеративни архитектури приоритизират символното възпроизвеждане на обекти пред реконструкцията на въплътена динамика. Казусът очертава границата между вероятностна семантична генерация и феноменологично приписване на смисъл, като подчертава, че интерпретационната отговорност остава човешка.

**Ключови думи:** Генеративен AI; взаимодействие човек–AI; промпт инженеринг; семантична реконструкция; динамично представяне; кинетично напрежение; комуникационни ограничения; дифузионни модели; интерпретационни граници.

### I. INTRODUCTION

Generative artificial intelligence has increasingly been applied to tasks involving semantic reconstruction, visual synthesis, and interpretative assistance. While significant progress has been achieved in object recognition and image generation, less attention has been given to the capacity of such systems to reconstruct embodied dynamic intention from abstract or minimally specified inputs.

In contexts of severe communicative limitation, such as speech loss following tracheostomy, non-verbal

visual expression may become a primary channel of meaning transmission. The interpretative challenge in such situations is amplified by the absence of verbal clarification, increasing semantic uncertainty. This study examines a 2025 case in which a hand-drawn abstract sketch, created under conditions of communicative constraint, was subjected to iterative interaction with a generative AI system. The objective was not diagnostic evaluation, but semantic reconstruction and hypothesis exploration. The central research question is: To what extent can generative AI preserve and reconstruct kinetic compositional intent embedded in an abstract human drawing?

The contribution of this paper lies in identifying a structural limitation in generative image systems: while object-level symbolic reconstruction is robust, dynamic constraint transfer—specifically torque-based propulsion encoding—remains insufficiently captured.

## II. CASE BACKGROUND

The case concerns an adult individual who experienced significant speech loss following tracheostomy. Verbal articulation was severely limited, and written communication was inconsistent. Under these conditions, a hand-drawn sketch was created on a whiteboard (Fig.1) as a form of non-verbal expression.

The drawing process unfolded sequentially. The lower portion of the composition was executed first and appears to represent the hind legs of a horse. The torso area and a horse's head with a mane were then sketched; both elements were subsequently erased, most likely as part of a correction or compositional refinement.

Following the erasure of the horse's head, attention shifted to the upper part of the composition, where the head of a presumed rider was sketched. A clearly structured composite element was constructed, consisting of a triangular upper form, a band-like base beneath it, and a more softly contoured segment below. Taken together, these three components resemble a medieval helmet configuration. The rider figure itself was rendered in a comparatively rough and partially illegible manner.

In contrast, certain linear elements were articulated with greater clarity. A curved line suggestive of a flexible object such as a whip was distinctly emphasized. In addition, a straight line running parallel to the horse's torso was introduced and later interpreted as a spear.

The sequence of drawing, erasure, and selective refinement indicates intentional compositional structuring rather than spontaneous abstraction. The fact that the composition begins with the hind legs rather than the head may suggest an emphasis on propulsion and take-off as the organizing principle of the image.

The subsequent interaction with AI was undertaken to examine whether a generative system could assist in reconstructing the possible semantic

content embedded in this dynamically structured configuration.

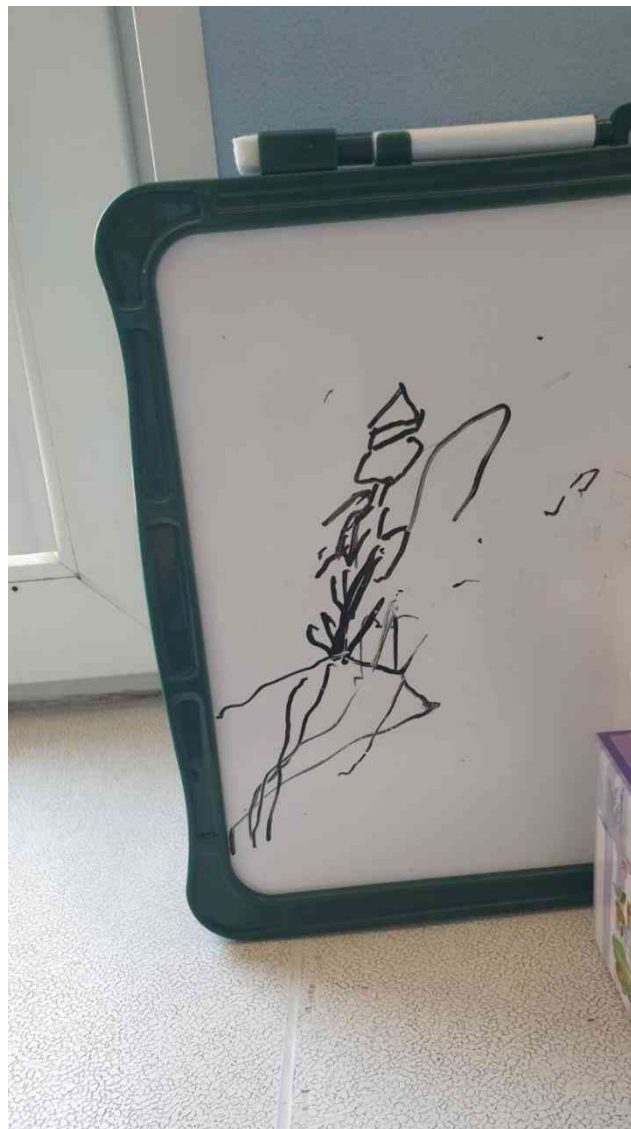


Fig.1 Original sketch (drawing: P.Petrov; photograph: N.Stamatova, 2025)

## III. METHODOLOGY: HUMAN – AI INTERACTION PROTOCOL

The interaction with the generative AI system followed an iterative, hypothesis-driven process. The objective was not automated diagnosis or definitive interpretation, but structured semantic exploration under conditions of communicative uncertainty. Contemporary diffusion-based generative models have demonstrated strong object-level and high-resolution image synthesis capabilities [1], [2]. These architectures optimize probabilistic reconstruction in latent space,

enabling semantic convergence under prompt constraints.

- **3.1 Initial Open-Ended Interpretation**

The background-cleaned sketch (Fig.2) was submitted to the AI system without contextual information. The prompt requested a description of the depicted image. The system generated multiple probabilistic interpretations, including a human figure, a person in motion, a climber, and an abstract drawing. These responses reflected object-level pattern recognition based solely on visual characteristics.



Fig. 2. Sketch with background removed using AI-assisted processing (edited: N. Stamatova, 2025)

- **3.2 Contextual Augmentation**

In the second stage, limited contextual information was introduced. The system was informed that the drawing had been created by an adult individual who had lost the ability to speak. No diagnostic assumptions were provided. The purpose of this augmentation was to observe whether semantic convergence would shift under minimal human framing.

- **3.3 Hypothesis-Guided Prompting**

In the subsequent stage, an expert-informed hypothesis was introduced, suggesting that the drawing might represent a medieval mounted warrior. An additional image (Fig.3), in which the elements erased during the drawing process were reconstructed in red, was provided to support this semantic probe. This possibility was not presented as a conclusion, but as a test hypothesis accompanied by the augmented image.

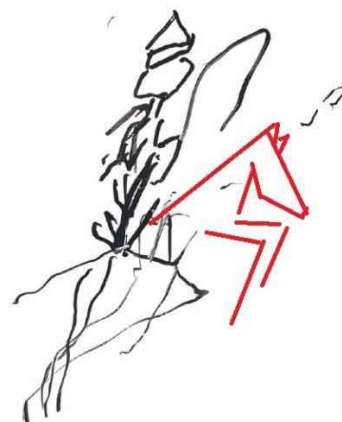


Fig.3 Sketch with erased elements digitally reconstructed in red (reconstruction: N.Stamatova, 2025)



Figs. 4–5. Initial AI-generated iconographic reconstructions of a mounted medieval warrior (prompting: N. Stamatova, 2025)

Further prompts requested interpretations within folkloric, religious, and archetypal frameworks.

The AI system converged toward iconographic reconstructions (Figs. 4, 5) that included a rider, horse, helmet, and weapon-like elements. These outputs demonstrated semantic alignment with the introduced hypothesis.

- **3.4 Text-to-Image Reconstruction and Dynamic Constraints**

In the next phase, the system was instructed to generate a colored image derived from the sketch while preserving the dynamic structure of the original. Explicit constraints were introduced, including:

- preservation of the diagonal compositional axis

- emphasis on propulsion from the hind legs
- representation of pre-leap compression
- avoidance of a static frontal pose

Multiple iterations were conducted with refined prompts emphasizing movement, tension, and torsional asymmetry (Figs. 6–9).



Figs. 6-9. AI-generated visual outputs exploring iconographic reconstruction and dynamic constraints (prompting: N. Stamatova, 2025)

### 3.5 Evaluation Criteria

The generated outputs were evaluated qualitatively according to the following criteria:

1. Object-level correspondence (horse, rider, helmet, weapon).
2. Preservation of dynamic tension and propulsion vectors.
3. Maintenance of asymmetrical force distribution consistent with take-off mechanics.

While object-level correspondence was consistently achieved, dynamic constraint transfer was not preserved. The generated images exhibited stabilized postures, bilateral symmetry, and reduced kinetic compression.

This methodological sequence enabled comparative observation between open-ended

interpretation, hypothesis-guided semantic convergence, and constrained dynamic reconstruction.

## IV. RESULTS

### 4.1 Semantic Convergence

Across successive prompting stages, the generative AI system demonstrated increasing semantic convergence toward a culturally codified representation of a mounted medieval warrior. While the initial open-ended interpretation produced multiple high-probability hypotheses at the object level, the introduction of contextual framing and hypothesis-guided prompting resulted in stabilization around a consistent iconographic type.

The generated images repeatedly included a rider, horse, helmet, and weapon-like elements. This indicates successful symbolic reconstruction aligned with the proposed medieval warrior hypothesis.

Object-level correspondence proved robust. The system effectively translated abstract linear cues into recognizable figurative components. These findings suggest that generative architectures are capable of resolving semantic ambiguity through convergence toward culturally established visual archetypes when guided by structured prompts.

### 4.2 Dynamic Constraint Failure

Despite successful object reconstruction, preservation of dynamic structure was not achieved. The original sketch encoded propulsion through emphasis on the hind legs, a diagonal force orientation, and compression consistent with a pre-leap phase.

In contrast, the generated outputs consistently gravitated toward stabilized configurations. Limb positioning tended toward bilateral symmetry, and weight distribution appeared evenly balanced. Even under repeated prompt refinement emphasizing movement, take-off mechanics, and tension, the system produced compositions resembling posed or suspended representations rather than mechanically grounded propulsion.

This indicates that dynamic constraint transfer from the original sketch to the generated image did not occur.

### 4.3 Biomechanical and Compositional Analysis

The central structural feature of the original sketch lies in its dynamic organization. The composition does not prioritize facial detail or iconographic clarity, but force generation. The drawing begins with the hind legs, establishing propulsion as the organizing principle of the image.

In equestrian biomechanics, the take-off phase is characterized by rear-leg compression, diagonal force transmission, and asymmetric torque distribution. This phase requires visible structural imbalance and muscular tension. The original sketch encodes precisely these indicators through posterior emphasis and diagonal alignment.

The AI-generated images, by contrast, tended toward balanced weight distribution and symmetrical configurations. Movement was suggested through surface-level visual markers, but without a clearly articulated propulsion vector or mechanical compression.

The diagonal axis present in the original drawing functions not merely as a compositional inclination but as a vector of force. The inability of the generative system to preserve this vector suggests that it does not internally simulate physical mechanics. Instead, it synthesizes statistically plausible configurations derived from learned distributions.

The divergence between propulsion-driven structure in the human sketch and pose-stabilized structure in the AI reconstructions constitutes the primary empirical finding of this study.

## V. DISCUSSION

Semantic convergence toward a mounted medieval warrior acquired greater clarity not through further algorithmic optimization, but within the context of human dialogue. During a conversation related to cultural heritage, the keyword “bogatyр” was suggested, directing attention to established epic representations. This led to the identification of the painting *Bogatyрsky Skok* (1914) by the Russian artist Viktor Vasnetsov (1848–1926) (Fig. 10),[3].

The painting depicts the epic hero Ilya Muromets at the precise moment of dynamic take-off. The horse’s hind legs are visibly compressed, the compositional axis is strongly diagonal, and the force orientation of the bodies conveys imminent

propulsion. The structure demonstrates mechanical tension and phase specificity comparable to the dynamic organization observed in the original sketch.

Notably, despite multiple iterations and carefully refined prompts emphasizing movement, tension, and diagonal force orientation, the AI system did not achieve a comparable dynamic reconstruction. The generated images tended to stabilize posture and symmetrize weight distribution rather than reproduce the compressed pre-leap phase.

The recognition of a visual parallel with Vasnetsov’s composition emerged within human communication rather than through algorithmic interaction. This moment delineates a structural boundary. While the generative system demonstrates capacity for semantic classification and iconographic stabilization, it does not possess mechanisms for associative cultural recognition grounded in experiential or biographical context.

The distinction between probabilistic semantic generation and human associative intuition becomes particularly evident in this case. Human recognition integrates visual structure with cultural memory, historical narrative, and analogical reasoning. The generative model operates through statistical consistency and optimization of visual plausibility.

Thus, the present case does not illustrate a technical failure of AI, but rather a structural boundary between algorithmic reconstruction and human interpretative cognition. The generative system effectively supports semantic exploration, yet the final recognition of dynamic analogy arises within human dialogue.



Fig. 10. Viktor Vasnetsov, *Bogatyрsky Skok*, 1914 (oil on canvas)

### III. CONCLUSION

The present study analyzed the interaction between a human-generated sketch and a generative AI system under conditions of communicative uncertainty. The results demonstrate that, under structured prompting, the system achieves semantic convergence at the object and iconographic levels.

However, the dynamic constraint embedded in the original sketch was not preserved. While the generated images reproduced recognizable elements such as a horse, rider, and helmet, they did not maintain force orientation, hind-leg compression, or phase-specific take-off mechanics.

The analysis delineates a boundary between probabilistic visual synthesis and force-constrained biomechanical representation. Generative architectures optimize statistical plausibility and structural coherence but do not internally model kinematic constraints or phase-specific motor organization.

The findings do not indicate a technical failure of AI, but rather an architectural limitation in transferring dynamic and biomechanical structures from abstract sketch input to realistic visualization. Generative systems are effective in semantic reconstruction; however, the reproduction of force-oriented dynamic structure remains outside the representational scope of current models.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The author acknowledges P. Petrov, whose final visual expression forms the basis of this study.

The author expresses gratitude to Aneliya Atanasova for the cultural-historical reference that contributed to the identification of *Bogatyrsky Skok*. The author also thanks Prof. Ingeborg Bratoeva-Daraktchieva for conceptual discussion on archetypal structures that informed the analytical framework of this research.

### REFERENCES

- [1] J. Ho, A. Jain and P. Abbeel, “Denoising diffusion probabilistic models,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 33, pp. 6840–6851, 2020.
- [2] R. Rombach et al., “High-resolution image synthesis with latent diffusion models,” in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, pp. 10684–10695.
- [3] V. Vasnetsov, *Bogatyrsky Skok*, oil on canvas, 19

**Affiliation:**

Nadya Stamatova. Ph.D, M.Arch.  
Architectural Spies EOOD, Director  
e-mail: nadya.stamatova@gmail.com  
mobile: +359 894 318113

ISSN 1310-5833

---