

UDC 550.34:551.243:550.835.2

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.7.988

ON RADON ACTIVITY OF TECTONIC FAULTS IN THE AREA OF SITING THE SINOP NPP IN THE REPUBLIC OF TÜRKIYE

SEDIN V.L.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
ULYANOV V.Yu.², *Ass.*,
ZAHILSKYI V.A.³, *Ph. D., Assoc. Prof.*,
KOVBA V.V.^{4*}, *Ph. D., Assoc. Prof.*,
HORLACH S.M.⁵, *Ph. D., Assoc. Prof.*,
BILYK V.V.⁶, *Postgrad. Stud., Research Fellow*

¹ Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: sedin.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

² Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: ulyanovvu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9028-3408

³ Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: zahilskyi.vitalii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

^{4*} Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 588-46-71, e-mail: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7888-4393

⁵ Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: horlach.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6511-7574

⁶ Laboratory of Research of Nuclear and Thermal Power Plants, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +380 (63) 247-27-42, e-mail: kolemasakar@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4435-2388

Abstract. Problem statement. The paper provides an additional expanded justification for applying an innovative methodology in the area of the future Sinop NPP, planned to be deployed in the Republic of Türkiye, to identify the activity rate of tectonic faults in soil foundation based on comprehensive radon measurements using the PSACEA universal estimation scale. **The purpose of the article.** Current radon activity assessment of existing tectonic faults in Earth's crust based on archival measurements of soil radon carried out earlier in Sinop Province. **Conclusions and results.** Current analysis of radon measurement results obtained previously by the track method made it possible to further assess the radon activity rate of tectonic faults existing in the area of the future nuclear power plant. The proposed methodology to assess radon activity of tectonic faults in Earth's crust involves increasing safety during the construction and operation of the future nuclear power plant. The regulation on using this methodology as part of the subsurface monitoring at the Sinop NPP can be enshrined in job descriptions. This methodology can also be used as part of the seismic monitoring of other sites at the nuclear power plant, especially those located in high seismic risk zones.

Keywords: NPP; Sinop NPP; seismic risk zone; radon; tectonic fault

ДО ПИТАННЯ РАДОНОВОЇ АКТИВНОСТІ ТЕКТОНІЧНИХ РОЗЛОМІВ РАЙОНУ РОЗМІЩЕННЯ АЕС «СИНОП» У ТУРЕЦЬКІЙ РЕСПУБЛІЦІ

СЕДІН В. Л.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
УЛЬЯНОВ В. Ю.², *ас.*,
ЗАГІЛЬСЬКИЙ В. А.³, *канд. техн. наук, доц.*,
КОВБА В. В.^{4*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ГОРЛАЧ С. М.⁵, *канд. техн. наук, доц.*,
БІЛИК В. В.⁶, *асп., н. с.*

¹ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: sedin.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

² Кафедра інженерної геології і геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: ulyanovvu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9028-3408

³ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: zahilskyi.vitalii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

^{4*} Кафедра інженерної геології і геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38(096)588-46-71, e-mail: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

⁵ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: horlach.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6511-7574

⁶ Лабораторія досліджень атомних та теплових електростанцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kolemasakar@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4435-2388

Анотація. Постановка проблеми. Наведено додаткове розширене обґрунтування застосування в районі майбутньої АЕС «Синоп», розташованої в Турецькій Республіці, інноваційної для даних умов методики виявлення ступеня активності тектонічних розломів ґрунтового утворення на основі комплексних вимірювань радону за допомогою універсальної оціночної шкали ПДАБА. **Мета статті** – сучасне оцінення радонової активності існуючих тектонічних розломів земної кори на основі архівних вимірювань ґрунтового радону, раніше виконаних у турецькій провінції Синоп. **Висновки.** Сучасний аналіз раніше отриманих результатів вимірювань радону треквим методом дозволив додатково оцінити ступінь активності радону існуючих тектонічних розломів району майбутньої АЕС. Пропонована методика оцінювання радонової активності тектонічних розломів земної кори передбачає підвищення безпеки під час будівництва та експлуатації майбутньої АЕС. Положення про застосування цієї методики в рамках моніторингу глибин земної кори на АЕС «Синоп» може бути закріплене в посадових інструкціях. Методика може бути використана і в рамках сейсмічного моніторингу інших майданчиків АЕС, особливо розташованих у зонах із підвищеною сейсмічністю.

Ключові слова: АЕС; АЕС «Синоп»; зона з підвищеною сейсмічністю; радон; тектонічні розломи

Formulation of the problem. Along with other natural gases that are freely discharged into the atmosphere in zones of tectonic faults in Earth's crust, the best-known one is the radioactive gas Radon (^{222}Rn). The properties of this gas, namely inertness, short half-life period (up to 3.8 days) and availability of progeny distinguish it from other gases, such as methane, hydrogen, helium, etc. These properties of radon served as the basis for its use as one of the available indicators in establishing the activity rate of tectonic fault zones. Monitoring the stressed state of subsurface resources in such zones is absolutely necessary, since near them various deformations of the Earth's surface are observed. Such processes lead to violations in the planned high-altitude position and integrity of residential and public buildings, transport infrastructure facilities, as well as construction works of particularly important power assets, such as nuclear power plants [1].

As part of numerous field studies in the 70–80s of the last century, a direct connection was established between the intensity of radon anomalies and geodynamic processes in tectonic fault zones. This phenomenon constituted a ground to start up a fundamentally new direction of applied research in the field of

engineering geology: – structural geodynamic mapping [2; 3].

The behavioral features of radon (^{222}Rn) in geological space, e.g. abnormally high or abnormally low gas concentrations in periods preceding earthquakes, created the conditions for the continuous monitoring of radon as one of the indicators of possible seismic events. The importance of radon monitoring with the aim of seismic forecasting has been repeatedly confirmed in practice, including the notorious events in L'Aquila (Abruzzo), Italy, which occurred in April 2009, having been predicted by the local seismologist Giampaolo Giuliani several months before based on observations of soil radon. Considering the tectonics and seismicity of the country, the relevance of such monitoring in Turkey is beyond doubt.

Despite the numerous facts of quite successful application of this method, radon, as a possible indicator of changes in the stressed state of subsurface on the sites of nuclear power plants being designed, under construction and in operation, has got undeservedly little attention so far. This was especially true for measurements of radon concentration in groundwater.

However, in recent years, measurements of soil radon for the purpose of studying the geodynamics of NPP sites using gas-emanation

methods have already been enshrined, albeit with reservations – “indirect” or “auxiliary” in regulatory documents of a number of countries. But the method of radon measurement in groundwater for geodynamics and seismic forecasting purposes has yet to prove its value, although separate studies have already been carried out in this area [25; 26; 31; 32].

The purpose of the article. The purpose of this paper is to provide an up-to-date assessment of tectonic fault activity based on soil radon measurements, previously performed by external researchers in Sinop Province, Turkey, as well as the rationale for using a methodology to identify the activity rate of tectonic faults already in the area of the future Sinop NPP, in reliance of complex radon measurements and with the own PDABA universal scale subsequently finalized.

Materials and Methods. In furtherance of energy construction, the coastal region of Sinop Province had been repeatedly studied by various Turkish and foreign companies and organizations since the 80s of the last century. Numerous large-scale geotechnical and geo-environmental investigations were carried out in both mountainous and coastal areas [4–6]. In particular, the peninsula itself, on which the future nuclear power plant is supposed to be located, was explored at the request of a French-Japanese Consortium already in the 21st century. The exploratory survey included aerial photography, field reconnaissance, geophysical and paleo-seismological studies, etc. Their results among others formed the basis for an EIA of this project [27; 28]. However, the final EIA report itself, despite its approval, was met by the public with a mixed reception.

As previously mentioned, following numerous investigations, the geological structure, tectonics and seismicity of the province were studied relatively in their entirety and described in many papers available for wide acquaintance and analysis. Moreover, the specialized survey was carried out not only on land, but also offshore a water body, as required by documents regulating studies on the

territory intended for the construction of nuclear power plants.

Geology. Geologically, the described area is located within the Sinop Depression of the Middle Pontids, filled with Lower Cretaceous and Tertiary (Neogene) deposits. The Sinop Suite of Middle and Upper Miocene is the most characteristic formation of the local geological section. It is essentially terrigenous-clastic and represented by limestone deposits, although sandstones and mudstones are noted at the bottom.

On the surface, the suite deposits are overlapped by the Quaternary deposits. Modern deposits are represented by river alluvium, palustrine deposits, colluvium, sands of seashore terraces and Aeolian relief forms. A more detailed description of the geological and stratigraphic features of the area where the future nuclear power plant has to be located is actually beyond the scope of this paper. Therefore, it can be found in Chapter VI.1.5.4. of the final EIA report.

Tectonics. There is an opinion that tectonically, the Sinop Trough, like other troughs of the suture trough system in the eastern region of the Black Sea, apparently has a dual nature. Having arisen initially as an orogenic or overthrust trough on the base formed by the Upper Cretaceous volcanogenic and volcanogenic-sedimentary complexes of the Pontids, it was divided at subsequent stages into two parts: – the southern, “continental”, with the basement depths of 4–5 km, and the northern “near-basin”, where the foundation submerged to the depths of 7–10 km.

The first one, filled with Paleogene and Neogene deposits that had been deformed with the underlying rocks, may continue to develop as a foretrough of the Pontus orogenic system. The second one bounded from the south by a tectonic scrap already belongs to the system of the Black Sea Abyssal Basin and develops as its boundary suture element.

The main faults identified and subsequently studied, including by radonometry methods, in the 80s of the last century, were as follows (see the diagram in Fig. 1):

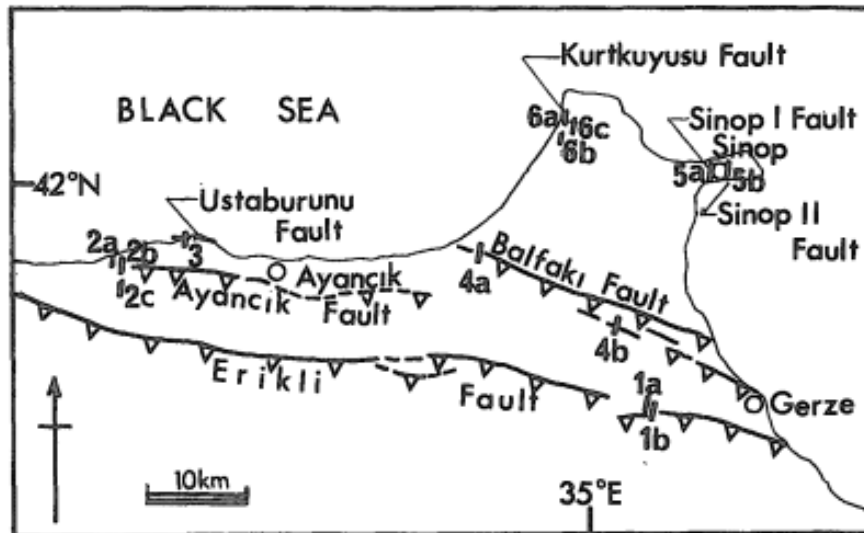


Fig. 1. Main faults on the territory being explored, with the indication of measurement areas (sections). Source: Paper of Hirokazu Kato, Kan Katoh, Aykut Barka and Ismail Kusgu. Alpha track measurements for faults in northern Turkey / *Bulletin of the Geological Survey of Japan* (1990)

Erikli (Eocene), Ayancik (late Eocene), Balifakl (late Eocene – early Miocene), Ustaburunu (late Eocene – early Miocene), Kurtkuyusu and Sinop I/II (late Miocene – early Pleistocene). It should be noted that all of the above-mentioned faults did not have strong geological and physiographic evidence of their activity at the time of investigations. And the supposed Kurtkuyusu Fault was generally identified only from aerial photographs and could well be a lineament. On the later maps and diagrams, Ayancik and Kurtkuyusu Faults were no longer indicated at all. But near the Kurtkuyusu location, a certain fault called Miocene Basin-Margin Fault was nevertheless plotted on the geological map of the peninsula [7]. The possible location of Sinop I/II Faults is also indicated on some maps [30].

Seismicity. The seismic conditions, tectonic faults identified and criteria for determining their activity at the site of the future nuclear power plant have been described in detail in a number of papers [8–10].

In 2005–2008, MTA (MADEN TETKİ VE ARAMA) carried out active studies that had been ordered by ICC EUAS to compile EIA of the Sinop NPP Project in the area with a radius of 150 km around the Sinop Peninsula, aimed at exploring the identified fault zones in segments of the Sinop underwater lineament and faults at the bottom of the Pontic Gulf, as well as

Balifakl, Ustaburunu, North Anatolian (NAF) Faults, and Erfelek Segment of Erikli Fault on land [11]. The most attention was paid to NAF Fault, Erfelek Segment of Erikli Fault and Pontic Ridge undersea, as the most significant in the region. In particular, the seismic events of 1942, 1943 and 1944 were associated with NAF Fault in the area of Tosya-Erbaa located 120 km south of the future nuclear power plant site, with $M > 7$. The GPS-investigation data indicate a slip rate of 24 mm/year along NAF Fault. For this reason, it is its seismic potential that was studied most thoroughly. This report containing a deterministic seismic hazard assessment shows that an earthquake with a magnitude of 8.0 is quite possible in the area of NAF. As concerns the area between the Black Sea and the north of NAF zone, velocities are minimal. The GPS-velocities were measured around the Sinop Peninsula, and there were obtained the values of $1,4 \pm 1,7$ mm/year [29]. According to the results of research in 2008, it was noted that more detailed seismicity assessments would be presented in the future final EIA report.

Also, the information about seismicity in the region was collected from the reports “Tectonic Framework and Seismic Potential of the Sinop Peninsula in Relation to Sinop Nuclear Research Center” and “Seismic Hazard Assessment for Sinop Nuclear Technology

Center” prepared by ODTÜ DMAM Research Center for Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK). The assessment in the report “Tectonic Framework and Seismic Potential of the Sinop Peninsula in Relation to Sinop Nuclear Research Center” is mainly based on a re-evaluation of geological and paleo-seismological studies carried out by MTA, investigation of deep seismic profiling conducted by Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO), and microseismic studies conducted by Marmara Research Center (TÜBİTAK MAM) in 2008. The faults assessed in the study were as follows: North Anatolian Fault Zone, Erbaa-Tosya Segment (NAF), Ekinveren Fault, Erikli Fault, Balıfakı Fault, Bartın Fault and small marine faults observed in the western Sinop Peninsula. Based on the research results, it was also concluded that the only fault playing an active role in seismicity of the Sinop Peninsula was Erbaa-Tosya Segment (NAF) due to the earthquake in 1943. All other mentioned structures were either inactive or subactive, or just very slight. Similar conclusions were contained in Chapter VI.1.5.8. of the final EIA Report. Individual studies in this area were continued by various specialized organizations virtually until 2020, including with the involvement of FUGRO specialists and equipment for works offshore a water body.

As regards Balıfakı Fault, that is the closest to the future construction site and accurately mapped, as well as other fault zones located nearby, the absence of any activity in them in the Quaternary is still questioned by a number of researchers. Sedimentological and geomorphological observations, collection of regional structural data and OSL-dating of deposits, including seashore terraces, indicate the continued participation of the Sinop Peninsula in the general process of Pontic orogeny. When studying rise rates of individual sections on the peninsula, it turned out, in particular, that Incheburun and Bozburun Capes situated on its northernmost tip experienced slow uplifts at a rate of 0.02...0.08 mm/year and 0.26 mm/year respectively, within the period from 570,000 to 190,000 years ago. This was presumably related to some kind of fault

slow-moving to the north of both sites. Some capes in the south of the peninsula experienced a rise rate of 0.22 mm/year during the same time. This, in turn, pointed to tectonic activity, but already along Balıfakı Thrust precisely in the Quaternary. This was also indicated by Steepnes normalized map of river networks crossing the fault zone, which showed a coherent deviation from their graduated profiles.

It was also noted that in Sinop area there were no historical records or instrumental evidence of large earthquakes in the distant historical past. Although sometimes, small and moderate earthquakes occurred in the so-called Pontidian Escarpment. The only major seismic event that occurred during the instrumental period at the southern edge of the Black Sea was an earthquake with a magnitude of 6.8, which took place in Bartın in September 1968. The mechanism of this seismic event is still a subject of debates.

However, numerous researchers seem to have completely failed to take into account that with the beginning of construction of the nuclear power plant, when planning the territory, its stressed state will inevitably change due to extraction and movement of a large volume of mined bulk from the rock mass, even though seismic events were recorded there with a maximum magnitude of $M < 6.8$. This becomes more probable with a subsequent additional technogenic flooding of possible fault zones and other technogenic impacts (blasting operations, vibration, etc.). In addition, the specific behavior of faults on aseismic territories revealed in recent years, to which the drafters of the document, apparently, have rightfully attributed the site of this nuclear power plant, is completely ignored. But disregard for any modern geodynamics of the site's soil foundation can have a very negative impact in construction of the nuclear power plant. This is especially true for installing powerful concrete beddings and deep foundations of essential structures (the so-called “nuclear islands”) that are ranked as the purported “active” geodynamic zones, as well as will manifest itself subsequently, already during the operation of completely constructed

facilities of the nuclear power plant and, first of all, its extended buried structures (cable and technological channels, galleries, circulating water pipelines, etc.). The possible “contribution” to the above processes of the so-called “swarm” of weak seismic events occurring from time to time both on land and in the sea, near the coast of the province, must never be underestimated.

Research results. One of the questions raised during the public discussion of EIA had relation directly to geology, namely determining the presence of tectonic faults with unknown activity on the site. In light of this situation, it became necessary to return to the issue of active tectonics in the future NPP construction area once again. And here radon studies, as on the site of the Akkuyu NPP under construction, could play a significant role in clarifying the situation [12]. For this reason, it makes sense not only to pay attention to modern materials, but also to return to archival data, presumably, to primary radon observations in tectonic fault zones, identified at the time of works completed by Turkish and Japanese researchers in the 80s of the last century [13–15]. It should be especially noted that, unlike other provinces of the country, which are replete with fault zones and often subject to seismic events, radon measurements in Sinop Province have been relatively rare until now and carried out for environmental purposes, mainly concerning safety of residential units, industrial premises and building materials. Information about the repeated large-scale studies of the 80s of the last century was not found by the authors. Why are the research data of the 80s especially valuable in light of the aims and objectives of this paper?

As mentioned above, the measurements in Sinop Province were carried out in the 80s of the last century by the method of registering “alpha-particles”, later called “track method”, or more precisely “measurement of the volumetric activity of radon using emanation-

tracking or thermo-luminescent detectors”. This method has become relatively widespread due to its simplicity and low requirements for available electricity, especially when measuring radon indoors. Two modifications of the method were tested at once, and were referred to in the reporting materials as the “tube-method” and the “cup-method” that later became classic. The “cup-method” has been most widely applied and used across all fault zones studied in the province. The determined parameter was referred to by the authors of the reporting materials as T.D. and calculated using the formula:

$$T.D. = N/(S \times T),$$

where T.D. is the flux density of alpha-particles, N is the number of tracks, S is the area of film (cm^2), T is the exposure time (a day).

Under certain conditions, this parameter is quite comparable with the concept of soil radon volumetric activity (RVA). And it can also be used in calculating the activity of tectonic faults using the universal scale proposed by PSACEA, although it has other criteria. However, taking into account the fact that the applied parameter is a certain averaged value associated with the RVA, the ratios $T.D._{\text{max}} / T.D._{\text{min}}$ and $Q_{\text{max}} / Q_{\text{min}}$ in the PSACEA scale are essentially identical, just so as the so-called contrast coefficients $KT.D.$ and KQ derived on their basis in the PSACEA scale.

As previously mentioned, the measurements by the track method were carried out in 1983 in the areas of faults shown above in Figure 1, namely: Erikli (Profiles 1a and 1b); Ayancik (Profiles 2a, 2b and 2c); Balifakl (Profiles 4a and 4b); Ustaburun (Profile 3); Kurtkuyusu (Profiles 6a, 6b and 6c); Sinop I (Profile 5a); and Sinop II (Profile 5b). The measurement results are shown in Figure 2.

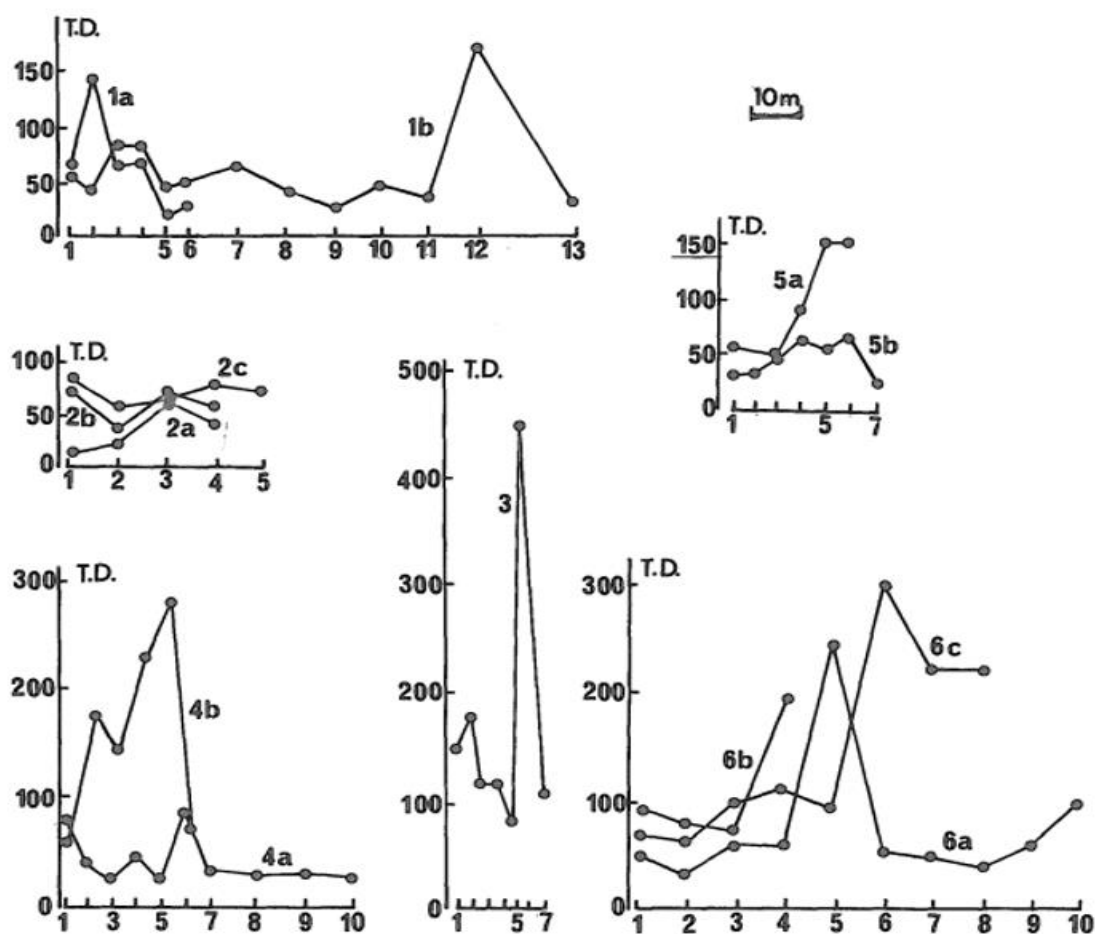


Fig. 2. Results of measurements on Profiles No. 1–6 in 1983. Source: Paper of Hirokazu Kato, Kan Katoh, Aykut Barka and Ismail Kusgu. Alpha track measurements for faults in northern Turkey / Bulletin of the Geological Survey of Japan (1990)

Table 1

Degree of radon activity based on the contrast ratio of emanational anomalies

Fault	Profile No.	Max. T.D. value	Min. T.D. value	Contrast Coefficient, $Kt.d = \max/\min$	Fault Activity Indicator (similar to Kq of the PSACEA scale)
Erikli	1a	145	65	2.2	low
	1b	175	40	4.4	average
Ayancik	2a	60	25	2.4	low
	2b	80	40	2.0	not active
	2c	90	70	1.3	not active
Ustaburun	3	460	80	5.8	active
Balfaki	4a	90	35	2.6	low
	4b	290	85	3.4	average
Sinop I	5a	160	55	2.9	low
Sinop II	5b	70	25	2.8	low
Kurtkuyusu	6a	250	60	4.2	average
	6b	200	80	2.5	low
	6c	310	100	3.1	average

As follows from Table 1, the results of studies for radon emissions from subsurface in 1983 on the territory of the peninsula may well be used at the present time. And the conclusions following the results of studies by different methods are also quite comparable. It should be especially noted that the given sample values are too small, and for this reason, they cannot reflect the whole picture, but the unexpectedly significant scatter in the values of radon volumetric activity (VA) on Profile No. 3, as well as on Profiles 1b, 4b, 6a, and 6c already leads to assess the stressed state of soil body in a different manner. There is no doubt that special attention during the upcoming studies of the future site, including by radonometry methods, should be given to the area of the supposed Kurtkuyusu fault zone, as that located in close proximity to the site of the future nuclear power plant. The activity of Kurtkuyusu fault zone must be explained despite the existing clarifications in the final EIA report (see Chapter VI.1.5.4.). If necessary, radon measurements should also be carried out in the coastal zone of water space, although the latter is associated with a number of methodological and technological difficulties. That is, we can already talk about the presence of clearly defined radon anomalies, presumably associated with modern geodynamics. The degree of the possible activity of identified faults at the site of the Akkuyo NPP under construction was assessed in a similar way. It is difficult to assess the seismic-tectonic situation using other indicators of the PSACEA scale due to insufficient data on radon measurements in this province being available to the public. The existing scattered data on the concentration of radon in the premises of cities and rural settlements of the province can only be of a poorly applicable indirect nature for the purposes of seismotectonics [16; 17]. However, the EIA report still provides some information about measuring RVA in residential premises (see Map of Sampling Sites VI.1.1-3 and Table of Results VI.1.1-59), and in water sources (see Map of Water Points VI.1.1-6 and Table of Sample Data VI.1.1-79 and VI.1.1-80). Despite the low RVA values obtained during the research, their significant difference within a

small area already shows us to raise a question of continuing and expanding the scale of such observations.

In addition to the geological and structural-tectonic component, the study of radon emissions from subsurface also has a clearly expressed technical aspect. A relatively little-studied area is the possible impact of the identified geodynamic structures on the welds of pipelines for various purposes in buildings and facilities of the future nuclear power plant. According to a number of researchers (Seliukov N.I., Riaboshan Yu.S., etc.), the negative impact of such structures can be reduced to three main factors, namely:

- mechanical-dynamic, associated with local fluctuations of the daytime surface of soil mass;
- gas-chemical, associated with the increased release of corrosive gases from the fault zones of active geodynamic structures;
- radiation.

The latter is the least studied due to the peculiarities of the impact of alpha-particles, formed as a result of the decay of radon in places of its intensive release from subsurface, on the corrosive environment, and, above all, groundwater, as well as the so-called technogenic aquifers inevitably formed during the operation of nuclear power plants (radiolysis effect). Hydrogen peroxide, ozone, and OH and H₂O₂ radicals formed during the water radiolysis are energetic cathodic depolarizers. For the same reason, the radiolysis effect enhances the cathodic process, and consequently, corrosion itself, including metal of pipeline welds, when they cross such structures within the site.

As follows from the above, it is quite likely that not all issues regarding the fault tectonics on the territory of Sinop Province, and especially the site of the nuclear power plant itself, were fully and correctly covered in the final EIA report of the French-Japanese Project. For this reason, if the need to compile a new EIA nevertheless arises, additional special comprehensive studies at the nuclear power plant site and surrounding area are highly desirable for it. As per a high-quality analysis of the current geodynamic situation, the list of planned geophysical studies should additionally

include the following types of work, namely: measurement of radon VA in groundwater of exploration grid wells, and measurement of soil radon VA in drill holes near exploration grid wells. Marine works must also be carried out. Moreover, sampling is necessary both from the bottom seawater and from the layer of bottom sediments at a depth of at least 1 m. As on land, profiles in offshore should be located across fault zones identified by seismic exploration.

When outfitting a permanent network of hydrogeological monitoring by the start time of exploring wells, they should also be included immediately in the number of water points tested for radon. There is experience in high-quality radonometry for the purposes of seismic forecasting, seismotectonics and radioecology in Turkey [18–23]. It is not worth postponing such studies, given the traditionally quite tight schedule in construction of the future facility in its entirety, as well as more frequent cases of resonance seismic phenomena in the Republic, in particular, those that occurred in the southeastern provinces on the border with Syria on 6.02.2023 and after. It is also worth considering that the catastrophic seismic events that occurred there may well contribute to the activation of tectonic structures in the described area. In particular, this is confirmed by the seismic event in the Black Sea with $M = 3.6$, which took place on 17.02.2023 nearby, 99 km from Samsun at a depth of 2 km that clearly points to its neotectonic nature.

Further, similar studies may become an integral part of subsurface monitoring both at the Sinop NPP site itself and on the adjacent territory of the province [24], including the monitoring of modern tectonic movements in Earth's crust. Refusal to conduct such studies is rife in the near future with the manifestation of negative geotechnical processes and phenomena that could complicate both the construction itself and the trouble-free operation of systems of the already commissioned nuclear power plant. If, during the proposed additional studies, active segments of geodynamic structures associated with radon anomalies are detected in certain areas of the nuclear power plant site (and, with sufficient justification, near it), it will be worthwhile to consider the question concerning

feasibility of timely changes in some design decisions.

Conclusion. Processing the available data received in 1983 by means of the PSACEA universal scale allowed us to give our own assessment of the results obtained and radon activity of the tested fault zones.

The results after investigations of radon emissions from subsurface, conducted in 1983 on the territory of the peninsula, may well be used at the present time. And the conclusions based on the results of comparative studies with the use of different methods are also quite comparable.

According to opponents of the project, not all issues regarding the fault tectonics of the area and nuclear power plant site itself were quite correctly covered in the final EIA report of the French-Japanese Project. Therefore, when carrying out works both within the existing project and a new one, if one does take place, additional comprehensive geotechnical studies, which have to include radonometry, are highly desirable. Moreover, this applies to both soil radon and radon in groundwater. Despite the low VAR values obtained during the research, their significant difference within a small area already allows us to raise the question of continuing and expanding the scale of such observations. At the time of writing this paper, the issue to restart building a nuclear power plant is again on the agenda, and therefore, additional studies being proposed might be quite appropriate.

There is no doubt that special attention during the upcoming studies of the future site, including by radonometry methods, should be given to the area of the supposed Kurtkuyusu fault zone as that located in close proximity to the site of the future nuclear power plant. The activity of Kurtkuyusu fault zone must be explained. If necessary and when technical capabilities are available, radon measurements should be carried out in the coastal zone offshore as well, especially on the western side of the peninsula.

If, during the proposed additional studies, active segments of geodynamic structures associated with radon anomalies are discovered at the NPP site and adjacent territory, it will be necessary to consider the question concerning

feasibility of timely changes in design decisions.

The exploratory survey can be combined with planned works to clarify engineering and geological conditions for specific buildings and structures of the nuclear power plant. Such survey may further become an integral part of

subsurface monitoring at the nuclear power plant site.

The expected additional studies will be able to provide more complete seismic protection of units at the future nuclear power plant and, as a result, trouble-free operation of its completed buildings and structures for a long term.

REFERENCES

1. Sedin V.L., Ulanov V. and Bicus K.M. *Shkala otsenki aktivnosti tektonicheskix razlomov zemnoj kory po intensivnosti radonovydeleniya iz nedr na ploshhadkah stroyashhihsya i dejstvuyushhih AES* [Scale assessment of active tectonic faults of the crust on the Intensity of radon exhalation from the depths to the construction site and the existing energy facilities]. *Georisk* [Georisk]. 2015, no. 4, pp. 48–52. (in Russian).
2. Gorbushina L.V. and Ryaboshtan Yu.S. *Ehmanacionnyjj metod indikacii geodinamicheskikh processov pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh* [Emanation method indication of geodynamic processes in geotechnical investigations]. *Sovetskaya geologiya* [Soviet Geology]. 1975, no. 4, pp. 106–112. (in Russian).
3. Rudakov V.P. *K voprosu o prirode ehmanacionnykh (radonovykh) predvestnikov zemletrjasenij* [The nature of emanation (radon) earthquake precursors]. *Geohimiya* [Geochemistry]. 2003, no. 2, pp. 222–224. (in Russian).
4. Yildirim C., Schildgen T.F., Echtler H., Melnick D. and Strecker M. R. Late Neogene and active orogenic uplift in the Central Pontides associated with the North Anatolian Fault: Implications for the northern margin of the Central Anatolian Plateau, Turkey. *Tectonics*. Vol. 30, 2011, TC5005. URL: doi:10.1029/2010TC002756.
5. Cengiz Yildirim, Daniel Melnick, Paolo Ballato, Taylor F. Schildgen, Helmut Echtler, A. Evren Erginal, Nafiye Güneç Kıyak and Manfred R. Strecker. Differential uplift along the northern margin of the Central Anatolian Plateau: inferences from marine terraces. *Quaternary Science Reviews*. Vol. 81, 1 December 2013, pp. 12–28.
6. Sinop İli, Merkez İlçe, Abalı Köyü and Inceburun Mevkii. Sinop nükleer güç santrali projesi. EUAS International ICC Merkezi Jersey Adaları Türkiye Merkez Şubesi, Aralık 2017, 279 p. (in Turkish).
7. Mustafa Can Canoğlu. Determination of hydrologic characteristics of Sinop demircikÖy watershed and production of monthly saturation degree maps. *Bull. Min. Res. Exp.*, 2017, no. 155, pp. 203–212.
8. Erkan Yılar. A sensitivity study for probabilistic seismic hazard assessment of Sinop nuclear power plant site. Middle East Technical University, June 2014, 112 p.
9. Yeliz İşcan, Neslihan Ocakoğlu, Fatmagül Kılıç and Oğuz Özel. Active tectonics of offshore Cide–Sinop (southern Black Sea shelf): from seismic and multibeam bathymetry data. *Geo-Marine Letters*, no. 39 (3), August 2019, 16 p.
10. Recai Feyiz Kartal, Gunay Beyhan and Ayhan Keskinsezer. Seismic hazard analysis of Sinop province. Turkey using probabilistic and statistical methods. *J. Earth Syst. Sci.* Vol. 123, no. 3, April 2014, pp. 565–579.
11. Türkiye Atom Enerjisi. Kurumu için hazırlanan 11044 numaralı Sinop Nükleer Teknoloji Merkezi için Jeolojik Araştırmalar Final Raporu. MTA. 2008, 1.396 sf. (in Turkish).
12. Sedin V.L. and Ulyanov V.U. On the possibility of evaluating the tectonic fault activity at the Akkuyu Nuclear Power Plant by sample radon measurements during environmental impact assessment. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2019, no. 14 (10), pp. 1272–1279.
13. Barka A., Katoh K. and Kusgu I. Some results of the alpha track measurements on faults in northern Turkey. Report of International Research and Development Cooperation. ITIT. Project no. 8212, Ed. Geo1. Surv., Japan, 1985, pp. 53–69.
14. Katoh K., Kusgu I. and Tsukudaa E. Alpha track measurements in the western part of the North Anatolian Fault. Report of international Research and Development Cooperation. ITIT. Projects no. 8513, Ed. Geol. Surv. Japan, 1989, pp. 30–34.
15. Hirokazu Kato, Kan Katoh, Aykut Barka and Ismail Kusgu. Alpha track measurements for faults in northern Turkey. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*. Vol. 41 (3), 1990, pp. 99–114.
16. Celebi N., Ataksor B., Taskın H. and Albayrak N. Bingoldag indoor radon measurements in Turkey dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014, pp. 1–7.
17. Fatma Bozdağ, Derya Kale, Ahmet Soysal and Gülçin Yapıcı. Sinop nükleer güç santrali projesi son şekli verilen çed raporu'nun insan ve çevre sağlığı açısından değerlendirilmesi. Ankara, 2022, 129 p. (in Turkish).
18. Tabar E. and Yakut H. Radon measurements in water samples from the thermal springs of Yalova basin. Turkey, *J Radioanal Nucl Chem*, 2014, no. 299, pp. 311–319.
19. Gurler O., Akar U. and Kahraman A. Measurements of radon levels in thermal waters of Bursa. Turkey, *Fresenius Environ Bull.*, 2010, no. 19, pp. 3013–3017.

20. Oner F., Yigitoglu I. and Yalim H.A. Measurements of radon concentrations in spa waters in Amasya. Turkey, *Radiat. Prot. Dosim.*, 2013, no. 157 (2), pp. 221–224.
21. Erees F.S., Yener G. and Salk M. O'zbal O' Measurements of radon content in soil gas and in the thermal waters in Western Turkey. *Radiat. Meas.*, 2006, no. 41, pp. 354–361.
22. Yalim H.A., Sandıkcıoglu A., Ertugrul O. and Yıldız A. Determination of the relationship between radon anomalies and earthquakes in well waters on the Aksehir-Simav Fault System in Afyonkarahisar province. Turkey, *J Environ Radioact.*, 2012, no. 110, pp. 7–12.
23. Karataşlı M., Turhan Ş., Varinlioğlu A. et al. Natural and fallout radioactivity levels and radiation hazard evaluation in soil samples. *Environ Earth Sci.* 2016, vol. 75, p. 424.
24. Safety Guide in Atomic Energy Use. Seismological monitoring of nuclear and radiation hazardous sites. RB-142-18: approved by the Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service. No. 592, dated of 27.11.2018.
25. Ulyanov V.Yu. *Organizacija i metodika provedenija monitoringa radona na ploshhadkakh AEhS v asejsmichnykh regionakh* [Organization and methodology of radon monitoring at NPP sites with aseismic regions]. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsoil use]. 2015, no. 1, pp. 103–107. (in Russian).
26. Ulyanov V.Yu. *Monitoring radona kak indikatora seysmotektonicheskikh sobytiy na ploshchadke AES «Bushehr-1» i privileyushchey territorii provintsii Busher Islamskoy Respubliki Iran* [Radon Monitoring as an Indicator of Seismotectonic Events at the Bushehr-1 NPP site and Bushehr Province Adjoining Territory of the Islamic Republic of Iran]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Journal Global Nuclear Safety]. 2017, no. 4 (25), pp. 7–17. (in Russian).
27. Abali KÖyü and İnceburun Mevkii. Sinop nükleer güç santrali projesi Sinop ili, merkez ilçe. Nihai ÇED Raporu. EUAS International ICC Merkezi Jersey Adaları Türkiye Merkez Şubesi, Ağustos 2020, 3301 p. (in Turkish).
28. Ayhan Ilgar. Sedimentary record of mid-Miocene seismotectonic activity in the Sinop Peninsula, north-central Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences.* 2014, vol. 23, iss. 1, pp. 16–30.
29. Sevgi Kaya Güney. Karadeniz şelfinde Cide açıklarının çok kanallı sismik yansıma verileri ile araştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Jeofizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Jeofizik Mühendisliği Bilim Dalı, Tez no. 609901, 2019, 83 p. (in Turkish).
30. Sinan Demirel and Fatih Adatepe. Application of the Talwani modeling metod to the magnetic data of Sinop and its surrounding. *J. Black Sea Mediterranean Environment.* Vol. 13, 2007, pp. 107–114.
31. Shigeki Tasaka and Yoshimi Sasaki. Observations of Underground Water Radon Concentration at the Kamioka Mine. Gifu Prefecture, Faculty of Education, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu 501-11, 2-45, Japan, 1992, 9 p.
32. Maho Matsumoto, Yumi Yasuoka, Yui Takakaze, Masahiro Hosoda, Shinji Tokonami, Kazuki Iwaoka and Takahiro Mukai. Evaluation of radon concentration measurements in water using the radon degassing method. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.* 2022, 6 p.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Седин В. Л., Ульянов В. Ю., Бикус Е.М. Шкала оценки активности тектонических разломов земной коры по интенсивности радоновыделения из недр на площадках строящихся и действующих АЭС. *Геориск.* 2015. № 4. С. 48–52.
2. Горбушина Л. В. Рябоштан Ю. С. Эманационный метод индикации геодинамических процессов при инженерно-геологических изысканиях. *Советская геология.* 1975. № 4. С. 106–112.
3. Рудаков В. П. К вопросу о природе эманационных (радоновых) предвестников землетрясений. *Геохимия.* 2003. № 2. С. 222–224.
4. Yildirim C., Schildgen T. F., Echtler H., Melnick D., Strecker M. R. Late Neogene and active orogenic uplift in the Central Pontides associated with the North Anatolian Fault: Implications for the northern margin of the Central Anatolian Plateau, Turkey. *Tectonics.* 2011. № 30. TC5005. URL: doi:10.1029/2010TC002756.
5. Cengiz Yildirim, Daniel Melnick, Paolo Ballato, Taylor F. Schildgen, Helmut Echtler, A. Evren Erginal, Nafiye Güneç Kıyak, Manfred R. Strecker Differential uplift along the northern margin of the Central Anatolian Plateau: inferences from marine terraces. *Quaternary Science Reviews.* Vol. 81. 1 December 2013. Pp. 12–28.
6. Merkez İlçe, Abali KÖyü, Inceburun Mevkii. Sinop nükleer güç santrali projesi Sinop İli. *EUAS International ICC Merkezi Jersey Adaları.* Türkiye, Merkez Şubesi, Aralık. 2017. 279 p.
7. Mustafa Can Canoğlu. Determination of hydrologic characteristics of Sinop demirciköy watershed and production of monthly saturation degree maps. *Bull. Min. Res. Exp.* 2017. № 155. Pp. 203–212.
8. Erkan Yılar. A sensitivity study for probabilistic seismic hazard assessment of Sinop nuclear power plant site. Middle East Technical University. June 2014. 112 p.
9. Yeliz İçsan, Neslihan Ocakoğlu, Fatmagül Kılıç, Oğuz Özel. Active tectonics of offshore Cide–Sinop (southern Black Sea shelf): from seismic and multibeam bathymetry data. *Geo-Marine Letters.* № 39 (3). August 2019. 16 p.
10. Recai Feyiz Kartal, Gunay Beyhan, Ayhan Keskinsezer. Seismic hazard analysis of Sinop province, Turkey using probabilistic and statistical methods. *J. Earth Syst. Sci.* Vol. 123, № 3. April 2014. Pp. 565–579.

11. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu için hazırlanan 11044 numaralı Sinop Nükleer Teknoloji Merkezi için Jeolojik Araştırmalar Final Raporu. MTA. 2008. 1.396 sf.
12. Sedin V. L., Ulyanov V. On the possibility of evaluating the tectonic fault activity at the Akkuyu Nuclear Power Plant by sample radon measurements during environmental impact assessment. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2019. № 14 (10). Pp. 1272–1279.
13. Barka A., Katoh K., Kusgu I. Some results of the alpha track measurements on faults in northern Turkey. Report of International Research and Development Cooperation. *ITIT*. Project № 8212. Ed. Geo1. Surv. Japan, 1985. Pp. 53–69.
14. Katoh K., Kusgu I. and Tsukudaa E. Alpha track measurements in the westem part of the North Anatolian Fault. Report of international Research and Development Cooperation. *ITIT*. Projects № 8513. Ed. Geol. Surv. Japan. 1989. Pp. 30–34.
15. Hirokazu Kato, Kan Katoh, Aykut Barka, Ismail Kusgu. Alpha track measurements for faults in northern Turkey. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*. Vol. 41 (3). 1990. Pp. 99–114.
16. Celebi N., Ataksor B., Taskin H., Albayrak N. Bingoldag indoor radon measurements in Turkey dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Pp. 1–7.
17. Fatma Bozdağ, Derya Kale, Ahmet Soysal, Gülçin Yapıcı. Sinop nükleer güç santrali projesi son şekli verilen çed raporu'nun insan ve çevre sağlığı açısından değerlendirilmesi. Ankara, 2022. 129 p.
18. Tabar E., Yakut H. Radon measurements in water samples from the thermal springs of Yalova basin, Turkey. *J. Radioanal Nucl Chem*. 2014. № 299. Pp. 311–319.
19. Gurler O., Akar U., Kahraman A. Measurements of radon levels in thermal waters of Bursa, Turkey. *Fresenius Environ Bull*. 2010. № 19. Pp. 3013–3017.
20. Oner F., Yigitoglu I., Yalim H. A. Measurements of radon concentrations in spa waters in Amasya, Turkey. *Radiat. Prot. Dosim*. 2013. № 157 (2). Pp. 221–224.
21. Erees F. S., Yener G., Salk M., O'zbal O'. Measurements of radon content in soil gas and in the thermal waters in Western Turkey. *Radiat. Meas*. 2006. № 41. Pp. 354–361.
22. Yalim H. A., Sandıkcıoğlu A., Ertugrul O., Yıldız A. Determination of the relationship between radon anomalies and earthquakes in well waters on the Akşehir-Simav Fault System in Afyonkarahisar province, Turkey. *J. Environ Radioact*. 2012. № 110. Pp. 7–12.
23. Karataşlı, M., Turhan, Ş., Varinlioğlu A. et al. Natural and fallout radioactivity levels and radiation hazard evaluation in soil samples. *Environ Earth Sci*. 2016. № 75. P. 424.
24. Safety Guide in Atomic Energy Use. Seismological monitoring of nuclear and radiation hazardous sites. RB-142-18: approved by the Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service. № 592, dated of 27.11.2018.
25. Ульянов В. Ю. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах. *Проблемы недропользования*. 2015. № 1. С. 103–107.
26. Ульянов В. Ю. Мониторинг радона как индикатора сейсмотектонических событий на площадке АЭС «Бушер-1» и прилегающей территории провинции Бушер Исламской Республики Иран. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017. № 4 (25). С. 7–17.
27. Sinop nükleer güç santrali projesi Sinop ili, merkez ilçe, Abalı Köyü, İnceburun Mevkii. Nihai ÇED Raporu. EUAS International ICC Merkezi Jersey Adaları Türkiye Merkez Şubesi. Ağustos 2020. 3301 p.
28. Ayhan Ilgar. Sedimentary record of mid-Miocene seismotectonic activity in the Sinop Peninsula, north-central Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2014. Vol. 23, iss. 1. Pp. 16–30.
29. Sevgi Kaya Güney. Karadeniz şelfinde Cide açıklarının çok kanallı sismik yansıma verileri ile araştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Jeofizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Tez № 609901. 2019. 83 p.
30. Sinan Demirel, Fatih Adatepe. Application of the Talwani modeling metod to the magnetic data of Sinop and its surrounding. *J. Black Sea/Mediterranean Environment*. 2007. Vol. 13. Pp. 107–114.
31. Shigeki Tasaka, Yoshimi Sasaki. Observations of Underground Water Radon Concentration at the Kamioka Mine, Gifu Prefecture. Faculty of Education, Gifu University, Yanagido 1-1. Gifu 501-11. 2-45. Japan, 1992. 9 p.
32. Maho Matsumoto, Yumi Yasuoka, Yui Takakaze, Masahiro Hosoda, Shinji Tokonami, Kazuki Iwaoka, Takahiro Mukai. •Evaluation of radon concentration measurements in water using the radon degassing method. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2022. 6 p.

Надійшла до редакції: 23.08.2023.

УДК 629.113

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.19.989

ВИЗНАЧЕННЯ ІНДЕКСУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ГІБРИДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

БАЖИНОВ О. В.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
КРАВЦОВ М. М.², канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра технічної експлуатації та сервісу автомобілів ім. М. Я. Говорущенка, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (099) 658-51-01, e-mail: alexey.bazhinov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5755-8553

² Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (099) 205-56-57, e-mail: super-mikvich@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3218-2182

Анотація. *Постановка проблеми* Наведеної теоретичні дослідження методів оцінювання показників якості електричних та гібридних автомобілів на етапі експлуатації. Важливі критерії оцінювання показників якості таких автомобілів на етапі експлуатації – функціональна стійкість, екологічність, комфорт, технічні рішення та безпека руху. *Мета роботи* – підвищення ефективності оцінювання показників якості автомобіля шляхом їх кількісного оцінювання на етапі експлуатації. *Метод* формування показника якості вирішує проблему перетворення багатокритеріальної задачі оцінки якості на однокритеріальну. *Методика* визначення індексу якості електричних та гібридних транспортних засобів дозволить підвищити екологічну безпеку автомобілів, яка може бути оцінена шляхом комплексного аналізу низки технічних та економічних проблем, включаючи закономірності утворення токсичних і канцерогенних речовин, техногенне забруднення атмосфери, дослідження паливних та екологічних показників двигунів та інші. Оцінювання якості екологічної безпеки автомобіля можливо значно спростити, якщо за базову норму стандарту (Євро-6) взяти викид оксиду азоту (NO_x) 0,06 г/км для бензинових і 0,08 г/км для дизельних двигунів, а витрати палива прийняти за мінімальні. Безпека автомобіля також характеризується гальмівними якостями, габаритами і наявністю додаткових опцій, які забезпечують безпечні умови роботи водія. За загальний показник активної безпеки прийнято коефіцієнт гальмування, а за пасивну безпеку – кількість зірок, отриманих у рейтингу безпеки EuroNCAP Європейської програми випробувань на пасивну безпеку серійних легкових автомобілів. *Розроблено* методику практичної реалізації дослідження на основі оцінки показника якості залежно від середньої швидкості руху автомобіля та сформульовано основні методичні положення. **Висновок.** Установлено, що показник якості автомобіля суттєво залежить від умов експлуатації. Наведено поправкові коефіцієнти показника якості базових, гібридних та електромобілів залежно від умов їх експлуатації. Проведені дослідження та запропонований показник якості автомобіля надають своєчасну інформацію про особливості умов експлуатації, що створює необхідні умови та можливості для автовиробників щодо вдосконалення дизайну автомобіля, поліпшення іміджу бренду автомобіля та збільшення обсягів продажів. Зі збільшенням середньої швидкості автомобіля відбувається підвищення критерію комфортності для всіх типів автомобілів у 1,6–2 рази, критерій оцінки екологічної безпеки базових автомобілів знижується у 9–11 разів, а гібридних автомобілів збільшується у 8–10 разів.

Ключові слова: автомобіль; електромобіль; гібридний автомобіль; метод; методика; якість

DETERMINING THE QUALITY INDEX OF ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES

BAZHYNOV O.V.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
KRAVTSOV M.M.^{2*}, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof.

^{1*} M.Ya. Govoruschenko Department of Technical Operation and Service of Automobiles, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (099) 658-51-01, e-mail: alexey.bazhinov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5755-8553

² Department of Metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (099) 205-56-57, e-mail: super-mikvich@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3218-2182

Abstract. Problem statement. The article presents theoretical studies of methods for assessing the quality indicators of electric and hybrid cars at the operation stage. Important criteria for assessing the quality indicators of such vehicles during operation are functional stability, environmental friendliness, comfort, technical solutions and traffic safety. *The purpose of the article* is to improve the efficiency of assessing the quality indicators of a car by quantifying

them at the operation stage. **The method** of forming a quality indicator solves the problem of transforming a multi-criteria quality assessment task into a single-criteria one. **The methodology** for determining the quality index of electric and hybrid vehicles will improve the environmental safety of cars, which can be assessed by a comprehensive analysis of a number of technical and economic problems, including the patterns of toxic and carcinogenic substances' formation, man-made air pollution, research on fuel and environmental performance of engines, and others. Assessing the quality of a car's environmental safety can be greatly simplified if the standard (Euro 6) is based on nitrogen oxide (NO_x) emissions of 0.06 g/km for gasoline and 0.08 g/km for diesel engines, and fuel consumption is assumed to be minimal. Vehicle safety is also characterized by braking performance, dimensions and the availability of additional options that ensure safe working conditions for the driver. The braking coefficient is taken as a general indicator of active safety, and the number of stars obtained in the EuroNCAP safety rating of the European program for testing the passive safety of serial passenger cars is taken as a passive safety indicator. **A methodology** for the practical implementation of the study based on the assessment of the quality indicator depending on the average speed of the car has been developed and the main methodological provisions have been formulated. **Conclusion.** It is established that the quality indicator of a car significantly depends on the operating conditions. The correction factors for the quality indicator of basic, hybrid and electric vehicles depending on their operating conditions are presented. The carried out research and the proposed car quality indicator provide timely information about the peculiarities of operating conditions, which creates the necessary conditions and opportunities for automakers to improve car design, improve the image of the car brand and increase sales. With an increase in the average speed of the car, the comfort criterion for all types of cars increases by 1.6–2 times, the criterion for assessing the environmental safety of basic cars decreases by 9–11 times, and hybrid cars, increases by 8–10 times.

Keywords: car; electric car; hybrid car; method; technique, quality

Вступ

Наразі вибір автомобіля ускладнюється тим, що він здійснюється в умовах дефіциту інформації через закриття експлуатаційних відмов сервісними підприємствами; обмеженості та значною мірою рекламного характеру інформації, що надається виробниками; відсутності централізованого банку, що містить об'єктивну інформацію про фактичні показники техніко-експлуатаційних властивостей автомобілів; складності зіставлення інформації, отриманої з різних джерел тощо. Слід урахувати, що автомобілі певного призначення мають різні властивості залежно від зовнішніх умов, у яких вони експлуатуються.

Наявність специфічних властивостей автомобілів дозволяє використовувати їх в умовах, у яких застосування іншої моделі автомобіля менш доцільне. Визначення техніко-експлуатаційних властивостей і якості автомобілів у цілому дозволяє вибрати той з них, який найбільшою мірою відповідає вимогам користувача для даних умов експлуатації, і дає можливість розробити оптимальні методи підтримки в процесі експлуатації властивостей, закладених під час проектування і виготовлення автомобілів. Ця обставина особливо важлива для вибору або

придбання автомобіля з метою експлуатації в Україні.

Відсутність якісних автомобілів українського виробництва – одна з основних причин низької конкурентоспроможності транспортних засобів. Якість автомобілів визначається низкою показників, що характеризують вагові та габаритні параметри, паливну економічність, продуктивність, маневреність, надійність, безпеку, вартість тощо. Таким чином, проблема оцінення та вибору автомобіля користувачем на етапі експлуатації не повністю вирішена, що визначає актуальність даної теми.

Мета роботи – підвищення ефективності оцінювання показників якості автомобіля шляхом їх кількісної оцінки на етапі експлуатації.

З аналізу літературних джерел встановлено, що сучасний стан ринку та оновлення структури пасажирських вагонів на етапі експлуатації зумовлюють необхідність комплексного підходу до оцінення показників якості з метою вибору кращої альтернативи [1–4]. Визначаючи ступінь відповідності пасажирських вагонів умовам експлуатації та очікуванням споживачів, необхідно враховувати великий перелік техніко-експлуатаційних властивостей, що відображаються сукупністю та якістю параметрів. Проведено

огляд існуючих досліджень з аналізу методів оцінення якості автомобілів, які не дозволяють повною мірою та об'єктивно врахувати сукупність показників, що зумовлюють необхідність їх удосконалення.

Результати дослідження Індексу якості

Для оцінення індексу якості автомобіля розроблено показники ефективності. Важливими критеріями оцінки показників якості автомобіля на етапі експлуатації вважаються функціональна стійкість, екологія, комфорт, технічні рішення та безпека руху. Якість автомобіля з урахуванням рівня його функціональної стійкості та енергоємності на етапі експлуатації оцінюється з позиції частоти технічних впливів, енергоспоживання та витрат на технічне обслуговування і ремонт. Критерій, що оцінює функціональну стабільність показників якості, для:

– базового автомобіля:

$$K_H = \frac{0,079 N_{\max} \cdot g_{\min} \cdot C_T \cdot L_{\text{Гар}}}{C_{\text{авт}} \cdot \rho_T \cdot V_a} = \frac{A}{V_a}, \quad (1)$$

$$A = \frac{0,079 N_{\max} \cdot g_{\min} \cdot C_T \cdot L_{\text{Гар}}}{C_{\text{авт}} \cdot \rho_T}; \quad (2)$$

– гібридного автомобіля:

$$K_H = \frac{20 N_{\max} \cdot g_{\min} \cdot C_T \cdot L_{\text{Гар}}}{C_{\text{авт}} \cdot \rho_T \cdot V_{\max} \cdot V_a} = \frac{C}{V_a}, \quad (3)$$

$$C = \frac{20 N_{\max} \cdot g_{\min} \cdot C_T \cdot L_{\text{Гар}}}{C_{\text{авт}} \cdot \rho_T \cdot V_{\max}}; \quad (4)$$

– електромобіля:

$$K_H^e = \frac{2,7 E_{\text{АКБ}} \cdot C_e \cdot L_{\text{Гар}} \cdot V_{\max}}{C_{\text{авт}} \cdot L_3 \cdot V_a} = \frac{B}{V_a}, \quad (5)$$

$$B = \frac{2,7 E_{\text{АКБ}} \cdot C_e \cdot L_{\text{Гар}} \cdot V_{\max}}{C_{\text{авт}} \cdot L_3}, \quad (6)$$

де $N_{\max}$ – максимальна потужність двигуна, кВт; $g_{\min}$ – мінімальне значення питомої витрати палива, г/кВт-год.; C_T – вартість одного літра пального, грн; $L_{\text{Гар}}$ – гарантований пробіг автомобіля, км; $C_{\text{авт}}$ – вартість нового автомобіля, грн; ρ_T – питома вага пального, кг/л; V_a – швидкість, км/год.; $E_{\text{акб}}$ – ємність акумуляторної батареї, кВт-год.; C_e – вартість однієї кВт-

год., грн; L_3 – запас ходу, км; $V_{\max}$ – максимальна швидкість, км/год.

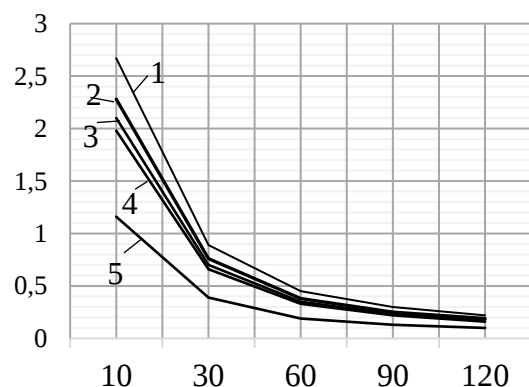
З наведених рівнянь випливає, що для конкретного автомобіля критерій функціональної стійкості оцінки показників якості не буде постійною величиною.

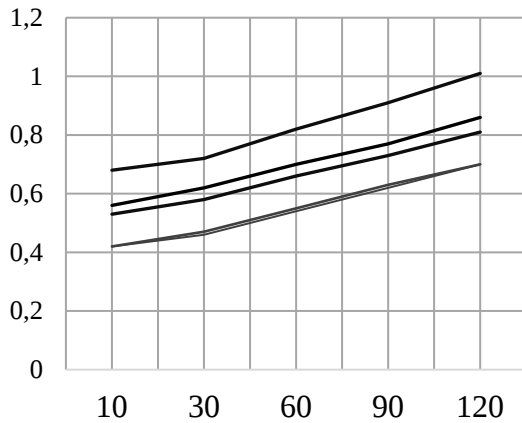
У період динамічного зростання висококонкурентного автомобільного ринку рівень комфорту як водія, так і пасажирів постійно підвищується. Це досягається шляхом удосконалення конструкції автомобіля, тобто розмірів пасажирського салону, багажника, колісної доріжки та колісної бази, а також рівня шуму та температури в пасажирському салоні. Отже, критерій показників якості комфорту можна визначити з рівняння:

$$K_{\Phi} = \frac{L_6 \cdot K_k \cdot Y_{\text{ш}}}{128 L_k}, \quad (7)$$

де L_6 , L_k – відповідно база та колія коліс автомобіля, м; K_k – коефіцієнт, що враховує наявність кондиціонера, $K_k = 0,9$, K_k – коефіцієнт, що враховує наявність клімат-контролю, $K_k = 0,8$; $Y_{\text{ш}}$ – рівень шуму в салоні під час руху автомобіля, для автомобілів з двигуном $z = 40$ дБ, а для електромобілів та гібридів $z = 30$ дБ, постійний коефіцієнт $= 0,2$ дБ-год./км.

На рисунку 1 показано зміну критеріїв оцінки якості функціональної стійкості та комфорту базового автомобіля, гібриду та електромобіля залежно від середньої швидкості руху.





1 – Lanos Sens; 2 – Mitsubishi Lancer; 3 – Chevrolet Aveo; 4 – Toyota Prius; 5 – Nissan Leaf

Рис. 1. Зміна критерію функціональної стійкості (K_p) що комфорт базового автомобіля (KF), гібрида та електромобіля залежно від швидкості руху

Екологічна безпека автомобілів може бути оцінена шляхом комплексного аналізу низки технічних та економічних проблем, включаючи закономірності утворення токсичних і канцерогенних речовин, техногенне забруднення атмосфери, дослідження паливних та екологічних показників двигунів та інші. Сумарний критерій токсичності – це багатовимірний вектор, який важко виразити одним числом. Так, оцінення якості екологічної безпеки автомобіля можна значно спростити, якщо за базову норму стандарту (Євро-6) взяти викид оксиду азоту (NO_x) 0,06 г/км для бензинових і 0,08 г/км для дизельних двигунів, а витрату палива прийняти за мінімальну. Тоді розрахункові вирази для визначення якості екологічної безпеки можна записати як для автомобілів із двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ) (7), так і для гібридних автомобілів (8):

$$K_e = \frac{0,0033 H_{л.мин} \cdot V_{max}}{K_{NO_x} \cdot V_a}, \quad (8)$$

де K_{NO_x} – допустима норма оксиду азоту за стандартом (Євро-6), г/км; $H_{л.мин}$ – мінімальна витрата палива автомобілем, л/100 км.

$$K_e^r = \frac{0,0275 H_{л.мин} \cdot N_e \cdot V_a}{K_{NO_x} \cdot V_{max} \cdot N_{max}}, \quad (9)$$

де N_e – потужність електродвигуна, кВт; N_{max} – потужність двигуна, кВт.

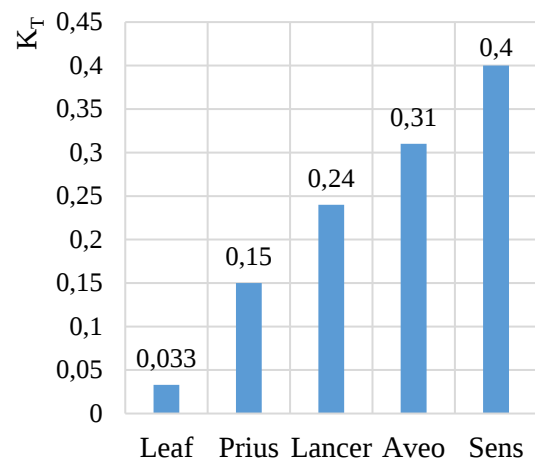
Безпека автомобіля характеризується гальмівними якостями, габаритами і наявністю додаткових опцій, що гарантують безпечні умови роботи водія. За загальний показник активної безпеки прийнято коефіцієнт гальмування, а за пасивну безпеку – кількість зірок, отриманих у рейтингу безпеки EuroNCAP Європейської програми випробувань на пасивну безпеку серійних легкових автомобілів. Таким чином, критерій оцінки показників якості безпеки дорожнього руху визначається наступним рівнянням:

$$K_6 = \frac{1,8 S_T}{n_3 \cdot S_{Tmin}}, \quad (10)$$

де n_3 – кількість зірок, отриманих в оціночному рейтингу краш-тесту; S_T – гальмівний шлях на швидкості 100 км/год., м; S_{Tmin} – найменший гальмівний шлях серед усіх протестованих автомобілів, м.

Критерій якості технічних рішень визначається на основі аналізу значень показників аналогів, що відображають кращі світові тенденції їх розвитку. До значень показників для оцінення якості технічних рішень автомобіля належать витрата палива, маса автомобіля, час розгону до 100 км/год., максимальна швидкість.

Зміна критерію оцінки показників якості технічних рішень та критерію безпеки руху транспортних засобів показана на рисунку 2.



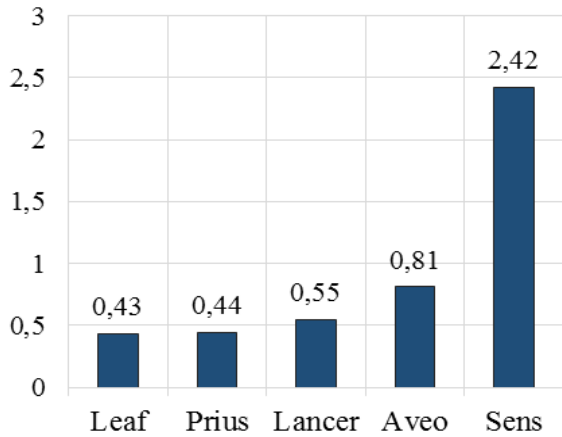


Рис. 2. Зміна критерію безпеки руху та критерію якості технічних рішень для марок автомобілів

Критерієм оцінки показників якості технічних рішень для базових автомобілів та гібриду визначено:

$$K_T = \frac{0,036H_{\min} \cdot t_p \cdot \rho_T \cdot V_{\max}}{G_a}, \quad (11)$$

– для електромобілів:

$$K_T^e = \frac{0,324E_{\text{АКБ}} \cdot t_p \cdot \rho_T \cdot V_{\max}}{L_3 \cdot G_a}, \quad (12)$$

де G_a – маса автомобіля, кг; t_p – час розгону з 0 до 100 км/год.

Проблему перетворення багатокритеріальної задачі оцінки якості на однокритеріальну можна вирішити методом формування інтегрального показника [5; 6].

З рівняння випливає, що чим менший інтегральний критерій, тим вища якість автомобіля. Отже, математична модель інтегрального критерію оцінки якості автомобілів з урахуванням середньої швидкості руху матиме такий вигляд:

– для базових автомобілів:

$$K_I = F + Z(40 + 0,2 \cdot V_a) + (A + D) / V_a \quad (13)$$

де

$$F = \left[\left(\frac{1,8S_T}{S_{T\min} \cdot n_3} \right) + \frac{0,036H_{\min} \cdot t_p \cdot \rho_T \cdot V_{\max}}{G_a} \right] \quad (14)$$

$$Z = \frac{L_6 \cdot K_k}{128L_k} \quad (15)$$

$$A = \frac{0,079N_{\max} \cdot g_{\min} \cdot C_T \cdot L_{\text{ГАР}}}{C_{\text{авт}} \cdot \rho_T} \quad (16)$$

$$D = \frac{0,0033H_{\min} \cdot V_{\max}}{K_{\text{NO}_x}}; \quad (17)$$

– для гібридних автомобілів:

$$K_I^r = F + Z(30 + 0,2V_a) + \frac{C}{V_a} + D_r \cdot V_a \quad (18)$$

$$D_r = \frac{0,0275H_{\min} \cdot N_e}{K_{\text{NO}_x} \cdot V_{\max} \cdot N_{\max}}; \quad (19)$$

– для електромобілів:

$$K_I^e = F_e + Z(30 + 0,2V_a) + \frac{B}{V_a}, \quad (20)$$

$$B = \frac{2,7E_{\text{АКБ}} \cdot C_e \cdot L_{\text{ГАР}} \cdot V_{\max}}{C_{\text{авт}} \cdot L_3} \quad (21)$$

$$F_e = \left[\frac{1,8S_T}{S_{T\min} \cdot n_3} + \frac{0,324E_{\text{АКБ}} \cdot t_p \cdot V_{\max}}{G_a \cdot G_3} \right]. \quad (22)$$

На рисунку 3 наведено зміну інтегрального показника якості від середньої швидкості та критерію оцінки показників якості технічних рішень моделей автомобілів.

У роботі розглянуто нові можливості підвищення ефективності використання автомобілів за результатами дослідження методів оцінювання якісних показників на етапі експлуатації. Методологія практичного виконання дослідження базується на оцінці якісних показників автомобілів на етапі експлуатації середньої швидкості за критеріями безпеки руху, технічних рішень, екологічності, комфорту та функціональної стійкості, а також на тому як сформульовано основні методичні принципи [7–9].

Інтегральний критерій оцінки якісних показників автомобіля суттєво залежить від умов експлуатації. У таблиці 1 наведено поправкові коефіцієнти інтегрального критерію для базових, гібридних та електромобілів залежно від умов експлуатації.

Таблиця 1

Коефіцієнти поправки на інтегральний критерій оцінки показників якості від умов експлуатації

Група умов експлуатації	Середня швидкість автомобіля	Інтегральний показник якості автомобіля		
		база	гібрид	електрокар
I	100	1,00	1,00	1,00
II	80	1,10	0,95	1,00
III	60	1,40	0,90	0,95
IV	30	1,50	1,00	1,05
V	20	2,25	1,40	1,60

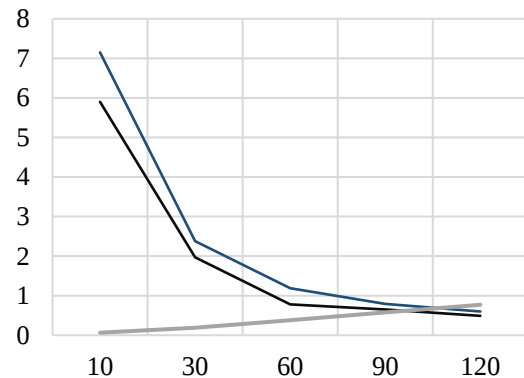
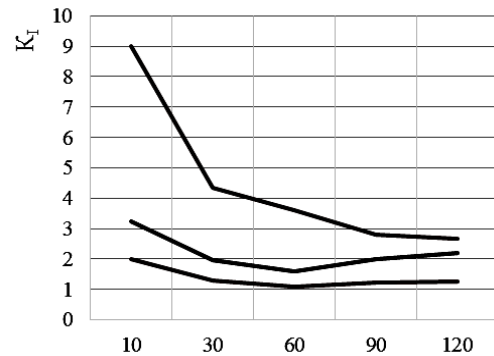
На інтегральний критерій оцінки показників якості автомобіля найбільше впливає швидкість руху. Зі збільшенням швидкості від 20 до 100 км/год. інтегральний критерій оцінки якісних показників автомобілів знижується більш ніж удвічі, гібридних та електромобілів – у 1,5–1,6 раза. Тому проблемі підвищення швидкості для автомобілів необхідно приділити особливу увагу. Швидкість – це резерв, який може істотно підвищити продуктивність автомобілів.

Таблиця 2

Результати комплексної оцінки показників якості

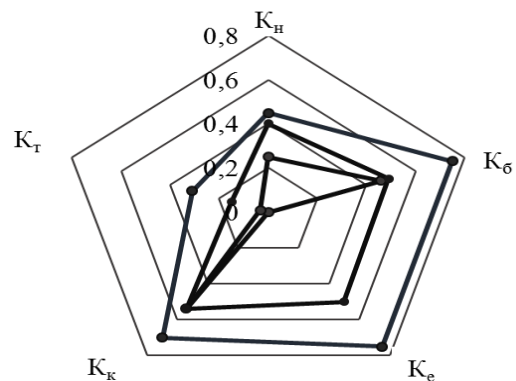
№	Найменування критеріїв	Позначення	Модель автомобіля		
			Chevrolet Aveo	Nissan Liac	Toyota Prius
1	Функціональна стабільність	K_n	0,45	0,25	0,4
2	Безпека руху	K_b	0,75	0,46	0,49
3	Екологічність	K_e	0,75	-	0,5
4	Комфорт	K_k	0,7	0,54	0,54
5	Технічні рішення	K_t	0,31	0,033	0,15
6	Інтегральний критерій	K_i	2,96	1,28	2,08

Інтегральна оцінка показників якості та конкурентоспроможності отримана на основі підходів та математичних моделей, описаних у [10; 11]. Найкраща альтернатива (легковий автомобіль) повинна відповідати мінімальному значенню інтегрального критерію якості. Кінцеві результати моделювання та розрахунків дозволили оцінити показники якості розглянутих базових, гібридних та електромобілів за обраними критеріями, а також отримати загальну інтегральну оцінку якості автомобілів, представлених у таблиці 2 і на рисунку 3.



1 – Chevrolet Aveo; 2 – Toyota Prius; 3 – Nissan Leaf;
4 – Mitsubishi Lancer

Рис. 3. Зміна інтегрального показника якості та критерію екологічної безпеки від середньої швидкості автомобіля



1 – Chevrolet Aveo; 2 – Toyota Prius; 3 – Nissan Leaf

Рис. 4. Зміна інтегрального показника якості від середньої швидкості для моделей транспортних засобів

На рисунку 4 добре видно, за якими наборами показників електричні та гібридні автомобілі перевершують базові автомобілі.

Практичне впровадження результатів, отриманих у процесі цього дослідження, забезпечує такі основні можливості та умови:

1) для автовиробників та їх дилерів: оперативне отримання інформації про особливості експлуатації автомобілів і

розроблення заходів щодо вдосконалення конструкцій автомобілів; підвищення іміджу марки автомобіля; збільшення продажів;

2) для споживачів транспортних засобів: можливість порівняльної узагальненої оцінки; придбання якісного автомобіля; формування та пред'явлення вимог до виробників автомобілів щодо вдосконалення конструкції та комплектуючих.

Висновки

1. Здійснено узагальнення та розвиток наукових основ актуального та важливого науково-технічного завдання щодо розроблення науково-методичного апарату оцінки якості автомобілів, що стало основою концепції визначення взаємозв'язків, розроблено математичні моделі і методи оцінювання та забезпечення якості на етапі експлуатації.

2. Зі збільшенням середньої швидкості автомобіля відбувається підвищення критерію комфортності для всіх типів автомобілів у 1,6–2 рази, критерій оцінки екологічної безпеки базових автомобілів знижується у 9–11 разів, а гібридних автомобілів збільшується у 8–10 разів.

За максимальної середньої швидкості критерії оцінки екологічної безпеки базових і гібридних автомобілів рівні. Критерій оцінки функціональної стійкості базових, гібридних та електромобілів зі збільшенням середньої швидкості знижується в 10–11 разів. Але слід зазначити, що критерій оцінки якості функціональної стійкості базових автомобілів в 1,3–1,5 раза вищий, ніж гібридних автомобілів, і в 1,8–2,0 рази більший, ніж електромобілів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бажинов О. В., Смирнов О. П., Суріков С. А., Двадненко В. Я., Бажинов О. В., Смирнов О. П., Суріков С. А., Двадненко В. Я. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика. За ред. Бажинова О. В. Харків : ХНАДУ, 2011. 236 с.
2. Бажинов А. В., Двадненко В. Я., Серіков С. А. Підвищення ефективності та екологічної безпеки транспортних засобів з гібридними силовими установками. Наукові нотатки ЛНТУ : міжвуз. зб. наук. пр. 2010. Вип. 28. С. 40–45.
3. Заятров А., Козловський А. Програмний комплекс для вимірювання експлуатаційної надійності електрообладнання автомобілів. Науковий пошук у сучасному світі: теоретичні засади та інноваційний підхід. Флорида, США, L&L Publishing, 2012. С. 101–103.
4. Строганов В. І., Козловський В. Н. Концепція забезпечення якості та надійності електромобілів і транспортних засобів з гібридною силовою установкою. *Електроніка та електрообладнання транспорту*. 2012. № 5. С. 49–55.
5. Бажинов А. В., Бажинова Т. А., Кравцов М. Н. Основи ефективного використання екологічно чистих автомобілів : монографія. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 200 с.
6. Побережний В. Н., Ременцов А. Н., Зенченко В. А. Методичний підхід до комплексної оцінки техніко-експлуатаційних властивостей імпортованих вантажних автомобілів, що працюють в умовах Крайньої Півночі. *Проблеми технічної експлуатації та автосервісу рухомого складу автомобільного транспорту*. 2005. С. 16–20.
7. Островцев А. Н., Кузнецов Е. С., Румянцев С. І. Критерії оцінки та управління якістю транспортних засобів на стадіях проектування, виробництва та експлуатації. Москва : МАДІ, 1981. 95 с.
8. Борисенко А. О., Бажинова Т. О. Експлуатація потужності гібридних автомобілів : монографія. Харків : ФОП Бровін О. В., 2016. 104 с.
9. Бажинова Т. О., Нечитайло Ю. А., Весела М. А. Енергетична оцінка транспортних засобів. *Науковий вісник Національного університету*. 2016. № 6 (156). С. 84–88.
10. Смирнов О. П., Бажинова Т. О., Весела М. А. Обґрунтування раціональних техніко-економічних параметрів гібридного автомобіля. *Автоматизація, програмне забезпечення та інженерія*. №. 1 URL : <http://asdej.xyz/substantiation-of-rational-technical-economic-parameters-of-hybrid-car/> 2017.
11. Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А. та ін. Гібридні автомобілі : монографія. За заг. ред. Бажинова О. В., Смірнова О. П. Харків : ХНАДУ, 2008. 327 с.
12. Kia очолила рейтинг якості електроенергії J.D. на тлі потрясінь. AutoNews. J.D. Power and Associates. URL: <http://www.autonews.com/article/20170621/OEM01/170629948/2017-j-d-power-iqs-kia>.

REFERENCES

1. Bazhynov O.V., Smirnov O.P., Surikov S.A., Dvadenko V.Y., Bazhynov O.V., Smirnov O.P., Surikov S.A. and Dvadenko V.Ya. *Synerhetychnyy avtomobil'. Teoriya i praktyka* [Synergetic car. Theory and Practice]. Edited by O.V. Bazhynov. Kharkiv: KHNADU, 2011, 236 p. (in Ukrainian).
2. Bazhynov A.V., Dvadenko V.Ya. and Serikov S.A. *Pidvyshchennya efektyvnosti ta ekolohichnoyi bezpeky transportnykh zasobiv z hibrydnymi sylovymi ustanovkamy* [Increasing the efficiency and environmental safety of vehicles with hybrid power plants]. *Naukovi notatky LNTU : mizhvuz. zb. nauk. pr.* [Scientific notes of LNTU : interuniversity collection of scientific papers]. 2010, iss. 28, pp. 40–45. (in Ukrainian).
3. Zayatov A. and Kozlovsky A. *Prohramnyy kompleks dlya vymiryuvannya ekspluatatsiynoyi nadiynosti elektroobladnannya avtomobiliv. Naukovyy poshuk u suchasnomu sviti: teoretychni zasady ta innovatsiynyy pidkhid* [Software complex for measuring the operational reliability of electrical equipment of cars. Scientific research in the modern world: theoretical foundations and innovative approach]. Florida, USA, L&L Publishing, 2012, pp. 101–103. (in Ukrainian).
4. Stroganov V.I. and Kozlovskiy V.N. *Kontseptsiya zabezpechennya yakosti ta nadiynosti elektromobiliv i transportnykh zasobiv z hibrydnoyu sylovoyu ustanovkoyu. Elektronika ta elektroobladnannya transportu* [The concept of ensuring the quality and reliability of electric vehicles and vehicles with a hybrid power plant. Electronics and electrical equipment of transport]. 2012, no. 5, pp. 49–55. (in Ukrainian).
5. Bazhynov A.V., Bazhynova T.A. and Kravtsov M.N. *Osnovy efektyvnoho vykorystannya ekolohichno chystykh avtomobiliv : monohrafiya* [Fundamentals of effective use of environmentally friendly cars : monograph]. Kharkiv : Panov A.M., Kharkiv, 2018, 200 p. (in Ukrainian).
6. Poberezhnyi V.N., Rementsov A.N. and Zenchenko V.A. *Metodychnyy pidkhid do kompleksnoyi otsinky tekhniko-ekspluatatsiynykh vlastyvostey importnykh vantazhnykh avtomobiliv, shcho pratsyuyut' v umovakh Krayn'oyi Pivnochi* [Methodical approach to a comprehensive assessment of the technical and operational properties of imported trucks operating in the Far North]. *Problemy tekhnichnoyi ekspluatatsiyi ta avtoservisu rukhomoho skladu avtomobil'noho transportu* [Problems of technical operation and car service of rolling stock of road transport : Collection of scientific works]. 2005, pp. 16–20. (in Ukrainian).
7. Ostrovtshev A.N., Kuznetsov E.S. and Rumyantsev S.I. *Kryteriyy otsinky ta upravlinnya yakisty transportnykh zasobiv na stadiyakh proektuvannya, vyrobnytstva ta ekspluatatsiyi* [Criteria for assessing and managing the quality of vehicles at the stages of design, production and operation]. Moscow : MADI, 1981, 95 p. (in Ukrainian).
8. Borysenko A.O. and Bazhynova T.O. *Ekspluatatsiya potuzhnosti hibrydnykh avtomobiliv : monohrafiya* [Operation of the power of hybrid cars : monograph]. Kharkiv : FOP Brovin O.V., 2016, 104 p. (in Ukrainian).
9. Bazhynova T.O., Nechytailo Y.A. and Vesela M.A. *Enerhetychna otsinka transportnykh zasobiv* [Energy assessment of vehicles]. *Naukovyy visnyk Natsional'noho universytetu* [Scientific Bulletin of the National University]. 2016, no. 6 (156), pp. 84–88.
10. Smirnov O.P., Bazhinova T.O. and Vesela M.A. *Obgruntuvannya ratsional'nykh tekhniko-ekonomichnykh parametriv hibrydnoho avtomobilya* [Substantiation of rational technical and economic parameters of a hybrid car]. *Avtomatyzatsiya, prohramne zabezpechennya ta inzheneriya* [Automation, Software and Engineering]. Vol. 1. URL: <http://asdej.xyz/substantiation-of-rational-technical-economic-parameters-of-hybrid-car/> 2017.
11. Bazhynov O.V., Smirnov O.P., Serikov S.A. et al. *Hibrydni avtomobili: monohrafiya* [Hybrid cars : a monograph]. Kharkiv : KhNADU, 2008, 327 p. (in Ukrainian).
12. *Kia ocholyla reytnyn yakosti elektroenerhiyi J.D. na tli potryasin'. AutoNews. J.D. Power and Associates* [Kia topped J.D. Power Quality Rating amid turmoil. AutoNews. J.D. Power and Associates]. URL: <http://www.autonews.com/article/20170621/OEM01/170629948/2017-j-d-power-iqs-kia>.

Надійшла до редакції: 03.09.2023.

УДК 669-1:691.714.122:519.237

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.27.990

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ПІДТВЕРДЖУЮЧОГО ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

БЕКЕТОВ О. В.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
ЛАУХІН Д. В.², докт. техн. наук, проф.,
СЛУПСЬКА Ю. С.³, докт. філософії,
РАКАЄВ О. М.⁴, ас.,
БЛІНОВ Ю. С.⁵, маг.

^{1*} Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 585-54-29, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Кафедра механічної та біомедичної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (068) 638-79-45, e-mail: juliaslypska@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7983-1602

⁴ Кафедра експлуатації та ремонту машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 682-10-96, e-mail: rakaiev.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-3173-0140

⁵ Кафедра комп'ютерних наук, інформаційних технологій та прикладної математики, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0009-0003-1552-6494

Анотація. *Постановка проблеми.* У процесі аналізу динаміки функціонування складних технічних систем, які характеризуються певною архітектурою та взаємодією між собою компонентів системи, у більшості випадків виникають певні труднощі, пов'язані з описом загальносистемних питань. До кола таких питань, в першу чергу, можна віднести проблеми, які стосуються безпосередньої математичної формалізації загальної структури системи, організації взаємозв'язків між її елементами, взаємодії елементів системи з її зовнішнім середовищем, керування діяльністю її елементів тощо. В таких випадках найчастіше дослідники застосовують процедуру математичного моделювання. Разом із тим є досить велике коло явищ, для аналізу яких можливе застосування традиційного апарату математичного моделювання. У таких ситуаціях можливо застосування прийомів моделювання, які представляють модель у вигляді алгоритмічної програми для електронно-обчислювальної машини, так зване імітаційне моделювання. **Мета дослідження** – застосування імітаційного фізико-математичного моделювання методом підтверджуючого факторного аналізу для дослідження складних технічних процесів. **Висновок.** Досліджено взаємозв'язок між параметрами режиму лазерного зварювання та морфологічними критеріями структурного стану низьковуглецевої низьколегованої сталі 09Г2С із застосуванням математичного апарату імітаційного моделювання, а саме підтверджуючого факторного аналізу. Методику підтверджуючого факторного реалізовано у вигляді діаграми шляхів, а саме графічної інтерпретації взаємозв'язку між критеріями структурного стану та параметрами лазерного зварювання. Як критерії морфології структурного стану використано відсотковий вміст та геометричні розміри основних структурних складових фериту та перліту, як параметри зварювання – геометричні розміри ділянок зварного з'єднання. Адекватність отриманої моделі підтверджено шляхом побудови імовірнісного графіка нормалізованих залишків згідно з квазіньютонівським методом залишків.

Ключові слова: імітаційне моделювання; підтверджуючий факторний аналіз; діаграма шляхів; коваріаційний аналіз; кореляційний аналіз; адекватність моделі

USING THE METHOD OF CONFIRMATORY FACTOR ANALYSIS FOR THE SIMULATION OF TECHNICAL SYSTEMS

BEKETOV O.V.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
LAUKHIN D.V.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
SLUPSKA Yu.S.³, Ph. D.,

RAKAIEV O.M.⁴, Ass.,
BLINOV Yu.S.⁵, *Master of Engineering*

^{1*} Department of Fundamental and Natural Sciences, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Department of Construction, Technical Aesthetics and Design, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytsky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 585-54-29, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytsky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (068) 638-79-45, e-mail: juliaslypska@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7983-1602

⁴ Department of Construction and Road Machinery, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 682-10-96, e-mail: rakaiev.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-3173-0140

⁵ Department of Computer Sciences, Information Technologies and Applied Mathematics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, ORCID ID: 0009-0003-1552-6494

Abstract. Problem statement. Analyzing the dynamics of the functioning of complex technical systems, which are characterized by a certain architecture and the interaction of system components, in most cases, there are certain difficulties associated with the description of system-wide issues. Among such issues, first of all, it is possible to include problems related to the direct mathematical formalization of the overall system structure, the organization of relationships between its elements, the interaction of system elements with its external environment, control of the activities of its elements, etc. In such cases, most often researchers use the procedure of mathematical modeling. At the same time, there is a fairly large range of phenomena, in the analysis of which it is possible to use the traditional apparatus of mathematical modeling. In such situations, it is possible to apply modeling techniques that represent the model in the form of an algorithmic program for an electronic computer, the so-called simulation modeling. **The purpose of the article.** Application of simulated physical and mathematical modeling by the method of confirmatory factor analysis for the study of complex technical processes. **Conclusion.** The relationship between the parameters of the laser welding mode and the morphological criteria of the structural state of low-carbon low-alloy steel 09Г2С was investigated using the mathematical apparatus of simulation modeling, namely confirmatory factor analysis. The confirmatory factor method was implemented in the form of a path diagram, namely a graphical interpretation of the relationship between the structural condition criteria and laser welding parameters. The percentage content and geometric dimensions of the main structural components of ferrite and pearlite were used as criteria for the morphology of the structural state, and the geometric dimensions of the welded joint sections were used as welding parameters. The adequacy of the obtained model was confirmed by constructing a probability plot of normalized residuals according to the quasi-Newtonian method of residuals.

Keywords: *simulation modeling; confirmatory factor analysis; path diagram; covariance analysis; correlation analysis; adequacy of the model*

Постановка проблеми. Під час аналізу складних технічних систем, що характеризуються власною архітектурою і взаємодією між собою елементів, кожен з яких також є системою, за традиційного підходу до досліджень, виникають певні проблеми. Основною складністю виявляються безпосередня математична формалізація і опис загальносистемних функцій на підставі дослідження зв'язків і залежностей між компонентами системи.

У таких ситуаціях можна застосовувати прийоми моделювання, які представляють модель у вигляді алгоритмічної програми, так зване імітаційне моделювання [1].

Аналіз публікацій. Імітаційне моделювання – це дослідження складної технічної системи із застосуванням

електронно-обчислювальної машини, спрямоване на отримання інформації щодо взаємозв'язку між компонентами системи. Таким чином, основною метою імітаційного моделювання стало отримання певного алгоритму, який демонструє розгорнутий у часі процес функціонування системи, вплив на роботу компонентів параметрів зовнішнього середовища [2].

Виходячи із зазначеного, основні завдання імітаційного моделювання можна сформулювати так [3]:

- розроблення алгоритму функціонування системи у вигляді комп'ютерної моделі на основі імітації впливу компонентів моделі (модулів), об'єднаних своїми взаємодіями в єдине ціле;

- визначення незалежних змінних (інтеграційних характеристик об'єкта), способів їх отримання і дослідження;
- врахування впливу зовнішнього середовища на систему у вигляді сукупності імітаційних моделей зовнішніх факторів;
- вибір способу побудови та аналізу імітаційної моделі відповідно до методів математичної формалізації імітаційних експериментів.

Таким чином, мета імітаційного моделювання – імітація об'єкта у вигляді математичної моделі та проведення уявних (теоретичних) експериментів над нею для дослідження законів її функціонування і поведінки [4].

До переваг методу імітаційного моделювання можуть бути віднесені [5]:

- проведення імітаційних експериментів над імітаційною моделлю системи, для якої натурний експеримент не можливо здійснити (наприклад, системи керування, динаміка розвитку структурного стану матеріалів тощо);
- розв'язання певного кола задач, для яких традиційні аналітичні методи (традиційне математичне моделювання) неможливі внаслідок наявності великої кількості факторів впливу (наприклад, системи з великою кількістю неперервнодискретних чинників; стохастичні системи, які містять випадкові впливи; системи, які містять компоненти з нелінійними характеристиками та ін.);
- дослідження загальносистемних ситуацій і прийняття рішення із застосуванням комп'ютерного алгоритму;
- можливість здійснення порівняльного аналізу основних закономірностей функціонування системи на підставі визначення певних критеріїв;
- економія часу і ресурсів на стадії пошуку проектних рішень;
- дослідження різних варіантів структури великих систем, побудова алгоритмів керування роботою системи, дослідження впливу діапазону параметрів системи на її функціонування.

Таким чином, за імітаційного моделювання, комп'ютерний алгоритм

імітує основні етапи функціонування системи шляхом порівняльного аналізу ідентичності будови системи та поведінки компонентів системи за зміни їх стану.

Мета роботи – застосування імітаційного фізико-математичного моделювання методом підтверджуючого факторного аналізу для дослідження складних технічних процесів.

Результати досліджень. Процес імітаційного моделювання графічно можливо подати у вигляді рисунку 1.

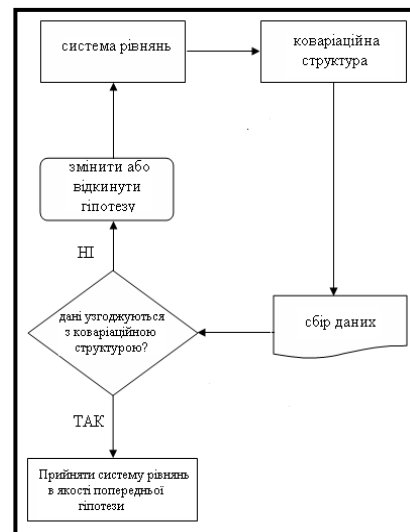


Рис. 1. Діаграма процесу імітаційного моделювання [6]

У цій статті імітаційне моделювання пропонується здійснювати шляхом застосування підтверджуючого факторного аналізу, який є розвитком стандартної процедури факторного аналізу та використовується для перевірки гіпотез структури факторних навантажень, а також кореляцій між факторами [7].

Як приклад для застосування підтверджуючого факторного аналізу використано технологічний процес лазерного зварювання низьковуглецевої низьколегованої сталі 09Г2С. Таким чином, як задача моделювання розглядався взаємозв'язок між морфологією структурних складових та параметрами режиму зварювання.

Як дані, що застосовувалися для імітаційного моделювання, використано результати експериментальних досліджень зварних з'єднань низьковуглецевих

низьколегованих сталей (див. [8–10]) та дані щодо групування та отримання факторів, отримані у праці [11]. Графічна та обчислювальна частини процесу побудови та аналізу імітаційної моделі здійснювали з використанням програмного комплексу STATSOFT STATISTICA 10.0 [12].

Як зазначено, головною ідеєю підтверджуючого факторного аналізу стало порівняння відхилень дисперсій вихідних і отриманих кореляційних та коваріаційних матриць [7], тобто у моделях підтверджуючого факторного аналізу навантаження факторів, кореляції факторів або дисперсія і коваріації залишків можуть бути визначені заданим числовим значенням.

Першим етапом підтверджуючого факторного аналізу стали аналіз змінних (факторів) та побудова відповідної діаграми шляхів, тобто графічна інтерпретація моделі.

Спираючись на дані праць [8–11], як змінні для побудови імітаційної моделі використовували:

- відсоткове співвідношення структурних складових фериту на межі зварного шва та зони термічного впливу (FERRITE2);
- відсоткове співвідношення структурних складових фериту у зоні термічного впливу (FERRITE3);
- відсоткове співвідношення структурних складових фериту на межі між зоною термічного впливу та основним металом (FERRITE4);
- відсоткове співвідношення структурних складових перліту на межі зварного шва та зони термічного впливу (PERLITE2);
- відсоткове співвідношення структурних складових перліту у зоні термічного впливу (PERLITE3);
- відсоткове співвідношення структурних складових перліту на межі між

зоною термічного впливу та основним металом (PERLITE4);

- геометричні розміри між межею зварного шва та зоною термічного впливу (ZONAI);
- геометричні розміри зони термічного впливу (ZONA III);
- геометричні розміри між межею зони термічного впливу та основним металом (GRZON).

Графічну інтерпретацію моделі наведено на рисунку 2. Побудова подібного типу діаграм здійснюється шляхом написання відповідної програми мовою PATH1 в середовищі STATSOFT STATISTICA 10.0.

Згідно зі схемою моделі (див. рис. 2) досліджували три фактори, де кожен із них навантажує по три явні змінні, а саме:

- перший фактор навантажує змінні – FERRITE2, FERRITE3, FERRITE4 (досліджується феритна складова у зонах зварного з'єднання);
- другий фактор навантажує змінні – PERLITE2, PERLITE3, PERLITE4 (досліджується перліт у зонах зварного з'єднання);
- третій фактор навантажує змінні – ZONAI, ZONA III, GRZON (досліджуються: межа зварний шов – зона термічного впливу; зона термічного впливу та межа зона термічного впливу – основний метал).

Окрім явних факторів, тобто змінних, які вимірювалися безпосередньо (див., наприклад, [8]), на діаграмі наведено так звані латентні змінні [13], які не підлягають вимірюванню. До таких змінних відносять похибки вимірювання ($U1-U9$) та факти впливу ($F1-F3$).

Отже, на рисунку 2 дугою 11–19 відображено дисперсії до латентних змінних $U1-U9$; дугою 20 відображено дисперсію між першим та другим фактором $F1-F2$; дугою 21 – між другим та третім фактором $F2-F3$; дугою 22 – дисперсію між першим та третім фактором $F1, F3$.

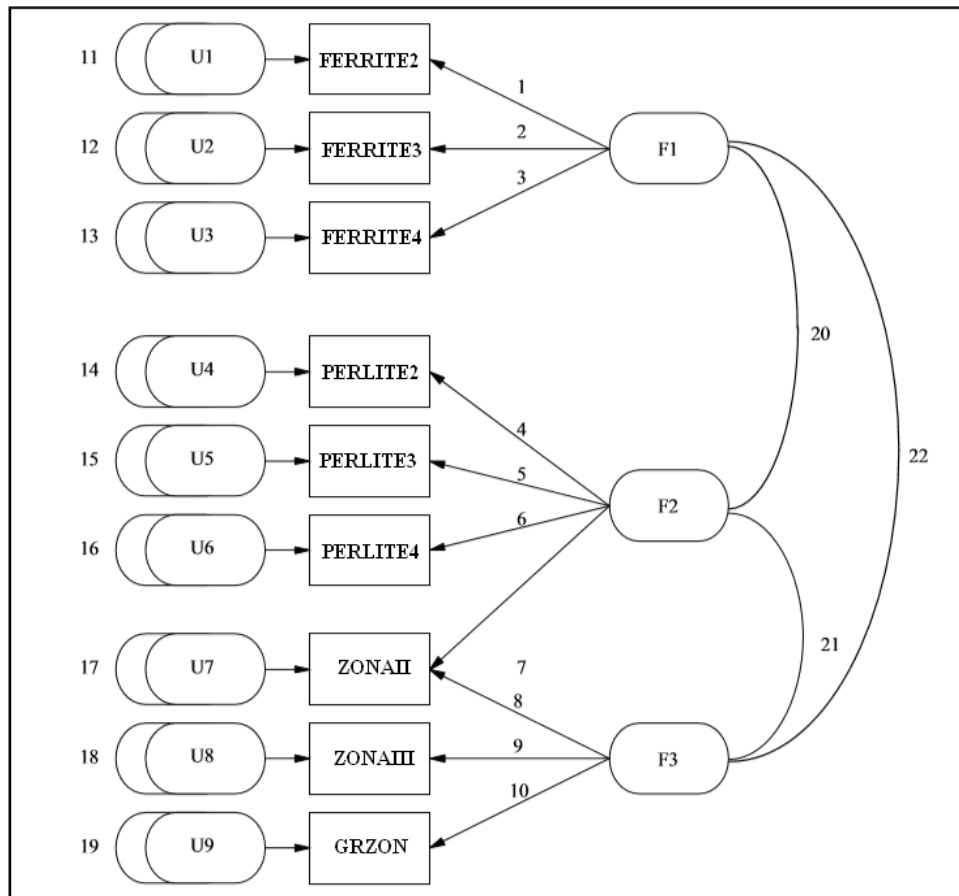


Рис. 2. Діаграма шляхів підтверджуючого факторного аналізу

З метою спрощення наступного етапу моделювання виявлені фактори умовно розподілено на такі компоненти:

- структура 1 (STRUCTURE1) – відносяться змінні, які навантажують перший фактор: FERRITE2, FERRITE3, FERRITE4;
- структура 2 (STRUCTURE2) – змінні, які навантажують другий фактор, тобто PERLITE2, PERLITE3, PERLITE4;
- геометричні розміри (GEOMETRY) – відносяться змінні, які навантажують третій фактор: ZONAII, ZONA III, GRZON.

На підставі групування факторів та результатів підтверджуючого факторного аналізу отримано та досліджено відповідні коваріаційні та кореляційні матриці взаємозв'язку (табл. 1).

Дані, наведені в таблиці 1 являють собою матриці, в яких кожний рядок отриманих результатів оцінення моделі аналізує кожен здійснений етап аналізу шляхів.

Як метод оцінення моделі застосовано узагальнений метод найменших квадратів (УМНК) [14], на наступному етапі – метод максимум правдоподібності (МП) [15]. Таким чином, виконувалося п'ять ітераційних процесів із застосуванням УМНК і така ж кількість ітерацій із застосуванням методу МП.

Відповідно, під час побудови моделі отримано оцінки для кожного з параметрів, стандартні похибки факторних навантажень. Також прораховано стандартні відхилення для кожного з написаних шляхів.

Аналіз наведених даних показує, що стандартні похибки знаходяться в допустимих інтервалах. Статистична оцінка виконана за критерієм Стюдента (так звана *T*-статистика, яка відображає значення критерію для гіпотези, що значення параметра дорівнює нулю), який показує межу відхилення кожного параметра від його номінальної величини. При цьому імовірнісний рівень повинен приймати значення, наближені до 1 за рівня

значущості $p = 0$. Отже, можна зробити висновок, що всі коефіцієнти кореляції між факторами та вихідними змінними значущі.

Перевірка отриманих моделей здійснювалась із використанням статистичного апарату критеріїв згоди [16]. Результати цього етапу наведені в таблиці 2.

Таблиця 1

Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу

Аналіз шляхів (рисунок 2)	Оцінка параметра	Стандартні помилки	T статистики	Імовірнісний рівень
<i>Коваріаційний аналіз</i>				
(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	0,07	0,17	0,45	0,66
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	0,80	0,14	5,68	0,68
(GEOMETRY) -8->[ZONAPI]	-1,51	0,19	-7,95	0,73
<i>Кореляційний аналіз</i>				
(STRUCTURE1)-1->[FERRITE2]	0,07	0,17	0,45	0,65
(STRUCTURE2)-4->[PERLITE2]	0,80	0,06	12,69	0,00
(GEOMETRY) -8->[ZONAPI]	-1,51	0,22	-6,93	0,00

Таблиця 2

Перевірка адекватності отриманих результатів

Критерії оцінки	Коваріаційна матриця	Кореляційна матриця
Функція незгоди	1,3E+002	1,3E+022
Критерій УУПММ	3,4E-007	1,7E-007
Критерій УИМ	0,0011	0,00061
χ^2 -квадрат	47,20	47,20
Максимум косинуса залишків	0,00	0,00

При цьому здійснювали аналіз за такими статистичними критеріями [16]:

- функція незгоди: відображає кінцеве значення залежності, форма якої приймається до допомоги функції незгоди;
- критерій стійкості до множення на постійний множник масштабу (критерій УУПММ): повинен наближатися до 0;
- критерій стійкості до зміни масштабу (критерій УИМ): також повинен наближатися до 0;
- χ^2 -квадрат: оцінює розбіжність між вихідною та відтвореною кореляційною матрицями;
- максимум косинуса залишків: повинен наближатися до нуля. При цьому буде виконуватися умова, що процес ітерації зійшовся.

Аналіз даних, наведених у таблиці 2, відповідає перерахованим умовам.

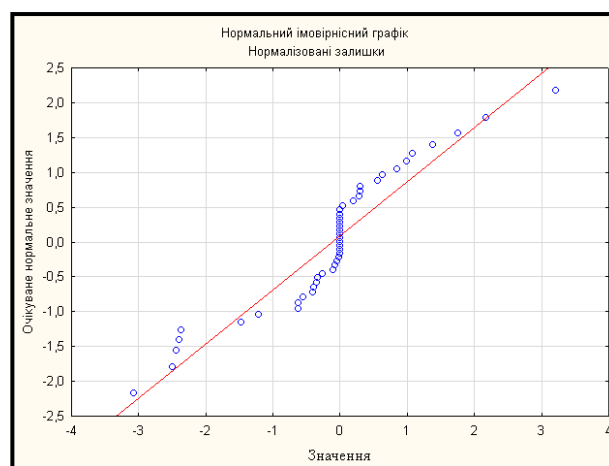


Рис. 3. Графічна інтерпретація кореляційного аналізу результатів підтверджуючого факторного аналізу

Графічну інтерпретацію матриці кореляційного аналізу наведено на рисунку 3. Аналіз даних показує, що залишки з достатнім ступенем точності лягають на пряму, яка відповідає нормальному закону розподілу.

Тому гіпотеза про нормальний розподіл помилок приймається. З графіка розподілу залишків випливає, що вони хаотично розкидані на площині і в їх поведінці немає закономірностей. Немає підстави говорити, що залишки корелюються між собою. Отже, можна зробити висновок, що отримана модель адекватна.

Висновки

1. З використанням математичного апарату імітаційного моделювання методом підтверджуючого факторного аналізу досліджено взаємозв'язок між параметрами режиму лазерного зварювання та морфологічними ознаками структурного стану низьковуглецевої низьколегованої сталі 09Г2С.

2. Методика підтверджуючого факторного аналізу запропонована у вигляді діаграми шляхів. Відповідно, діаграма шляхів побудована як графічна інтерпретація взаємозв'язку між критеріями структурного стану (відсотковий вміст та геометричні розміри основних структурних

складових фериту та перліту) та наслідком дії лазерного зварювання (геометричні розміри ділянок зварного з'єднання).

3. Проведено коваріаційний та кореляційний аналіз отриманих даних. При цьому отримано матриці, які аналізують кожен шлях моделі. Показники отриманих критеріїв відповідають достовірності, а саме: отримані критерії УУПММ та УИМ наближені до нуля; імовірнісний рівень близький до 1; максимальне значення косинуса залишків наближене до нуля; коефіцієнти між коваріаціями (кореляціями) та вихідні дані значимі на рівні $p = 0$.

4. Отримано графічну інтерпретацію кореляційного аналізу, а саме імовірнісний графік нормалізованих залишків. Аналіз графіка показав, що залишки з достатнім ступенем точності лягають на пряму, яка відповідає нормальному закону розподілу, та хаотично розкидані на площині, і в їх поведінці немає закономірностей. Це свідчить про адекватність отриманої моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Неруш В. Б., Курдеча В. В. Імітаційне моделювання систем та процесів: електр. навч. вид. Конспект лекцій. Київ : НН ІТС НТУУ «КПІ». 2012. 115 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15598/1/Konspekt_lekciy_Imit_modelyr_syst_process%28CHANGED%29.pdf
2. Ситник В. Ф., Орленко Н. С. Імітаційне моделювання : навч. посіб. Київ : КНЕУ, 2008. 232 с. URL : <https://studfile.net/preview/5470103/>
3. Кадієвський В. А., Жадлун З. О., Жадлун А. О. Імітаційне моделювання економічних процесів. Київ : НАУ, 2002. 230 с. URL: <https://econom.lnu.edu.ua/course/imitatsijne-modelyuvannya>
4. Велика О. Т., Ляковська С. Є., Смотров О. О., Бойко М. В. Імітаційне моделювання технологічного процесу виготовлення виробів у середовищі FlexSim. *Науковий вісник Н/ІТУ України*. 2021. Т. 31, № 2. С. 108–113. URL: <https://nv.nltu.edu.ua/index.php/journal/issue/view/219>
5. Жерновий Ю. В. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування : практикум. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка. 2007. 312 с. URL: https://zyurvas.narod.ru/Queueing/Imit_model.pdf
6. Інструкція користувача StatSoft Statistica. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm>
7. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посіб. Львів : ЛьвДУВС. 2017. 292 с. URL: <https://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/629/1/%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F%20%D0%B9%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf>
8. Slupska Y., Laukhin D., Poznyakov V., Kostin V., Beketov O., Rott N., Dadiverina L., Liubymova-Zinchenko O. Features in the formation of the structural state of low-carbon micro-alloyed steels after eletron beam welding. *Materials science. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, № 12 (111). Pp. 25–31. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/234783>
9. Slupska Y., Laukhin D., Beketov O., Babenko E., Rott N., Dytiuk V. Metallographic analysis of potential areas of destruction initiation of the zone of thermal impact of low-carbon steels after laser welding. *Materials Science and Industrial Mechine-Building*. № 65. Pp. 88–98. URL: <https://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnal/38-65ua/451-65ua09>
10. Слупська Ю. С., Лаухін Д. В., Бекетов О. В., Тютєрев І. А., Ротт Н. О., Чашин Д. Ю., Торопченєв Г. О., Пико М. О. Металографічний аналіз структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після

автоматичного зварювання під шаром флюсу. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. № 16. Ч. 1. С. 105–113. URL: <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit16-01/meit16-01>

11. Слупська Ю. С., Лаухін Д. В., Бекетов О. В., Тютєрев І. А., Ротт Н. О. Застосування методів факторного аналізу у дослідженні структурного стану зварного з'єднання після лазерного зварювання. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3 (003). С. 91–100. URL : <https://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/239178/237668>

12. Програмний комплекс StatSoftStatistika. URL: <https://statsoft.com>

13. Borsboom D., Mellenbergh G. J., van Heerden J. The Theoretical Status of Latent Variables. *Psychological Review*. 2003. Vol. 110, № 2. Pp. 203–219. URL: <https://psycnet.apa.org/record/2003-00307-002>

14. Барковський В. В., Барковська Н. В., Лопатін О. К. Теорія ймовірностей та математична статистика. Київ : ЦУЛ, 2002. 448 с. URL: <https://library.kre.dp.ua/Books/2-4%20kurs/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F%20%D0%B9%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%20%D1%82%D0%B0%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0/%D0%91%D0%B0%D1%80%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F%20%D1%96%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9%20%D1%82%D0%B0%20%D0%9C%D0%A1%202010.pdf>

15. Іванюта І. Д., Рибалка В. І., Рудоміно-Дусятська І. А. Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики. Київ: Слово, 2003. 272 с. URL: <https://dspace.udpu.edu.ua/bitstream/123456789/13667/1/%D0%9F%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%20%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%97%20%D0%B9%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9%20%28%D1%84%D1%96%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%20%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D1%96%D1%8F%29%20repository.pdf>

16. Карташов М. В. Імовірність, процеси, статистика : посіб. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. 494 с. URL : https://probability.knu.ua/userfiles/kmv/VPS_Pv.pdf

REFERENCES

1. Nerush V.B. and Kurdecha V.V. *Imitatsiine modeliuвання system ta protsesiv : elektronne navchalne vydannia. Konspekt lektzii* [Simulation modeling of systems and processes : electronic educational edition. Synopsis of lectures.] Kyiv : NN ITS NTUU “KPI”, 2012, 115 p. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15598/1/Konspekt_lekciy_Imit_modely_r_syst_process%28CHANGED%29.pdf (in Ukrainian).

2. Sytnyk V.F. and Orlenko N.S. *Imitatsiine modeliuвання : navch. posibnyk* [Simulation modeling : education. manual]. Kyiv : KNEU, 2008, 232 p. URL: <https://studfile.net/preview/5470103/> (in Ukrainian).

3. Kadiievskiy V.A., Zhadlun Z.O. and Zhadlun A.O. *Imitatsiine modeliuвання ekonomichnykh protsesiv*. [Simulation modeling of economic processes]. Kyiv : NAU Publ., 2002, 230 p. URL: <https://econom.lnu.edu.ua/course/imitatsiine-modeliyuvannya> (in Ukrainian).

4. Velyka O.T., Liaskovska S.Ye., Smotr O.O. and Boiko M.V. *Imitatsiine modeliuвання tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia vyrobiv u seredovyshchi FlexSim* [Simulation modeling of the manufacturing process of products in the FlexSim environment.] *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy* [Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine]. 2021, vol. 31, no. 2, pp. 108–113. URL: <https://nv.nltu.edu.ua/index.php/journal/issue/view/219> (in Ukrainian).

5. Zhernovyi Yu.V. *Imitatsiine modeliuвання system masovoho obsluhovuvannya : praktykum* [Simulation modeling of mass service systems : workshop]. Lviv : VTs LNU im. I. Franka, 2007, 312 p. URL : https://zyurvas.narod.ru/Queueing/Imit_model.pdf (in Ukrainian).

6. *Instruktsiia korystuvacha StatSoft Statistica* [StatSoft Statistica User Manual]. URL : <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (in Ukrainian).

7. Ohirko O.I. and Halaiko N.V. *Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka : navchalnyi posibnyk* [Probability theory and mathematical statistics : a textbook]. Lviv : LvDUVS, 2017, 292 p. URL : <https://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/629/1/%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F%20%D0%B9%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf> (in Ukrainian).

8. Slupska Y., Laukhin D., Poznyakov V., Kostin V., Beketov O., Rott N., Dadiverina L. and Liubymova-Zinchenko O. Features in the formation of the structural state of low-carbon micro-alloyed steels after electron beam welding. *Materials Science. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021, vol. 3, no. 12 (111), pp. 25–31. URL : <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/234783>

9. Slupska Y., Laukhin D., Beketov O., Babenko E., Rott N. and Dytiuk V. Metallographic analysis of potential areas of destruction initiation of the zone of thermal impact of low-carbon steels after laser welding. *Materials Science and Industrial Machine-Building*. No. 65, pp. 88–98. URL: <https://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/38-65ua/451-65ua09>

10. Slupska Yu.S., Laukhin D.V., Beketov O.V., Tiutieriev I.A., Rott N.O., Chashyn D.Iu., Toropchenov H.O. and Pyko M.O. *Metalohrafichnyi analiz strukturnoho stanu nyzkovuhletsevykh nyzkolehovanykh stalei pislia avtomatichnoho zvariuvannia pid sharom fliusu* [Metallographic analysis of the structural state of low-carbon, low-alloy steels after automatic welding under a flux layer.] *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2021, no. 16, part 1, pp. 105–113. URL: <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit16-01/meit16-01> (in Ukrainian).
11. Slupska Yu.S., Laukhin D. V., Beketov O. V., Tiuterev I. A. and Rott N. O. *Zastosuvannia metodiv faktornoho analizu u doslidzhenni strukturnoho stanu zvarnogo ziednannia pislia lazernoho zvariuvannia* [Application of factor analysis methods in the study of the structural state of the welded joint after laser welding.] *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no. 3 (003), pp. 91–100. URL: <https://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/239178/237668> (in Ukrainian).
12. *Prohramnyi kompleks StatSoftStatistika* [StatSoftStatistika software complex]. URL: <https://statsoft.com> (in Ukrainian).
13. Borsboom D., Mellenbergh G.J. and van Heerden J. The Theoretical Status of Latent Variables. *Psychological Review*. 2003, vol. 110, no. 2, pp. 203–219. URL: <https://psycnet.apa.org/record/2003-00307-002>
14. Barkovskyi V.V., Barkovska N.V. and Lopatin O.K. *Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka* [Probability theory and mathematical statistics]. Kyiv : TsUL, 2002, 448 p. URL: <https://library.kre.dp.ua/Books/2-4%20kurs/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F%20%D0%B9%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%20%D1%82%D0%B0%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0/%D0%91%D0%B0%D1%80%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F%20%D1%96%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9%20%D1%82%D0%B0%20%D0%9C%D0%A1%202010.pdf> (in Ukrainian).
15. Ivaniuta I.D., Rybalka V.I. and Rudomino-Dusiatska I.A. *Elementy teorii ymovirnostei ta matematychnoi statystyky* [Elements of probability theory and mathematical statistics]. Kyiv : Slovo, 2003, 272 p. URL : <https://dspace.udpu.edu.ua/bitstream/123456789/13667/1/%D0%9F%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%20%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%97%20%D0%B9%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9%20%28%D1%84%D1%96%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%20%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D1%96%D1%8F%29> repository.pdf (in Ukrainian).
16. Kartashov M.V. *Imovirnist, protsesy, statystyka : posibnyk* [Probability, processes, statistics : handbook]. Kyiv: Publishing and Printing Center "Kyiv University", 2008, 494 p. URL : https://probability.knu.ua/userfiles/kmv/VPS_Pv.pdf (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 07.09.2023.

УДК 669-1:691.714.122:519.237

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.36.991

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СТАТИСТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

БЕКЕТОВ О. В.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
ЛАУХІН Д. В.², докт. техн. наук, проф.,
СЛУПСЬКА Ю. С.³, докт. філософії,
РАКАЄВ О. М.⁴, ас.,
ПРИХНО К. Є.⁵, маг.

^{1*} Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 585-54-29, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Кафедра механічної та біомедичної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (068) 638-79-45, e-mail: juliaslypska@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7983-1602

⁴ Кафедра експлуатації та ремонту машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 682-10-96, e-mail: rakaiev.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-3173-0140

⁵ Кафедра комп'ютерних наук, інформаційних технологій та прикладної математики, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0009-0007-9248-8275

Анотація. Постановка проблеми. Дослідження функціонування багатокomпонентних систем можливе із застосуванням статистичних імітаційних моделей. На відміну від традиційного математичного моделювання, для побудови зазначеного типу моделей не є необхідним отримання математичної формалізації взаємозв'язку між параметрами в тій або іншій формі. Основна умова – спроможність моделі відтворювати явища, які моделюються, із збереженням їх логічної та часової послідовності та фізичного сенсу. Один із найпоширеніших методів статистичного імітаційного моделювання є метод статистичних випробувань – метод Монте-Карло. Основа цього методу – багаторазове застосування генератора випадкових чисел для моделювання динаміки процесів, які відбуваються у системі. На підставі отриманих ітерацій розраховуються статистичні критерії оцінки отриманих результатів, що дає змогу провести попередній аналіз фізичних процесів, які досліджуються, і зробити висновки щодо взаємозв'язку між параметрами, включеними до моделі. Таким чином, враховуючи загальні принципи побудови імітаційних моделей подібного типу, доцільно їх застосовувати для дослідження низки задач прикладного матеріалознавства, наприклад, для опису впливу зовнішніх чинників на структурний стан матеріалу. **Мета роботи** – застосування статистичного імітаційного моделювання методом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) для дослідження фізичних процесів, які відбуваються в складних системах. **Висновок.** Із застосуванням методу Монте-Карло отримано імітаційну модель взаємозв'язку між технологічними режимами зварювання та параметрами структурного стану низьковуглецевої низьколегованої сталі 09Г2С. Отриману імітаційну модель наведено у вигляді матриці, яка містить результати статистичних випробувань. Аналіз отриманих статистичних показників дозволив здійснити попередній аналіз взаємозв'язку між технологічними режимами зварювання та відповідним структурним станом низьковуглецевої низьколегованої сталі 09Г2С. Попереднє оцінювання отриманої імітаційної моделі здійснювали шляхом аналізу активних обмежень типу нерівностей. Проведений комплекс досліджень довів адекватність отриманих даних.

Ключові слова: статистичне імітаційне моделювання; метод Монте-Карло; параметри структурного стану; технологічні режими зварювання; аналіз показників

APPLICATION OF THE STATISTICAL TESTING METHOD FOR SIMULATION MODELLING OF COMPLEX SYSTEMS

BEKETOV O.V.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
LAUKHIN D.V.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
SLUPSKA Yu.S.³, Ph. D.,

RAKAIEV O.M.⁴, Ass.,
PRYKHNO K.Ye.⁵, *Master of Eng.*

^{1*} Department of Fundamental and Natural Sciences, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Department of Construction, Technical Aesthetics and Design, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 585-54-29, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (068) 638-79-45, e-mail: juliaslypska@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7983-1602

⁴ Department of Construction and Road Machinery, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 682-10-96, e-mail: rakaiev.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-3173-0140

⁵ Department of Computer Sciences, Information Technologies and Applied Mathematics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, ORCID ID: 0009-0007-9248-8275

Abstract. Problem statement. The study of the multicomponent systems' operation is possible using statistical simulation models. In contrast to traditional mathematical modeling, in order to build the specified type of models, it is not necessary to obtain a mathematical formalization of the relationship between parameters in one form or another. The main condition is the ability of the model to reproduce the phenomena being modeled, while preserving their logical and temporal sequence and physical meaning. One of the most common methods of statistical simulation modeling is the method of statistical tests - the Monte Carlo method. The basis of this method is the repeated use of a random number generator to simulate the dynamics of processes occurring in the system. Based on the obtained iterations, statistical criteria for evaluating the obtained results are calculated, which makes it possible to conduct a preliminary analysis of the physical processes under investigation and draw conclusions about the relationship between the parameters included in the model. Thus, taking into account the general principles of these building simulation models, it is advisable to use them to study a number of applied materials science problems, for example, to describe the influence of external factors on the structural state of the material. **The purpose of the article.** Application of statistical simulation modeling by the method of statistical tests (Monte Carlo method) for the study of physical processes that occur in complex systems. **Conclusion.** Using the Monte Carlo method, a simulation model of the relationship between the technological modes of welding and the parameters of the structural state of low-carbon low-alloy steel 09Г2С was obtained. The obtained simulation model is presented in the form of a matrix containing the results of statistical tests. The analysis of the obtained statistical indicators made it possible to carry out a preliminary analysis of the relationship between technological modes of welding and the corresponding structural state of low-carbon low-alloy steel 09Г2С. Preliminary evaluation of the obtained simulation model was carried out by analyzing active constraints of the type of inequalities. The conducted set of studies proved the obtained data adequacy.

Keywords: *simulation modeling; confirmatory factor analysis; path diagram; covariance analysis; correlation analysis; adequacy of the model*

Постановка проблеми. Для аналізу функціонування багатокомпонентних систем разом із традиційними (аналітичними) можливе застосування і чисельних методів моделювання, орієнтованих на розв'язування низки задач із використанням електронно-обчислювальних машин. Загальною особливістю такого підходу до розв'язання прикладних задач є побудова моделей спеціального типу – так званих статистичних імітаційних моделей.

На відміну від традиційного математичного моделювання, для побудови зазначеного типу моделей не є необхідним отримання математичної формалізації взаємозв'язку між параметрами в тій або іншій формі [1]. Головне в цьому випадку –

спроможність моделі до характерного відтворення явищ, що описуються моделлю, із збереженням їх логічної структури, часової послідовності та фізичного сенсу [2]. Технічна реалізація такого підходу до побудови моделі складної системи можлива лише з використанням засобів обчислювальної техніки, які забезпечать високий ступінь кореляції між математичними (кількісними) характеристиками реальних процесів і їх модельними відображеннями [3].

Отже, виходячи з принципів побудови імітаційних моделей подібного типу, доцільно їх застосовувати для дослідження низки задач прикладного матеріалознавства,

наприклад, для опису впливу зовнішніх чинників на структурний стан матеріалу.

Аналіз публікацій. Методи, які застосовуються для статистичного імітаційного моделювання, принципово відрізняються від методів традиційного математичного моделювання. Традиційні моделі повинні надати рішення, що визначає у вигляді математичної залежності взаємозв'язок між параметрами, на підставі закладеної в моделі інформації про досліджувану систему. На відміну від них, статистичні імітаційні моделі створюються для отримання інформації про систему і створення в подальшому відповідних оцінок, які можливо використовувати для формування рішень [3]. При цьому процес формування рішень безпосередньо до імітаційної моделі не включається. Така особливість статистичних імітаційних моделей дозволяє застосовувати їх для дослідження складних процесів, які майже не підлягають математичній формалізації.

Формування початкових даних для побудови статистичної імітаційної моделі ґрунтуються на використанні максимального обсягу доступної інформації про систему, наданої в більшості випадків у вигляді різноманітних статистичних функцій: коваріаційних і/або кореляційних матриць, функцій розподілу ймовірності випадкової величини тощо. Такий підхід дозволяє долучити до аналізу ті дані про систему, які неможливо отримати через відсутність аналізу поведінки системи у всіх принципово можливих режимах її функціонування [4].

Один із найпоширеніших методів статистичного імітаційного моделювання – метод статистичних випробувань – метод Монте-Карло [5]. Сучасний варіант цього методу сформувався у процесі виконання досліджень у рамках Манхеттенського проекту, де його застосовували для моделювання відстаней, які можуть пройти нейтрони в різних матеріалах [6]. В основу методу Монте-Карло покладено багаторазове застосування генератора випадкових чисел для моделювання динаміки процесів, які відбуваються у

системі. На підставі отриманих ітерацій розраховуються статистичні критерії оцінки отриманих результатів [5; 6].

Результати моделювання методом Монте-Карло мають стохастичний характер. Через це отримані залежності можуть мати схильність випадкових коливань навколо дійсних значень. Відповідно виникають певні труднощі в оцінюванні результату: важко встановити, чи залежність справді має таку поведінку на досліджуваному відрізку часу, чи має місце вплив стохастичних похибок, які з'являються внаслідок роботи генератора випадкових чисел.

Один із проявів такого недоліку – те, що для однієї і тієї ж моделі, в аналогічних умовах статистичного експерименту кожне наступне моделювання даватиме результат, відмінний від попереднього, хоча загальний характер залежностей, отриманих за різних реалізацій, буде однаковим [6].

Незважаючи на недоліки, методи статистичного імітаційного моделювання являють собою потужний інструмент для дослідження фізичних процесів, які містять стохастичну (випадкову) складову і відбуваються в складних системах протягом певного проміжку часу.

Мета статті – висвітлення застосування статистичного імітаційного моделювання методом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) для дослідження фізичних процесів, які відбуваються в складних системах.

Результати досліджень. Як приклад застосування статистичного імітаційного моделювання розглянемо взаємозв'язок між режимами зварювання та структурним станом низьковуглецевої низьколегованої сталі 09Г2С. Відповідні матеріалознавчі дослідження опубліковані у працях [7–9]. Аналіз цих робіт показує, що автори визначили декілька параметрів, які змінювалися внаслідок зміни режиму зварювання. При цьому ці параметри можливо розподілити на дві категорії:

- параметри, які характеризують режим зварювання: геометричні розміри

відповідних зон зварного з'єднання [9] та геометричні розміри меж між зонами;

- параметри, які характеризують структурний стан: відсотковий вміст і геометричні розміри структурних складових (основні структурні складові ферит і перліт) по зонах зварного з'єднання.

Технічну реалізацію статистичного імітаційного моделювання методом Монте-Карло виконували із застосуванням спеціальних модулів програмного комплексу StatSoftStatistika [10]. Програмну реалізацію методу засновано на генерації псевдовипадкових чисел [11]. Усі процеси генерування випадкових чисел на початковому етапі генерують рівномірно розподілені випадкові величини на основі

стандартного процесу, який математично можна виразити у вигляді рівняння (1):

$$x_i = 742938258 \cdot x_{i-1} \cdot (\text{mod} 2^{31} - 1), (1)$$

де x_i – наступне значення; x_{i-1} – попереднє значення.

Як вхідні для моделювання дані програма використовує кореляційні матриці. Відповідно, кореляційні матриці впливу режимів зварювання на структурний стан низьковуглецевої низьколегованої сталі 09Г2С було отримано на підставі даних, наведених у [7–9]. Для побудови кореляційних матриць враховувались також дані та рекомендації, які надано в праці [12]. Результати проведеного кореляційного аналізу узагальнено та представлено у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Результати кореляційного аналізу

Лазерне зварювання									
	ZONA II	ZONA III	ZONA IV	FER 2	FER 3	FER 4	PER 2	PER 3	PER 4
ZONA II	1,00	-0,16	-0,55	0,51	-0,11	-0,42	-0,31	0,06	0,24
ZONA III	-0,16	1,00	-0,46	-0,46	-0,09	-0,06	-0,81	-0,60	-0,77
ZONA IV	-0,55	-0,46	1,00	-0,02	0,58	0,83	0,88	0,78	0,67
FER 2	0,51	-0,46	-0,02	1,00	-0,16	-0,04	0,15	0,23	0,43
FER 3	-0,11	-0,09	0,58	-0,16	1,00	0,48	0,46	0,56	0,44
FER 4	-0,42	-0,06	0,83	-0,04	0,48	1,00	0,50	0,74	0,55
PER 2	-0,31	-0,81	0,88	0,15	0,46	0,50	1,00	0,77	0,78
PER 3	0,06	-0,60	0,78	0,23	0,56	0,74	0,77	1,00	0,96
PER 4	0,24	-0,77	0,67	0,43	0,44	0,55	0,78	0,96	1,00
Електронно-променеве зварювання									
ZONA II	1,00	-0,33	0,45	0,05	-0,61	0,36	0,61	-0,66	0,03
ZONA III	-0,33	1,00	-0,12	0,32	0,17	0,60	-0,53	0,59	-0,90
ZONA IV	0,45	-0,12	1,00	-0,67	-0,91	-0,18	0,68	-0,31	0,20
FER 2	0,05	0,32	-0,67	1,00	0,43	0,77	-0,20	0,15	-0,49
FER 3	-0,61	0,17	-0,91	0,43	1,00	0,03	-0,83	0,20	-0,23
FER 4	0,36	0,60	-0,18	0,77	0,03	1,00	-0,10	0,00	-0,82
PER 2	0,61	-0,53	0,68	-0,20	-0,83	-0,10	1,00	-0,43	0,52
PER 3	-0,66	0,59	-0,31	0,15	0,20	0,00	-0,43	1,00	-0,26
PER 4	0,03	-0,90	0,20	-0,49	-0,23	-0,82	0,52	-0,26	1,00
Автоматичне зварювання під шаром флюсу									
ZONA II	1,00	-0,05	0,27	0,38	-0,63	-0,33	-0,59	0,23	-0,14
ZONA III	-0,05	1,00	-0,47	0,62	0,22	-0,11	0,02	-0,38	0,14
ZONA IV	0,27	-0,47	1,00	0,15	-0,48	-0,46	-0,08	-0,32	-0,02
FER 2	0,38	0,62	0,15	1,00	0,15	-0,78	-0,61	-0,61	-0,03
FER 3	-0,63	0,22	-0,48	0,15	1,00	-0,17	-0,22	-0,33	-0,08
FER 4	-0,33	-0,11	-0,46	-0,78	-0,17	1,00	0,62	0,40	-0,21
PER 2	-0,59	0,02	-0,08	-0,61	-0,22	0,62	1,00	0,22	0,45
PER 3	0,23	-0,38	-0,32	-0,61	-0,33	0,40	0,22	1,00	0,40
PER 4	-0,14	0,14	-0,02	-0,03	-0,08	-0,21	0,45	0,40	1,00

У таблиці 1 використано такі умовні позначення:

- ZONA II – ширина граничного шару між зварним швом та зоною термічного впливу;
- ZONA III – ширина зони термічного впливу;
- ZONA IV – ширина граничного шару між зоною термічного впливу та основним металом;
- FER 2 – відсотковий вміст феритної фази в ZONA II;
- FER 3 – відсотковий вміст феритної фази в ZONA III;
- FER 4 – відсотковий вміст феритної фази в ZONA IV;
- PER 2 – відсотковий вміст перлітної фази в ZONA II;
- PER 3 – відсотковий вміст перлітної фази в ZONA III;
- PER 4 – відсотковий вміст перлітної фази в ZONA IV.

На підставі даних кореляційної матриці розроблено в програмному модулі комплексу StatSoftStatistika шляхи навантаження змінних (розроблено відповідні діаграми шляхів), а саме:

- параметру ZONA II ставились у відповідність фактори FER 2, PER 2;
- параметру ZONA III ставились у відповідність фактори FER 3, PER 3;
- параметру ZONA IV ставились у відповідність фактори FER 4, PER 4.

Під час моделювання методом Монте-Карло здійснено генерацію 50 ітерацій. Результати представлено у вигляді матриці, яку наведено у таблиці 2. Результати підрахунку основних статистичних показників, які наведено у цій таблиці, дозволяють провести попередній (розвідувальний) аналіз процесу, який досліджується.

Так, наприклад, згідно з правилами математичної статистики [13], 95 % довірчий інтервал наближено дорівнює плюс-мінус дві стандартні похибки.

Результати, наведені в таблиці 2, показують, що для фактора PER 4 стандартне відхилення набуває значення: 0,38 (лазерне зварювання); 0,29 (електронно-променеве зварювання); 0,31 (автоматичне зварювання під шаром флюсу). Тоді, для усіх трьох режимів зварювання довірчий інтервал наближено складає $\pm 0,66$.

Таблиця 2

Оцінка моделі підтверджуючого факторного аналізу

Лазерне зварювання									
	PER 2	PER 3	PER 4	FER 2	FER 3	FER 4	ZONA II	ZONA III	ZONA IV
СЕРЕДНЄ	0,4885	0,56987	0,5850	0,6143	0,5894	0,5742	0,5135	0,63026	0,554322
МЕДІАНА	0,5411	0,66406	0,6655	0,5857	0,6013	0,5994	0,5881508	0,60480	0,56681
Станд. відх.	0,3374	0,36971	0,3862	0,2506	0,2965	0,2725	0,3298608	0,28369	0,291304
МІН.	-0,2083	-0,4379	-0,832	0,0000	0,0000	0,0000	-0,290110	0,00000	-0,01104
МАКС.	1,0000	1,00000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,000000	1,00000	1,000000
Електронно-променеве зварювання									
СЕРЕДНЄ	0,5714	0,57117	0,5816	0,6045	0,5853	0,5374	0,5238579	0,60436	0,496567
МЕДІАНА	0,5691	0,59675	0,5933	0,6260	0,6039	0,5435	0,6022654	0,63592	0,53782
Станд. відх.	0,2773	0,31086	0,2929	0,3441	0,3262	0,3434	0,3514015	0,35213	0,368474
МІН.	0,0000	-0,1144	0,0000	-0,375	-0,196	-0,8034	-0,372227	-0,6930	-0,36480
МАКС.	1,0000	1,00000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,000000	1,00000	1,000000
Автоматичне зварювання під шаром флюсу									
СЕРЕДНЄ	0,5291	0,54835	0,6453	0,5594	0,5939	0,5278	0,6008994	0,54789	0,614235
МЕДІАНА	0,5535	0,60806	0,6766	0,5484	0,5843	0,4946	0,5474777	0,49955	0,692855
Станд. відх.	0,3397	0,31220	0,3141	0,3243	0,3019	0,3622	0,3057236	0,30860	0,327918
МІН.	-0,4736	-0,2372	-0,285	-0,264	0,0000	-0,9237	-0,076062	-0,01104	-0,04423
МАКС.	1,0000	1,00001	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,000000	1,00000	1,0000

Це означає, що параметри «ширина граничного шару між зоною термічного впливу та основним металом» і «відсотковий вміст перлітної складової структури» пов'язані між собою.

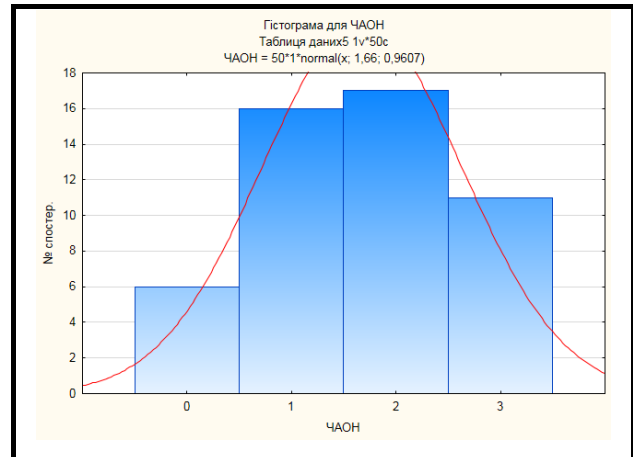
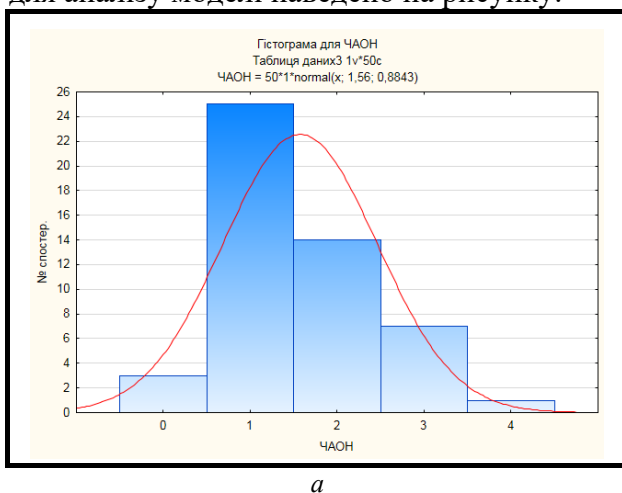
Враховуючи те, що геометричні розміри зон зварного з'єднання безпосередньо пов'язані з кількістю тепловкладання, яке відбулося під час зварювання, можливо дійти висновку, що на формування перліту в приграничному до основного металу шарі впливають параметри режиму зварювання (потужність джерела, швидкість підведення тепла, швидкість охолодження тощо).

Отже, аналізуючи основні статистичні показники, отримані із застосуванням методу Монте-Карло, можна здійснити попередній аналіз процесів, які досліджуються, і на підставі отриманих результатів безпосередньо робити висновки стосовно можливості корегування технологічних процесів.

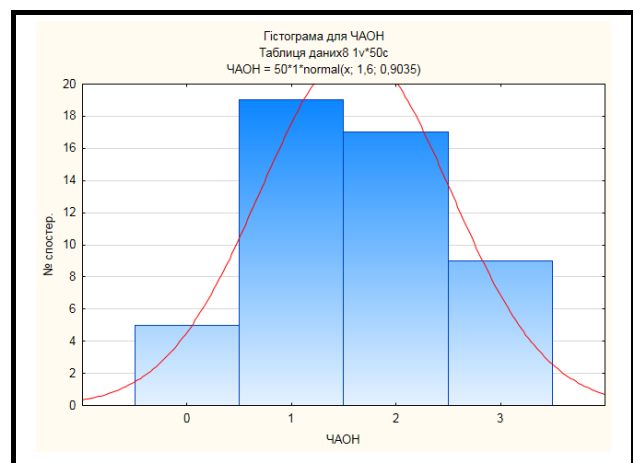
Оцінювання отриманої моделі можливо здійснити шляхом аналізу статистичних розподілів та статистичних показників. Для прикладу, в даній роботі із цією метою застосовували так званий метод «граничних умов» (ЧАОН). Основна ідея методу полягає в отриманні після завершення кожної ітерації для кожного шляху активних обмежень типу нерівностей.

Здійснення аналізу цим методом дозволяє виявити помилки, пов'язані як із кількістю ітерацій, так і з обробкою граничних умов для кожного шляху.

Результати застосування методу ЧАОН для аналізу моделі наведено на рисунку.



б



в

Рис. Результати оцінення імітаційної статистичної моделі методом ЧАОН: а – лазерне зварювання; б – електронно-променеє зварювання; в – автоматичне зварювання під шаром флюсу

Інтерпретація даних, наведених на рисунку, показує, що розподіл отриманих граничних умов наближено до нормального вигляду (на гістограмах рисунка нормальний розподіл наведено у вигляді суцільної лінії). Це вказує на адекватність отриманої імітаційної моделі. Разом із цим, аналіз наведених даних показує, що кількість значень ЧАОН, які знаходяться в діапазоні 1...3, значно перевищує 50 % усіх отриманих результатів (для кожної з гістограм). Це свідчить, що для ще більш детального моделювання слід обрати більшу кількість ітерацій.

Висновки

1. Із застосуванням статистичного імітаційного моделювання (методу Монте-

Карло) отримано імітаційну модель взаємозв'язку між технологічними режимами зварювання та параметрами структурного стану низьковуглецевої низьколегованої сталі 09Г2С.

2. Для першого етапу отримання статистичної імітаційної моделі використано кількісний аналіз даних металографічних досліджень, який представлено у вигляді кореляційної матриці.

3. Метод статистичних випробувань здійснювався по 50 ітераціях. Отриману імітаційну модель наведено у вигляді матриці, яка містить результати статистичних випробувань (набір

статистичних показників). Аналіз отриманих статистичних показників дозволив здійснити попередній аналіз взаємозв'язку між технологічними режимами зварювання та відповідним структурним станом низьковуглецевої низьколегованої сталі 09Г2С.

4. Попереднє оцінювання отриманої імітаційної моделі здійснювали шляхом аналізу активних обмежень типу нерівностей (метод граничних умов). Проведений комплекс досліджень показав, що розподіл отриманих граничних умов наближено до нормального вигляду, що свідчить про адекватність отриманих даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жерновий Ю. В. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування : практикум. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2007. 312 с. URL: https://zyurvas.narod.ru/Queuing/Imit_model.pdf
2. Кадієвський В. А., Жадлун З. О., Жадлун А. О. Імітаційне моделювання економічних процесів. Київ : НАУ, 2002. 230 с. URL: <https://econom.lnu.edu.ua/course/imitatsijne-modelyuvannya>
3. Неруш В. Б., Курдеча В. В. Імітаційне моделювання систем та процесів : електр. навч. вид. Конспект лекцій. Київ : НН ІТС НТУУ «КПІ», 2012. 115 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15598/1/Konspect_lekcij_Imit_modelyuv_syst_process%28CHANGED%29.pdf
4. Ситник В. Ф., Орленко Н. С. Імітаційне моделювання : навч. посіб. Київ : КНЕУ, 2008. 232 с. URL: <https://studfile.net/preview/5470103/>
5. Клименко М. І., Гребенюк С. М. Математичне моделювання складних систем : конспект лекцій. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 73 с. URL: <https://moodle.znu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=499782&forceview=1>
6. Лежнюк П. Д., Комар В. О. Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом. Вінниця : УНІБЕРСУМ-Вінниця, 2006. 107 с. URL : <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/23878/51711.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
7. Slupska Y., Laukhin D., Poznyakov V., Kostin V., Beketov O., Rott N., Dadiverina L., Liubymova-Zinchenko O. Features in the formation of the structural state of low-carbon micro-alloyed steels after electron beam welding. *Materials Science. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, № 12 (111). Pp. 25–31. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/234783>
8. Slupska Y., Laukhin D., Beketov O., Babenko E., Rott N., Dytiuk V. Metallographic analysis of potential areas of destruction initiation of the zone of thermal impact of low-carbon steels after laser welding. *Materials Science and Industrial Machine-Building*. № 65. Pp. 88–98. URL: <https://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/38-65ua/451-65ua09>
9. Слупська Ю. С., Лаухін Д. В., Бекетов О. В., Тютєрев І. А., Ротт Н. О., Чашин Д. Ю., Торопченков Г. О., Пико М. О. Металографічний аналіз структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після автоматичного зварювання під шаром флюсу. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2021. № 16, ч. 1. С. 105–113. URL: <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit16-01/meit16-01>
10. Програми комплекс StatSoftStatistika. URL: <https://statsoft.com>
11. Інструкція користувача StatSoft Statistica. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm>
12. Слупська Ю. С., Лаухін Д. В., Бекетов О. В., Тютєрев І. А., Ротт Н. О. Застосування методів факторного аналізу у дослідженні структурного стану зварного з'єднання після лазерного зварювання. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3 (003). С. 91–100. URL: <https://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/239178/237668>
13. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посіб. Львів : ЛьвДУВС, 2017. 292 с. URL: <https://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/629/1/%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F%20%D0%B9%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf>

REFERENCES

1. Zhernovyi Yu.V. *Imitatsiine modeliuвання system masovoho obsluhovuvannya : praktykum* [Simulation modeling of mass service systems : workshop]. Lviv : VTs LNU im. I. Franka, 2007, 312 p. URL : https://zyurvas.narod.ru/Queuing/Imit_model.pdf (in Ukrainian).
2. Kadiievskiy V.A., Zhadlun Z.O. and Zhadlun A.O. *Imitatsiine modeliuвання ekonomichnykh protsesiv* [Simulation modeling of economic processes]. Kyiv: NAU Publ., 2002, 230 p. URL: <https://econom.lnu.edu.ua/course/imitatsijne-modeliyuvannya> (in Ukrainian).
3. Nerush V.B. and Kurdecha V.V. *Imitatsiine modeliuвання system ta protsesiv : elektronne navchalne vydannia. Konspekt lektzii* [Simulation modeling of systems and processes : electronic educational edition. Synopsis of lectures]. Kyiv : NN ITS NTUU “KPI”, 2012, 115 p. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15598/1/Konspekt_lekciy_Imit_modely_r_syst_process%28CHANGED%29.pdf
4. Sytnyk V.F. and Orlenko N.S. *Imitatsiine modeliuвання : navch. posibnyk* [Simulation modeling : education. manual]. Kyiv : KNEU Publ., 2008, 232 p. URL: <https://studfile.net/preview/5470103/>
5. Klymenko M.I. and Hrebenuk S.M. *Matematychnе modeliuвання skladnykh system : konspekt lektzii* [Mathematical modeling of complex systems: lecture notes]. Zaporizhzhia : ZNU Publ., 2021, 73 p. URL: <https://moodle.znu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=499782&forceview=1> (in Ukrainian).
6. Lezhniuk P.D. and Komar V.O. *Otsinka yakosti optymalnoho keruvannya kryterialnym metodom* [Evaluation of the quality of optimal management by the criterion method]. Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006, 107 p. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/23878/51711.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (in Ukrainian).
7. Slupska Y., Laukhin D., Poznyakov V., Kostin V., Beketov O., Rott N., Dadiverina L. and Liubymova-Zinchenko O. Features in the formation of the structural state of low-carbon micro-alloyed steels after electron beam welding. Materials Science. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021, vol. 3, no. 12 (111), pp. 25–31. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/234783>
8. Slupska Y., Laukhin D., Beketov O., Babenko E., Rott N. and Dytiuk V. Metallographic analysis of potential areas of destruction initiation of the zone of thermal impact of low-carbon steels after laser welding. Materials Science and Industrial Machine-Building. No. 65, pp. 88–98. URL: <https://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/38-65ua/451-65ua09>
9. Slupska Yu.S., Laukhin D.V., Beketov O.V., Tiutieriev I.A., Rott N.O., Chashyn D.Yu., Toropchenov H.O. and Pyko M.O. *Metalohrafichnyi analiz strukturnoho stanu nyzkovuhletsevykh nyzkolehovanykh stalei pislia avtomatichnoho zvariuvannya pid sharom fliusu* [Metallographic analysis of the structural state of low-carbon, low-alloy steels after automatic welding under a flux layer]. Modern Engineering and Innovative Technologies. 2021, no. 16, p. 1, pp. 105–113. URL: <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit16-01/meit16-01> (in Ukrainian).
10. *Prohramnyi kompleks StatSoftStatistika* [StatSoftStatistika software complex]. URL: <https://statsoft.com> (in Ukrainian).
11. *Instruktsiia korystuvacha StatSoft Statistica* [StatSoft Statistica User Manual]. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (in Ukrainian).
12. Slupska Yu.S., Laukhin D.V., Beketov O.V., Tiuterev I.A. and Rott N.O. *Zastosuvannya metodiv faktornoho analizu u doslidzhenni strukturnoho stanu zvarnoho ziednannya pislia lazernoho zvariuvannya* [Application of factor analysis methods in the study of the structural state of the welded joint after laser welding]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no. 3 (003), pp. 91–100. URL : <https://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/239178/237668> (in Ukrainian).
13. Ohirko O.I. and Halaiko N.V. *Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka : navchalnyi posibnyk* [Probability theory and mathematical statistics : a textbook]. Lviv : LvDUVS, 2017, 292 p. URL: <https://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/629/1/%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F%20%D0%B9%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 11.09.2023.

УДК 622.831.31:622.834

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.44.992

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКІВ І КОНТРОЛЮ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПІДЗЕМНИХ ВИРОБОК В УМОВАХ МІНЛИВОСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
СЛАЩОВА О. А.^{2*}, *канд. техн. наук, с. н. с.*,
КОГТЕВА О. П.³, *асп.*,
ЯЛАНСЬКИЙ О. А.⁴, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, вул. Сімферопольська 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigt@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

³ Кафедра біотехнології та безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 651-73-94, e-mail: 200483leo@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7282-8243

⁴ Кафедра електропривода, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

Анотація. *Постановка проблеми.* Сучасне геотехнічне виробництво або підземна споруда, що використовується як військово-промисловий об'єкт, повинні відповідати вимогам міжнародних стандартів з управління ризиками, які складають основу безпечного та ефективного управління. Впровадження ефективного управління ризиками сприяє підвищенню якості прийняття рішень, а також позитивно діє на благо підприємства та суспільства в цілому. *Мета дослідження* – вдосконалення методу визначення ризиків втрати стійкості гірничих виробок та інших підземних споруд з урахуванням мінливості фізико-механічних властивостей гірських порід. *Методика* – застосування системного підходу в аналітичних дослідженнях літературних джерел, систематизація сучасних підходів і методів у визначенні ризиків у системі безпеки життєдіяльності, обробка статистичними методами, використання теорії ймовірності. *Результати.* За результатами натурних досліджень підземної виробки шахти «Ювілейна» ВСП «ШУ Першотравенське» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» побудовано графіки деформацій покрівлі, визначено зміщення, отримано залежності та виконано ідентифікацію ризиків руйнування підземної виробки. *Наукова новизна.* Вперше запропоновано використання розкиду параметрів за їх стандартним відхиленням при ідентифікації ризику втрати стійкості підземної виробки. *Практична значимість.* Запропоновано методику з ідентифікації та прогнозу геомеханічних параметрів для ризик-орієнтованої системи контролю стійкості породного масиву для забезпечення безпеки під час використання розробок як оборонно-промислових комплексів.

Ключові слова: *ризик; підвищення безпеки; втрата стійкості; зміщення; відхилення; небезпека; обвалення; виробка*

FEATURES OF RISK DETERMINATION AND CONTROL OF THE UNDERGROUND FACILITIES STABILITY LOSS UNDER CONDITIONS OF ROCKS PROPERTIES VARIATION

BIELIKOV A.S.¹, *Dr.Sc. (Tech.), Prof.*,
SLASHCHOVA O.A.^{2*}, *Ph. D. (Tech.), Sen. Res.*,
KOHTEVA O.P.³, *Postgrad. Stud.*,
YALANSKYI O.A.⁴, *Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by M. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, 2-a, Simferopolska St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

³ Department of Biotechnology and of Life Safety, State Higher Educational Establishment "Ukrainian State University of Chemical Technology", 8, Haharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 651-73-94, e-mail: 200483leo@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7282-8243

⁴ Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

Abstract. Problem statement. Modern geotechnical production or an underground structure used as a military-industrial facility must meet the requirements of international risk management standards, which form the basis of safe and effective management. Implementation of effective risk management improves the quality of decision making, and has a positive impact on the benefit of the enterprises and society as a whole. **The purpose of the article.** To improve the method of risks' determining for the mining stability loss and other underground structures, taking into account the variability of the physical and mechanical properties of rocks. **Methods.** The use of a systematic approach in analytical studies of literary sources, systematization of modern approaches and methods in determining risks in the life safety system, processing by statistical methods, and the use of probability theory. **Research results.** Based on the results of field studies of the underground mining of the Yubileynaya mine at the Pershotravenskoye Mining Structural Division of PuAT DTEK Pavlogradugol, graphs of roof deformations were constructed, displacements were determined, dependencies were obtained, and the risks of underground mining destruction were identified. **Scientific novelty.** For the first time, the use of the parameters' scatter by their standard deviation in identifying the risk of stability loss for underground mining is proposed. **Practical value.** A methodology for identifying and predicting geomechanical parameters for a risk-oriented system for monitoring the stability of the rock mass while ensuring safety when using developments as military-industrial complexes is proposed.

Keywords: risks; safety improvement; loss of stability; displacement; deviation; hazard; collapse; mining

Постановка проблеми. Сучасні нормативні документи з безпеки вимагають, щоб ризики на всіх виробництвах, особливо на небезпечних, були заздалегідь виявлені та проаналізовані. Процес управління ризиками допомагає приймати правильні рішення з урахуванням різних невизначеностей або можливостей настання будь-яких подій (негативних, навмисних, випадкових) та їх вплив на поставлені цілі [1]. Принцип ефективного управління ризиками включає в себе комплекс управлінських рішень, комунікацію, консультування, аналіз, оцінювання, моніторинг, перегляд ризиків.

Зазначається [2], що «ризик» – це комбінована міра ймовірності настання певної події та наслідків, якщо ця подія відбудеться. В разі, коли виникають події з несприятливими наслідками, джерело потенційної шкоди називається «небезпекою», а тригери, що можуть спричинити реалізацію цих небезпечних подій, називаються «загрозами».

Найбільшу світову популярність здобули стандарти з управління ризиками (Risk management standard, RMS) і керівництва: ISO 31000: 2009 і ISO / IEC

31010: 2009, що застосовуються в Європейському союзі; AS / NZS 4360 і керівництва – в ЄС, Новій Зеландії та Австралії; «Управління ризиками організацій. Інтегрована модель» (Enterprise Risk Management – Integrated Framework, COSO, USA) – у Великобританії, Японії, США, ПАР і Канаді [3–6]. ISO 45001:2018 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування» – це перший єдиний для всіх країн стандарт із системи менеджменту охорони здоров'я та організації безпеки праці на виробництвах [7]. За цим стандартом підприємство, насамперед, відповідає за вибір методів та дій, які дозволяють усунути небезпеку повністю. Якщо це неможливо, розглядається питання про заміну на менш небезпечні процеси, технології, матеріали та інше.

В Україні власники підприємств із підвищеною небезпекою, до яких належать підземні виробки, повинні постійно визначати та враховувати ризики під час господарської діяльності підприємства. Стаття 20 «Кодексу цивільного захисту України» зобов'язує суб'єкти господарювання проводити оцінювання

ризиків виникнення надзвичайних ситуацій та здійснювати заходи щодо неперевикнення прийнятних рівнів таких ризиків. Стаття 8 вимагає забезпечувати експлуатацію об'єктів підвищеної небезпеки з додержанням прийнятного рівня ризику, а цивільний захист здійснювати за основним принципом максимально можливого, економічно обґрунтованого зменшення ризику виникнення надзвичайних ситуацій.

Слід зазначити, що останнім часом велика увага приділяється спорудженню оборонно-промислових комплексів у підземних виробках шахт та інших підземних спорудах. Безпека цих об'єктів безпосередньо пов'язана з ризиком руйнування засобів кріплення та активізацією проявів гірського тиску внаслідок негативного впливу сукупної дії гірничо-геологічних, гірничотехнічних і технологічних факторів [8; 9].

Зокрема, ризики підвищення статичних або динамічних напружень у масиві гірських порід зумовлені реологічними процесами, обводненням порід і ґрунтів, раптовим відшаруванням безпосередньої та осіданням основної покрівлі виробок, вибухів під землею і на її поверхні та іншими.

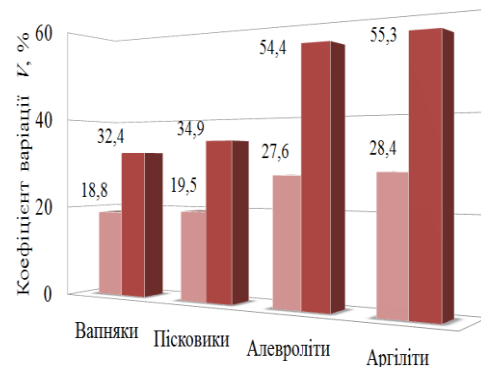
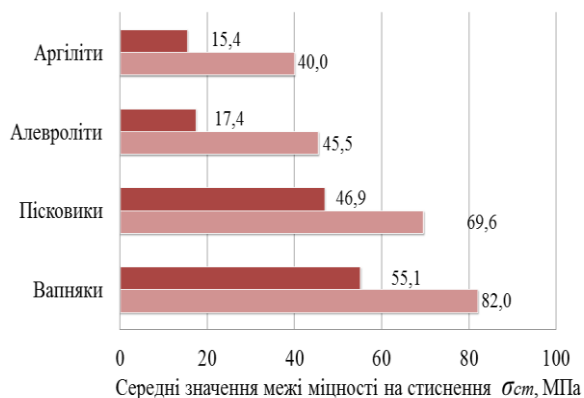
Таким чином, дослідження методів контролю процесів деформування гірничих виробок і заглиблених об'єктів показали, що без розрахунку ризиків і управління ризиками неможливе проведення господарської діяльності в підземних виробках. Разом із тим, для підтримання

прийнятного рівня ризику та забезпечення стійкості підземних споруд на весь час їх експлуатації в умовах мінливості властивостей гірських порід є необхідність вдосконалення існуючих і розроблення нових методів ідентифікації ризиків та прогнозу геомеханічних параметрів.

Мета дослідження – вдосконалення методу визначення ризиків втрати стійкості гірничих виробок та інших підземних споруд з урахуванням мінливості фізико-механічних властивостей гірських порід.

Результати досліджень. Безпечна експлуатація підземних виробок багато в чому залежить від гірничо-геологічних умов їх розташування, які характеризуються невизначеністю фізико-механічних властивостей гірських порід. Це пов'язано з тим, що природні властивості гірських порід, ще до їх руйнування, мають значну мінливість фізико-механічних показників міцності та інших властивостей.

Під час непружних деформацій гірських порід і ґрунтів відбуваються процеси різкого зниження їх міцності, активного деформування контуру виробок, значною мірою зростають навантаження на кріплення. Тому очевидно, що мінливість природних фізико-механічних властивостей гірських порід і активізація змін міцності за впливу гірського тиску та обводнення викликають нерівномірні (більшою чи меншою мірою) деформування контуру будь-яких підземних споруд, а найголовніше – зміни рівнів ризиків втрати стійкості гірничотехнічної системи в цілому.



■ - варіації міцності у сухому стані; ■ - варіації міцності у водонасиченому стані
Рис. 1. Мінливість властивостей гірських порід: а – міцності на стиснення; б – коефіцієнтів варіації

Для оцінювання факторів ризиків, що впливають на втрату стійкості виробок та призводять до травмування або загибелі персоналу, слід застосовувати методи, які базуються на статистично значущій кількості параметрів або визначених закономірностях поведінки породного масиву [10; 11].

На рисунку 1, а наведено мінливість середніх значень межі міцності на стиснення порід. Збільшення вмісту глинистої фракції сприяє не тільки зменшенню міцності при обводненні порід, а й збільшенню розкиду параметрів міцності (збільшенню коефіцієнта варіації, рис. 1, б).

Установлено, що коефіцієнти варіації міцності порід залежать від їх насичення водою. При водонасиченні породи мають більший розкид середніх значень коефіцієнтів варіації, ніж у сухому стані. Для аргілітів і алевролітів зміна цього показника становить ~48–58 %, для пісковиків і вапняків ~44–52 %. Тобто при водонасиченні простежується збільшення до 60 % розкиду міцності порід від розкиду міцності порід в сухому стані. Значення коефіцієнтів варіації дозволяють досліджувати ризики виникнення небезпечних станів масиву порід за

критичних параметрів (мінімальних міцностей) у сухому і насиченому водою стані.

Експериментально доволі складно визначити вплив кожного фактора окремо на деформації кріплення виробок. Тому інструментальними вимірюваннями визначались, в основному, величина та інтенсивність домінуючих зміщень, які характеризують сукупний результат силового впливу породного масиву на підземну виробку. Дослідження проведені на основі візуальних спостережень та замірів перетинів виробки, з метою оцінення зовнішніх пошкоджень виробки і визначення їх небезпечності. Інструментальним методом отримано параметри зміщення покрівлі, підосви і боків виробки.

На рисунку 2 показано об'ємний графік деформування виробки за даними натурних досліджень підземної виробки шахти «Ювілейна» ВСП «ШУ Першотравенське» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Встановлено, що активізація деформацій контуру виробки відбувається в зонах підвищеної тріщинуватості і, внаслідок цього, низької міцності порід.

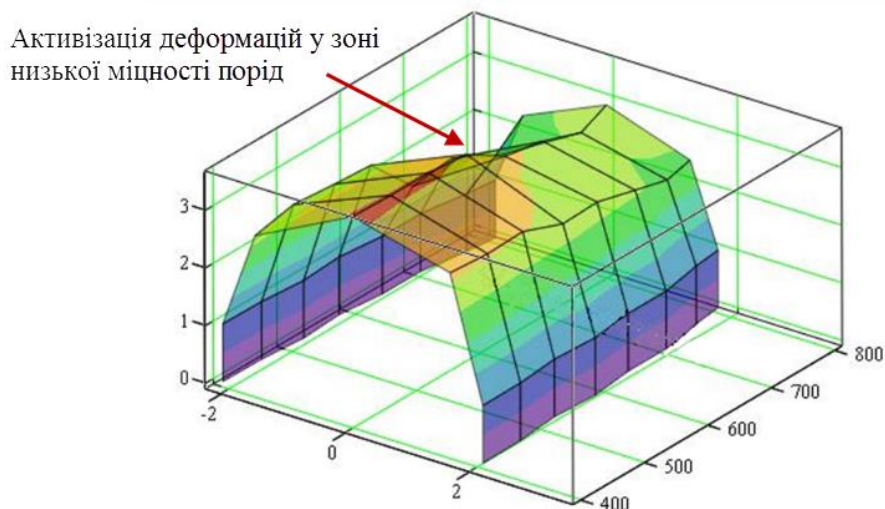


Рис. 2. Нерівномірність деформування гірничої виробки за даними натурних спостережень

На рисунку 3 показано деформування виробки поза зоною дії динамічного тиску з виділенням розкиду параметрів, а також

визначено залежність, за якою відбувається деформування кріплень цієї виробки. Залежність має вигляд:

$$u = 0,0019 t - 0,005; R^2 = 0,76. \quad (1)$$

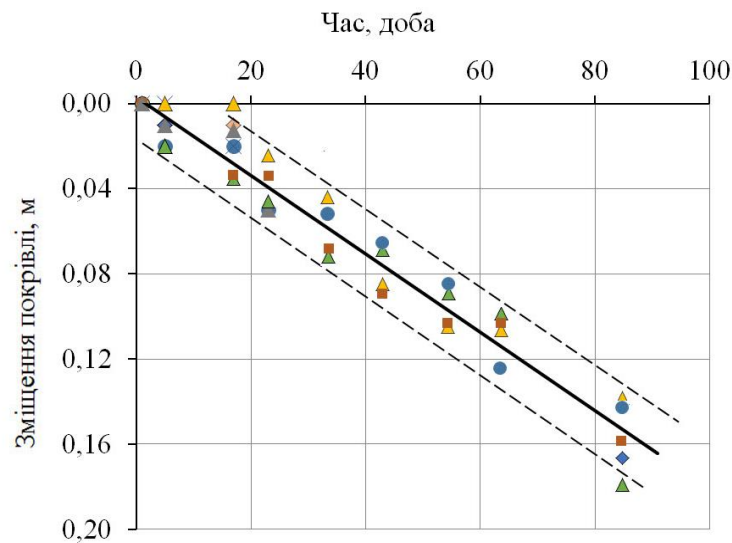


Рис. 3. Деформування покрівлі підземної виробки за даними натурних досліджень у часі з виділенням розкиду параметрів за їх стандартним відхиленням

На графіку показано лінії максимальних і мінімальних відхилень, що утворюють певну зону розкиду параметрів. Цей розкид пов'язаний із зміною фізико-механічних властивостей порід як за довжиною виробки, так і з урахуванням обводненості порід, що також викликає коливання параметрів.

Втрата стійкості підземних виробок відбувається у разі перевищення зміщень породного контуру, величина яких безпосередньо залежить від геомеханічного стану породного масиву, інтенсивності процесу деформування, проектних технологічних зазорів, що визначаються габаритами рухомого складу, безпечним проходом людей та іншого. Здебільшого, піддатливе кріплення підземних виробок має конструктивну піддатливість 300 мм, а проектний зазор становить 600 мм, тому зміщення контуру більше 300–600 мм спричиняють вигин елементів кріплення та його руйнування, а більше 900 мм – порушення технологічних зазорів і втрату стійкості виробки.

Тому для оцінення стійкості підземних виробок значення зміщень потрібно диференціювати на три характерні режими, що визначаються значеннями зміщень: 0–300 мм (кріплення працюють у паспортному режимі), 300–600 мм (порушення замкових з'єднань і вигин

верхняків), 600–900 мм і понад 900 мм (порушення технологічних зазорів, втрата стійкості виробок).

Дослідженнями встановлено, що для порід значний розкид даних є наслідком їх великої неоднорідності, і в меншому ступені – похибок різних методів та апаратури досліджень. Розкид параметрів пояснюється тим, що серед слабких пісковиків, аргілітів та алевролітів зазвичай присутні шари міцних порід тих же літологічних різниць.

Результати однозначно показують, що для визначення стійкості підземних споруд та оцінення ризиків їх руйнування необхідно використовувати стандартні відхилення та коефіцієнти варіації параметрів фізико-механічних властивостей порід та зміщень контуру виробок. Коефіцієнти варіації, наприклад міцності, визначають за співвідношенням:

$$V = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{сжс_i} - \overline{\sigma_{сжс_i}})^2}}{\sigma_{сжс_i}}. \quad (2)$$

Стандартні відхилення і коефіцієнти варіації дозволяють урахувати заздалегідь гірші умови за мінімальним або максимальним значенням параметрів. У даному випадку діапазон випадкового розкиду даних ще ширший і отримання

адекватних результатів неможливе без обов'язкового урахування цих розкидів. Крім того, методика оцінювання безпеки підземних об'єктів повинна передбачати розрахунок за критичних умов, особливо з урахуванням можливості таких потужних динамічних впливів як вибухи. Оцінка безпеки об'єкта повинна включати найгірший (за динамічного впливу) і

найбільш вірогідний сценарій розвитку деформації кріплення виробки.

На рисунку 4 показано приклад ідентифікації ймовірних небезпечних ситуацій на основі натурних досліджень за зміщеннями, які пов'язані зі станом породного масиву і можливою небезпекою у зв'язку з цим.

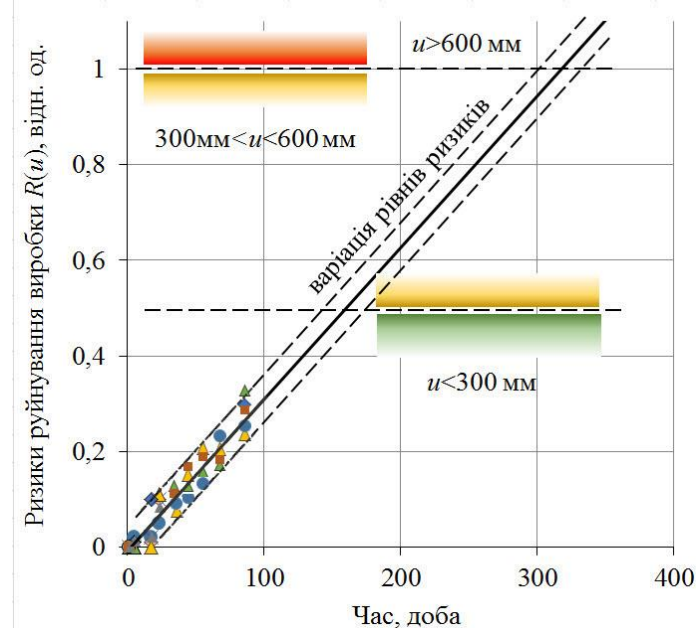


Рис. 4. Ідентифікація ризиків руйнування підземної виробки на основі результатів спостережень. Рівні ризику позначені кольорами: зелений – «безпечна зона» ($u < 300$ мм), жовтий – «зона уваги» ($300 \text{ мм} < u < 600$ мм), червоний – «небезпечна зона» ($600 \text{ мм} < u < 900 \dots 1200$ мм). Зміщення більше 1 200 мм спричинюють повну втрату функціональності виробки

За результатами статистичного аналізу даних вимірювань зміщень покрівлі підземної виробки встановлено регресійну залежність ризиків втрати стійкості $R(u)$ у часі t і перевищення кріпленням паспортної піддатливості:

$$R(u) = 0,0228 t + 0,065; R^2 = 0,95. \quad (3)$$

За графіком можна визначити, що після 160-ї доби зміщення починають сягати значень 300...600 мм і виробка потребує уваги і моніторингу. Ризик втрати стійкості для кріплення за даних умов настає в період після 320-ї доби, за результатами прогнозу, який виконано за показниками інструментальних вимірів і побудови трендів та сценарію розвитку процесу деформування. В цей час виробка потребує превентивних заходів із посилення кріплення.

Ризик $R(E^t)$ виникнення небезпечної ситуації від впливу різних факторів розраховується за співвідношеннями [12–14]. Наприклад, ризик від впливу фактора E^t в момент часу t (ймовірність реалізації несприятливого розвитку подій) визначається для кожного з елементів геотехнічної системи, де повний ризик являє собою суму індивідуальних ризиків. Для кожного з елементів геотехнічної системи ризик виникнення аварійної ситуації визначають:

– за значеннями інформативних параметрів в момент часу t :

$$R(E^t) = k_1^t R(E_1^t) + k_2^t R(E_2^t) + \dots + k_m^t R(E_m^t); \quad (4)$$

– за відхиленнями параметрів від точки рівноваги за проміжок часу Δt :

$$R(E^{\Delta t}) = k_1^{\Delta t} R(E_1^{\Delta t}) + k_2^{\Delta t} R(E_2^{\Delta t}) + \dots + k_n^{\Delta t} R(E_n^{\Delta t}); \quad (5)$$

– за швидкістю відхилення параметрів за проміжков часу Δt :

$$R(E^{v(\Delta t)}) = k_1^{v(\Delta t)} R(E_1^{v(\Delta t)}) + \dots + k_k^{v(\Delta t)} R(E_k^{v(\Delta t)}), \quad (6)$$

де $R(E^t)$, $R(E^{\Delta t})$, $R(E^{v(\Delta t)})$ – ризики виникнення аварійної ситуації в одному з елементів геотехнічної системи, в. о.; $R(E_m^t)$, $R(E_n^{\Delta t})$, $R(E_k^{v(\Delta t)})$ – ризики, визначені за значенням інформативних параметрів в момент часу t ; відхилень і швидкостей відхилень параметрів геотехнічної системи від точки рівноваги для груп з m , n і k факторів, що впливають, відповідно, в. о.;

$k_1^t, k_2^t, \dots, k_m^t; k_1^{\Delta t}, k_2^{\Delta t}, \dots, k_n^{\Delta t}; k_1^{v(\Delta t)}, k_2^{v(\Delta t)}, \dots, k_k^{v(\Delta t)}$ – нормалізовані коефіцієнти впливу на потенційний ризик окремих факторів [12; 13].

На основі міжнародного досвіду з оцінювання ризиків у підземних виробках наведено приклад попереднього визначення факторів і індикаторів ризику (табл. 1). Рівні ризику визначаються на основі моніторингу проявів небезпечних факторів у виробках, досвіду експертів і часу експлуатації. Далі впроваджуються відповідні дії щодо забезпечення безпеки робочого середовища.

Таблиця 1

Фактори та індикатори ризиків щодо попередньої оцінки стійкості підземної виробки

Рівень	І рівень нормальний стан	II рівень потребує уваги	III рівень	IV рівень
Індикатор	«безпечно»	«умовно безпечно»	«увага»	«небезпечно»
Індикатори ризику, візуальна оцінка стану об'єкта	Покрівля	- погіршення стану покрівлі, тріщинуватість; - пласт порід < 1 м; - конвергенція > 50 мм за годину, але менше 100 мм за годину; - незначні потоки рідини	- великі блоки пісковика в межах 5 м від виробки; - конвергенція більше 100 мм за годину, але менше 200 мм за годину	- зсув покрівлі > 1 м; конвергенція > 200 мм за годину; - безперервний потік рідини
	Підлога	відшарування порід < 0,5 м	великі відколи порід 1,1...1,5 м	сильна крихкість порід, великі відколи більше 1,5 м

Моніторинг становить невід'ємну складовою уникнення небажаних подій і управління наслідками, що відповідає Міжнародному стандарту з управління ризиками ISO 31000:2018. Для масового оперативного визначення активізації росту систем тріщин, як наслідків зміни властивостей гірських порід за впливу сил гірського тиску, найбільш прийнятний віброакустичний метод контролю, який використовує активне збудження коливань та резонансні відгуки тріщин у породному масиві. Збудження коливань ударними методами застосовується найчастіше, що пояснюється простотою реалізації і малим енергоспоживанням апаратури. Тріщинувата порода зазвичай характеризується

збільшенням амплітуди коливань з частотами нижче 400 Гц, а частоти вимушених коливань зумовлені резонансними явищами, які можна порівняти з довжиною акустичних напівхвиль.

На рисунку 5 показано віброакустичне профілювання підлоги підземної виробки, виконане приладом ІСП-1Ш (індикатор стану покрівлі) з інтервалом ударного впливу через кожні шість метрів. Межі зон підвищеної тріщинуватості визначені за резонансними частотами [15], які й визначалися приладом. Встановлено, що глибини меж підвищеної тріщинуватості розташовані на відстанях 1,0...1,4 м, рідше – 1,8...2,6 м від контуру виробки.

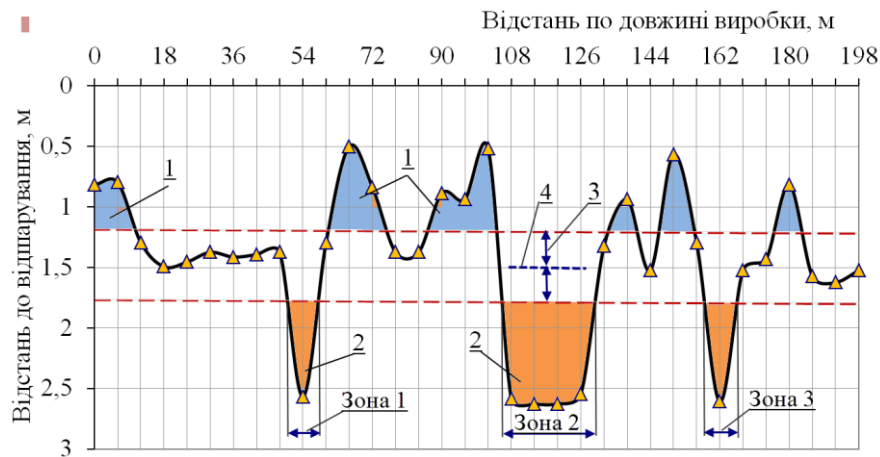


Рис. 5. Результати віброакустичного профілювання за довжиною штреку

Мінливість гірничо-геологічних умов та процесів деформування за довжиною виробки спричинює утворення небезпечних зон, у яких ризики втрати стійкості споруди значно зростають. Запропоновано метод ідентифікації таких аномальних зон, який полягає у визначенні середньої по виробці глибини розташування межі зони тріщин (рис. 5, поз. 4) з урахуванням стандартних відхилень та виявленням «умовно безпечного» діапазону дислокації систем тріщин (рис. 5, поз. 3), де деформування порід відбувається повільно і прогнозовано. Потім визначаються аномальні зони в породному масиві навколо виробки (системи тріщин, що становлять ризики активізації деформацій, рис. 5, поз. 1, 2). На ділянках виробки 0...10 м, 61...69 м, 86...104 м, 133...141 м, 146...157 м і 176...183 м (рис. 5, поз. 1) зростають ризики розпушення та спучування порід приконтурної зони, що підтверджується натурними спостереженнями. Також виявлено ділянки виробки 49...58 м, 105...129 м і 158...166 м, які відрізняються найбільшою товщею порід, що відшарувалися з підняттям підшви виробки і викривленням транспортних шляхів (рис. 5, поз. 2). На ділянках виробки в зонах 1...3 спостерігалось зростання амплітуди акустичних коливань $\Delta A/A_{mid} = 3,6$ (ΔA – збільшення амплітуди на ділянці, A_{mid} – середня амплітуда поза аномалією), що майже вдвічі вище, ніж у середньому по виробці $\Delta A/A_{mid}=1,9$.

Три зони виробки, виділені на рисунку 5, характеризуються різною інтенсивністю тріщинуватості, одна з яких (зона 2) відрізнялася значними деформаціями і великим припливом води, які візуально спостерігалися у виробці. У двох інших зонах (зони 1, 3) прояви гірського тиску були менш інтенсивними, спостерігалось збільшення деформацій по всьому контуру виробки. Подальші дослідження цих зон шляхом вертикального електричного зондування (ВЕЗ) підтвердили дані віброакустичного контролю, що свідчить про надійність запропонованого методу виявлення та контролю зон підвищеного ризику у підземних виробках.

Процес контролю втрати стійкості підземних виробок в умовах мінливості властивостей гірських порід може бути автоматизованим. Для цього програмно-технічними засобами реалізують закон управління. Для розбиття сигналу на ділянки та виділення уявних складових, за аналогією з наведеними вище результатами, запропоновано порівнювати поточне миттєве значення сигналу контролю з граничними значеннями зони нечутливості (тобто рівень сигналу автоматизованої системи, який не несе інформативного навантаження). В такому випадку нижня межа нечутливості $A_0 - \Delta TG$, а верхня межа – $A_0 + \Delta TG$ ($2TG$ – ширина зони нечутливості, рис. 6). В даному випадку A_0 – середнє значення, постійна складова оцифрованого сигналу, яка, як правило,

дорівнює величині зсуву аналого-цифрового перетворювача.

Для автоматизації контролю потенційно небезпечних зон в виробках, наприклад, які показані на рисунку 5, поз. 1, 2, застосовуються апаратний або програмний компаратор ТН1, що встановлюється в одиничний стан у разі поточного входного сигналу більшого за верхню межу $A_t > A_0 + \Delta TG$ (A_t – амплітуда сигналу на момент часу t , рис. 6), і компаратор ТН2, який встановлюється в одиничний стан у разі значення цифрового коду менше нижньої межі $A_t < A_0 + \Delta TG$.

При цьому значення A_0 та зона нечутливості співвідносяться до рівня верхньої межі «умовно безпечного»

діапазону дислокації даних систем тріщин, якщо потрібно контролювати ближню до виробки зону масиву порід (див. рис. 5, поз. 1). Якщо контролюється зона масиву порід на більшій глибині (1,7...2,6 м, див. рис. 5, поз. 2) значення A_0 та зона нечутливості співвідносяться до рівня нижньої межі «умовно безпечного» діапазону. Якщо виходи компараторів підключаються відповідно до входів установки (S) та скидання (R) апаратного або програмного RS-тригера, тоді початок кожного нового i -го інтервалу контролю визначиться фронтом вихідного сигналу RS-тригера. Вихідний сигнал RS-тригера спрацює лише на визначений в автоматизованій системі рівень загроз.

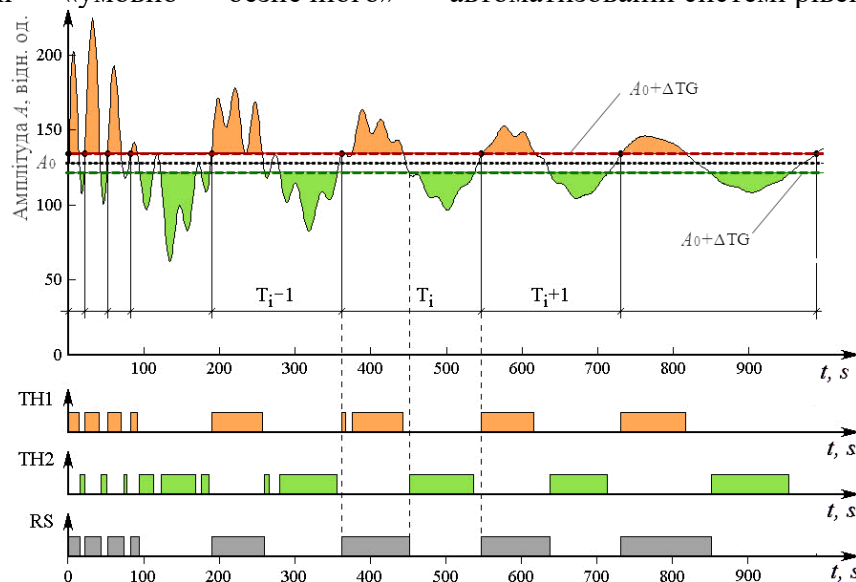


Рис. 6. Розбиття аперіодичного сигналу на часові інтервали на основі алгоритму роботи двох елементів порівняння ТН1, ТН2 та RS-тригера

Результати досліджень щодо прогнозу наслідків впливу мінливості гірничо-геологічних факторів на ризики втрати стійкості підземних об'єктів використано для розроблення і впровадження «Методичних рекомендацій з визначення ризиків і оцінки небезпеки втрати стійкості підземних виробок, що призначені для розміщення промислових та оборонних споруд». Рекомендації містять систематизацію некерованих факторів та наслідків, що впливають на ризики втрати стійкості підземних виробок для промислових та оборонних об'єктів, технологію управління ризиками,

визначення ризиків і оцінку небезпеки втрати стійкості підземного об'єкта на основі інструментального моніторингу зміщень покрівлі. Встановлюються додаткові способи, які дозволяють підвищити якість управлінських рішень з безпеки за рахунок експертної оцінки стану захисних споруд та підземних виробок. Прогноз стану підземних об'єктів сприяє зниженню ризиків руйнування кріплення і запобіганню значних фінансових витрат на ліквідацію можливих аварій.

Таким чином, удосконалено інформаційні апаратні технології та запропоновано алгоритми цифрового

перетворення сигналів автоматизованої системи з тимчасової області на частотну, що забезпечують підвищення надійності та зменшення розмірів геотехнічної інформації, яка передається. Методи та алгоритми можуть бути використані для вдосконалення існуючих та розроблення нових систем безпеки гірничих робіт.

Висновки

1. Подальший розвиток отримав метод ідентифікації ризиків руйнування підземної виробки за результатами натурних досліджень, який відрізняється урахуванням варіації значень і стандартних відхилень прогнозованих ризиків втрати функціональності гірничої виробки та критеріїв порушення її технологічних зазорів у певний момент часу, що визначаються за верхніми і нижніми межами значень зсувів порід покрівлі, зумовлених мінливістю некерованих фізико-механічних властивостей гірських порід та гірничотехнічних факторів в умовах конкретної виробки. Це дозволяє оцінювати рівень небезпеки втрати стійкості гірничої виробки за мінімальними і максимальними показниками ризиків, більш обґрунтовано вживати заходів із реагування.

2. Запропоновано метод ідентифікації потенційно небезпечних зон за довжиною виробки, в яких ризики втрати стійкості споруди значно зростають, котрий полягає у

визначенні середньої по виробці глибини розташування межі зони тріщин віброакустичним методом з урахуванням стандартних відхилень та виявленням «умовно безпечного» діапазону дислокації систем тріщин, де деформування порід відбувається повільно і прогнозовано, а також «небезпечних» зон, в яких ризики активізації деформацій зростають.

Для автоматизації контролю потенційно небезпечних зон у виробках удосконалено інформаційні апаратні технології та запропоновано алгоритми цифрового перетворення сигналів автоматизованої системи з часової області на частотну з порівнюванням поточних миттєвих значень сигналу контролю з граничними значеннями зони нечутливості.

3. Розроблено і впроваджено в процеси аналізу ризиків та безпеки захисних споруд «Методичні рекомендації з визначення ризиків і оцінки небезпеки втрати стійкості підземних виробок, що призначені для розміщення промислових та оборонних споруд», які дозволяють підвищити якість управлінських рішень з безпеки шляхом експертної оцінки стану захисних споруд та підземних виробок, а також якість підготовки у вищих навчальних закладах фахівців в області оцінювання стану підземних споруд та промислової безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT). 2018.
2. Galvin J.M. Ground Engineering – Principles and Practices for Underground Coal Mining. Manly, NSW, Australia. 2016.
3. International Standards Office ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines, provides principles (Electronic documents, ISO, Geneva, Switzerland). 2018.
4. International Standards Office ISO/IEC 31010:2009. Risk management – Risk assessment techniques (Electronic documents, ISO, Geneva, Switzerland). 2009.
5. The Institute of Risk Management (IRM), The Association of Insurance and Risk Managers (AIRMIC) and ALARM. The National Forum for Risk Management in the Public Sector. Risk management standard (FERMA RMS: Electronic documents, BSI, London, UK. Adopted by Federation of European Risk Management Associations). 2002.
6. Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission 2004. COSO II ERM Enterprise Risk Management – Integrated Framework (COSO, USA). 2004.
7. International Organization for Standardization. ISO 45001:2018(en). Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use, URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:en> (Accessed 4 Aug 2023). 2018.
8. Slashchov I. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. Pp. 00094.
9. Slashchova O. Water effect on the rocks and mine roadways stability. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. Pp. 00092.

10. Shevchenko V., Slashchov A. Justification of the basic algorithms of the mine safety information system. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. Pp. 86.
11. Slashchova O., Slashchov I., Sapunova I. Specific solution of problem of water filtering in the rocks by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. Pp. 00093.
12. Слащов І. М., Слащова О. А., Осінній В. Я., Сапунова І. О., Константинова І. Б. Ідентифікація факторів ризиків втрати стійкості гірничих виробок. *Геотехнічна механіка*. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 209–222.
13. Слащов А. І. та ін. Ієрархічна модель формалізації нечіткого логічного виводу для цифрових систем оцінки стійкості гірничих виробок. *Геотехнічна механіка*. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 122–131.
14. Slashchova O. A., Yalanskyi O. A., Slashchov A. I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural ources : 3rd International Sci. and Tech. Conf. Book of Abstracts. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020. Pp. 126–127.
15. Булат А. Ф., Усаченко Б. М., Яланський А. А. та ін. Методичний посібник з комплексної геофізичної діагностики породного масиву та підземних геотехнічних систем. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2004. 75 с.

REFERENCES

1. DSTU ISO 31000:2018. *Menedzhment ryzykiv. Pryntsypy ta nastanovy (ISO 31000:2018, IDT)* [DSTU ISO 31000:2018. Risk management. Principles and guidelines (ISO 31000:2018, IDT)]. 2018. (in Ukrainian).
2. Galvin J.M. Ground Engineering – Principles and Practices for Underground Coal Mining. Manly, NSW, Australia. 2016. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25005-2>
3. International Standards Office ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines, provides principles (Electronic documents, ISO, Geneva, Switzerland). 2018.
4. International Standards Office ISO/IEC 31010:2009. Risk management – Risk assessment techniques (Electronic documents, ISO, Geneva, Switzerland). 2009.
5. The Institute of Risk Management (IRM). The Association of Insurance and Risk Managers (AIRMIC) and ALARM. The National Forum for Risk Management in the Public Sector. Risk management standard (FERMA RMS: Electronic documents, BSI, London, UK. Adopted by Federation of European Risk Management Associations). 2002.
6. Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission 2004. COSO II ERM Enterprise Risk Management – Integrated Framework (COSO, USA). 2004.
7. International Organization for Standardization ISO 45001:2018(en). Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. 2018. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:en> (Accessed: 4 Aug 2023).
8. Slashchov I. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, pp. 00094. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900094>
9. Slashchova O. Water effect on the rocks and mine roadways stability. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, pp. 00092. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900092>
10. Shevchenko V. and Slashchov A. Justification of the basic algorithms of the mine safety information system. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, pp. 86. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900086>
11. Slashchova O., Slashchov I. and Sapunova I. Specific solution of problem of water filtering in the rocks by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, pp. 00093. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900093>
12. Slashchov I.M., Slashchova O.A., Osinniy V.Ya., Sapunova I.O. and Konstantynova I.B. *Identyfikatsiya faktoriv ryzykiv vtraty stiykosti hirnychkykh vyrobok* [Identification of risk factors for the loss of stability of mining products]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2019, no. 149, pp. 209–222. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.209> (in Ukrainian).
13. Slashchov A.I., Slashchov I.M., Osinniy N.V. and Konstantynova I.B. *Iyerarkhichna model' formalizatsiyi nechitkoho lohichnoho vyvodu dlya tsyfrovyykh system otsinky stiykosti hirnychkykh vyrobok* [The hierarchical model of fuzzy logic output formalization for digital systems evaluating mine workings stability]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2019, no. 149, pp. 122–131. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.122> (in Ukrainian).
14. Slashchova O.A., Yalanskyi O.A. and Slashchov A.I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. Innovative Development of Resource-saving Technologies and Sustainable Use of Natural Oources : 3rd International Sci. and Tech. Conf. Book of Abstracts. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020, pp. 126–127. URL: <https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/1>
15. Bulat A.F., Usachenko B.M., Yalanskyi A.A. and oth. *Metodychnyy posibnyk z kompleksnoyi heofizychnoyi diahnostryky porodnoho masyvu ta pidzemnykh heotekhnichnykh system* [Methodical manual for complex geophysical diagnostics of the rock massif and underground geotechnical systems]. Dnipro : IGTM NASU, 2004, 75 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 05.09.2023.

УДК 331:4:69

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.55.993

АНАЛІЗ ТРАВМАТИЗМУ ТА ЗАГИБЕЛІ ЛЮДЕЙ ЧЕРЕЗ ПОРУШЕННЯ ВИМОГ БЕЗПЕКИ В УКРАЇНІ

БЕЛІКОВ А. С.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
ТОДОРОВ О. П.², асп.,
ШИБА О. В.³
ЖУРБЕНКО В. М.⁴, асп.

^{1*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр Міністерства внутрішніх справ України, тупик Будівельний, 1, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 732-16-93, e-mail: lesiya_shiba@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4269-8887

⁴ Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: zurbenko.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9607-8205

Анотація. Постановка проблеми. Аналізом досліджень встановлено, що основна причина травматизму на підприємствах вугільної, хімічної, будівельної та ін. промисловості полягає у фізичному зносі технологічного обладнання, машин і механізмів, які не відповідають вимогам безпеки. Велика частка виробничого та невиробничого травматизму зі смертельними наслідками припадає на зношення конструкцій будівель і споруд, які перебувають в аварійному стані. Причиною травматизму найчастіше стає порушення працівниками підприємств вимог безпеки, охорони праці та санітарно-гігієнічних умов праці. Пожежна небезпека показує, що відчутний матеріальний збиток економіці в усьому світі завдають пожежі, значно ускладнюючи екологічну обстановку, наражаючи на небезпеку життя людей. Так, в Україні щороку виникає понад 50 тис. пожеж, у яких гинуть люди, а матеріальні збитки перевищують сотні мільйонів гривень, побічні збитки у 20 разів більші. Аналіз показав, що значна частина нещасних випадків трапляються з працівниками, які виконують одноразові роботи та прийняті на роботу не за трудовим договором, а за договором підяду. В Україні щодня на виробництві травмується в середньому 140–80 осіб, з них 20 стають інвалідами, 4–5 осіб вмирають. **Мета статті** – дослідження причин та наслідків порушень вимог нормативних та законодавчих актів безпеки, які призводять до травматизму та загибелі людей. **Висновок.** З'ясовано, що значна частина травмування та загибелі людей пов'язана з експлуатацією та утриманням будівель і споруд, порушенням власниками підприємств нормативних та законодавчих актів з питань охорони праці, безпеки та санітарно-гігієнічних умов праці. Також на підприємствах України проводиться робота на зношеному технологічному обладнанні, що спричинює тяжкі наслідки у вигляді смертельного травмування.

Ключові слова: травматизм; горіння; будівельні конструкції; горючість; пожежна небезпека; охорона праці

ANALYSIS OF INJURIES AND DEATH OF PEOPLE AS A RESULT OF VIOLATION REQUIREMENTS IN UKRAINE

BIELIKOV A.S.^{1*}, Dr. Sc. (Tech)., Prof.,
TODOROV O.P.², Postgrad. Stud.,
SHIBA O.V.³
ZHURBENKO V.M.⁴, Postgrad. Stud.

^{1*} Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: zurbenko.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9607-8205

³ Dnipropetrovsk Forensic Research Center of Ministry Internal Affairs of Ukraine, 1, Tupik Budivelniiy, Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 732-16-93, e-mail: lesiya_shiba@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4546-1383

⁴ Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

Abstract. Problem statement. The exploring research shows that physical wear and tear of technological equipment, machines and mechanisms that fail to meet safety requirements causes the main number of injuries at coal, chemical, construction industry, etc. A large share of work- and non-workplace injuries with fatal consequences occur on the wear and tear of buildings and structures that are in an emergency state. The injuries are mostly common caused due to violation of fire safety rules, rules of labor protection, and inappropriate sanitary and hygienic working conditions. Thus, there are more than 50 thousand fires in Ukraine every year, in which people die, and material damage exceeds hundreds of millions of hryvnias, incidental losses are 20 times bigger. The research shows that a significant part of accidents happens to whokers who perform one-time jobs working under subcontract, without an employment. An average of 140–180 people in Ukraine are injured at work every day, 20 of them become disabled, 4–5 of those people die. **The purpose of the article** is to reseach the causes and consequences of violations' requirements of regulatory and legislative acts, safety, which lead to injuries and deaths. And to analyse the statistics of industrial injuries in Ukraine. **Conclusions.** The analysis revealed that a significant part of the injuries and deaths of people is caused by the operations and maintenance of buildings and structures, violations by enterprise owners of regulatory and legislative acts on labor protection, safety, and sanitary and hygienic working conditions. Also, at the enterprises of Ukraine, work is carried out on worn-out technological equipment, which leads to serious consequences in the form of fatal injuries.

Keywords: injury; burning; building structures; flammability; fire hazard; labor protection

Постановка проблеми. Згідно з виробництва. Число людей, яким загрожує проведеним аналізом, у світі визначено травматизм на виробництві на 100 000 зростання травмування та загибелі людей, населення в розвинутих країнах [1] показано що пов'язано з ростом населення на Землі та в таблиці 1. недосконалістю засобів та технологій

Таблиця 1

Кількість людей, що отримали виробничі травми, на 100 000 населення

Країна	Кількість травмованих	Країна	Кількість травмованих
Австрія	1 211	Португалія	1 904
Бельгія	1 371	російська федерація	3
Німеччина	1 165	Туреччина	512
Ізраїль	939	Україна	21
Іспанія	1 195	Франція	1 014
Італія	582	Європейський Союз	688

Таблиця 2

Загальна кількість смертельних випадків в сфері виробництва на 1000 працюючих ($k_{см}^{1000}$) у деяких країнах Європи

Країна	$k_{см}^{1000}$	Країна	$k_{см}^{1000}$
Австрія	0,067	Польща	0,057
Білорусь	0,089	російська федерація	0,134
Великобританія	0,010	Угорщина	0,056
Данія	0,028	Україна	0,117
Норвегія	0,020	Франція	0,016

Недостатня статистика в Україні та росії свідчить про присутність прихованих нещасних випадків. У той самий час за кількістю смертельних травмувань ці країни

значно перевищують показники травмування в розвинених країнах.

У таблиці 2 наводяться дані про смертельні випадки виробничого

травматизму в країнах Європи. Встановлено, що технічний прогрес не знизив, а навпаки, підвищив рівень ризику загибелі від нещасних випадків, як у побуті, так і на виробництві. Кількість нещасних випадків у світі має тенденцію до зростання і становить 125 млн щорічно, 220 тисяч – зі смертельними наслідками [3].

Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), травматизм у світі визначається епідемією, яка масово знищує людей, смертність від нещасних випадків посідає третє місце після серцево-судинних і онкологічних захворювань [2]. Встановлено, що:

- кожену секунду в світі у сфері виробництва травмується чотири людини;
- кожену секунду в світі у сфері виробництва травмується чотири людини;

- в Україні кожні 8 хв. травмується людина;

- в Україні кожні 5 годин гине одна людина.

Щомісяця в світі на виробництві травмується число людей, що дорівнює населенню Парижа.

В Україні щодня на виробництві травмуються в середньому 140–180 осіб, з них 20 стають інвалідами, четверо–п'ятеро осіб вмирають. Дуже високий показник травматизму відмічається в сільському господарстві, вугільній, хімічній, будівельній, металургійній промисловості та на транспорті.

Статистичні дані свідчать про незадовільний стан охорони праці в Україні (табл. 3).

Таблиця 3

Травматизм, пов'язаний з виробництвом

Рік	2017	2018	2019	2020	2021
<i>тисяч</i>					
Кількість потерпілих від нещасних випадків (гострих професійних захворювань (отруєнь/аварій) та від нещасних випадків зі смертельним наслідком, осіб	4,4	4,0	4,4	6,6	12,3
з них зі смертельним наслідком	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5
Тривалість тимчасової непрацездатності потерпілих від нещасних випадків, яка закінчилася у звітному році, робочих днів	224	215	230	181	200
<i>на 1 000 працюючих</i>					
Кількість потерпілих від нещасних випадків (гострих професійних захворювань (отруєнь/аварій) та від нещасних випадків зі смертельним наслідком, осіб	0,6	0,5	0,6	0,9	1,7
з них зі смертельним наслідком	0,038	0,036	0,055	0,054	0,076
Кількість днів непрацездатності	31,7	28,0	30,9	24,6	28,2
<i>на одного потерпілого</i>					
Кількість днів непрацездатності	55,4	53,2	52,3	27,2	16,3

На графіку (рис. 1) показано стан виробничого травматизму згідно з даними Держслужби з питань праці за останні роки.

На рисунку 2 наведено дані смертельних нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом за 2021–2023 рр.

Проведений нами аналіз свідчить, що причиною високого травматизму на виробництві в Україні стає, перш за все, значний знос технологічного обладнання (в деяких галузях він досяг критичної величини – 80 %). Наразі понад 800 тис. машин і механізмів не відповідають

вимогам безпеки (близько 80 %), 42 тис. будівель і споруд перебувають в аварійному стані, понад 3,4 млн осіб працюють в умовах з порушенням санітарно-гігієнічних норм [4].

Ще вищий рівень травматизму в Україні в невиробничій сфері. В середньому в побутовій сфері щорічно травмується близько 2 млн осіб, з них 70 тис. осіб гине. Найвищий рівень смертельних випадків на 1 000 осіб припадає на Дніпропетровську, Донецьку, Запорізьку, Херсонську, Кіровоградську, Чернігівську області [5].

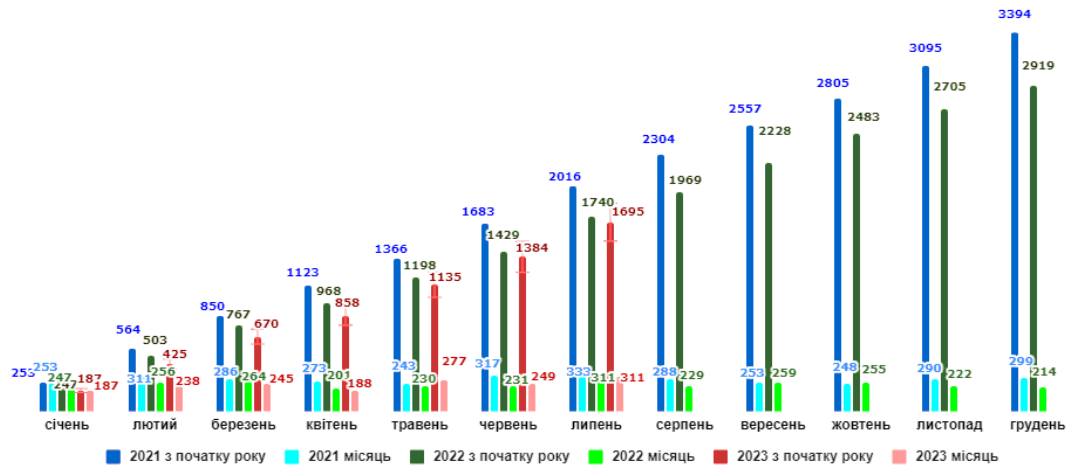


Рис. 1. Стан виробничого травматизму в Україні у 2021–2023 рр. (кількість осіб)

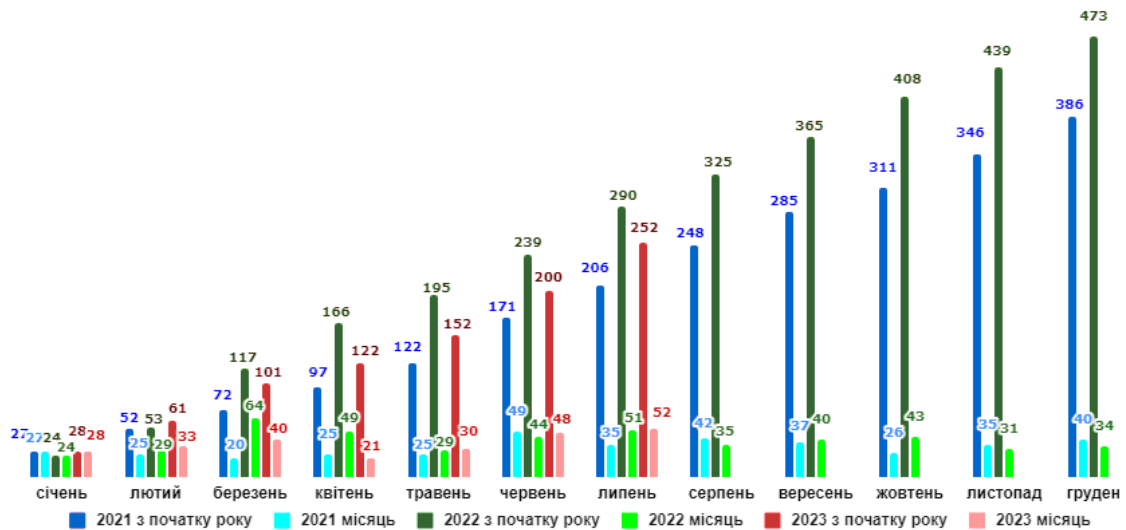


Рис. 2. Стан виробничого травматизму зі смертельними наслідками в Україні у 2021–2023 рр. (кількість осіб)

Останніми роками в Україні спостерігається зростання числа професійних захворювань. Щорічно реєструється близько 2,5 тис. хворих: у вугільній промисловості – 60–62 %; металургійній – 12–14 %; машинобудівній – 8–9 %; сільському господарстві – 3–4 %; інших галузях – 10–15 %. Розподіл по регіонах: Донецька область – 42–44 %; Дніпропетровська – 17–18 %; Луганська – 9–10 %; Львівська – 8–9 %; Волинська область – 3–4 %.

Відмічено зростання кількості професійних захворювань через вібрацію і

шум (29–31 %), запилення і загазованість (38–40 %).

На рисунку 3 наведені дані про потерпілих зі смертельним наслідком залежно від виду виробництва. Згідно з ними найвищий рівень травматизму зі смертельними наслідками в металургійній, гірничій, будівельній галузях.

Одна з причин смертельного травмування, як свідчить аналіз, – це незадовільний стан виробничих робочих місць, технологічного устаткування та прийняття на роботу не за трудовим договором, а за договором-підрядом.

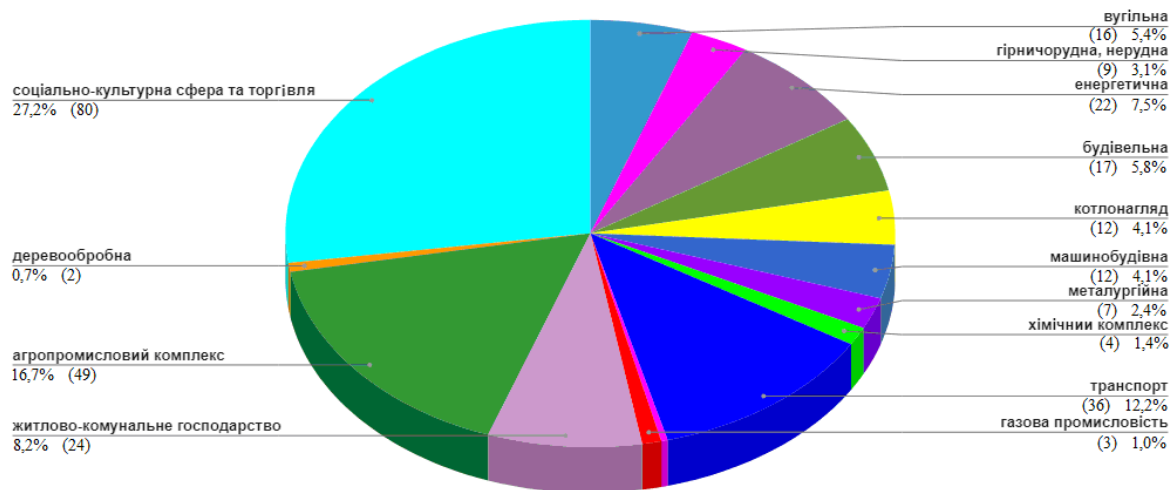


Рис. 3. Кількість потерпілих від нещасних випадків зі смертельним наслідком, пов'язаних із виробництвом, за видами діяльності (з початку року, станом на 29.08.2023)

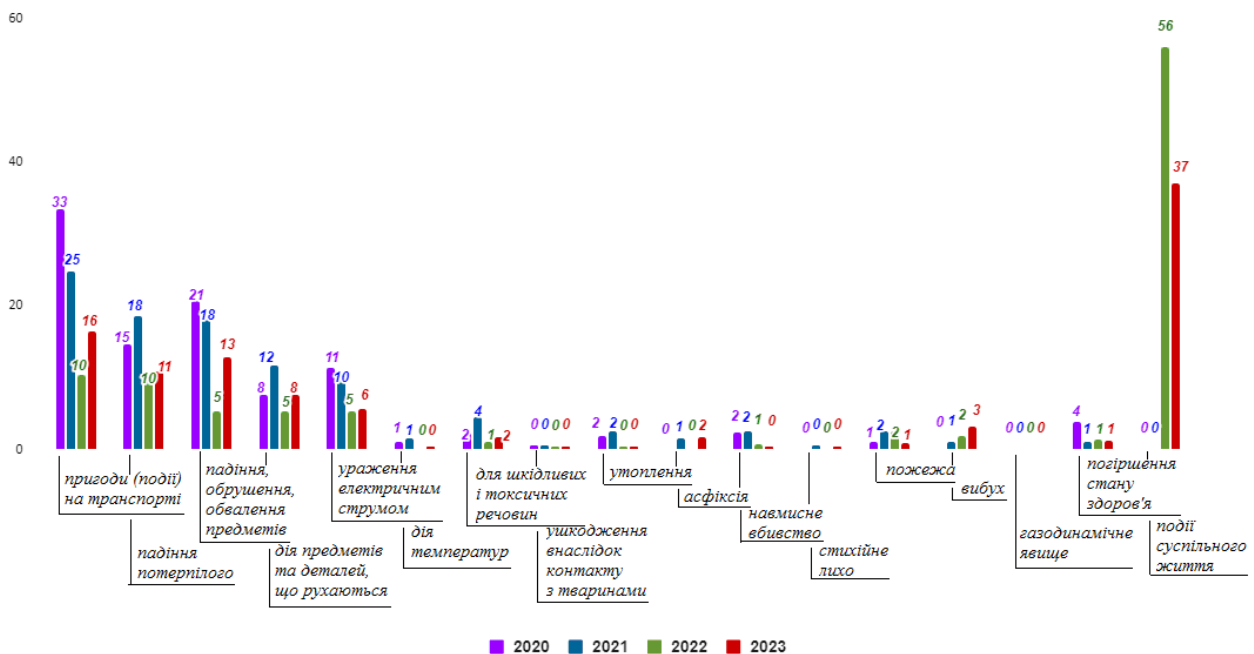


Рис. 4. Динаміка подій, що призвели до нещасних випадків зі смертельним наслідком, 2022–2023 рр. (% від загальної кількості загиблих)

На рисунку 4 наведені дані нещасних випадків зі смертельним наслідком (причинний зв'язок).

Як свідчить аналіз, значна частка нещасних випадків зі смертельним наслідком пов'язана з обрушенням будівель і споруд, будівельних конструкцій, пов'язаних з експлуатацією будівель, виникнення пожеж, вибухів та інше.

Аналіз стану безпеки під час експлуатації будівель і споруд в Україні. Як свідчать статистичні дані (Аналітична довідка Інституту державного управління та

наукових досліджень з цивільного захисту про пожежі та їх наслідки в Україні за 2021, 2022 роки), значна частина травмування та загибелі людей пов'язана з експлуатацією та утриманням будівель і споруд [3].

За останні 10 років в Україні зареєстровано 730 456 надзвичайних ситуацій з виникненням пожеж, з них понад 22 тис. на суб'єктах господарювання. В середньому кількість пожеж складає понад 73 тис. випадків на рік [1].

За останні 10 років унаслідок обрушень будівель і споруд через пожежі загинуло

28 220 людей і 16 884 особи було травмовано. Тільки прямі збитки, завдані пожежами, склали понад 12 млрд грн, а загальні матеріальні втрати – близько 50 млрд грн.

У надзвичайних ситуаціях за останні

10 років загинуло 2 478 людей, постраждало 9 709 людей.

Статистичні дані стану з виникненням пожеж в Україні за 2021 рік порівняно з 2020 роком наведені в таблиці 4, на рисунках 5–7.

Таблиця 4

Статистичні показники стану з пожежами в Україні за 2021 рік порівняно з 2020 роком

Назва показників	2021 рік	2020 рік	Тенденція по країні, +/-, у %	% від загальної кількості
<i>Загальні дані про пожежі</i>				
Кількість пожеж (од.)	79 457	101 279	-21,5	–
Збитки прямі (тис. грн)	3 181 197	2 631 982	20,3	–
Збитки побічні (тис. грн)	10 182 348	9 974 922	2,1	–
Загинуло людей унаслідок пожеж	1 853	1 728	7,2	–
у т. ч. дітей і підлітків до 18 років	35	46	-23,9	1,9
Загинуло людей унаслідок пожеж у містах	901	833	8,2	48,6
Загинуло людей унаслідок пожеж у селах	952	895	6,4	51,4
Травмовано людей на пожежах	1 383	1 453	-4,8	–
у т. ч. дітей та підлітків до 18 років	90	107	-15,9	6,5
у т. ч. у містах	894	908	-1,5	64,6
Знищено, пошкоджено будівель і споруд (од.)	23 061	28 029	-17,7	–
Знищено, пошкоджено техніки (од.)	4 719	4 972	-5,1	–
Загинуло людей унаслідок пожеж, на 100 тис. населення	4,5	4,1	-9,8	–
Кількість пожеж на 10 тис. населення	19,3	24,3	-20,6	–
Збитки прямі на 10 тис. населення (тис. грн)	770,8	630,2	22,3	–
Кількість пожеж у містах	44 476	53 511	-16,9	56,0
Кількість пожеж у селах	34 975	47 756	-26,8	44,0
Кількість пожеж на об'єктах, на яких здійснюється державний нагляд (контроль)	2 246	2 466	-8,9	2,8
у т.ч. на підприємствах, в організаціях, закладах	2 191	2 409	-9,0	2,8
<i>Об'єкти пожеж</i>				
Будівлі виробничого призначення	515	552	-6,7	0,6
Будівлі об'єктів торгівлі та харчування	706	787	-10,	0,9
Соціально-культурні, громадські та адміністративні споруди	476	493	-3,4	0,6
Будівлі та споруди сільськогосподарського призначення	114	112	1,8	0,1
Будинки та споруди житлового призначення	28 350	29 698	-4,5	35,7
у т. ч. житлові будинки	16 566	15 526	6,7	20,8
Природні екосистеми	528	1231	-57,1	0,7
Відкриті території	41 704	61 495	-32,2	52,5
Транспортні засоби	4 375	4 386	-0,3	5,5
Інші об'єкти	2 689	2 525	6,5	3,4

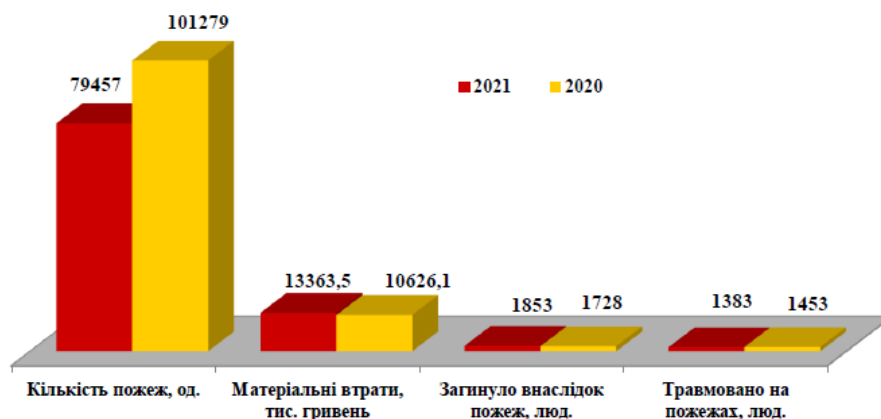


Рис. 5. Основні показники, що характеризують стан із пожежами в Україні у 2021 році порівняно з 2020 роком[7]

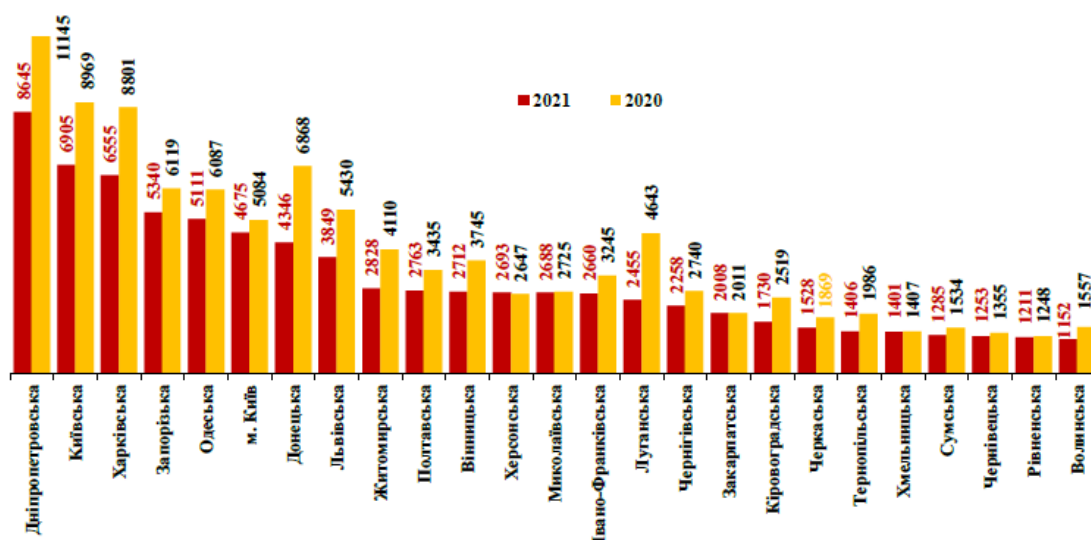
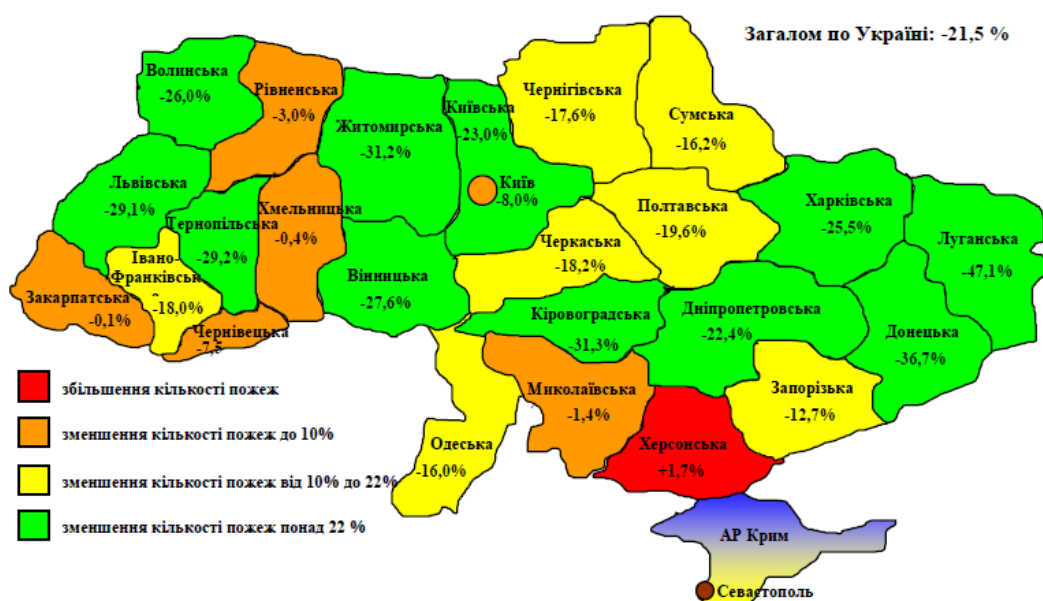


Рис. 6. Ранжування регіонів України за кількістю пожеж у 2021 році порівняно з 2020 роком



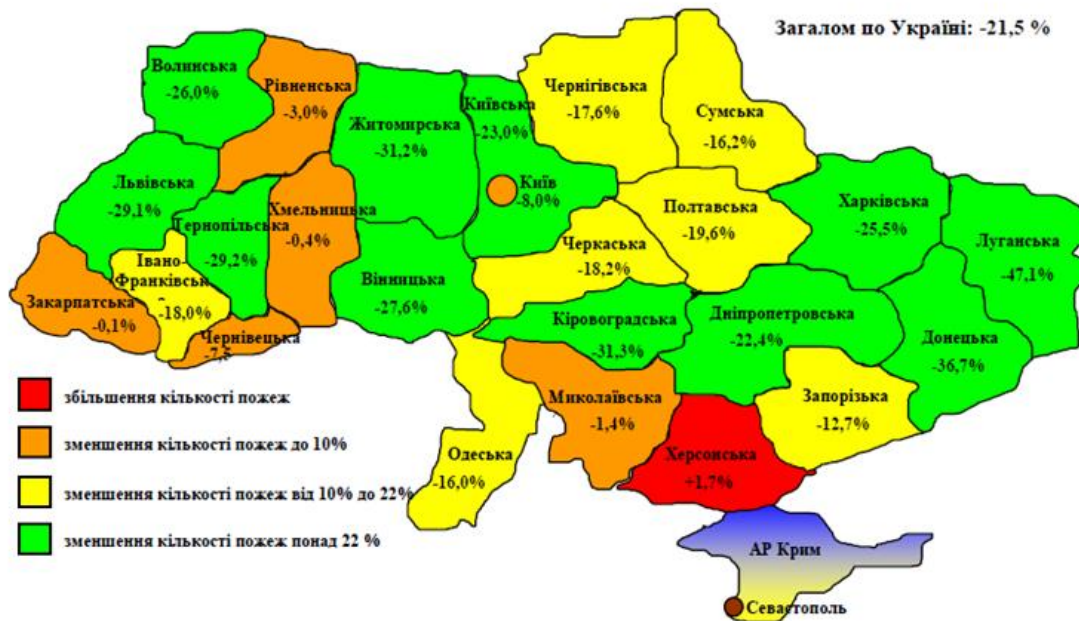


Рис. 7. Динаміка кількості виникнення пожеж по регіонах України у 2021 році порівняно з 2020 роком

Аналіз свідчить про збільшення прямих та побічних збитків від пожеж, збільшення числа загиблих та травмованих. Найбільше збитків від пожеж, що виникають в будівлях та спорудах житла, торгівлі та харчування, виробничого призначення.

Показник кількості пожеж на 2021 рік на 10 тис. населення по Україні становить 19,3 (у 2020 році – 24,3). Цей показник вищий у Київській (38,5), Запорізькій (32,5), Дніпропетровській (27,8), Херсонській (26,8), Харківській (25,1), Миколаївській (24,5), Житомирській (23,9), Чернігівській (23,4), Одеській (21,7), Полтавській (20,4) та Івано-Франківській (19,6) областях.

Залишається дуже складною ситуація на стратегічних об'єктах України – атомних електростанціях. Так, за останні роки все частіше виникають пожежі на АЕК та особливу тривогу викликають недоліки протипожежного захисту систем ядерної безпеки енергоблоків, де відсутнє обладнання автоматичним устаткуванням пожежегасіння.

Висока ймовірність збитків та загибелі людей від пожеж ставить перед державою

завдання виділення значних коштів на профілактику та боротьбу з пожежами. При цьому особлива увага приділяється підвищенню безпеки експлуатаційних характеристик будівель і споруд.

Проведений нами аналіз свідчить, що значна кількість випадків травмування та загибелі людей пов'язана з обрушенням будівельних конструкцій, будівель і споруд, підтверджує незадовільний стан утримання та експлуатації в Україні. У таблиці 5 наведено дані щодо кількості виникнення НС з обрушення будівельних конструкцій, будівель і споруд.

В таблиці 5 наведено дані щодо кількості виникнення НС з обрушення будівельних конструкцій, будівель і споруд. Значні матеріальні збитки наразі пов'язані з руйнуванням енергетичної інфраструктури України, що спричинює перенапруження в силових мережах і вихід із ладу технологічних установ та стає основною причиною виникнення НС з обрушенням будівель і споруд.

Таблиця 5

Статистичні дані щодо кількісних показників класифікованих НС [6]

Вид НС	Кількість НС					Загинуло людей					Постраждало людей				
	2018 рік	2019 рік	2020 рік	2021 рік	2022 рік	2018 рік	2019 рік	2020 рік	2021 рік	2022 рік	2018 рік	2019 рік	2020 рік	2021 рік	2022 рік
НС унаслідок пожеж, вибухів у тому числі у будівлях або спорудах житлової призначеності	22	27	26	28	38*	52	79	66	88	101*	9	81	27	31	149*
НС унаслідок раптового руйнування будівель і споруд	0	4	4	3	3*	0	10	10	10	10*	0	14	0	11	12*
НС унаслідок аварій в електро-енергетичних системах	1	0	0	2	1	0	0	0	4	3	0	0	0	немає даних	немає даних
НС унаслідок аварій у системах життєзабезпечення	5	10	4	17	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Значні матеріальні збитки наразі пов'язані з руйнуванням енергетичної інфраструктури України, що спричинює перенапруження в силових мережах і вихід із ладу технологічних установ та стає основною причиною виникнення НС з обрушенням будівель і споруд.

Висновки

Визначено, що численні травми та загибель людей в Україні та світі пов'язані з

обрушенням будівельних конструкцій будівель та споруд внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій.

Із початку 2022 року по теперішній час значна частина обрушень будівель і споруд пов'язана з воєнними діями та застосуванням різних засобів ураження з боку російської федерації, що призводить до збільшення кількості травмування та загибелі людей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Березуцький В. В. Ризик орієнтований підхід в охороні праці. Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 108 с.
2. Сафонов В. В., Бєліков А. С., Папірник Р. Б. та ін. Інженерні рішення з охорони праці при розробці дипломних проектів інженерно-будівельних спеціальностей : підруч. Під заг. ред. засл. діяча науки і техніки України, д. т. н., проф. Бєлікова А. С. Дніпро : Журфонд, 2020. 366 с.
3. Рожков А. П. Пожежна безпека. Київ : Пожінформтехніка, 1998. 256 с.
4. Карамзіна О. О. Статистичний бюлетень. Травматизм на виробництві у 2015–2020 роках. Київ : Держкомстат України, 2021.
5. Лактіонов С. О., Серіков Я. О. Виробничий травматизм і професійна захворюваність як проблема сучасності: аспекти, причини, шляхи запобігання. *Безпека людини у сучасних умовах : Міжнародна конференція*. Харків : НТУ «ХПІ», 2015. С. 219–224.
6. Статичний щорічник України : збірник. URL : https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/01/Arch_zor_zb.htm (Дата звернення : 09.09.2023).
7. Державна служба України з питань праці «Матеріали по травматизму». URL : http://4ua.co.ua/life/yb3bc78a4c53b89421206d37_0.html (Дата звернення : 09.09.2023).
8. Інститут державного управління та науки дослідження цивільного захисту аналітичні довідки про пожежі. URL : <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/1/7/6/3/3/8/9/analitichna-dovidka-pro-pojeji-032023.pdf> (Дата звернення : 09.09.2023).

REFERENCES

1. Bezrutskiy V.V. *Ryzik orientovaniy pidhid v ochoroni prachi* [Risk-based approach in labor protection]. Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2019, 108 p. (in Ukrainian).
2. Safonov V.V., Belikov A.S., Papirnik R.B. and oth. *Inzhenerni rishennya z okhorony pratsi pry rozrobtsi dyplomnykh proektiv inzhenerno-budivel'nykh spetsial'nostey* [Engineering solutions for labor protection in the development of diploma projects of engineering and construction specialties]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2020, 366 p. (in Ukrainian).
3. Rozhkov A.P. *Pozhezha bezpeka* [Fire Safety]. Kyiv : Pizhinformtehnika Publ., 1998, 256 p. (in Ukrainian).
4. Karamzina O.O. *Statistichniy bulletin. Travnatizm na vurobnichtvi y 2015–2020 rokha* [Statistical bulletin. Injuries at work in 2015–2020]. Kyiv : Dezhcomstat of Ukraine, 2021. (in Ukrainian).
5. Laktionov S.O. and Serikov Ya.O. *Vuribnichiy travmatizm I profesiyna zachvoruvanist yak problema suchasnosti: aspekti, prichini, shlyachi zapibighannia* [Industrial injuries and occupational morbidity as a modern problem: aspects, causes, ways of prevention]. Human Safety in Modern Condition : International conference. Kharkiv : National Technical University "Kharkiv Politechnical University", 2015, pp. 219–224. (in Ukrainian).
6. *Statisticniy shorichnik Ukraini* [Statistic yearbook of Ukraine: degest]. URL : https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/01/Arch_zor_zb.htm (in Ukrainian). (Date of application : 2023, September, 09).
7. *Derzhavna sluzhba Ukrayiny z pytan' pratsi "Materialy po travmatyzmu"* [State Labor Service of Ukraine "Injury Materials"]. URL : http://4ua.co.ua/life/yb3bc78a4c53b89421206d37_0.html (in Ukrainian). (Date of application: 2023, September, 09).
8. *Instytut derzhavnoho upravlinnya ta nauky doslidzhennya tsyvil'noho zakhystu analitychny dovidky pro pozhezhi* [Institute of Public Administration and Science of Civil Defense Research Analytical Report on Fires]. URL : <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/1/7/6/3/3/8/9/analitichna-dovidka-pro-pojeji-032023.pdf> (in Ukrainian). (Date of application: 2023, September, 09).

Надійшла до редакції: 03.10.2023 р.

УДК 691

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.65.994

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЛАСТИФІКАТОРІВ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН СИСТЕМИ $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$

ДЕРЕВ'ЯНКО В. М.¹, докт. техн. наук, проф.,
ГРИШКО Г. М.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
ДУБОВ Т. М.³, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: viktorderevianko2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

^{2*} Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: hryshko.h.m@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

³ Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: dubov.t.m@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1740-9251

Анотація. Постановка проблеми. До складу сучасних бетонів і розчинів входять поверхнево-активні речовини, які регулюють процеси гідратації, структуроутворення і, відповідно, властивості штучного каменю. Один із видів поверхнево-активних речовин – це пластифікатори, основне призначенням яких – зменшення водопотреби. Розглядаючи їх вплив, можна відмітити більш широкий спектр зміни властивостей розчинів і бетонів. Особливо слід звернути увагу в цьому плані на алюмінатні, сульфатні і сульфоалюмінатні в'язучі речовини. Тому розроблення композиційних в'язучих речовин системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ на основі глиноземистого цементу і гіпсу з використанням пластифікаторів потребує досліджень у цьому напрямку. **Мета статті** – дослідити вплив пластифікаторів на технологічні та основні фізико-механічні властивості глиноземистого цементу, композитів на його основі. **Висновки.** Отримано комплекс експериментально-статистичних моделей наномодифікованих композицій на основі глиноземистого цементу та гіпсу, що дають можливість визначення впливу вхідних факторів на зростання основних фізико-механічних властивостей. Дослідженнями встановлено співвідношення базових компонентів композиту на основі 70 % глиноземистого цементу, 30 % гіпсу і пластифікатора Sika VG Sika = $0,10 \div 0,40$; глиноземистий цемент = $69,72 \div 69,93$; гіпс = $29,88 \div 29,97$. Згідно з технологією виготовлення зменшено кількість компонентів до мінімуму й отримано систему в'язуче – заповнювач – пластифікатор. З економічної сторони залежно від вимог замовника можна регулювати витрату глиноземистого цементу та гіпсової в'язучої речовини в межах приблизно 10 %.

Ключові слова: пластифікатор; композиційне в'язуче; модифікація; етрингіт; стабілізація етрингітової фази; алюмінатні цементи; сульфоалюмінатні цементи

RESEARCHING THE INFLUENCE OF PLASTICIZERS ON THE TECHNOLOGICAL AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE BINDING SUBSTANCES OF THE $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ SYSTEM

DEREVIANKO V.M.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
HRYSHKO H.M.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
DUBOV T.M.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

¹ Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: viktorderevianko2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

^{2*} Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian-Economic University, 25, Serhii Efremov St., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: hryshko.h.m@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

³ Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian-Economic University, 25, Serhii Efremov St., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: dubov.t.m@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1740-9251

Abstract. Problem statement. Composition of modern concretes and mortars includes surface-active substances that regulate processes of hydration, structure formation and, accordingly, properties of artificial stone. One of the types of surface-active substances are plasticizers, their main purpose is to reduce water consumption. When considering their influence, a wider range of changes in the properties of solutions and concretes can be noted. In this regard a particular attention should be paid to aluminate, sulfate and sulfo-aluminate binders. Therefore, the development of composite binders of the $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ system based on alumina cement and gypsum with the use of plasticizers requires research in this direction. **The purpose of the article** – to investigate the effect of plasticizers on the technological and basic physical and mechanical properties of alumina cement and composites based on it. **Conclusions.** A complex of experimental and statistical models of nanomodified compositions based on alumina cement and gypsum was obtained, and these models make it possible to determine influence of input factors on the growth of the main physical and mechanical properties. Research has established the ratio of the basic components of the composite based on 70 % alumina cement, 30 % gypsum and Sika VG Sika plasticizer = $0.10 \div 0.40$; alumina cement = $69.72 \div 69.93$; Gypsum = $29.88 \div 29.97$. According to the manufacturing technology, the number of components was reduced to a minimum and a binder-filler-plasticizer system was obtained. From the economic point of view, depending on the customer's requirements, it is possible to regulate the consumption of alumina cement and gypsum binder within the limits of approximately 10 %.

Keywords: *plasticizer; composite binder; modification; ettringite; ettringite phase stabilization; aluminate cements; sulfoaluminate cements*

Актуальність проблеми. До складу сучасних бетонів і розчинів входять поверхнево-активні речовини, які регулюють процеси гідратації, структуроутворення і, відповідно, – властивості штучного каменю. Один із видів поверхнево-активних речовин – це пластифікатори, основне призначення яких – зменшення водопотреби [1; 2; 4–6].

Розглядаючи їх вплив, можна відмітити більш широкий спектр зміни властивостей розчинів і бетонів [7–11].

Особливо слід звернути увагу в цьому плані на алюмінати, сульфати і сульфоалюмінатні в'язучі речовини.

Тому розроблення композиційних в'язучих речовин системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ на основі глиноземистого цементу, гіпсу і з використанням пластифікаторів потребує проведення досліджень в цьому напрямку.

Аналіз літератури. У роботах В. М. Дерев'янка, Н. В. Кондратьєвої, Л. В. Мороз, В. Ю. Мороз, О. І. Бегуна проводилися дослідження впливу пластифікаторів на технологічні та фізико-механічні властивості гіпсових в'язучих [3]. Автори визначили найбільш ефективні добавки, які сприяють поліпшенню технологічних та фізико-механічних властивостей гіпсових в'язучих: Sika

Viscocrete G (ТОВ «Сіка Україна»), MC-Power Flow 2695 (ТОВ «МЦ Баухемі») та STANEPLAST 156 (ТОВ «СТАХЕМА ЛЬВІВ-СЕРВІС») [3].

Поліпшення основних властивостей глиноземистого цементу і композиту, що складається з $30 \div 70$ % глиноземистого цементу і $30 \div 70$ % гіпсу та містить оптимальну кількість еtringіту, постає актуальною проблемою, що потребує вирішення.

Мета статті – дослідити вплив пластифікаторів на технологічні та основні фізико-механічні властивості глиноземистого цементу, композитів на його основі.

Результати досліджень. З метою зменшення водотвердого відношення, підвищення щільності структури та міцних показників проводили модифікацію пластифікаторами уже розроблених складів системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ (глиноземистий цемент – гіпс): а) $70 \div 30$; б) $50 \div 50$; в) $30 \div 70$ з підвищеним вмістом стабільної форми еtringітової складової.

Для досліджень процесів гідратації та структуроутворення мінералогічних систем за присутності поверхнево-активних речовин використано такі добавки-пластифікатори, оптимальні відсотковий вміст та ефективність яких були визначені в попередніх роботах на гіпсовому в'язучому

марки Г5 Н – II згідно ДСТУ Б В.2.7-82, виробництва ПАТ «Гіпсовик», м. Кам'янець-Подільський [1]:

а) ТОВ «МЦ Баухемі» – MC-Power Flow 2695;

б) ТОВ «Сіка Україна» – Sika Viscocrete G;

в) ТОВ «СТАХЕМА ЛЬВІВ-СЕРВІС» – STANEPLAST 156.

В роботі визначено вплив пластифікаторів на технологічні та фізико-механічні властивості глиноземистого цементу (табл. 1, 2) і композиту оптимального складу: 70 % глиноземистого цементу і 30 % гіпсу, модифікованих пластифікаторами (рис. 1).

Таблиця 1

Вплив добавок на властивості глиноземистого цементу

	Глиноземистий цемент	Сіка, Viscocrete G	МЦ Баухемі, 2695	Стахема, STP 156
Призначення добавки		суперпластифікатор для гіпсових сумішей	суперпластифікатор для бетонних сумішей	гіперпластифікатор для бетонних сумішей
Максимальна рекомендована к-ть добавки, %	0	0,4	2	1,5
В/Ц	0,33	0,25	0,24	0,24
$\tau_{\text{поч}}, \text{ГОД.}-\text{ХВ.}-\text{СЕК.}$	60 хв. 56 сек.	1 год. 50 хв.	15 хв. 40 сек.	18 хв. 30 сек.
$\tau_{\text{кін}}, \text{ГОД.}-\text{ХВ.}-\text{СЕК.}$	12 год. 5 хв. 10 сек.	1 доба 5 год. 10 хв.	2 год. 26 хв.	2 год. 43 хв.
$R_{\text{сж}}, \text{МПа}$	7,92	12,72	11,1	10,15
$R_{\text{ср}}, \text{МПа}$	36,41	38,62	28,17	27,5

Таблиця 2

Межа міцності на стиск та згинання глиноземистого цементу з ПАР

№ п/п	Склад	Розмір зразків, см			m, г	$\rho, \text{кг/м}^3$	$R_{\text{ст1}}, \text{МПа}$	$R_{\text{ст2}}, \text{МПа}$	$R_{\text{сж заг}}, \text{МПа}$	$R_{\text{ст заг}}, \text{МПа}$	$R_{\text{виг}}, \text{МПа}$	$R_{\text{виг}}, \text{МПа}$
1	Глиноземистий + 0% добавки	16,0	3,9	3,9	499	2050	32,55	32,55	32,55		7,43	
		16,1	3,9	3,9	499	2038	38,52	40,00	39,26	36,41	9,71	7,92
		16,1	4,0	4,0	527	2046	37,48	37,33	37,41		6,63	
2	100 % Глиноземистий цемент+0,4%СікаVG	16	4	3,9	504	2019	35,48	40,00	37,74		14,00	
		16	4	4	514	2008	36,24	40,00	38,12	38,62	10,89	12,73
		16	4	4	485	1895	40,00	40,00	40,00		13,31	
3	100 % Глиноземистий цемент+2%MC Баухемі, 2695	16	4	3,9	513	2055	35,48	23,88	29,68		11,45	
		16	4	4	511	1996	21,38	30,32	25,85	28,17	10,89	11,10
		16,1	4	4	512	1988	35,48	30,32	32,90		10,96	
4	100 % Глиноземистий цемент+1,5%Стахема, STP 156	15,9	4	3,9	523	2109	22,00	34,84	28,42		10,12	
		16	4	3,9	513	2055	26,71	27,36	27,03	27,49	10,18	10,15
		16	4	3,9	515	2063	26,71	27,36	27,03		10,18	

Нормальна густина (НГ) гіпсового становить 0,52, початок тужавлення гіпсового тіста – 7 хв. 45 сек., кінець тужавлення – 14 хв. 5 сек.

Додавання всіх пластифікаторів викликає зменшення водотвердого

співвідношення. Оптимальний вміст добавки Sika Viscocrete G для глиноземистого цементу – 0,4 %. При цьому водотверде співвідношення становить 0,24, для композиції глиноземистий цемент + гіпс водотверде збільшується до 0,27.

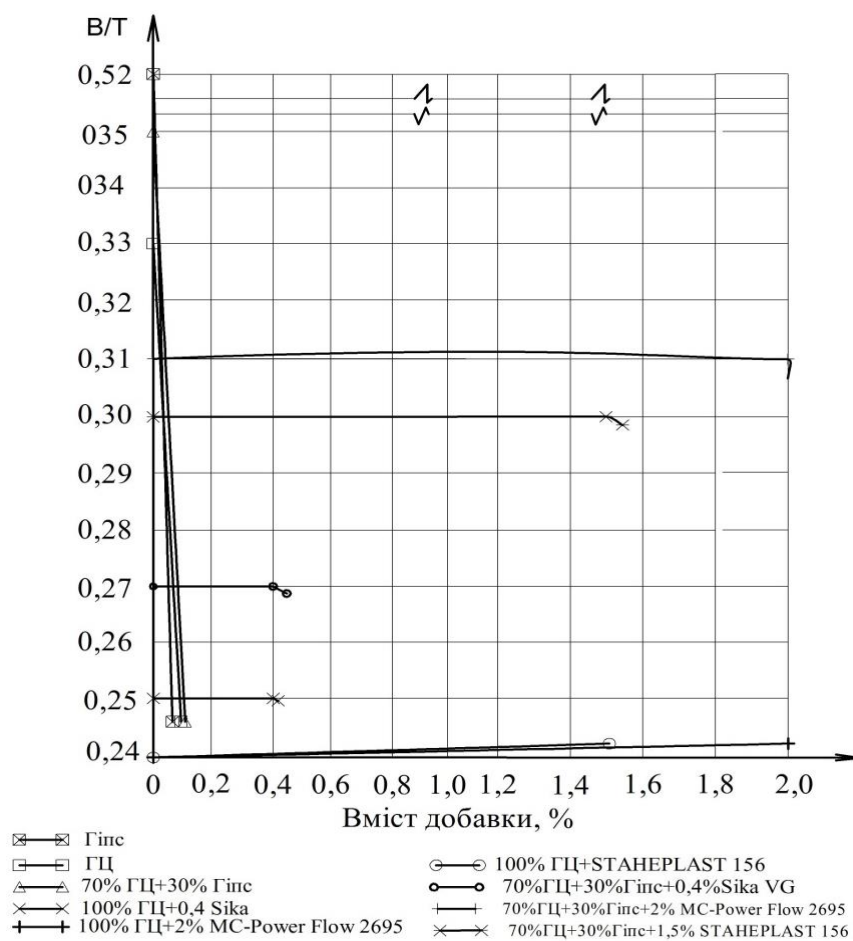


Рис. 1. Графіки залежності водотвердого відношення, композицій, в'язучих гіпсового і глиноземистих цементів від вмісту пластифікаторів

Також проведено дослідження в'язучих речовин відповідно до ДСТУ механічних властивостей зразків гіпсових (табл. 3).

Таблиця 3

Межа міцності на стиск гіпсового в'язучого без добавки

№ п/п	Розмір зразків, см						m, г	ρ, кг/м³	Rст1, МПа	Rст2, МПа	Rст заг., МПа	Rвиг, МПа
	Верхньої грані			Нижньої грані								
1	16,0	4,0	4,0	16,0	4,0	4,0	444	1756	4,0	4,1	4,1	3,5
2	16,0	4,0	4,0	16,0	4,0	4,0	462	1805	3,7	3,6	3,7	4,0
3	16,0	4,0	3,9	16,0	4,0	3,9	447	1791	3,6	3,5	3,5	3,9
4	15,9	4,0	4,1	15,9	4,0	4,1	456	1749			Rст ср	Rвиг ср
5	15,9	4,0	4,1	15,9	4,0	4,1	456	1749			3,8	3,8
6	16,1	4,0	4,0	16,1	4,0	4,0	452	1755				

У попередніх дослідженнях визначено склад композицій в'язучих речовин (глиноземистий цемент + гіпс), що дорівнює 70 : 30 %, в якому формується максимальна кількість еtringіту.

Як відомо, еtringітова фаза не стабільна у процесі експлуатації. Згідно з нашою

гіпотезою, стабілізації структури еtringіту можна досягти шляхом введення наномодифікаторів.

На основі попередніх досліджень і аналізу літературних даних з'ясовано що вміст нанодобавок перебуває в межах сотих, а іноді і тисячних часток відсотків. Це

викликає значні проблеми при диспергації нанодобавок у такій кількості. Варіантом вирішення проблеми стає використання пластифікаторів.

Сутність технології полягає в попередній диспергації нанодобавки в концентрованому розчині вода–пластифікатор.

У подальшому – приготування розчину заданої концентрації і затворювання суміші композиції.

Із цією метою проведено дослідження щодо визначення впливу пластифікаторів на композицію ГЦ : Г (70 : 30 %) (табл. 4, 5).

У таблиці 4, 5 показано вплив добавок на властивості композиту, що складається з 70 % ГЦ та 30 % Гіпсу.

Таблиця 4

**Вплив добавок на властивості композитів,
що складаються з 70 % ГЦ та 30 % Гіпсу з ПАР**

	70 % ГЦ та 30 % гіпсу	Сіка, Viscocrete G	Сіка, Viscocrete G	МЦ Баухемі, 2695	Стахема, STP 156
Призначення добавки		суперпластифі- катор для гіпсових сумішей	суперпластифі- катор для гіпсових сумішей	суперпластифі- катор для бетонних сумішей	гіперпластифі- катор для бетонних сумішей
Максимальна рекомендована кількість добавки, %	0	0,4	0,8	2	1,5
В/Ц	0,35	0,27	0,28	0,31	0,30
τ _{поч.} , год.-хв.-сек.	4 хв. 56 сек.	44 хв. 20 сек.	42 хв. 57 сек.	12 хв. 20 сек.	37 хв. 31 сек.
τ _{кін.} , год.-хв.-сек.	6 хв. 39 сек.	1 доба 1 год. 2 хв.	1 доба 3 год. 2 хв.	25 хв. 45 сек.	1 год. 8 хв. 25 сек.
R _{зг} , МПа	8,74	14,15	10,88	8,29	11,74
R _{ст} , МПа	14,37	19,30	18,17	19,88	17,61

Таблиця 5

Межа міцності на стиск та згинання композитів, що складаються з 70 % ГЦ та 30 % гіпсу з ПАР

№ п/ п	Склад	Розмір зразка, см			м, г	ρ, кг/м³	R _{ст1} , МПа	R _{ст2} , МПа	R _{зг} , МПа	R _{ст} заг., МПа	R _{виг} , МПа	R _{виг} , МПа
1	Глиноземистий + 0% добавки	16,0	3,9	3,9	499	2050	32,55	32,55	32,55		7,43	
		16,1	3,9	3,9	499	2038	38,52	40,00	39,26	36,41	7,47	7,28
		16,1	4,0	4,0	527	2046	37,48	37,33	37,41		6,93	
2	70 % Глиноземистий цемент+30% Гіпс	16,1	4,0	4,0	487	1891	16,00	13,55	14,77		6,93	
		16,1	4	3,9	487	1939	16,13	14,71	15,42	14,80	7,29	7,33
		16,3	4	3,8	495	1998	13,55	14,84	14,19		7,77	
3	70 % Глиноземистий цемент+30% Гіпс+0,4%СікаVG	16	4	3,9	543	2175	20,37	20,37	20,37		7,24	
		16	4	4	524	2047	20,50	17,16	18,83	19,86	6,89	7,00
		16	4	4	545	2129	20,37	20,37	20,37		6,89	
4	70 % Глиноземистий цемент+30% Гіпс+0,8%СікаVG	16	3,9	3,9	529	2174	16,26	22,13	19,19		7,43	
		16	3,9	3,9	519	2133	16,26	16,26	16,26	17,37	7,43	7,43
		16	3,9	3,9	490	2013	17,20	16,13	16,67		7,43	
5	70 % Глиноземистий цемент+30% Гіпс+2%МС Баухемі, 2695	16	4	3,9	513	2055	17,81	22,13	19,97		7,24	
		16	4	3,9	501	2007	21,00	21,00	21,00	19,91	7,24	7,26
		16,1	4	3,9	496	1975	21,00	16,52	18,76		7,29	
6	70 % Глиноземистий цемент+30% Гіпс+1,5%Стахема, STP 156	15,9	4	3,9	523	2109	17,73	17,20	17,47		7,20	
		16	4	3,9	513	2055	19,21	16,13	17,67	17,60	7,24	7,22
		16	4	3,9	515	2063	19,21	16,13	17,67		120,89	

Таблиця 6

Інтервал вар'ювання компонентів

Фактор впливу	Од. вимір.	Позн.	Рівні	
			нижній (-1)	верхній (+1)
Вміст глиноземистого цементу	%	X ₁	99,9	99,6
Вміст Sika	%	X ₂	0,1	0,4

Таблиця 7

Матриця планування

№ п/п	Рівні варіювання		Витрати матеріалу	
	Фактор впливу		Фактор впливу	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	1	-1	99,6	0,1
2	-1	1	99,9	0,4
3	-1	-1	99,9	0,1
4	1	1	99,6	0,4

На підставі матриці планування проведено експерименти щодо визначення основних властивостей розчинних сумішей: В/Ц відношення, міцність при згинанні, міцність при стисканні у віці 3 діб (табл. 8).

Таблиця 8

Результати досліджень

№ п/п	Рівень варіювання		Витрата матеріалу, %		В/Т	R _{згин} 3 доби, МПа	R _{стисн} 3 доби, МПа
	Фактор впливу		Фактор впливу				
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂			
			Глиноземистий цемент	Sika VG			
1	1	-1	99,6	0,1	0,31	9,13	37,02
2	-1	1	99,9	0,4	0,26	11,69	37,25
3	-1	-1	99,9	0,1	0,32	8,78	36,95
4	1	1	99,6	0,4	0,25	12,72	38,62

За результатами досліджень складено рівняння регресії та побудовано діаграми взаємного впливу факторів впливу на досліджувані властивості розчинних сумішей (рис. 2–4).

Оптимальний вміст пластифікатора Sika VG – 0,4 % від маси глиноземистого цементу, за збільшення або зменшення його вмісту відбувається зниження основних фізико-механічних властивостей.

Дослідження фізико-механічних властивостей композиції (глиноземистий

цемент + гіпс) 70 ÷ 30 % проведено на основі планування ПФЕ 2^н.

Як фактори впливу вибрано – вміст суміші такого складу: 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу (x₁), ПАР Sika VG (x₂), яка забезпечує оптимальне В/Т та максимальні міцні показники на ранніх термінах твердіння.

Таблиця 9

Інтервал вар'ювання компонентів

Фактор впливу	Од. вимір.	Позн.	Рівні	
			нижній (-1)	верхній (+1)
Вміст глиноземистого цементу + гіпс	%	X ₁	99,9	99,6
Вміст Sika	%	X ₂	0,1	0,4

Виходячи з інтервалу варіювання компонентів складено матрицю планування експерименту (табл. 10).

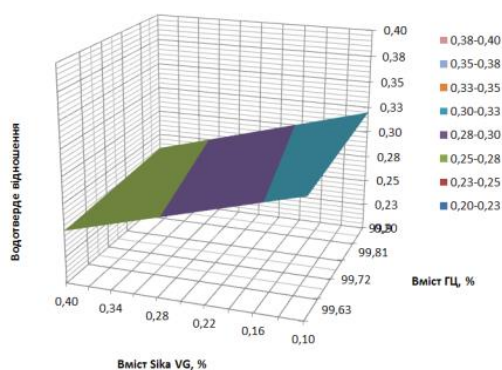
Таблиця 10

Матриця планування

№ п/п	Рівні варіювання фактор впливу		Витрати матеріалу фактор впливу	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	1	-1	99,6	0,1
2	-1	1	99,9	0,4
3	-1	-1	99,9	0,1
4	1	1	99,6	0,4

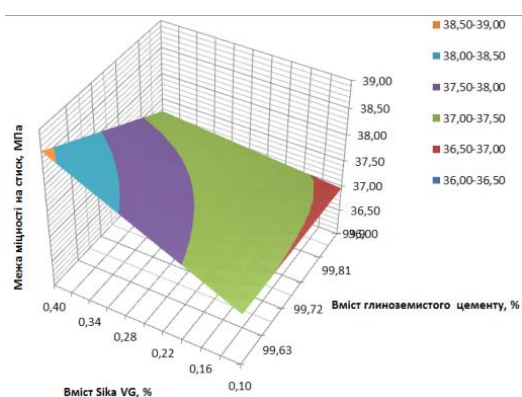
На підставі матриці планування проведено експерименти щодо визначення основних властивостей розчинних сумішей: В/Ц відношення, міцність при згинанні, міцність при стисненні у віці 3 доби (табл. 11).

За результатами досліджень розроблено рівняння регресії та побудовано діаграми взаємної дії факторів впливу на досліджувані властивості розчинних сумішей (рис. 5–7).



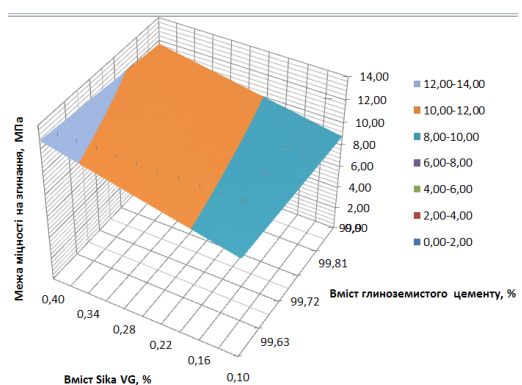
$$B/T = 0,285 - 0,005X_1 - 0,03X_2$$

Рис. 2. Діаграма залежності зміни В/Т глиноземистого цементу від вмісту пластифікатора Sika VG



$$R_{\text{стисн}} = 37,46 + 0,36X_1 + 0,475X_2 + 0,325X_1X_2$$

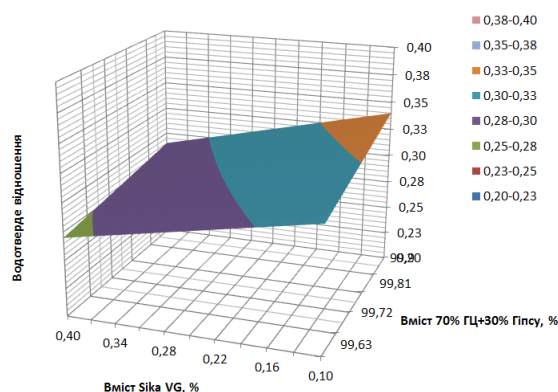
Рис. 3. Діаграма залежності зміни межі міцності на стиск глиноземистого цементу від вмісту пластифікатора Sika VG



$$R_{\text{згин}} = 10,58 + 0,345X_1 + 1,625X_2 + 0,17X_1X_2$$

Рис. 4. Діаграма залежності зміни межі міцності на згинання глиноземистого цементу від вмісту пластифікатора Sika VG

Інтервал варіювання наведено в таблиці 9.



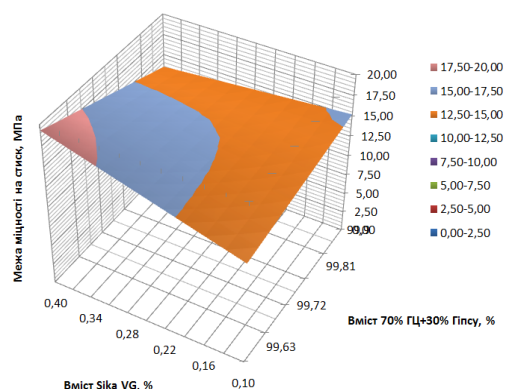
$$B/T = 0,303 - 0,013X_1 - 0,023X_2 + 0,03X_1X_2$$

Рис. 5. Діаграма залежності зміни В/Т сировинної суміші на основі 70 % глиноземистого цементу + 30 % гіпсу від вмісту пластифікатора Sika VG

Таблиця 11

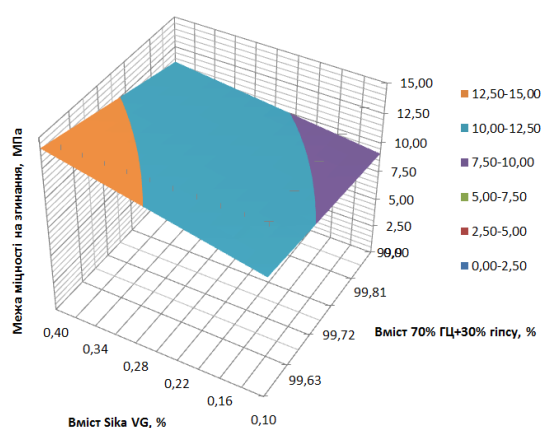
Результати досліджень

№ п/п	Рівень варіювання		Витрата матеріалу, %		В/Т	R _{згин} 3 доб, МПа	R _{стисн} 3 доб, МПа
	Фактор впливу		Фактор впливу				
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂			
			70 % ГЦ + 30 % гіпсу	Sika VG			
1	1	-1	99,6 (69,72+29,88)	0,1	0,31	10,59	12,79
2	-1	1	99,9 (69,93+29,97)	0,4	0,29	11,2	13,45
3	-1	-1	99,9 (69,93+29,97)	0,1	0,34	9,1	15,23
4	1	1	99,6 (69,72+29,88)	0,4	0,27	14,15	19,30



$$R_{\text{стисн}} = 15,193 + 0,853X_1 + 1,183X_2 + 2,073X_1X_2$$

Рис. 6. Діаграма залежності зміни межі міцності на стиск сировинної суміші на основі 70 % глиноземистого цементу + 30 % гіпсу від умісту пластифікатора Sika VG



$$R_{\text{згин}} = 11,26 + 1,11X_1 + 1,415X_2 + 0,365X_1X_2$$

Рис. 7. Діаграма залежності зміни межі міцності на згинання сировинної суміші на основі 70 % глиноземистого цементу + 30 % гіпсу від умісту пластифікатора Sika VG

Висновок

Отримано комплекс експериментально-статистичних моделей наномодифікованих композицій на основі глиноземистого цементу та гіпсу, що дають можливість визначення впливу вхідних факторів на зростання основних фізико-механічних властивостей.

Дослідженнями встановлено співвідношення базових компонентів композиту на основі 70 % глиноземистого цементу, 30 % гіпсу і пластифікатора Sika VG: Sika = 0,10 ÷ 0,40; глиноземистий цемент = 69,72 ÷ 69,93; гіпс = 29,88 ÷ 29,97.

Отримана система для виготовлення композиту на основі глиноземистого цементу, гіпсу і пластифікатора дозволяє у процесі гідратації отримати максимальну кількість еtringіту. Це дасть змогу в подальшому провести дослідження зі стабілізації структури еtringітової фази, що становить досить значну проблему за експлуатації бетонів на основі портландцементу, глиноземистого цементу, а також сульфоалюмінатних в'язучих речовин.

Композиції глиноземистий цемент + гіпс дають можливість зменшити витрати в'язучої речовини глиноземистого цементу із заміною гіпсових в'язучих компонентів (не тільки напівгідратом, а й природним гіпсом).

Також такі композиції можуть змінити технологію виробництва залізобетонних виробів і бути використані в будівельних 3D-принтерах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини : підруч. Київ : Основа, 2012. 448 с.
2. Пашченко О. О. В'язучі матеріали : підруч. Київ : Вища школа, 1995. 416 с.
3. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fischer H., Kondratieva N. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019. Vol. 13, № 4. Pp. 495–502.
4. Sanytsky M., Usherov-Marshak A., Kropyvnytska T., Heviuk I. Performance of multicomponent Portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite and limestone. *Cement Wapno Beton*. № 25 (5). 2020. Pp. 416–427.
5. Plank J. Concrete Admixtures Where Are We Now and What Can We Expect in the Future? 19'Ibausil. Weimar. 2015. PV03. 18 p.
6. Roy D., Daimon M. Effect of Admixtures upon Electrokinetic phenomena during hydration of C_3S , C_3A and port-land cement. *7th intern Congr. Chem. Cements*. Paris. Vol II. 1980. Pp. 242–246.
7. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б., Кочевих М. О., Хасан Є. Г., Константиновський Б. Я., Ракша В. О. Будівельне матеріалознавство : підруч. за ред. П. В. Кривенка. Київ : Ліра-К, 2015. 624 с.
8. Пушкарьова К. К., Кочевих М. О. Матеріалознавство для архітекторів та дизайнерів : навч. посіб. Київ : Вид-во «Ліра-К», 2019. 424 с.
9. Kondofesky-Mintova L., Plank J. Superplasticizers and oth. Chemical Admixtures in Concrete : Proceedings Tenth International Conference (October 2012, Prague, Czech Republic). P. 423.
10. Sanytskyi M. A., Kondratieva N. V. Modern Trends in the Development and Production of Silicate Materials : III All-Ukrainian Science and Technology Conference. September 5-8. Lviv, 2016. P. 93.
11. Фізика і хімія поверхності. Кн. 1. За ред. М. Т. Картеля та В. В. Любанова. Київ : Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйко НАН України. Інтерсервіс, 2015. 1085 с.
12. Shishkin A., Shishkina A., Vatin N. Low-shrinkage alcohol cement concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 633–634. 2014. Pp. 917–921.
13. Shishkina A., Shishkin A. Study of the effect of micellar catalysis on the strength of alkaline reactive powder concrete. *EEJET*. 2018. Vol. 3/6 (93). Pp. 46–51.

REFERENCES

1. Runova R.F., Dvorkin L.J., Dvorkin O.L. and Nosovs'kij Yu.L. *V'yazhuchi rehovini* [Binders]. Kyiv : Osnova, 2012, 448 p. (in Ukrainian).
2. Pashchenko O.O. *V'yazhuchi materiali* [Binding materials]. Kyiv : Vishcha Shkola, 1995, 416 p. (in Ukrainian).
3. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fischer H. and Kondratieva N. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019, vol. 13, no. 4, pp. 495–502.
4. Sanytsky M., Usherov-Marshak A., Kropyvnytska T. and Heviuk I. Performance of multicomponent Portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite and limestone. *Cement Wapno Beton*. 2020, no. 25 (5), pp. 416–427.
5. Plank J. Concrete Admixtures Where Are We Now and What Can We Expect in the Future? 19'Ibausil. Weimar. 2015, PV03, 18 p.
6. Roy D. and Daimon M. Effect of Admixtures upon Electrokinetic phenomena during hydration of C_3S , C_3A and port-land cement. *7th intern Congr. Chem. Cements*. Paris, vol. II, 1980, pp. 242–246.
7. Kryvenko P.V., Pushkariova K.K., Baranovskiy V.B., Kochevyh M.O., Hasan Ye.G., Konstantynivskiy B.Ya. and Raksha V.O. *Budiv'el'ne Materialoznavstvo : pidruchnik* [Materials Science in Construction : textbook]. Ed. by P.V. Kryvenko. Kyiv : Lira-K Publ., 2015, 624 p. (in Ukrainian).
8. Pushkariova K.K. and Kochevykh M.O. *Materialoznavstvo dlya arhitektoriv ta dizayneriv : navchal'nyy posibnyk* [Materials Science for Architects and Designers : textbook]. Kyiv : Lira-K Publ., 2018, 424 p. (in Ukrainian).
9. Kondofesky-Mintova L. and Plank J. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete : Proceedings Tenth International Conference. October 2012, Prague, Czech Republic, pp. 423.
10. Sanytskyi M.A. and Kondratieva N.V. Modern Trends in the Development and Production of Silicate Materials ; III All-Ukrainian Science and Technology Conference. September 5–8, 2016, Lviv, p. 93.
11. *Fizika i Khimiya Poverkhnosti. Kniga I. Fizika Poverkhnosti* [Surface Physics and Chemistry. Book I. Surface Physics]. Eds. M.T. Kartel and V.V. Lobanov. Kyiv : Chuiko O.O. Institute of Surface Chemistry of the N.A.S. of Ukraine-Interservis LLC, 2015, 1085 p. (in Ukrainian).
12. Shishkin A., Shishkina A. and Vatin N. Low-shrinkage alcohol cement concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 633–634, 2014, pp. 917–921.
13. Shishkina A. and Shishkin A. Study of the effect of micellar catalysis on the strength of alkaline reactive powder concrete. *EEJET*. 2018, vol. 3/6 (93), pp. 46–51.

Надійшла до редакції: 23.08.2023.

УДК 519.85:519.233.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.74.995

КОНТРОЛЬ ІНФОРМАЦІЇ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ

ЄРШОВА Н. М., *докт. техн. наук, проф.*

Кафедра комп'ютерних наук, інформаційних технологій та прикладної математики, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 918-01-02, e-mail: nersova107@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0198-0883

Анотація. Постановка проблеми. Точність і достовірність вихідного статистичного матеріалу – найважливіше завдання статистичного спостереження. Навіть за гарної організації спостережень або проведення експерименту з тих чи інших причин можуть виявитися неточності, похибки, тобто помилки реєстрації. Аналіз існуючого способу контролю інформації показує, що він занадто складний, використовує різні критерії залежно від обсягу вибірки, критичні значення критеріїв обираються з таблиць, розрахунок критеріїв виконується за формулами та статистичними функціями майстра функцій Excel. **Мета статті** – розроблення способу контролю інформації на основі дисперсійного аналізу даних спостережень. **Результати.** Створено єдину базу даних об'єктів-аналогів. Для коректного створення об'єднаної бази даних потрібно бути впевненим, що об'єднані дані належать до однієї генеральної сукупності. Складність проведення дисперсійного аналізу залежить від обсягу вибірок. Якщо об'єднуються кілька вибірок одного обсягу, легко перевірити їх однорідність за допомогою інструменту «Однофакторний дисперсійний аналіз», у вихідній інформації якого видаються розрахункові і критичні значення F -критерію Фішера. На прикладах показано, що за допомогою дисперсійного аналізу можна встановити не тільки однорідність вибірок, а і причину її порушення. Створено спосіб дисперсійного аналізу однорідності вибірок різного обсягу за допомогою інструменту «Описова статистика» пакета аналізу. Виконані перевірки адекватності моделі регресії активного експерименту. План експерименту визначає точність моделі регресії. У факторному просторі обирається деяка точка і розглядається безліч точок її околиці. У цій околиці проводиться експеримент, на основі якого будується перша модель. Головна вимога до моделі – здатність передбачати напрямки подальших дослідів із необхідною точністю. І точність цього передбачення в усіх напрямках пошуку повинна бути однаковою. Модель, що задовольняє таку вимогу, називається адекватною. Перевірка здійсненості цієї умови називається аналізом адекватності моделі. У процесі проведення експерименту необхідно переконатися, що вимірювані значення відгуку належать до однієї генеральної сукупності і технологічний процес не вимагає регулювання. Для цього здійснюються паралельні досліді. Після проведення чотирьох дослідів за матрицею планування експерименту необхідно переконатися в однорідності отриманих вибірок відгуку та можливості відтворюваності дослідів. **Висновки.** Виконані розрахунки доказують, що: існуючий спосіб контролю інформації занадто складний та має суттєві недоліки – використовуються різні критерії залежно від обсягу вибірки, критичні значення критеріїв обираються з таблиць, розрахунок критеріїв виконується за формулами та статистичними функціями майстра функцій Excel; спосіб контролю інформації на основі дисперсійного аналізу не має цих недоліків і є універсальним, тому що існує один критерій для малих і великих вибірок, розрахункові і критичні значення F -критерію видаються у вихідній інформації інструменту «Однофакторний дисперсійний аналіз», його можна використовувати для створення єдиної бази даних об'єктів-аналогів та перевірки адекватності моделі регресії активного експерименту.

Ключові слова: експеримент; інформація; спосіб контролю; критерій; дисперсійний аналіз; адекватність моделі регресії

CONTROL INFORMATION OF STATISTICAL DATA BASED ON DISPERSION ANALYSIS

YERSHOVA N.M., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Department of Computer Science, Information Technologies and Applied Mathematics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 918-01-02, e-mail: nersova107@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0198-0883

Abstract. Problem statement. The accuracy and reliability of the source statistical material is the most important

task of statistical observation. Even with a good organization of observations or conducting an experiment, for one reason or another, inaccuracies, errors, that is, registration errors, may appear. Analysis of the existing method of information control shows that it is too complicated, uses different criteria depending on the sample size, critical criteria values are selected from tables, calculation is performed using formulas and statistical functions of the Excel function master. **The purpose of the article** is to develop a method of information control based on dispersion analysis of observation data. **Results.** A single database of analogue objects is created. To correctly create a combined database, you need to be sure that the combined data belong to the same general population. The complexity of dispersion analysis depends on the size of the samples. If several samples of the same volume are combined, then it is easy to check their homogeneity with the help of the “One-factor dispersion analysis” tool, in the output of which the calculated and critical value F -Fisher's test - are given. The examples show that with the help of dispersion analysis it is possible not only to establish the homogeneity of samples, but also the reason for its violation. A method of dispersion analysis of the homogeneity of samples of different volumes was created using the “Descriptive statistics” tool of the analysis package. The adequacy check of the regression model of the active experiment was performed. The experiment plan determines the accuracy of the regression model. Some point is selected in the factor space and many points in its neighborhood are considered. An experiment is being conducted in this neighborhood, on the basis of which the first model is being built. The main requirement for the model is the ability to predict the direction of further experiments with the required accuracy. And the accuracy of this prediction in all search directions should be the same. A model that satisfies this requirement is called adequate. Checking the feasibility of this condition is called model adequacy analysis. In the process of conducting the experiment, it is necessary to make sure that the measured response values belong to the same general population and the technological process does not require regulation. For this purpose, is carried parallel experiments. After conducting 4 experiments according to the experiment planning matrix, it is necessary to make sure of the received response samples' homogeneity and the reproducibility of the experiments. **Conclusions.** The performed calculations prove that: the existing method of information control is too complex and has significant disadvantages – different criteria are used depending on the sample size, critical values of the criteria are selected from tables, the calculation is performed using formulas and statistical functions of the Excel function master; the method of information control based on dispersion analysis does not have these disadvantages and is universal, because there is one criterion for small and large samples, the calculated and critical value of F -criterion are given in the initial information of the tool “One-factor dispersion analysis”, it can be used to create a single database analogue objects and to check the adequacy of the regression model at the active experiment.

Keywords: *experiment; information; method of control; criterion; dispersion analysis; regression model adequacy*

Постановка проблеми. Перш ніж проводити кореляційно-регресійний аналіз даних статистичних спостережень, необхідно перевірити вибірку на наявність викидів (занадто великі і занадто малі значення ознаки, що помірно відрізняються в ряді вимірювань). Точність і достовірність вихідного статистичного матеріалу – найважливіше завдання статистичного спостереження. Навіть за гарної організації спостережень або проведення експерименту з тих чи інших причин можуть виявитися неточності, похибки, тобто помилки реєстрації. У існуючому способі контролю інформації для перевірки вихідної інформації на наявність викидів використовують залежно від обсягу вибірки критерії [1]:

- S -критерій – для вибірки, що містить понад 25 елементів;

- M -критерій – для вибірки малого обсягу.

Процедуру перевірки екстремальних значень щодо їх виключення з вибірки як викидів за M -критерієм можна здійснити так:

- переглянути багатовимірну вибірку та скопіювати ознаку з екстремальним значенням у вільний стовпець поруч із вибіркою;

- значення скопійованої ознаки вибірки впорядкувати по мірі зростання чи спадання, щоб екстремальне значення виявилось першим елементом масиву;

- позначити перший елемент масиву – x_1 ;

- за формулою обчислити розрахункове значення критерію M (M_p) та порівняти його з критичним значенням M , що наведене у таблиці 1.

Таблиця 1

Критичні значення критерію M

Обсяг вибірки	Рівень значущості			M_p
	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	
3	0,886	0,941	0,988	$\frac{ x_1 - x_2 }{ x_1 - x_n }$
4	0,679	0,765	0,889	
5	0,557	0,642	0,780	
6	0,482	0,560	0,698	
7	0,434	0,507	0,637	
8	0,479	0,554	0,683	$\frac{ x_1 - x_2 }{ x_1 - x_{n-1} }$
9	0,441	0,512	0,635	
10	0,409	0,477	0,597	– ‘ –
11	0,517	0,576	0,679	$\frac{ x_1 - x_3 }{ x_1 - x_{n-1} }$
12	0,490	0,546	0,642	
13	0,467	0,521	0,615	
14	0,492	0,546	0,641	$\frac{ x_1 - x_3 }{ x_1 - x_{n-2} }$
15	0,472	0,525	0,616	
16	0,454	0,507	0,595	
17	0,438	0,490	0,577	$\frac{ x_1 - x_3 }{ x_1 - x_{n-2} }$
18	0,424	0,475	0,561	
19	0,412	0,462	0,547	
20	0,401	0,450	0,535	
21	0,391	0,440	0,524	
22	0,382	0,430	0,514	
23	0,374	0,421	0,505	
24	0,367	0,413	0,497	
25	0,360	0,406	0,489	

Примітка. Індеси у формулах M_p відповідають розташуванню елемента в упорядкованому масиві ознаки.

Якщо $M_p < M$, то екстремальне значення x_1 з ймовірністю $1 - \alpha$ не є викидом, тобто його не можна виключати з вибірки. І тут екстремальне значення пояснюється проявом мінливості, що притаманно даній генеральній сукупності. Якщо $M_p \geq M$, то виключається з багатовимірної вибірки рядок з екстремальним значенням ознаки.

У разі обсягу вибірки $n > 25$ екстремальні значення можуть бути перевірені за S -критерієм:

$$S_p = (x_1 - \bar{X}) / \sigma, \quad (1)$$

де $\bar{X}$ – вибіркове середнє та σ – стандартне відхилення всієї вибірки ознаки; x_1 – передбачуваний викид. Критичне значення критерію визначається за таблицею 2.

Якщо $|S_p| < S$, екстремальне значення x_1 не є викидом. При $|S_p| \geq S$ із багатовимірної вибірки виключається рядок з

екстремальним значенням.

Таблиця 2

Критичні значення критерію S

Обсяг вибірки	Рівень значущості	
	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
30	2,929	3,402
50	3,082	3,539
100	3,283	3,718
1000	3,884	4,264

Приклад 1. Серед 15 значень ознаки X (прибуток банку) зустрічається негативне значення. Перевірити, чи воно є викидом?

Оскільки обсяг вибірки малий ($n = 15$), використовуємо M -критерій, розрахункове значення якого визначається за формулою:

$$M_p = \frac{|x_1 - x_3|}{|x_1 - x_{n-2}|},$$

де x_1, x_3, x_{n-2} – відповідно перший, третій та 13-й елементи впорядкованого масиву X .

Допустимо $x_1 = -0,8$; $x_3 = 1$; $x_{13} = 6,2$.

Тоді $M_p = \left| \frac{-0,8-1}{-0,8-6,2} \right| = 0,257$. Критичне

значення критерію M для обсягу вибірки $n=15$ при рівні значимості $\alpha = 0,05$ дорівнює 0,525 (табл.1). Отже, розрахункове значення критерію менше критичного і екстремальне значення не є викидом.

Приклад 2. Перевірити на викид значення 526,6 результативної ознаки Y при вибірці обсягом $n=50$. Вибіркове середнє $\bar{X}=113,1945$; стандартне відхилення $\sigma=116,937$. Розрахункове значення критерію дорівнює $S_p = (526,6 - 113,1945) / 116,937 = 3,5353$.

Критичне значення критерію $S = 3,082$ для обсягу вибірки $n=50$ за рівнем значимості $\alpha = 0,05$. Отже, значення 526,6 є викидом і з багатовимірної вибірки слід виключити рядок із цим значенням.

Приклад 3. Грубих помилок у вихідній інформації багатовимірної вибірки обсягом $n=53$ немає, але серед елементів масиву ознаки X_8 (премії та винагороди на одного працівника, %) є два елементи, значення яких різко виділяються на загальному фоні: 0,03 та 4,44. Перевіримо, чи ці значення є викидами. Результати розрахунку наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Контроль інформації про наявність викидів

Контроль інформації	
x1	середнє
0,03	1,0718868
стандартне відхилення	
	0,6759838
Sp	S
-1,54129	3,082
x1=0,03 -	не викид
x1	
4,44	викид
Sp	S
4,9825356	3,082

Визначаємо вибіркове середнє, стандартне відхилення та розрахункове значення S -критерію. В окрему осередку заносимо критичне значення цього

критерію. Отже, перше екстремальне значення не є викидом, тобто у такому розмірі премії та винагороди на одного працівника для аналізованої сукупності підприємств можливі. За розрахунками друге екстремальне значення є викидом.

Аналіз існуючого способу контролю інформації показує, що він занадто складний: використовує різні критерії залежно від обсягу вибірки, критичні значення критеріїв обираються з таблиць, розрахунок критеріїв виконується за формулами та статистичними функціями майстра функцій Excel.

Мета статті – розроблення способу контролю інформації на основі дисперсійного аналізу даних спостережень.

Результати досліджень. Створено єдину базу даних об'єктів-аналогів. Для коректного створення об'єднаної бази даних потрібно бути впевненим, що об'єднані дані належать до однієї генеральної сукупності.

Складність проведення дисперсійного аналізу залежить від обсягу вибірок. Якщо об'єднуються кілька вибірок одного обсягу, тоді легко перевірити їх однорідність за допомогою інструменту «Однофакторний дисперсійний аналіз», у вихідній інформації якого видаються розрахункове і критичне значення F -критерію Фішера. Розрахункове значення критерію обчислюється дисперсійним відношенням

$$F = s_1^2 / s_0^2, \quad s_1^2 > s_0^2, \quad (2)$$

де s_1^2 – факторна дисперсія; s_0^2 – залишкова дисперсія.

Якщо $F \leq F_{кр}$, то на прийнятому рівні значимості робиться висновок про однорідність вибірок.

Приклад 4 [2]. Маємо вибірку трудомісткості одиниці виробленої продукції обсягом 40 елементів. Потрібно перевірити їх приналежність до однієї генеральної сукупності.

Із вибірки будуюмо 8 малих вибірок обсягом 5 елементів (табл. 5) і перевіряємо їх однорідність за допомогою інструменту *Однофакторний дисперсійний аналіз* (табл. 4).

Таблиця 4

Дисперсійний аналіз однорідності вибірок трудомісткості одиниці виробленої продукції

Однофакторний дисперсійний аналіз					
ВИСНОВОК					
Групи	Счет	Сума	Середнє	Дисперсія	
1	5	1,72	0,344	0,01248	
2	5	1,89	0,378	0,00097	
3	5	1,6	0,32	0,00385	
4	5	1,49	0,298	0,00327	
5	5	1,91	0,382	0,00872	
6	5	1,41	0,282	0,00237	
7	5	1,49	0,298	0,00317	
8	5	1,79	0,358	0,01527	
Дисперсійний аналіз					
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення F критичне
Між групами	0,052	7	0,00742	1,185058	0,338923 2,3127412
Усередині груп	0,2	32	0,00626		
Разом	0,252	39			

Таблиця 5

Вибірki малого обсягу

1	2	3	4	5	6	7	8
0,23	0,36	0,42	0,26	0,29	0,36	0,25	0,42
0,43	0,37	0,3	0,37	0,41	0,23	0,31	0,51
0,31	0,43	0,32	0,29	0,41	0,26	0,38	0,31
0,26	0,35	0,25	0,34	0,29	0,27	0,24	0,37
0,49	0,38	0,31	0,23	0,51	0,29	0,31	0,18

Дисперсійний аналіз показує: вибірки однорідні, тому що $F < F_{кр}$, середні значення всіх вибірок практично однакові, тобто елементи вибірки обсягом 40 елементів належать до однієї генеральної сукупності.

Приклад 5. Маємо вибірку премії та винагороди на одного працівника (%) обсягом 44 елементи. Потрібно перевірити їх приналежність до однієї генеральної сукупності.

Із чотирьох малих вибірок одна вибірка має максимальне число ознаки (табл. 6).

Перевіряємо максимальне число на викид за допомогою інструменту *Однофакторний дисперсійний аналіз*. Вихідна інформація наведена в таблиці 7.

Дисперсійний аналіз показує $F > F_{кр}$, тобто вибірки не однорідні, середнє значення вибірки 1 суттєво більше середніх значень інших вибірок. Отже, це є

причиною порушення однорідності вибірок. Вибірka 1 має елемент 4,44 більший величини порівнянно з іншими елементами, тобто 4,44 є викид.

Таблиця 6

Вибірki малого обсягу

1	2	3	4
0,67	1,23	0,84	0,68
0,98	1,04	0,67	0,86
1,16	1,8	1,04	0,96
0,54	0,43	0,66	0,33
1,23	0,88	0,86	0,45
0,78	0,57	0,79	0,74
1,16	0,99	0,34	0,03
4,44	0,24	0,82	0,99
1,06	0,84	0,84	0,24
2,13	0,6	0,67	0,57
1,21	0,82	0,58	1,22

Таблиця 7

Дисперсійний аналіз однорідності вибірок премії та винагороди на одного працівника

Однофакторний дисперсійний аналіз						
ВИСНОВОК						
Групи	Счет	Сума	Середнє	Дисперсія		
1	11	15,36	1,3963636	1,19034545		
2	11	9,44	0,8581818	0,17931636		
3	11	8,11	0,7372727	0,03350182		
4	11	7,07	0,6427273	0,12904182		
Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення	F критичне
Між групами	3,745464	3	1,2484879	3,25932237	0,03129705	2,838745398
Усередині груп	15,32205	40	0,3830514			
Разом	19,06752	43				

Приклад 6. Сформувані вибірку премії та винагороди на одного працівника (%) із вибірок малого обсягу. Розглянуто можливі варіанти.

Варіант 1

№ п/п	Вибірки		
	1	2	3
1	1,23	1,72	0,001
2	1,04	1,7	0,99
3	1,8	0,84	0,24
4	0,43	0,6	0,57
5	0,88	0,82	0,01

Варіант 2

№ п/п	Вибірки		
	1	2	3
1	1,22	4,44	0,67
2	0,68	1,06	0,98
3	1	2,13	1,16
4	0,81	1,21	0,54
5	0,27	2,2	1,23

Варіант 1. Результати дисперсійного аналізу наведені в таблиці 8.

Таблиця 8

Дисперсійний аналіз однорідності вибірок премії та винагороди на одного працівника

Однофакторний дисперсійний аналіз						
ВИСНОВОК						
Групи	Счет	Сума	Середнє	Дисперсія		
1	5	5,38	1,076	0,25123		
2	5	5,68	1,136	0,28348		
3	5	1,811	0,3622	0,17669		
Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення	F критичне
Між групами	1,853	2	0,9266	3,90736	0,0493356	3,885294
Усередині груп	2,846	12	0,2371			
Разом	4,699	14				

Дисперсійний аналіз показує: $F > F_{кр}$, середнє значення вибірки 3 суттєво відрізняється від середніх значень вибірок 1 та 2, тобто вибірки неоднорідні. Аналізуючи

елементи вибірок, відмічаємо, що вибірка 3 має два елементи дуже малої величини. Замінімо значення елемента 0,01 на 1,22 (табл. 9).

Таблиця 9

Дисперсійний аналіз однорідності вибірок

Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення	F критичне
Між групами	0,848344	2	0,42417	1,6084626	0,240506071	3,885293835
Усередині груп	3,164553	12	0,26371			
Разом	4,012897	14				

Дисперсійний аналіз показує: вибірки однорідні, тому що $F < F_{кр}$. Отже, можна отримати вибірку обсягом 15 елементів, коли у вибірці 3 буде тільки один елемент дуже малої величини. Тобто елемент

фактора премії і винагороди 0,03 не є викидом.

Варіант 2. Результати дисперсійного аналізу наведені в таблиці 10. Вони показують, що середнє значення вибірки 2 суттєво відрізняється від середніх значень вибірок 1 та 3.

Таблиця 10

Дисперсійний аналіз однорідності вибірок

Однофакторний дисперсійний аналіз					
ВИСНОВОК					
Групи	Счет	Сума	Середнє	Дисперсія	
1	5	3,98	0,796	0,12793	
2	5	11,04	2,208	1,82547	
3	5	4,58	0,916	0,09103	
Дисперсійний аналіз					
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення F критичне
Між групами	6,129	2	3,0645	4,49686	0,0348779 3,885294
Усередині груп	8,178	12	0,6815		
Разом	14,31	14			

Це причина того, що $F > F_{кр}$, тобто вибірки неоднорідні і їх не можна об'єднати в одну. Аналізуючи елементи вибірок, відмічаємо, що вибірка 2 має елемент 4,44 більший величини порівнянно з іншими

елементами. Замінімо 4,44 на 0 і перевіримо однорідність вибірок.

Результати дисперсійного аналізу наведені в таблиці 11.

Таблиця 11

Дисперсійний аналіз однорідності вибірок

Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення	F критичне
Між групами	0,753653	2	0,37683	1,0953096	0,365661635	3,88529383
Усередині груп	4,12844	12	0,34404			
Разом	4,882093	14				

Дисперсійний аналіз показує $F < F_{кр}$, тобто вибірки однорідні і їх можна об'єднати в одну вибірку обсягом 14 елементів. Отже, число 4,44 є викид.

Таким чином, за допомогою дисперсійного аналізу можна встановити не тільки однорідність вибірок, а і причину її порушення.

Дисперсійний аналіз однорідності вибірок різного обсягу. Як приклад дисперсійного аналізу однорідності вибірок у випадку нерівного числа спостережень за факторами розглянемо дані спостережень терміну служби електричних ламп.

Приклад 7 [3]. Для виготовлення кожної партії ламп взято дріт різних сортів, інші умови виробництва були однакові. Потрібно встановити однорідність партій ламп між собою за терміном служби. Вихідна інформація наведена у таблиці 12.

Покажемо можливість поєднання вибірок різного обсягу за допомогою інструменту «Описова статистика» пакета аналізу. Вихідна інформація наведена в таблиці 13.

Таблиця 12

Дисперсійний аналіз однорідності терміну служби партій електричних ламп

	Термін служби електричних ламп			
Номер партії	1	2	3	4
	1,6	1,58	1,46	1,51
Термін	1,61	1,64	1,55	1,52
служби	1,65	1,64	1,6	1,53
	1,68	1,7	1,62	1,67
	1,7	1,75	1,64	1,6
	1,72		1,66	1,68
	1,8		1,74	

Таблиця 13

Статистична обробка вибірок

1		2		3		4	
Середнє	1,68	Середнє	1,662	Середнє	1,61	Середнє	1,585
Стандартна помилка	0,02609506	Стандартна помилка	0,029	Стандартна помилка	0,03331	Стандартна помилка	0,03128
Медіана	1,68	Медіана	1,64	Медіана	1,62	Медіана	1,565
Мода	#Н/Д	Мода	1,64	Мода	#Н/Д	Мода	#Н/Д
Стандартне відхилення	0,06904105	Стандартне відхилення	0,065	Стандартне відхилення	0,088129	Стандартне відхилення	0,07662
Дисперсія вибірки	0,00476667	Дисперсія вибірки	0,004	Дисперсія вибірки	0,007767	Дисперсія вибірки	0,00587
Експес	0,26586141	Експес	-0,438	Експес	0,881162	Експес	-2,3425
Асиметричність	0,65087455	Асиметричність	0,249	Асиметричність	-0,4234	Асиметричність	0,40824
Інтервал	0,2	Інтервал	0,17	Інтервал	0,28	Інтервал	0,17
Мінімум	1,6	Мінімум	1,58	Мінімум	1,46	Мінімум	1,51
Максимум	1,8	Максимум	1,75	Максимум	1,74	Максимум	1,68
Сума	11,76	Сума	8,31	Сума	11,27	Сума	9,51
Рахунок	7	Рахунок	5	Рахунок	7	Рахунок	6

Таблиця 14

Зведення вихідних даних та дисперсійний аналіз

партії	дисперсія	середнє	обсяг	
1	0,004766667	1,68	7	
2	0,00422	1,662	5	
3	0,012169643	1,63625	8	
4	0,00587	1,585	6	
Дисперсійний аналіз				
alfa=	0,05			
партії 1-2	m1	m2	F	F _{кр}
	6	4	1,12954	6,163132
партії 1-3	6	6	2,55307	4,283866
партії 1-4	5	6	1,23147	4,387374

Аналіз статистичної обробки вибірок показує, що термін служби електричних ламп підпорядковується нормальному закону розподілу, оскільки середнє значення, мода і медіана мають один порядок, а значення ексцесу та асиметричності близькі до нуля.

Вихідна інформація щодо дисперсійного аналізу вибирається з таблиці 13, зводиться в таблицю 14 та виконується дисперсійний аналіз. Дисперсійний аналіз однорідності вибірок різного обсягу виконується шляхом перевірки однорідності двох вибірок, одна з яких – перша партія ламп. Другою вибіркою послідовно є: друга, третя та четверта партії.

Аналіз даних таблиці 14 показує, що для всіх поєднань партій середні дуже близькі за значеннями, а розрахункові значення критерію Фішера менші з відповідними критичними значеннями, тобто $F < F_{кр}$. Отже, вибірки однорідні і можуть бути об'єднані в одну вибірку обсягом 26 елементів.

Перевірка адекватності моделі регресії активного експерименту. План експерименту передбачає умови і кількість проведення дослідів, а головне, – визначає точність отриманої в результаті експерименту моделі регресії. У факторному просторі вибирається деяка точка і розглядається безліч точок її околиці. У цій околиці проводиться експеримент, на основі якого будується перша модель. Вона використовується для передбачення результатів у точках, які не увійшли до плану експерименту.

Головна вимога до моделі – здатність передбачати напрямок подальших дослідів із необхідною точністю. І точність цього передбачення в усіх напрямках пошуку повинна бути однаковою, тобто передбачене значення відгуку може відрізнятись від фактичного значення тільки в межах деякої заздалегідь заданої величини. Модель, що задовольняє таку вимогу, називається адекватною. Перевірка здійсненності цієї умови називається аналізом адекватності моделі.

У процесі проведення експерименту необхідно переконатися, що вимірювані значення відгуку належать до однієї генеральної сукупності і технологічний процес не вимагає регулювання.

Для цього кожний дослід матриці планування експерименту проводять кілька разів (паралельні дослідів). Після проведення чотирьох дослідів за матрицею планування експерименту необхідно переконатися в однорідності отриманих вибірок відгуку та можливості відтворюваності дослідів.

Для оцінення адекватності рівняння регресії експериментальним даним залишкова дисперсія відгуку порівнюється з дисперсією фактичних значень відгуку, тобто оцінка адекватності відповідає оцінці однорідності вибірок відгуку.

Перевірка адекватності моделі регресії проводиться за F -критерієм Фішера, розрахункове значення якого визначається відношенням дисперсії фактичних значень відгуку до залишкової дисперсії $F = S_y^2 / S_0^2$.

У разі негативних результатів, тобто $F > F_{кр}$, слід відрегулювати прилади вимірювання, повторити дослідів та їх обробку. Після підтвердження однорідності вибірок відгуків продовжити дослідів за матрицею планування.

Приклад 8 [4]. У кожній точці плану проводили випробування на міцність трьох зразків бетону. В таблиці 15 наведено умови планування експерименту. Досліджується залежність між ознаками: y – міцність на стиснення бетону у віці 28 діб, МПа; x_1 – цементно/водне (Ц/В) відношення бетону М200–М400; x_2 – активність цементу R_c , МПа; x_3 – модуль крупності $M_{кр}$; x_4 – вміст домішок Q_o , що відмучуються.

Перевіримо адекватність моделі регресії за першими чотирма дослідями. Матриця планування експерименту наведена в таблиці 16, де замість y виступає середнє значення міцності бетону на стиск Y_{cp} , отримане за результатами експерименту.

Таблиця 15

Умови планування експерименту

Фактор		Рівень фактора			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	-1	0	1	
Ц/В	X_1	1,4	2	2,6	0,6
R_u , МПа	X_2	38,8	45,3	51,8	6,5
$M_{кр}$	X_3	1,4	2,2	3	0,8
Q_0	X_4	1	3	5	2

Таблиця 16

Матриця планування

№	X_1	X_2	X_3	X_4	y_1	y_2	y_3	$y_{ср}$
1	2,6	51,8	3	5	44,2	43	43,6	43,6
2	2,6	51,8	3	1	49	49,6	47,5	48,7
3	2,6	51,8	1,4	5	42	39,6	41,1	40,9
4	2,6	51,8	1,4	1	45	44	44,2	44,4

Для цього достатньо перевірити однорідність вибірок за допомогою інструменту *Однофакторний дисперсійний* аналіз. Вихідна інформація наведена в таблиці 17.

Таблиця 17

Дисперсійний аналіз адекватності моделі регресії

Однофакторний дисперсійний аналіз					
ВИСНОВОК					
Групи	Счет	Сума	Середнє	Дисперсія	
y1	4	180,2	45,05	8,543333	
y2	4	176,2	44,05	17,23667	
y3	4	176,4	44,1	6,94	
Дисперсійний аналіз					
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення
Між групами	2,54	2	1,27	0,116443	0,89140046
Усередині груп	98,16	9	10,9067		
Разом	100,7	11			

Таблиця 18

Оскільки $F < F_{кр}$, вибірки міцності бетону на стиск однорідні і лінійна модель регресії адекватна експериментальним даним. Отже, можна продовжувати виконувати дослід за матрицею планування експерименту.

Приклад 9 [5]. Здійснити дисперсійний аналіз впливу на міцність бетону режимів роботи технологічної лінії з виготовлення залізобетонних виробів.

Результати вимірювань міцності бетону

Тиждень	1	2	3	4
Міцність бетону, МПа	22	18,4	21	20,4
	18,5	19,8	22	20,5
	20,1	20,2	18,3	22
	20,4	20,5	19,1	18
	19,7	21	20,3	19

Таблиця 19

Дисперсійний аналіз впливу технологічного процесу на міцність бетону

Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-Значення</i>	<i>F критичне</i>
Між групами	0,128	3	0,04267	0,02404	0,99474864	3,23887152
Усередині груп	28,4	16	1,775			
Разом	28,528	19				

Результати вимірювань міцності таблиці 18. У таблиці 19 наведено зведення протягом місяця по тижнях показані в дисперсійного аналізу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ершова Н. М., Деревянко В. Н., Тимченко Р. А., Шаповалова О. В. Обработка данных средствами Excel при планировании эксперимента : учеб. пособ. для вузов. Днепропетровск : ПГАСА, 2012. 350 с.
2. Дубров А. М., Мхитарян В. С., Трошин Л. И. Многомерные статистические методы для экономистов и менеджеров : учеб. Москва : Финансы и статистика, 2000. 352 с.
3. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів : навч. посіб. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2020. 205 с.
4. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. Москва : Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1971. 576 с.
5. Красовский П. С. Исследование и оптимизация свойств строительных материалов с применением элементов математической статистики : учеб. пособ. Хабаровск : ДВГУПС, 2004. 128 с.

REFERENCES

1. Yershova N.M., Derevyanko V.N., Timchenko R.A. and Shapovalova O.V. *Obrabotka dannykh sredstvami Excel pri planirovanii eksperimenta : ucheb. posobiye dlya vuzov* [Data processing using Excel when planning an experiment: textbook manual for universities]. Dnipropetrovsk : PSACEA Publ., 2012, 350 p. (in Russian).
2. Dubrov A.M., Mkhitaryan V.S. and Troshin L.I. *Mnogomernyye statisticheskiye metody dlya ekonomistov i menedzherov : ucheb.* [Multidimensional statistical methods for economists and managers : textbook]. Moscow : Finance and Statistics Publ., 2000, 352 p. (in Russian).
3. Dvorkin L.Yo. *Ekspyrymental'no-statystychne modelyuvannya pry proektuvanni skladiv betoniv : navch. posib.* [Experimental-statistical modeling in the design of concrete compositions : training manual]. Kyiv : "Condor" Publishing House, 2020, 205 p. (in Ukrainian).
4. Mitropol'skiy A.K. *Tekhnika statisticheskikh vychisleniy* [Statistical computing technique]. Moscow : Main editorial office of physical and mathematical literature of the "Science" Publishing House, 1971, 576 p. (in Russian).
5. Krasovskiy P.S. *Issledovaniye i optimizatsiya svoystv stroitel'nykh materialov s primeneniyyem elementov matematicheskoy statistiki : ucheb. posob.* [Research and optimization of the properties of building materials using elements of mathematical statistics : textbook allowance]. Khabarovsk : DVGUPS Publ., 2004, 128 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 15.09.2023.

УДК 519.85:[512.544.7+519.233.4]

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.85.996

СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ РЕГРЕСІЇ НА ОСНОВІ АПРОКСИМАЦІЇ ТА ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ

ЄРШОВА Н. М., *докт. техн. наук, проф.*

Кафедра комп'ютерних наук, інформаційних технологій та прикладної математики, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 918-01-02, e-mail: nersova107@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0198-0883

Анотація. Постановка проблеми. Найскладніше питання у створенні статистичних моделей – це вибір математичної форми зв'язку, тобто аналітичної функції, яка пов'язує елементи системи, що вивчається. Форма рівняння зв'язку встановлюється на основі теоретичних, технологічних міркувань або інтуїції. Коли заздалегідь важко уявити залежність, будують кореляційне поле точок для двох ознак, за розташуванням яких на площині судять про напрям дії і форму зв'язку. Для глибокого і всебічного вивчення статистичних зв'язків використовуються поняття «кореляція» та «регресія». Завдання кореляційного аналізу – встановлення напрямку дії та виду форми зв'язку. Завдання регресійного аналізу – побудова математичної моделі регресії у вигляді залежності середнього значення результативної ознаки від факторних ознак. Параметри моделі регресії повинні бути підібрані таким чином, щоб крива, побудована за моделлю, проходила між точками і розташовувалася як можна ближче до всіх точок кореляційного поля, тобто проходила практично через його центр. **Мета статті** – створення моделі регресії на основі апроксимації, кореляції та дисперсійного аналізу даних спостережень. **Результати.** Виконано апроксимацію даних багатовимірних вибірок активного і пасивного експериментів, отримано апроксимуючі функції і на їх основі моделі регресії в загальному вигляді. На конкретних прикладах встановлено зв'язок між факторними ознаками, обрано факторну ознаку, що найбільш значуща за тісністю зв'язку з результативною ознакою, отримано придатну для прогнозування багатовимірну модель регресії. Виконано багатфакторний дисперсійний аналіз даних активного експерименту на прикладі дослідження впливу на коефіцієнт однорідності бетону марки цементу, типу заповнювача, терміну випробувань та «періоду виготовлення» бетону. Дисперсійний аналіз показує, що найбільш значущі фактори – це марка цементу, термін випробування, «період виготовлення» бетону та незначна їх взаємодія і тип заповнювача. Запропонована методика значно спрощує процес створення моделі регресії. **Висновки.** Виконані розрахунки доводять, що: на основі апроксимації і кореляції даних спостережень пасивного експерименту можна встановити зв'язок між факторними ознаками, обрати факторну ознаку, що найбільш значуща за тісністю зв'язку з результативною ознакою, отримати придатну для прогнозування багатовимірну модель регресії, і це дозволяє спростити процедуру створення моделі регресії шляхом послідовного переходу від простої моделі до складної; дисперсійний аналіз даних активного експерименту дає можливість оцінити вплив окремих факторів і вплив взаємодії поміж ними. Апроксимація доказує, що моделі регресії даних активного експерименту лінійні. Це підтверджує і дисперсійний аналіз, тому що є незначна взаємодія факторів.

Ключові слова: активний і пасивний експеримент; модель регресії; апроксимація; кореляція; дисперсійний аналіз; результативні і факторні ознаки

THE CREATION OF A REGRESSION MODEL BASED ON APPROXIMATION AND DISPERSION ANALYSIS OF STATISTICAL DATA

YERSHOVA N.M., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Department of Computer Science, Information Technologies and Applied Mathematics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 918-01-02, e-mail: nersova107@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0198-0883

Abstract. Problem statement. The most difficult issue when creating statistical models is the choice of a mathematical form of connection, that is, an analytical function that connects the elements of the system being studied. The form of the connection equation is established on the basis of theoretical, technological considerations or intuition. When it is difficult to imagine the dependence in advance, then a correlation field of points is built for two signs, the location of which on the plane determines the direction of action and the form of communication. For a deep and

comprehensive study of statistical relationships, the concepts of correlation and regression are used. The task of correlation analysis is to establish the direction of action and the form of communication type. The task of regression analysis is to build a mathematical model of regression in the form of the resulting characteristic average value dependence on factor characteristics. The parameters of the regression model should be selected in such a way that the line constructed by the model passes between the points and is located as close as possible to all points of the correlation field, that is, it passes almost through its center. **The purpose of the article** is to create a regression model based on approximation, correlation and dispersion analysis of observational data. **Results.** Data approximation for multidimensional samples of active and passive experiments was performed, approximating functions and regression models in general were obtained based on them. On specific examples, the relationship between the factor features was established, the factor feature was selected. The most significant in terms of the connection closeness with the resulting feature, and a multivariate regression model suitable for forecasting was obtained. A multivariate dispersion analysis of the active experiment data was carried out on the research example of the influence on the homogeneity coefficient of concrete cement brand, type of aggregate, test period and "production period" of concrete. Analysis of dispersion shows that the most significant factors are the cement grade, the test period, the "making period" of the concrete and their minor interaction and the type of aggregate. The proposed technique significantly simplifies the process of creating a regression model. **Conclusions.** The performed calculations prove that: on the basis of the approximation and correlation of the passive experiment observations, it is possible to establish a relationship between the factor characteristics, to choose the factor characteristic that is the most significant in terms of the connection closeness with the resulting characteristic, to obtain a multivariate regression model suitable for forecasting, and this allows simplify the procedure for creating a regression model by successively moving from a simple model to a complex one; dispersion analysis of active experiment data makes it possible to assess the impact of individual factors and the impact of interaction between them. The approximation proves that the regression models of the active experiment data are linear. This is also confirmed by dispersion analysis, because the interaction of factors is insignificant.

Keywords: active and passive experiment; regression model; approximation; correlation; dispersion analysis; effective and factor characteristics

Постановка проблеми. У створенні статистичних моделей найскладніше питання – це вибір математичної форми зв'язку, тобто аналітичної функції, яка пов'язує елементи системи, що вивчається. Форму рівняння зв'язку можна встановити на основі теоретичних, технологічних міркувань або інтуїції, але часто будують кореляційне поле точок для двох ознак, за розташуванням яких на площині судять про напрям дії і форму зв'язку. Для глибокого і всебічного вивчення статистичних зв'язків використовуються поняття «кореляція» та «регресія».

Завдання кореляційного аналізу – це встановлення напрямку дії та виду форми зв'язку. Завдання регресійного аналізу – побудова математичної моделі регресії у вигляді залежності середнього значення результативної ознаки від факторних ознак. Параметри моделі регресії повинні бути підібрані таким чином, щоб крива, побудована за моделлю, проходила між точками і розташовувалася якомога ближче до всіх точок кореляційного поля, тобто проходила практично через його центр.

У цій статті пропонується методика створення моделі регресії на основі

апроксимації, кореляції та дисперсійного аналізу даних спостережень. Для прискорення процесу впровадження у науку та інженерну практику ефективних комп'ютерних засобів обробки даних експерименту покажемо на прикладах можливості інструментів пакета аналізу Excel. Методика значно спрощує процес створення моделі регресії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експерименту належить особливе місце серед способів отримання інформації про внутрішні взаємозв'язки явищ у природі та техніці. Відповідно ускладненню досліджуваних процесів та явищ зростають витрати на апаратуру та проведення експерименту. У ході випробувань збирається велика кількість експериментальних даних, що потребують обробки та аналізу. При цьому тривалість аналізу, осмислення результатів випробувань та їх обліку для коригування характеристик нових виробів дуже значна. Під час проведення спостережень чи експерименту дуже важливо підібрати методи та інструментальні засоби обробки даних експерименту. Інша проблема – створення моделі регресії, яка відповідає

даним спостережень. У праці [1] запропоновано методику планування, проведення і обробки даних активного експерименту. Ця робота – є її продовження.

Мета статті – створення моделі регресії на основі апроксимації, кореляції та дисперсійного аналізу даних спостережень.

Результати досліджень. В основу апроксимації і дисперсійного аналізу даних спостережень закладено метод найменших квадратів.

Допустимо, що в результаті експерименту, який складається з N дослідів, отримана таблиця значень одного відгуку y при зміні одного фактора x , тобто функція відгуку задана у вигляді $y = f(x)$.

x	x_1	x_2	...	x_N
y	y_1	y_2	...	y_N

Для отримання теоретичного опису функції відгуку на площині YOX графічно зображуються таблично задані точки і крива, яка найближче розташована до всіх експериментальних точок.

За формою (зовнішнім виглядом) кривої дають її аналітичний опис у загальному вигляді, тобто у вигляді функції відгуку $\varphi(x)$. У математиці заміна істинної залежності $f(x)$ деякої наближеної $\varphi(x)$, за якої відхилення $\varphi(x)$ від $f(x)$ на аналізованому відрізку було б можливо малим, називається апроксимацією. Функція називається апроксимуючою функцією $\varphi(x)$. Як апроксимуюча функція на практиці зазвичай використовується алгебраїчний багаточлен:

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (1)$$

коефіцієнти якого $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ встановлюються в результаті обробки експериментальних даних. Так, якщо графік апроксимуючої функції пряма, що проходить між експериментальними точками, апроксимуюча функція записується у вигляді:

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x. \quad (2)$$

Тоді за результатами експерименту потрібно визначити два коефіцієнти: a_0, a_1 . Для експериментальних точок, що зображені на рисунку 1, апроксимуючою функцією слід прийняти алгебраїчний багаточлен другого порядку:

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (3)$$

І тут потрібно визначити три коефіцієнти: a_0, a_1, a_2 . Для двох факторів функція відгуку буде не кривою на площині, а поверхнею в тривимірному просторі, що називається поверхнею відгуку. Поверхня відгуку другого порядку для двох факторів записується у вигляді:

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{22}x_2^2. \quad (4)$$

І тут потрібно визначити вже шість коефіцієнтів. Розглянемо розв'язання задачі визначення оптимальних значень параметрів a_0, a_1, a_2 алгебраїчного багаточлена (3). Потрібно визначити такі значення параметрів, за яких теоретичні значення апроксимуючої функції, отримані за формулою (3), мали б мінімальні відхилення від фактичних значень функції $y = f(x)$ (рис. 1) для всіх таблично заданих точок. Для цього використовують метод найменших квадратів.

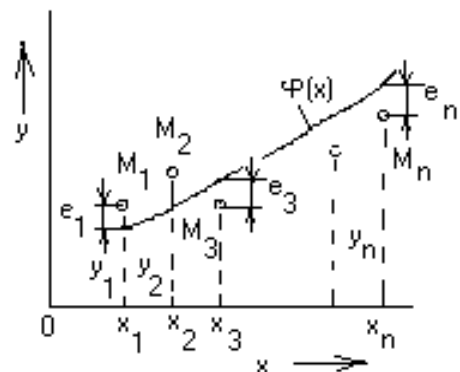


Рис. 1. Геометричний зміст апроксимації

Суть методу полягає в такому:

– записується різниця між значеннями апроксимуючої функції та таблично заданою функцією $y = f(x)$ для кожного

таблично заданого x_i :
 $e_i = \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2) - y_i$, що називається відхиленням значення апроксимуючої функції від відповідного табличного значення;

– мінімізують суму квадратів відхилень за всіма таблично заданими x_i тобто $\sum_{i=1}^n e_i^2 \rightarrow \min$, де n – кількість таблично заданих точок;

– оскільки x_i, y_i відомі (задані таблицею), сума квадратів відхилень є функція параметрів a_0, a_1, a_2 . Ця функція позитивна і має мінімум. Позначимо її через $S(a_0, a_1, a_2)$.

Тоді запис методу найменших квадратів має вигляд:

$$S(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Маємо функцію багатьох змінних. Необхідна умова мінімуму такої функції полягає в рівності нулю всіх її перших частинних похідних, тобто:

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0; \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0; \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0. \quad (6)$$

– Точність апроксимації визначається середньоквадратичною похибкою:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}. \quad (7)$$

Примітка. Умова мінімуму суми самих відхилень, а не їх квадратів, не вирішує проблеми, оскільки сума $\sum_{i=1}^n e_i$ може бути дуже малою і тоді, коли окремі відхилення дуже великі, але мають різні знаки і вони взаємно компенсують одне одного.

Отже, в задачі апроксимації потрібно обчислити такі значення a_0, a_1, a_2 , за яких функція $S(a_0, a_1, a_2)$ досягає мінімуму. Це звичайна задача визначення екстремуму функції трьох змінних без обмежень і може бути розв'язана за допомогою надбудови «Пошук рішення» Excel. Найпростіше розв'язати цю задачу шляхом побудови лінії тренду.

Приклад 1. Знайти апроксимуючу функцію по таблично заданих значеннях x_i, y_i , де x_i – обсяг гіпсу в суміші, %; y_i – вміст еtringіту, % [1]:

x_i	5	15	25	35	45	55
y_i	5	16	17	16	16,5	15

Технологія підбору апроксимуючої функції шляхом побудови лінії тренду:

1. На аркуші ЕТ ввести два ряди даних, що відповідають один одному, тобто x_i, y_i . Виділити їх.

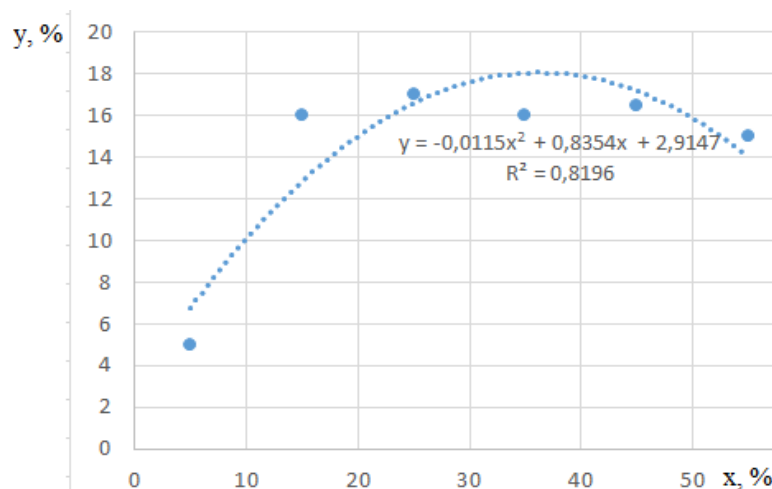


Рис. 2. Точкова діаграма

2. Увійти до пункту меню *Вставка* та вибрати інструмент: $\Rightarrow$ *Діаграма* $\Rightarrow$ *Точкова*. У результаті на аркуші з'явиться точкова діаграма. Оформлена діаграма показана на рисунку 2.

3. Спочатку, коли треба, виконаємо формат осі для кращого вигляду діаграми: на осі клацнути правою кнопкою, увійти в контекстне меню і вибрати операцію *Формат осі*. В діалоговому вікні в параметрах осі задати межі (min, max). Потім на будь-якій точці діаграми клацнути правою кнопкою, увійти в контекстне меню і вибрати операцію *Додати лінію тренду*. Відкриється діалогове вікно *Формат лінії тренду* (рис. 3).

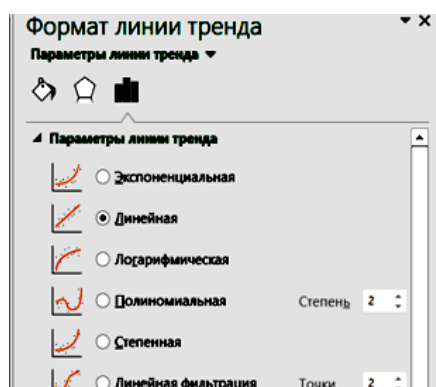


Рис. 3. Діалогове вікно «Формат лінії тренду»

4. У діалоговому вікні *Формат лінії тренду*:

– із запропонованих видів

апроксимуючих функцій вибрати поліноміальну лінію тренду 2-го ступеня;

– для отримання на діаграмі аналітичного виразу апроксимуючої функції необхідно в цьому ж вікні встановити галочки, клацнувши в кружках перед *Показувати рівняння на діаграмі* та *Помістити на діаграму величину достовірності апроксимації*. Закрити вікно.

Таким чином, рівняння апроксимуючої функції, отримане шляхом побудови лінії тренду, має вигляд:

$$\varphi(x) = y = 2,9147 + 0,8354x - 0,0115x^2. \quad (8)$$

Достовірність апроксимації $R^2 = 0,8196$.

За апроксимуючою функцією можна написати математичну модель парної нелінійної регресії в загальному вигляді:

$$\bar{Y}_x = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (9)$$

Математичний запис методу найменших квадратів у цьому випадку має вигляд:

$$S(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^6 (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

Параметри a_0, a_1, a_2 моделі регресії отримаємо за допомогою інструменту *Регресія* пакета аналізу. Вихідна інформація наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати роботи інструменту «Регресія»

ВИСНОВОК ПІДСУМКІВ						
<i>Регресійна статистика</i>						
Множинний R	0,9053354					
R-квадрат	0,8196322					
Нормований R-квадрат	0,699387					
Стандартна помилка	2,511047					
Спостереження	6					
<i>Дисперсійний аналіз</i>						
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значення F</i>	
Регресія	2	85,95892857	42,97946429	6,816341	0,0766017	
Залишок	3	18,91607143	6,305357143			
Разом	5	104,875				
	<i>Коефіцієнти</i>	<i>Стандартна помилка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значення</i>	<i>Нижні 95%</i>	<i>Верхні 95%</i>
Y-перетин	2,9147321	3,247134143	0,897632193	0,4355314	-7,419098	13,248562
x	0,8353571	0,253780849	3,291647678	0,046021	0,0277132	1,6430011
x^2	-0,0115179	0,004109665	-2,802626514	0,0677052	-0,024597	0,0015609

Отже, отримали модель парної нелінійної регресії:

$$\bar{Y}_x = 2,9147 + 0,8354x - 0,0115x^2. (11)$$

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,8196$, тобто рівняння (8) і (11) однакові.

Отже, за виглядом апроксимуючої функції можна отримати модель парної регресії.

Приклад 2. У таблиці 2 наведено вихідні дані пасивного експерименту. Створити математичну модель регресії на основі апроксимації даних досліджень.

У таблиці 2 позначено: Y_3 – рентабельність, %; X_5 – питома вага робітників у складі промислово-виробничого персоналу (ПВП); X_8 – премії та винагороди на одного працівника, %; X_{17} – невикористані витрати, %.

Установимо залежність рентабельності від питомої ваги робітників у складі промислово-виробничого персоналу.

1. На робочому аркуші ЕТ вводимо дані таблиці 2.

2. Виділимо вибірки X_5 і Y_3 . Спочатку

X_5 , потім клацнути на Ctrl виділити Y_3 .

Таблиця 2

Вихідні дані пасивного експерименту [2]

№	X_5	X_8	X_{17}	Y_3
1	0,78	1,23	17,72	13,26
2	0,75	1,04	18,39	10,16
3	0,68	1,80	26,46	13,72
4	0,70	0,43	22,37	12,85
5	0,62	0,88	28,13	10,63
6	0,76	0,57	17,55	9,12
7	0,73	1,72	21,92	25,83
8	0,71	1,70	19,52	23,39
9	0,69	0,84	23,99	14,68
10	0,73	0,60	21,76	10,05
11	0,68	0,82	25,68	13,99
12	0,74	0,84	18,13	9,68
13	0,66	0,67	25,74	10,03
14	0,72	1,04	21,21	9,13
15	0,68	0,66	22,97	5,37
16	0,77	0,86	16,38	9,86

На рисунку 4 представлена діаграма залежності рентабельності від питомої ваги робітників у складі ПВП.

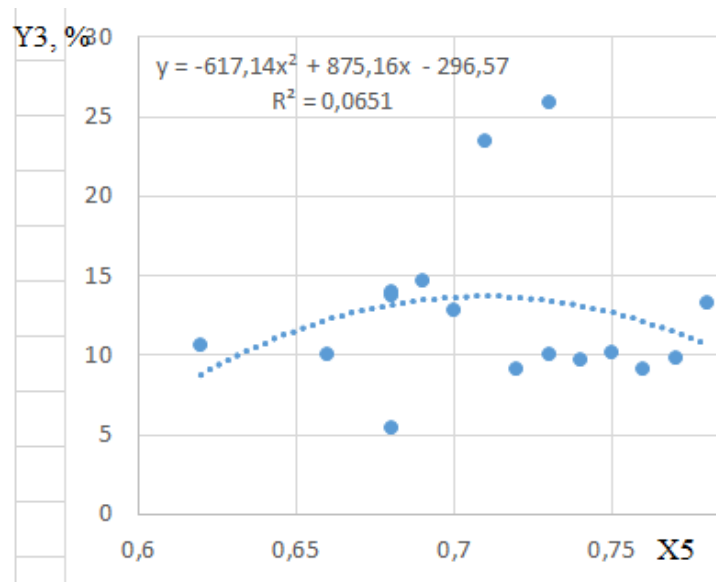


Рис. 4. Залежність рентабельності від питомої ваги робітників у складі ПВП

Отже, рівняння апроксимуючої функції, що отримане шляхом побудови лінії тренду:

$$\varphi(X_5) = y = -296,57 + 875,16X_5 - 617,14X_5^2.$$

Достовірність апроксимації $R^2 = 0,0651$.

Залежність рентабельності від премії та винагороди на одного працівника встановлюється аналогічно. Рівняння апроксимуючої функції має вигляд:

$$\varphi(X_8) = y = 13,65 - 9,6776X_8 + 7,9978X_8^2.$$

Достовірність апроксимації $R^2 = 0,5733$.

Рівняння апроксимуючої функції залежності рентабельності від невикористаних витрат:

$$\varphi(X_{17}) = y = -42,274 + 5,062X_{17} - 0,1138X_{17}^2.$$

Достовірність апроксимації $R^2 = 0,0633$.

Аналіз достовірності апроксимації показує, що на рентабельність підприємства суттєво впливають премії та винагороди працівникам.

Установимо кореляційний зв'язок між ознаками за допомогою інструменту *Кореляція* пакета аналізу. Матриця коефіцієнтів парної кореляції наведена в таблиці 3.

Таблиця 3

Матриця коефіцієнтів парної кореляції

	x5	x8	x17	y3
x5	1			
x8	0,2174254	1		
x17	-0,9379766	-0,200748	1	
y3	0,2240482	0,67640838	-0,27235	1

Аналіз коефіцієнтів парної кореляції показує, що між рентабельністю підприємства та преміями і винагородами працівникам спостерігається помітний позитивний кореляційний зв'язок; між питомою вагою робітників у складі промислово-виробничого персоналу та невикористаними витратами – дуже сильний негативний кореляційний зв'язок.

У математичну модель парної регресії слід включити факторну ознаку X_8 , що найбільш значуща за тіснотою зв'язку з результативною ознакою. Оскільки факторні ознаки X_5 і X_{17} мають сильний кореляційний зв'язок між собою, їх не можна разом вводити в математичну модель багатовимірної регресії. Тому математична модель багатовимірної лінійної регресії має вигляд:

$$\bar{Y}_x = a_0 + a_1x_8 + a_2x_{17}.$$

Отримані апроксимуючі функції нелінійні, тож для прогнозування буде придатна багатовимірна нелінійна модель регресії:

$$\bar{Y}_x = a_0 + a_1x_8 + a_2x_{17} + a_{11}x_8^2 + a_{12}x_8x_{17} + a_{22}x_{17}^2.$$

Приклад 3 [3]. У таблиці 4 наведено умови планування експерименту для дослідження залежності між ознаками: Y_1 – міцність на стиснення бетону у віці 28 діб, МПа; x_1 – цементоводне (Ц/В) відношення бетону М200–М400; x_2 – активність цементу $R_{ц}$, МПа; x_3 – модуль крупності $M_{кр}$; x_4 – зміст домішок Q_0 , що відмучуються. Матриця планування експерименту наведена в таблиці 5.

Таблиця 4

Умови планування експерименту

Фактор		Рівень фактора			Інтервал
натуральний	кодований	-1	0	1	варіювання
Ц/В	x_1	1,4	2	2,6	0,6
$R_{ц}$, МПа	x_2	38,8	45,3	51,8	6,5
$M_{кр}$	x_3	1,4	2,2	3	0,8
Q_0	x_4	1	3	5	2

Таблиця 5

Матриця планування

№	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	$Y_{ср}$
1	2,6	51,8	3	5	44,2	43	43,6	43,6
2	2,6	51,8	3	1	49	49,6	47,5	48,7
3	2,6	51,8	1,4	5	42	39,6	41,1	40,9
4	2,6	51,8	1,4	1	45	44	44,2	44,4
5	2,6	38,8	3	5	31,8	32	32,8	32,2
6	2,6	38,8	3	1	35	34	35,4	34,8
7	2,6	38,8	1,4	5	29,6	31	30,6	30,4
8	2,6	38,8	1,4	1	32	33	31,9	32,3
9	1,4	51,8	3	5	20,6	22	20,7	21,1
10	1,4	51,8	3	1	22,5	21	21,9	21,8
11	1,4	51,8	1,4	5	20,8	19,6	18,4	19,6
12	1,4	51,8	1,4	1	21,2	19	20,7	20,3
13	1,4	38,8	3	5	12,9	11	11,8	11,9
14	1,4	38,8	3	1	13,7	13	11,1	12,6
15	1,4	38,8	1,4	5	11	10,4	9,8	10,4
16	1,4	38,8	1,4	1	12	11	10,3	11,1

Діаграма залежності міцності на стиск бетону від Ц/В наведена на рисунку 5.

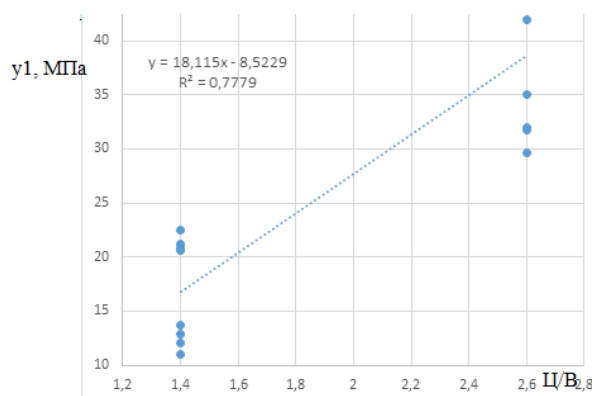


Рис. 5. Залежність міцності на стиснення бетону від Ц/В

Рівняння апроксимуючої функції, отримане шляхом побудови лінії тренду:

$$\varphi(x_1) = y = -8,5229 + 18,115x_1.$$

Достовірність апроксимації $R^2 = 0,7779$.

Отже, апроксимуючі функції всіх факторів лінійні, тобто і моделі регресії даних активного експерименту лінійні.

У математичну модель регресії активного експерименту включаються всі фактори.

$$\bar{Y}_x = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4,$$

де $a_0, a_1, \dots, a_4$ – невідомі параметри моделі регресії.

Кореляційна матриця наведена в таблиці 6. Як видно з кореляційної матриці всі коефіцієнти парної кореляції між факторами дорівнюють нулю, тобто фактори незалежні між собою.

Таблиця 6

Матриця коефіцієнтів парної кореляції

	x1	x2	x3	x4	Уср
x1	1				
x2	-1E-17	1			
x3	0	-4E-17	1		
x4	0	0	0	1	
Уср	0,8933	0,4246	0,0871	-0,0791	1

Між фактором Ц/В і міцністю бетону на стиск спостерігається сильний кореляційний зв'язок, зв'язок міцності з активністю цементу помітний, а з модулем крупності і вмістом домішок практично відсутній.

Багатофакторний дисперсійний аналіз даних спостережень. У процесі вивчення спільного впливу на результативну ознаку більше двох факторів дисперсійний аналіз ускладнюється. Цей аналіз дає можливість оцінити як вплив окремих факторів, так і вплив взаємодії поміж ними. Повторні випробування можна вважати додатковим фактором.

Приклад 4 [4]. Дослідити вплив на коефіцієнт однорідності бетону K марки цементу R , типу заповнювача A , терміну випробувань T та «періоду виготовлення» бетону N . План експерименту показаний у таблиці 7.

Таблиця 7

Матриця експерименту

Коефіцієнт однорідності бетону					
Марка бетону 200					
Марка цементу 400					
Бетон випробуваний через 1 добу					
		N1	N2	N3	
	A1	0,91	0,82	0,6	
	A2	0,94	0,76	0,78	
	A3	0,89	0,62	0,7	
Бетон випробуваний через 28 діб					
	A1	0,9	1,13	1,02	
	A2	1,13	0,94	0,94	
	A3	0,84	0,85	0,82	
Марка цементу 500					
Бетон випробуваний через 1 добу					
	A1	0,78	0,59	0,51	
	A2	0,88	0,55	0,55	
	A3	0,63	0,46	0,56	
Бетон випробуваний через 28 діб					
	A1	0,85	0,72	0,84	
	A2	0,64	0,6	0,54	
	A3	0,87	0,76	0,62	

Заповнювачі: A_1 – гравій річковий; A_2 – щебінь гранітний; A_3 – щебінь вапняковий. Досліджуємо вплив на коефіцієнт однорідності бетону типу заповнювача (фактор A) та «періоду виготовлення» бетону (фактор N). Для цього виконаємо двофакторний дисперсійний аналіз без повторень першої вибірки з таблиці 7.

Зведення дисперсійного аналізу показано у таблиці 8.

Таблиця 8

Дисперсійний аналіз впливу типу заповнювача та «періоду виготовлення» бетону

Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення	F критичне
Рядки	0,038	2	0,019	2,124	0,2351831	6,9442719
Стовпці	0,038	2	0,019	2,098	0,2381534	6,9442719
Похибка	0,036	4	0,009			
Разом	0,113	8				

Аналіз таблиці 8 показує, що розрахункові значення F -критерію цих факторів менші критичних значень. Отже, тип заповнювача та «період виготовлення» не мають суттєвого впливу на коефіцієнт однорідності бетону за випробування зразків через одну добу. Аналогічні результати отримані для другої вибірки таблиці 7.

Досліджуємо вплив на коефіцієнт однорідності бетону марки цементу та терміну випробувань. Для цього виконаємо двофакторний дисперсійний аналіз із повтореннями двох вибірок, одна з яких містить першу та другу вибірки таблиці 7 (марка цементу 400), друга – третю та четверту вибірки (марка цементу 500). Зведення дисперсійного аналізу для марки цементу 400 наведені в таблиці 9.

Таблиця 9

Дисперсійний аналіз впливу марки цементу та терміну випробувань

Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення	F критичне
Рядки	0,1701	1	0,17	11,181	0,00584669	4,7472253
Стовпці	0,0252	2	0,013	0,8291	0,45995296	3,8852938
Взаємодія	0,0161	2	0,008	0,5283	0,60271067	3,8852938
Усередині	0,1826	12	0,015			
Разом	0,3941	17				

Дисперсійний аналіз показує, що для цементу марки 400 суттєво впливає на коефіцієнт однорідності бетону термін випробування ($F > F_{kr}$) і мало впливають «період виготовлення» та їх взаємодія. Для марки цементу 500 спостерігається зворотна картина: термін випробування не суттєво впливає на коефіцієнт однорідності і помітний вплив чинить «період виготовлення» ($F = 4,895 > F_{kr} = 3,885$). Також мало впливає їх взаємодія.

Для аналізу впливу на коефіцієнт однорідності бетону марки цементу з таблиці 7 сформовано таблицю, у якій вибірки марок цементу 400 і 500 зібрані разом, а випробування зразків бетону

виконувалось через одну добу і 28 діб. Дисперсійний аналіз виявив, що в разі випробування зразків бетону через: добу суттєво впливають на коефіцієнт однорідності бетону марка бетону та «періоди виготовлення» і не впливає їх взаємодія; 28 діб – суттєво впливає на коефіцієнт однорідності бетону марка цементу і не впливають «періоди виготовлення» бетону та їх взаємодія. Зведення дисперсійного аналізу всіх вибірок таблиці 7 представлене в таблиці 10.

Додатково обчислено середні значення коефіцієнта однорідності бетону. Дисперсійний аналіз показує, що найбільш значущими факторами є марка цементу, термін випробування, «період

виготовлення» бетону та незначна їх взаємодія. Середнє значення коефіцієнта однорідності бетону зменшується зі зміною марки цементу: $K_{400} = 0,757$ та $K_{500} = 0,612$ за випробування через добу; $K_{400} = 0,952$ і $K_{500} = 0,715$ під час випробування через 28 діб, тобто зі збільшенням віку бетону

коефіцієнт однорідності збільшується, що пояснюється стабілізацією структуроутворення та зняттям термічної напруги. Позначимо: коефіцієнт однорідності бетону $K = x_1$, марка цементу $R = x_2$, термін випробувань $T = x_3$, «період виготовлення» бетону $N = x_4$.

Таблиця 10

Дисперсійний аналіз всіх вибірок

ВИСНОВОК	N1	N2	N3	Разом		
Счет	3	3	3	9		
Сума	2,54	2,2	2,08	6,82		
Середнє	0,847	0,733	0,693	0,7578	Кср	
Дисперсія	0,019	0,011	0,008	0,0141		
<i>AI</i>						
Счет	3	3	3	9		
Сума	2,87	2,92	2,78	8,57		
Середнє	0,957	0,973	0,927	0,9522	Кср	
Дисперсія	0,023	0,02	0,01	0,0139		
<i>AI</i>						
Счет	3	3	3	9		
Сума	2,29	1,6	1,62	5,51		
Середнє	0,763	0,533	0,54	0,6122	Кср	
Дисперсія	0,016	0,004	7E-04	0,0181		
<i>AI</i>						
Счет	3	3	3	9		
Сума	2,36	2,08	2	6,44		
Середнє	0,787	0,693	0,667	0,7156	Кср	
Дисперсія	0,016	0,007	0,024	0,0148		
<i>Разом</i>						
Счет	12	12	12			
Сума	10,06	8,8	8,48			
Середнє	0,838	0,733	0,707			
Дисперсія	0,02	0,035	0,029			
Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-Значення</i>	<i>F критичне</i>
Вибірка	0,547	3	0,182	13,71	2,052E-05	3,0087866
Стовпці	0,116	2	0,058	4,3727	0,0240292	3,4028261
Взаємодія	0,052	6	0,009	0,6476	0,6915676	2,5081888
Усередині	0,319	24	0,013			
Разом	1,034	35				

Загальний вигляд моделі багатовимірної лінійної регресії коефіцієнта однорідності бетону:

$$\bar{Y}_x = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4,$$

де $a_0, a_1, \dots, a_4$ – невідомі параметри моделі регресії.

Отже, апроксимація, кореляція та дисперсійний аналіз даних спостережень дозволяють створювати математичні моделі регресії дослідних ознак.

Висновки

Виконані розрахунки показують:

1. На основі апроксимації і кореляції даних спостережень пасивного

експерименту можна встановити зв'язок між факторними ознаками, обрати факторну ознаку, найбільш значущу за тіснотою зв'язку з результативною ознакою, отримати придатну для прогнозування багатовимірну модель регресії. Це дозволяє спростити процедуру створення моделі регресії шляхом послідовного переходу від простої моделі до складної.

2. Дисперсійний аналіз даних активного експерименту дає можливість оцінити вплив окремих факторів і вплив взаємодії поміж ними. Апроксимація доводить, що моделі регресії лінійні. Це підтверджує і дисперсійний аналіз, тому що є незначна взаємодія факторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ершова Н. М., Деревянко В. Н., Тимченко Р. А., Шаповалова О. В. Обработка данных средствами Excel при планировании эксперимента : учеб. пособ. для вузов. Днепропетровск : ПГАСА, 2012. 350 с.
2. Дубров А. М., Мхитарян В. С., Трошин Л. И. Многомерные статистические методы для экономистов и менеджеров : учеб. Москва : Финансы и статистика, 2000. 352 с.
3. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів : навч. посіб. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2020. 205 с.
4. Вознесенский В. Статистические решения в технологических задачах. Кишинев : Картия Молдовеняскэ, 1969. 232 с.
5. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. Москва : Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1971. 576 с.

REFERENCES

1. Yershova N.M., Derevyanko V.N., Timchenko R.A. and Shapovalova O.V. *Obrabotka dannykh sredstvami Excel pri planirovanii eksperimenta: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Data processing using Excel when planning an experiment : textbook manual for universities]. Dnipropetrovsk : PSACEA Publ., 2012, 350 p. (in Russian).
2. Dubrov A.M., Mkhitaryan V.S. and Troshin L.I. *Mnogomernyye statisticheskiye metody dlya ekonomistov i menedzherov : uchebnyk* [Multidimensional statistical methods for economists and managers : textbook]. Moscow : Finance and Statistics Publ., 2000, 352 p. (in Russian).
3. Dvorkin L.Yo. *Ekspyrymental'no-statystychne modelyuvannya pry proektuvanni skladiv betoniv : navch. posib.* [Experimental-statistical modeling in the design of concrete compositions : training manual]. Kyiv : "Condor" Publishing House, 2020, 205 p.(in Ukrainian).
4. Voznesenskiy V. *Statisticheskiye resheniya v tekhnologicheskikh zadachakh* [Statistical solutions in technological problems]. Kishinev : Kartya Moldovenyaske Publ., 1969, 232 p. (in Russian).
5. Mitropol'skiy A.K. *Tekhnika statisticheskikh vychisleniy* [Statistical computing technique]. Moscow : Main editorial office of physical and mathematical literature of the "Science" Publishing House, 1971, 576 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 11.09.2023.

УДК 697.1:621.178:697.34

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.96.997

ДО ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УМОВ МІКРОКЛІМАТУ ТА БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ У ВИПАДКУ АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ЖЕЛЕЗНЯКОВ Є. О.^{2*}, *асп.*

¹ Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра цивільної інженерії, технології будівництва та захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 045-51-22, e-mail: e.zheleznyakov1996@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6124-201X

Анотація. Постановка проблеми. Умови мікроклімату приміщень будівель та споруд в холодну пору року надзвичайно важливі, оскільки вони є основою безпеки життєдіяльності та здоров'я людей. Аварійні ситуації та значні порушення теплового режиму в приміщеннях і будівлях невизначений час погіршують умови мікроклімату, аж до досягнення його параметрами граничних значень, небезпечних для життя людей. Особливо актуальні ці питання в умовах зростання в Україні чисельності аварійних ситуацій в системах теплопостачання, як через значну зношеність їх інфраструктури загалом, так і через надзвичайні ситуації воєнного часу. Тому дослідження із забезпечення безпеки експлуатації систем теплопостачання у разі аварійних відключень через визначення закономірностей зміни температури в приміщеннях, досягнення критичної температури та часу роботи систем теплопостачання з урахуванням просторового розташування приміщень в будівлях та їх конструктивних особливостей бачаться актуальними. **Мета статті** – дослідження ризику досягнення критичних умов експлуатації систем теплопостачання в аварійних ситуаціях з урахуванням конструктивних особливостей будівель та забезпечення необхідних умов мікроклімату. **Висновок.** На основі проведених досліджень встановлено закономірності впливу просторового розташування приміщень всередині будівель та споруд і конструктивних особливостей будівель на підтримання умов мікроклімату приміщень в аварійних ситуаціях у системах теплопостачання. Визначено граничний час досягнення критичних умов мікроклімату в приміщенні внаслідок аварій в системах теплопостачання, що дозволяє прогнозувати граничні умови ліквідації наслідків аварійних ситуацій і оптимізувати діяльність ремонтно-рятувальних служб. Це особливо важливе у зв'язку з виходом із ладу застарілих систем теплопостачання та бойовими діями на території країни.

Ключові слова: аварійні відключення; мікроклімат; зовнішні кліматичні умови; конструктивні особливості, критичні умови мікроклімату

ON THE ISSUE OF ENSURING THE MICROCLIMATE CONDITIONS AND OPERATIONAL SAFETY OF HEAT SUPPLY SYSTEMS DURING EMERGENCY HEAT SUPPLY SHUTDOWNS

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
ZHELEZNYAKOV Ye.O.^{2*}, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, phone +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian-Economic University, 25, Serhii Efremov St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 045-51-22, e-mail: e.zheleznyakov1996@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6124-201X

Abstract. The issue of ensuring the microclimate conditions of the premises in the buildings and structures during cold season are of exceptional importance, as it is the basis for ensuring the safety of human life and health. Emergencies and significant violations of the thermal regime in premises and buildings worsen microclimate conditions for an indefinite period of time, until its parameters reach extreme values dangerous for human life. These issues are particularly relevant in the context of the growing number of emergency situations in heat supply systems in Ukraine, both due to the high level of wear and tear of their infrastructure in general, and wartime emergencies. Therefore, conducting research to ensure the safety of heat supply systems operation during emergency shutdowns by determining

the regularities of temperature changes in rooms, reaching the critical temperature and operating time of heat supply systems, taking into account the spatial location of rooms in buildings and their design features, is an urgent task. **The purpose of the article.** Study of the risk of reaching critical modes of heat supply systems operation in emergency situations, taking into account the structural features of buildings and ensuring the necessary microclimate conditions. **Conclusion.** On the basis of the conducted research, the regularities of the structural features of buildings and structures in emergency situations in heat supply systems to ensure microclimate conditions in the premises have been determined. The limit conditions for achieving critical indoor microclimate conditions due to accidents in heat supply systems are determined, which allows predicting the limit conditions for eliminating the consequences of emergency situations and optimizing the activities of repair and rescue services, which is especially important in connection with the failure of outdated heat supply systems and combat operations on the territory of the country.

Keywords: *emergency shutdown; microclimate; external climatic conditions; structural features; critical microclimate conditions*

Постановка проблеми. Забезпечення умов мікроклімату приміщень будівель та споруд у холодну пору року винятково важливе завдання, від них залежить безпека життєдіяльності та здоров'я людей [1; 5–7; 9].

Особливо актуальні ці питання в умовах зростання в Україні числа аварій в системах теплопостачання, як через значну зношеність їх інфраструктури загалом, так і через надзвичайні ситуації воєнного часу.

Ці реалії перешкоджають підтриманню нормального стану здоров'я та життєдіяльності населення і можуть спричинити непоправні порушення та руйнування систем життєдіяльності об'єктів, через вихід систем теплопостачання з ладу.

Тому актуальними стали дослідження із забезпечення безпеки експлуатації систем теплопостачання за аварійних відключень через визначення закономірностей зміни температури в приміщеннях, досягнення критичної температури та часу роботи систем теплопостачання з урахуванням просторового розташування приміщень у будівлях та їх конструктивних особливостей.

Дослідження умов мікроклімату приміщень потребує врахування впливу просторового розташування приміщення у будівлі та дії зовнішніх кліматичних факторів, котрі через зовнішні огорожувальні конструкції забезпечують взаємодію між замкнутим простором приміщення та навколишнім середовищем.

Як установлено із практики експлуатації будівель та споруд, приміщення, що мають

значну площу зовнішніх огорожувальних конструкцій, та кутові приміщення характеризуються значними температурними коливаннями внутрішнього повітря [2; 3; 5–7]. Такі коливання несприятливо впливають на самопочуття людей [16–19]. Тому проведення досліджень та визначення температури внутрішнього повітряного середовища стало проблемою сьогодення [1–3].

Мета статті – висвітлити теоретичні дослідження визначення критичних умов мікроклімату в аварійних ситуаціях у системах теплопостачання з урахуванням просторового розташування приміщень усередині будівель та споруд і конструктивних особливостей будівель.

Результати досліджень. Мікроклімат приміщень можна охарактеризувати як такий стан внутрішнього середовища деякого обмеженого простору, котрий безпосередньо впливає на відчуття комфорту, здоров'я та продуктивність людини. Його характерні параметри: температура повітря, рухливість повітря, температура огорожувальних конструкцій та вологість [13–15].

Протягом періоду експлуатації приміщення параметри мікроклімату залежно від особливостей їх просторового розташування всередині будівлі, впливу теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій та дії зовнішніх кліматичних факторів можуть набирати як допустимих та оптимальних, так і критичних значень.

Установлено, що у випадку, коли характер впливу зовнішнього середовища та

теплоакумульовальна здатність огорожувальних конструкцій є величинами відомими, виникає можливість оптимізувати як якість, так і кількість теплової енергії, необхідної для підтримки всередині будівлі оптимальних параметрів мікроклімату [4–6].

Дослідженнями [2; 3; 11] встановлено, що у разі забезпечення нормативного значення повітрообміну приміщень за рахунок зовнішнього повітря в будівлях підтримуються такі вологість і рухливість внутрішнього повітря, які не змінюють визначального впливу температурних показників на теплові умови. Тому у розрахунках забезпеченості теплового режиму можна враховувати тільки температурний фактор мікроклімату.

Таким чином, дослідження змін параметрів мікроклімату приміщень житлових будівель, викликаних аварійними ситуаціями та відключеннями систем теплопостачання, з урахуванням просторового розташування приміщень у будівлях, їх конструктивних особливостей та дії зовнішніх кліматичних факторів, потребує визначення закономірностей зміни температури в приміщеннях, досягнення критичної температури та часу роботи систем теплопостачання.

У разі повного припинення опалення та відсутності внутрішніх тепловиділень для визначення очікуваної температури внутрішнього повітря, яка встановиться в приміщенні через час Z після порушення нормального теплового режиму, визначається за формулою [5]:

$$t_e(Z) = t_{zc} + (t_e - t_{zc}) \times e^{-Z/\beta}, \quad (1)$$

де t_{zc} – температура зовнішнього середовища, °C; t_e – температура внутрішнього повітря до моменту

порушення нормального теплового режиму, °C; Z – кількість часу, що минув з моменту порушення нормального теплового режиму, год.; β – коефіцієнт акумуляції теплової енергії, год.

Як показав проведений нами аналіз, показники коефіцієнта акумуляції теплової енергії β , год визначені [9; 10; 16] для типових серій житлових будинків, однак розвиток будівельної галузі сприяє використанню новітніх та несерійних огорожувальних конструкцій. Тому для досліджень зміни очікуваної температури внутрішнього повітря $t_e(Z)$, °C приміщень під час аварійних ситуацій та відключень систем теплопостачання протягом опалювального періоду виникає необхідність обчислення нових значень коефіцієнта акумуляції теплової енергії β , год для сучасних будівель та споруд. Причому особливу увагу необхідно приділити їх конструктивним особливостям, врахувавши просторове розташування досліджуваних приміщень.

Ми виконали оціночний розрахунок динаміки зміни температури внутрішнього повітря $t_e(Z)$, °C приміщення у жовтні для шести типів стін з урахуванням трьох можливих варіантів просторового розташування приміщення всередині будівлі. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблицях 1–2.

У результаті розрахунку нами отримано дані добової динаміки зміни температури внутрішнього повітря приміщень для шести типів стін у разі аварійного відключення системи теплопостачання, при трьох варіантах просторового розташування приміщення всередині будівлі для жовтня (рис. 1–3).

Таблиця 1

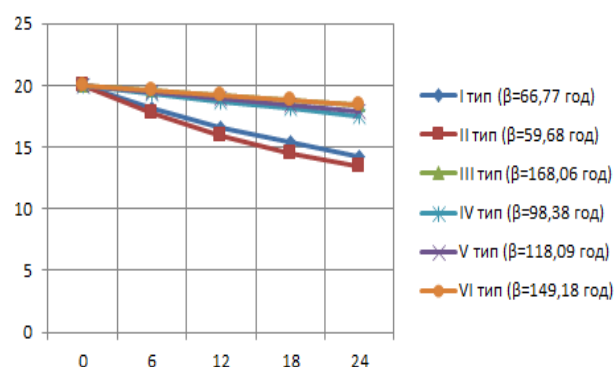
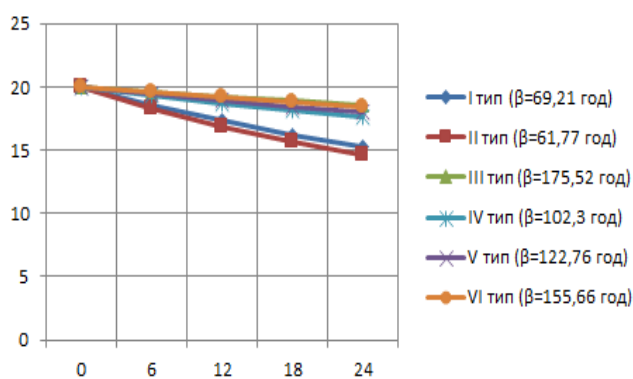
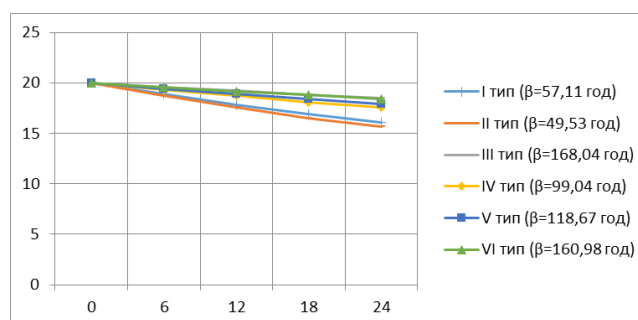
Можливі матеріали огорожувальної конструкції та їх теплотехнічні характеристики

Тип	Матеріал	$R_{g, \frac{2}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}}$	$\delta, \text{м}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{кДж/кгК}$	$\lambda_p, \text{Вт/(м К)}$
I	Декоративна штукатурка	124,3	0,005	1 600	0,84	0,81
	Екструдований пінополістирол ТЕХНОПЛЕКС	79	0,1	35	1,45	0,032
	Стіна з газобетону	45	0,3	500	0,84	0,5
II	Декоративна штукатурка	124,3	0,005	1 600	0,84	0,81
	Мінеральна вата ТЕХНОФАС	4	0,1	110	0,84	0,038
	Стіна з газобетону	45	0,3	500	0,84	0,5
III	Декоративна штукатурка	124,3	0,005	1 600	0,84	0,81
	Екструдований пінополістирол ТЕХНОПЛЕКС	79	0,1	35	1,45	0,032
	З/б панель	35 316	0,18	2 500	0,84	2,04
IV	Декоративна штукатурка	124,3	0,005	1 600	0,84	0,81
	Вата мінеральна	0	0,1	100	0,84	0,045
	Бетон ніздрюватий	588	0,3	700	0,84	0,18
V	Декоративна штукатурка	124,3	0,005	1 600	0,84	0,81
	Екструдований пінополістирол ТЕХНОПЛЕКС	79	0,1	35	1,45	0,032
	Бетон ніздрюватий	588	0,3	700	0,84	0,18
VI	Декоративна штукатурка	124,3	0,005	1 600	0,84	0,81
	Мінеральна вата ТЕХНОФАС	4	0,1	110	0,84	0,038
	З/б панель	36 297	0,185	2 500	0,84	2,04

Таблиця 2

Коефіцієнт акумуляції теплової енергії, год.

Тип огороження	β , год		
	Розташування приміщення		
	кутове	середнє	кутове на верхніх поверххах
I	66,77	69,21	57,11
II	59,68	61,77	49,53
III	168,06	175,52	168,04
IV	98,38	102,30	99,04
V	118,09	122,76	118,67
VI	149,18	155,66	160,98

Рис. 2. Залежності динаміки зміни $t_e(Z), ^\circ\text{C}$ для стін різних типів у жовтні, за кутового розташування приміщенняРис. 1. Залежності динаміки зміни $t_e(Z), ^\circ\text{C}$ для стін різних типів у жовтні, для середнього розташування приміщенняРис. 3. Залежності динаміки зміни $t_e(Z), ^\circ\text{C}$ для стін різних типів у жовтні, за верхнього кутового розташування приміщення

Отримано такі залежності для середнього розташування приміщення зі стіною:

1. I типу ($\beta = 69,21$ год): $y = 9E - 08x^4 - 2E - 05x^3 + 0,0028x^2 - 0,2529x + 20$
2. II типу ($\beta = 61,77$ год): $y = 2E - 07x^4 - 4E - 05x^3 + 0,0041x^2 - 0,3063x + 20$
3. III типу ($\beta = 175,52$ год): $y = 5E - 10x^4 - 4E - 07x^3 + 0,0002x^2 - 0,065x + 20$
4. IV типу ($\beta = 102,3$ год): $y = 4E - 09x^4 - 2E - 06x^3 + 0,0005x^2 - 0,1111x + 20$
5. V типу ($\beta = 122,76$ год): $y = 2E - 09x^4 - 1E - 06x^3 + 0,0004x^2 - 0,0928x + 20$
6. VI типу ($\beta = 155,66$ год): $y = 6E - 10x^4 - 4E - 07x^3 + 0,0002x^2 - 0,0677x + 20$.

Для кутового розташування приміщення зі стіною :

1. I типу ($\beta = 66,77$ год): $y = 2E - 07x^4 - 4E - 05x^3 + 0,0048x^2 - 0,3301x + 20$
2. II типу ($\beta = 59,68$ год): $y = 5E - 07x^4 - 8E - 05x^3 + 0,0074x^2 - 0,4118x + 20$
3. III типу ($\beta = 168,06$ год): $y = 6E - 10x^4 - 4E - 07x^3 + 0,0002x^2 - 0,068x + 20$
4. IV типу ($\beta = 98,38$ год): $y = 4E - 09x^4 - 2E - 06x^3 + 0,0006x^2 - 0,1155x + 20$
5. V типу ($\beta = 118,09$ год): $y = 2E - 09x^4 - 1E - 06x^3 + 0,0004x^2 - 0,0962x + 20$
- VI типу ($\beta = 149,18$ год): $y = 7E - 10x^4 - 5E - 07x^3 + 0,0002x^2 - 0,0708x + 20$.

Для верхнього кутового розташування приміщення зі стіною:

1. I типу ($\beta = 57,11$ год): $y = 4E - 08x^4 - 1E - 05x^3 + 0,0017x^2 - 0,199x + 20$
2. II типу ($\beta = 49,53$ год): $y = 6E - 08x^4 - 2E - 05x^3 + 0,0023x^2 - 0,2295x + 20$
3. III типу ($\beta = 168,04$ год): $y = 5E - 10x^4 - 4E - 07x^3 + 0,0002x^2 - 0,0676x + 20$
4. IV типу ($\beta = 98,04$ год): $y = 4E - 09x^4 - 2E - 06x^3 + 0,0006x^2 - 0,1148x + 20$
5. V типу ($\beta = 118,67$ год): $y = 2E - 09x^4 - 1E - 06x^3 + 0,0004x^2 - 0,0958x + 20$
6. VI типу ($\beta = 160,98$ год): $y = 6E - 10x^4 - 5E - 07x^3 + 0,0002x^2 - 0,0706x + 20$.

Висновки

На основі проведених досліджень встановлено закономірності на забезпечення умов мікроклімату в приміщеннях залежно від конструктивних особливостей будівель та споруд у разі аварійних ситуацій у системах теплопостачання.

Визначені граничні умови досягнення критичних умов мікроклімату в приміщенні внаслідок аварій в системах теплопостачання. Це дозволяє прогнозувати граничні умови ліквідації наслідків аварійних ситуацій і оптимізувати діяльність ремонтно-рятувальних служб, що особливо важливо у зв'язку з виходом із ладу застарілих систем теплопостачання та бойовими діями на території країни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беликов А. С., Кожушко А. П., Сафонов В. В. Охрана труда на предприятиях строительной индустрии. Днепропетровск : ЧП Федоренко А. А., 2010. 528 с.
2. Грудзинский М. М., Ливчак В. Н., Поз М. Я. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности. Москва : Стройиздат, 1982. 256 с.
3. Губернский Е. Д., Корневская Е. И. Гигиенические основы кондиционирования микроклимата жилых и общественных зданий. Москва : Медицина, 1978. 192 с.
4. Дуганов Г. В., Чистяков В. Л., Стрежекуров Э. Е. Новые приборы, применяемые для измерения теплофизических характеристик горных пород. *Приборостроение*. Киев, 1972. Вып. 12. С. 3–5.
5. Данилов М. П., Ветвицкий И. Л., Чесанов Л. Г., Колесник И. А. Теплоустойчивость зданий в экосистеме «Окружающая среда–здание–человек» (аварийно-дефицитные тепловые режимы, гелио- и ветровые аспекты). Днепропетровск : «Поліграфіст», 2005. 263 с.
6. Ветвицкий И. Л., Каспийцева В. Ю., Колесник И. А., Шевченко А. А. Исследование влияния теплопроводных включений на параметры микроклимата помещений при отключении системы отопления. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2013. Вып. 70. С. 65–69.
7. Беликов А. С., Колесник И. А., Рагимов С. Ю., Маладыка И. Г., Вовк Д. В. Исследование влияния теплопроводных включений на микроклимат помещений при аварийных ситуациях в системах теплоснабжения. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вып. 98. С. 20–24.
8. Стрежекуров Э. Е., Гашко С. В. Исследование терморadiационной напряженности в горячих цехах металлургического производства. *Гигиена и санитария*. 1980. Вып. 9. С. 62–64.
9. Табунщиков Ю. А. Строительные концепции зданий XXI века в области теплоснабжения и климатизации. *АВОК*. 2005. № 4. С. 4–7.
10. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева. Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. 278 с.

11. Шкловер А. М., Васильев В. Ф., Ушаков Ф. В. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. Москва : Стройиздат, 1982. 256 с.
12. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Общие требования : стандарт ГОСТ 12.1.005-88. Введ.01.01.89. Система стандартов безопасности труда. Ч. 1. С. 165–239. Москва, 1996. Изм. 1 (ИУС.2000.N9).
13. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. (Державні будівельні норми України). URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>
14. ДСТУ Б EN ISO 7730. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=28002
15. ДСТУ Б EN 15251. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=28004
16. Кононович Ю. В. Тепловой режим зданий массовой застройки. Москва : Стройиздат, 1986. 158 с.
17. Castaldo Veronica Lucia, Pigliautile Ilaria, Rosso Federica, Pisello Anna Laura, Cotana Franco. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants: a case study in central Italy. ScienceDirect : web-site. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed: 01 September 2020).
18. Gobakis Kostantinos, Kolokotsa Dionysia. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. ScienceDirect: web-site. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735> (Accessed: 01 September 2020).
19. Beker Braian M., Cervellera Camila, De Vito Antonella, Musso Carlos G. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. ClinMed International Library: web-site. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

REFERENCES

1. Belikov A.S., Kozhushko A.P. and Safonov V.V. *Okhrana truda na predpriyatiyakh stroitel'noy industrii* [Protection of labour on the enterprises of build industry]. Dnipropetrovsk : PE Fedorenko A. A., 2010, 528 p. (in Russian).
2. Grudzynsky M.M., Livchak V.N. and Poz M.Ya. *Otopstello-ventilyatsionnye sistemy zdaniy povyshennoy etazhnosti* [Heating-ventilation systems of buildings of the promoted floor]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1982, 256 p. (in Russian).
3. Gubernsky Ye.D. and Korenevskaya Ye.I. *Gigiyenicheskiye osnovy konditsionirovaniya mikroklimata zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Hygienic bases of conditioning of microclimate of dwelling and public buildings]. Moscow : Medicine Publ., 1978, 192 p. (in Russian).
4. Duganov G.V., Chistyakov V.L. and Strezhekurov T.Ye. *Novyye pribory, primenyayemye dlya izmereniya teplofizicheskikh kharakteristik gornykh porod* [New devices applied for measuring of heating-physical descriptions of mine breeds]. *Pryborostroeniye* [Instrumentation]. Vol. 12, Kyiv, 1972, pp. 3–5. (in Russian).
5. Danilov M.P., Vetrovskiy I.L., Chesanov L.G. and Kolesnik I.A. *Teplovaya ustoychivost' zdaniy v ekosisteme "Sreda–zdaniye–chelovek" (avariyno-defitsitnyye teplovyye rezhimy, solnechnyy i vetrovoy aspekty)* [Thermal stability of buildings in the ecosystem "Environment–building–man" (emergency-deficient thermal regimes, solar and wind aspects)]. Dnipropetrovsk : Poligrafist Publ., 2005, 263 p. (in Russian).
6. Vetrovskiy I.L., Kaspiytseva V.Yu., Kolesnik I.A. and Shevchenko A.A. *Issledovanie vliyaniya teploprovodnykh vklyuchenii na parametry mikroklimata pomeshchenii pri otklyuchenii sistemy otopleniya* [Investigation of the influence of heat-conducting inclusions on the parameters of the microclimate of premises when the heating system is turned off]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2013, iss. 70, pp. 65–69. (in Russian).
7. Belikov A.S., Kolesnik I.A., Ragimov S.Yu., Maladyka I.G. and Vovk D.V. *Issledovaniye vliyaniya teploprovodnykh vklyuchenii na mikroklimat pomeshchenii pri avariynnykh situatsiyakh v sistemakh teplosnabzheniya* [Study of the influence of heat-conducting inclusions on the microclimate of premises in emergency situations in heat supply systems.]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2017, iss. 98, pp. 20–24. (in Russian).
8. Strezhekurov E.Ye. and Gashko S.V. *Issledovaniye termoradiatsionnoy napryazhennosti v goryachikh tsekhakh metallurgicheskogo proizvodstva* [Investigation of thermo-radiation stress in hot shops of metallurgical production]. *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 1980, iss. 9, pp. 62–64. (in Russian).

9. Tabunshchikov Yu. A. *Stroitel'nyye kontseptsii zdaniy KHKHÍ veka v oblasti teplosnabzheniya i klimatizatsii* [Construction concepts for buildings of the XXI century in the field of heat supply and air conditioning]. AVOK [AVOK]. 2005, iss. 4, pp. 4–7. (in Russian).
10. Borkhert R. and Yubits V. *Tekhnika infrakrasnogo nagreva* [Infrared heating technique]. Leningrad : Gosenergoizdat Publ., 1963, 278 p. (in Russian).
11. Shklover A.M., Vasil'yev V.F. and Ushakov F.V. *Osnovy stroitel'noy teplotekhniki zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Fundamentals of building heat engineering for residential and public buildings]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1982, 256 p. (in Russian).
12. *Obshchiye sanitarno-gigiyenicheskiye trebovani k vozdukhу rabochey zony. Obshchiye trebovaniya : standart GOST 12.1.005-88. Sistema standartov bezopasnosti truda* [General sanitary and hygienic requirements for the air in the working area. General requirements : standard GOST 12.1.005-88. System of occupational safety standards]. Entered 01/01/89, part 1, Moscow, 1996, pp. 165–239. Change 1 (IUS C.2000.N9). (in Russian).
13. *DBN V.2.5-67:2013. Opalennya, ventylyatsiya ta kondytsionuvannya* [SCN V.2.5-67:2013. Heating, ventilation, air conditioning]. Valid from 2013-01-01. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2013. State Building Codes of Ukraine. (in Ukrainian). URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>
14. *DSTU B EN ISO 7730. Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analitychne vyznachennya ta interpretatsiya teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriyiv lokal'noho teplovoho komfortu* [DSTU B EN ISO 7730. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria]. Valid from 2012-01-01. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. State Building Codes of Ukraine. (in Ukrainian). URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=28002
15. *DSTU B EN 15251. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen' dlya proektuvannya ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel' po vidnoshenni do yakosti povitrya, teplovoho komfortu, osvittlennya ta akustyky* [DSTU B EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics]. Valid from 2012-01-01. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. State Building Codes of Ukraine. (in Ukrainian). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=28004
16. Kononovich Yu.V. *Teplovoy rezhim zdaniy massovoy zastroйки* [Infrared heating technique]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1986, 158 p. (in Russian).
17. Castaldo Veronica Lucia, Pigliautile Ilaria, Rosso Federica, Pisello Anna Laura and Cotana Franco. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants : a case study in central Italy. ScienceDirect : web-site. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed : 01 September 2020).
18. Gobakis Kostantinos and Kolokotsa Dionysia. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735> (Accessed : 01 September 2020).
19. Beker Braian M., Cervellera Camila, De Vito Antonella and Musso Carlos G. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. ClinMed International Library : web-site. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>.

Надійшла до редакції: 02.09.2023.

УДК 669.86:536.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.103.998

АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ЧЕРЕЗ СВІТЛОПРОЗОРИ ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

ОРЛОВА Н. О., канд. техн. наук, с. н. с.

Відділ моделювання та ідентифікації теплових процесів в енерготехнологічному обладнанні, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Пожарського 2/10, 61000, Харків, Україна, тел. +38 (066) 170-16-95, e-mail: orlova@ipmach.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-9387-6823

Анотація. Постановка проблеми. Енергозбереження в умовах дефіциту та постійного зростання вартості енергоносіїв – основне завдання житлово-комунального комплексу. Наряду із застосуванням енергозберігального обладнання в системах життєзабезпечення будівель, суттєвого зниження енергоспоживання можна досягти впровадженням у будівництво енергоефективних конструктивних рішень. Світлопрозорі конструкції більш незахищені, оскільки тепловтрати через них можуть досягати 54 % від загальних, тому потребують нових підходів до визначення коефіцієнтів теплопередачі. На підставі аналізу процесів тепломасопереносу поелементно для віконних блоків нестандартної форми проведено коректне оцінення коефіцієнта теплопередачі. **Мета роботи** – на підставі аналізу формування теплофізичних процесів через світлопрозорі огороджувальні конструкції вдосконалити залежності для розрахунку коефіцієнта теплопередачі конструкцій склопакетів з урахуванням кліматичного навантаження і встановлення взаємозв'язку між їх основними теплотехнічними характеристиками. **Результати.** На підставі аналізу теплофізичних процесів, які відбуваються у світлопрозорих конструкціях, отримано залежності коефіцієнта теплопередачі віконного блока нестандартної форми від швидкості вітру, з урахуванням орієнтації, висоти будівлі з поелементним визначенням. Установлено основні фактори, що впливають на значення коефіцієнта теплопередачі віконного блока, тобто подані залежності можуть бути використані для оцінення енергозберігальних заходів під час проведення енергоаудиту будівель. **Наукова новизна і практична значимість.** Отримано залежності для визначення коефіцієнта теплопередачі світлопрозорих конструкцій, з урахуванням тепловтрат через віконні рами, місця розташування вікна в отворі стіни і конструктивних рішень. Аналіз теплофізичних процесів, які відбуваються у віконних блоках, дозволить не тільки розрахувати коефіцієнт теплопередачі для вікон нестандартної форми, а й запропонувати енергозберігальні заходи, направлені на зниження тепловтрат, оскільки актуальним наразі бачиться збільшення скління для забезпечення норм освітленості і комфортних умов. Отримано кількісні результати променистої і конвективної складової для поелементного визначення коефіцієнта теплопередачі віконних блоків і тепловтрат через них, які дозволяють установити першочерговість енергозберігальних заходів.

Ключові слова: коефіцієнт теплопередачі; тепловтрати; променистий теплообмін; конвективний теплообмін; швидкість повітря

ANALYSIS OF CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHODS OF DETERMINING HEAT LOSSES THROUGH WINDOW CONSTRUCTION

ORLOVA N.O., Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res.

A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10, Pozharskoho St., Kharkiv, 61000, Ukraine, tel. +38 (066) 170-16-95, e-mail: orlova@ipmach.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-9387-6823

Abstract. Problem statement. Energy conservation in the conditions of deficit and constant growth in the cost of energy carriers is the main task of the housing and communal complex. Along with the use of energy-saving equipment in life support systems, a significant reduction in energy consumption can be achieved by introducing energy-efficient structural solutions into construction. Translucent structures are considered more unprotected, since heat losses through them can reach 54 % of the total, so they require new approaches to determining heat transfer coefficients. On the basis of the analysis of heat and mass transfer processes element by element for window blocks of non-standard shape, a correct estimate of the heat transfer coefficient was made. **The purpose of the article** on the basis of the analysis of the thermophysical processes formation through translucent enclosing structures, improve the dependences for calculating

the heat transfer coefficient of double-glazed structures taking into account the climatic load and establishing the relationship between their main thermotechnical characteristics. **Results.** Based on the analysis of thermophysical processes occurring in opaque structures, the dependence of the heat transfer coefficient of non-standard shape window block on the wind speed, taking into account the orientation of the building height in the element-by-element determination, was obtained. The main factors affecting the value of the heat transfer coefficient of the window unit have been established, i. e., these dependencies can be used to evaluate energy-saving measures during an energy audit. **Scientific novelty and practical value.** Dependencies for determining the heat transfer coefficient of translucent structures, taking into account heat loss through window frames, the location of the window in the wall opening, and structural solutions are obtained. An analysis of the results of heat transfer coefficients for windows of non-standard shape, which are aimed at choosing the optimal technical solutions of window blocks from the standpoint of energy and resource saving, taking into account climatic parameters, was conducted. Quantitative results of the radiant and convective components for the element-by-element determination of the heat transfer coefficient of window blocks and heat losses through them are obtained, allowing to establish the priority of energy-saving measures.

Keywords: heat transfer coefficient; heat loss; radiant heat exchange; convective heat exchange; air velocity

Постановка проблеми. Забезпечення комфортних умов під час періодичних відключень і дефіциту енергоносіїв на сьогоднішній день – основне завдання житлово-комунального сектора. У зв'язку з тим, що до 50 % втрат (від загальних) тепла припадає на вікна, підвищуються вимоги до їх опору теплопередачі, оскільки світлопрозорі конструкції це не тільки елемент будівлі, а і складова частина системи кліматизації. Зовнішні збурення однаково впливають як на стіни, так і на світлопрозорі конструкції, однак останні більш незахищені, тому потребують нових підходів до визначення коефіцієнтів теплопередачі. Правильна оцінка коефіцієнта теплопередачі через світлопрозорі конструкції дозволить коректно оцінити енергозберігальні заходи.

Аналіз публікацій. Коефіцієнти теплопередачі світлопрозорих конструкцій визначаються декількома способами: це чисельне моделювання і визначення коефіцієнтів теплопередачі за методикою, викладеною в [1; 2].

У статтях [3; 4] наведено загальні методики визначення теплових втрат на основі [1; 2], а саме коефіцієнт тепловіддачі прийнятий $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ для швидкості вітру 9 м/с , без урахування її зміни по висоті і турбулізації потоку. У праці [5] наведено узагальнення для проектування енерго-ефективних світлопрозорих конструкцій.

У роботі [6] описано вдосконалену методику оцінювання теплотехнічних параметрів віконних конструкцій з високим рівнем теплозахисту. Комплексний підхід до

визначення фактичного значення опору теплопередачі віконних систем, заснований на вимірюванні середньої температури внутрішньої поверхні конструкції та визначенні фактичного коефіцієнта тепловіддачі, проаналізовано в статті [7]. Цей метод дозволяє більш повно врахувати термічну неоднородність і досягти високої точності дослідження, проте вимагає великої кількості вимірювань, щоб запобігти похибкам.

У праці [8] виконано аналіз різних методів підвищення опору теплопередачі склопакетів. Залежність опору теплопередачі вікон від різних чинників досліджено у статті [9]. Водночас застосування енергоефективних склопакетів вимагає адекватної оцінки цих якостей, що значно ускладнюється суперечливістю методологій розрахунку теплотехнічних якостей віконних конструкцій.

У роботі [10] наведено результати розгляду невідповідностей у викладенні вимог і формулювань для розрахунку віконних конструкцій, що містяться в різних нормативних документах, тобто першочерговим постає уточнення методологій розрахунку теплотехнічних якостей віконних конструкцій.

Робота [11] за негативних зовнішніх температур досліджує температури на різних частинах внутрішньої поверхні віконної конструкції та встановлює, що на склопакеті температура завжди нижча, ніж на профілі.

Передача тепла через вікна має складний характер і відбувається одночасно

з теплопровідністю, випромінюванням і конвекцією. Аналіз публікацій показав, що у вивчених статтях мало відображено питання визначення опору теплопередачі склопакетів залежно від кліматичних параметрів.

Для отримання залежностей, які повно відображають теплотехнічні якості вікон, необхідно виявити взаємозв'язок між кількістю передачі тепла і розглянути кожну складову окремо, а також установити їх взаємний вплив.

Мета роботи – вдосконалення розрахунку коефіцієнта теплопередачі конструкцій склопакетів з урахуванням кліматичного навантаження і встановлення взаємозв'язку між їх основними теплотехнічними характеристиками.

Виклад матеріалу. Світлопрозорі конструкції являють собою комбінацію твердих прозорих пластин (скла) і повітряних прошарків, з'єднаних рамною конструкцією. Теплоперенесення через світлопрозорі огороження відбувається досить швидко і може розглядатися як квазістаціонарний процес.

Коефіцієнт теплопередачі вікна дорівнює:

$$K = \frac{1}{R_{\text{скл}}} = \frac{1}{R_6 + \sum_{i=1}^{i-1} R_c + \sum_{i=1}^{i-1} R_{\text{п. пр}} + R_3}, \quad (1)$$

де $R_B = 1/\alpha_B$, R_c , $R_{\text{п. пр}} = 1/(\alpha_k + \alpha_{\text{пр}})$, $R_3 = 1/\alpha_{\text{скл}}$ – термічний опір: на внутрішній поверхні скління, самого скла, повітряного прошарку та на зовнішній поверхні скління, відповідно.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі (КТВ) температура скління розглядається як середня за товщиною прийнявши для внутрішнього скла значення t_1 і для зовнішнього t_2 .

В інженерних розрахунках прийнято тепловіддачу на зовнішніх поверхнях не поділяти на променисту і конвективну складові. Коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній або внутрішній поверхні за фізичним змістом – це щільність теплового потоку, що віддається відповідною поверхнею навколишньому середовищу (або

навпаки) за різниці температури поверхні та середовища в 1°C .

Складова природної конвекції на внутрішній поверхні огорожі визначається коефіцієнтом тепловіддачі на вертикальній площині внутрішнього скла. У разі ламінарного режиму перебігу повітряного потоку поверхнею скла можна визначити з наступного критеріального рівняння [12]:

$$Nu_x = 0,12 \cdot Gr_x^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

де $Nu_x = \frac{\alpha_6 \cdot x}{\lambda_6}$ – критерій Нуссельта;

$Gr_x = g\beta \cdot \frac{\Delta t \cdot x^3}{\nu^2}$ – критерій Грасгофа; x – поточний розмір уздовж поверхні скління за напрямом руху повітря.

Підставивши у (2) фізичні характеристики повітря в діапазоні зміни температур від 20°C до 50°C , а також $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ отримаємо $\alpha_k = 6,95 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$.

Конвективний теплообмін між склом характеризується:

$$Nu_x = 0,231 Gr_x^{0,3}. \quad (3)$$

Аналіз опору повітряного прошарку проводиться на прикладі віконного блока, (рис. 1), схема конвективного теплообміну в приміщенні наведена на рисунку 2.

Перехід від ламінарного до турбулентного режиму течії повітря між склом здійснюється за

$$Gr_B = g \cdot \beta \cdot \frac{\Delta t \cdot b^3}{\nu_B^2}, \quad (4)$$

де $\Delta t' = \frac{t_{\text{вн}} - t_3}{2} = 21,5$; $t_{\text{ср}} = t_{\text{вн}} - \Delta t'$; $\Delta t = 20^\circ\text{C}$, $\nu_B = 13,15 \cdot 10^{-6}$, підставивши значення в (4), отримаємо, що $Gr_B = 14,1 \gg 10^3$, отже, режим руху повітря між склом турбулентний.

Еквівалентну теплопровідність знаходимо з формули:

$$\varepsilon = \frac{\lambda_{\text{ек}}}{\lambda_B} = 0,4 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,2} = 10,04,$$

$$\lambda_{\text{ек}} = \varepsilon \cdot \lambda_B = 10,04 \cdot 0,0272 = 0,243 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

тоді термічний опір повітря:

$$R_{в.пр.} = \frac{\delta}{\lambda_{ек}} = \frac{10,15}{0,243} = 0,6173 \frac{м^2 \cdot К}{Вт}.$$

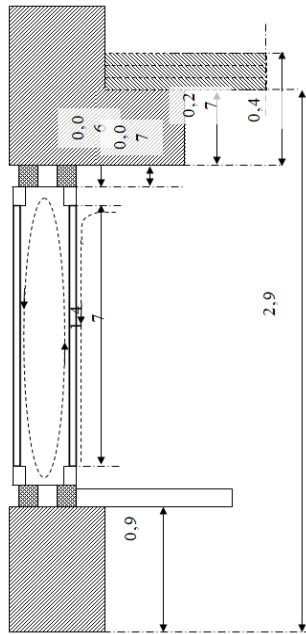


Рис. 1. Схема віконного отвору

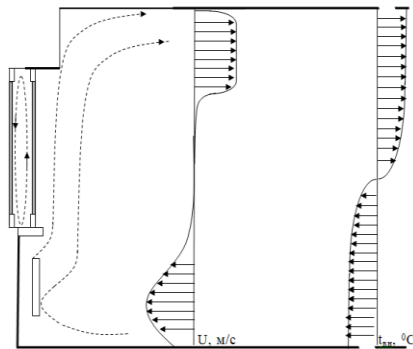


Рис. 2. Схема конвективного теплообміну у приміщеннях

Для вікон $\delta = 0,4$ м, отже $G_{гп}$ за тих саме теплофізичних параметрів:

$$G_{гв} = 9,81 \cdot \frac{20}{271,5} \cdot \frac{0,4^3}{(13,15 \cdot 10^{-6})^2} = 2,634,$$

$$G_{г \cdot Pr} = 2,634 \cdot 0,707 = 1,8625 \cdot 10^8,$$

$$\varepsilon_{к} = 0,4 \cdot (G_{г \cdot Pr})^{0,2} = 18,03,$$

$$\lambda_{ек} = \varepsilon \cdot \lambda_{в} = 18,03 \cdot 0,0242 = 0,4364 \frac{Вт}{м \cdot К},$$

$$R_{в.пр.} = \frac{\delta}{\lambda_{ек}} = \frac{0,4}{0,4364} = 0,9166 \frac{м^2 \cdot К}{Вт},$$

$$G_{гкр} = 10^8 \cdot 10^9,$$

$$x_{кр} = (1 + 0,007636 \cdot t) \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\Delta t}{273 + t} \right).$$

Якщо $\Delta t = 10^0 \text{C}$, $t_{ср} = 15^0 \text{C}$,
 $v = 14,61 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 0,0255 \frac{Вт}{м \cdot К}$,

$$G_{гн} = 7,6036 \cdot 10^9, \quad G_{г \cdot Pr} = 5,3529 \cdot 10^9,$$

$$\overline{Nu}_{гн} = 1623,43, \quad \alpha = 28,16 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}, \text{ а термічний опір}$$

$$R = 0,0355 \frac{м^2 \cdot К}{Вт}.$$

Променистий теплообмін у просторі між поверхнями скління, зверненими одна до одної, який з урахуванням діатермічності середовища, стаціонарності процесу, наведеного коефіцієнта випромінювання $\varepsilon_{пр} = 0,8815$, постійної Стефана–Больцмана для абсолютно чорного тіла $\sigma_0 = 5,67 \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$

може бути визначений відповідно до рівняння:

$$Q_{1-2} = q_{1-2} \cdot F_1 = 4,998 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де T_1 , T_2 – абсолютна температура внутрішнього та зовнішнього скла.

З урахуванням орієнтації промениста складова дорівнює на східній та південній стороні $Q_{пр} = 1144,5 \frac{Вт}{м^2}$, на північній

$$Q_{пр} = 1051,1 \frac{Вт}{м^2}, \text{ для віконного переплетення}$$

$$Q_{пр} = 1034,0 \text{ Вт}.$$

Виходячи з аналізу умов натікання повітряного потоку на навітряну стіну, можна зазначити, що велика частина вікон потрапляє в область загальмованого потоку, в якій формування тепловіддачі на зовнішній поверхні відбувається за впливу пульсаційної складової U' . Значення α у цьому випадку може бути прийняте згідно з $\alpha_{max} = 21 \cdot \rho_{г} \cdot U'$.

В області поблизу кута будівлі, в якій відбувається стік повітряного потоку з навітряного боку, показник КТО визначається згідно з $\alpha_H^{пр} = 0,708 \cdot \alpha_{max}$.

Для віконних прорізів, розташованих в області течій, що рухаються вздовж поверхні стіни (це в основному області відривних течій) через поглиблення зовнішнього скління на величину $\delta = 0,10-0,12$ м очислення значень α_k може бути проведене як для відривної ділянки циркуляційної течії за уступом згідно із залежностями:

$$St = 0,115 \cdot 10^{-3} \frac{x}{\delta} \text{ при } 0 \leq \bar{x} \leq 7,$$

$$St = 1,5995e^{-0,0282 \frac{x}{\delta}} \text{ при } 7 < \bar{x} \leq 20,$$

в яких $St = \frac{\alpha_k}{c_p \cdot \rho \cdot U_{\text{відр}}}$ – критерій Стентона,

де $c_p = 1005$ Дж/(кг·К) теплоємність повітря в діапазоні зміни температури повітря $-30 \leq t \leq 50$ °С; $U_{\text{відр}}$ – швидкість повітря в зоні відриву потоку, ρ – щільність зовнішнього повітря.

Після перетворення ці залежності можуть бути подані у вигляді:

$$\text{при } 0 < (x/\delta) < 7 \quad \alpha_{\text{скл}} = 0,115 \cdot \rho \cdot U_{\text{відр}} \cdot \bar{x},$$

$$\text{при } 7 < (x/\delta) < 40 \quad \alpha_{\text{скл}} = (-6 \cdot 10^{-4} \bar{x}^4 + 0,03 \bar{x}^3 + 0,4 \cdot \bar{x}^2 - 53,9 \cdot \bar{x} + 1683,6) \cdot \rho \cdot U_{\text{відр}}$$

Середнє значення $\alpha_{\text{скл}}$ на поверхні скління для вікон стандартної довжини $l_{\text{вік}} = 1,3$ м, $((x/\delta) = 13)$ може бути прийняте $\bar{\alpha}_{\text{скл}} = 1,1 \cdot \rho \cdot U_{\text{відр}}$.

Коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні віконного блока може бути прийнятий рівним (з урахуванням $U_{\text{відр}} = 1,41 U_0$) і має вигляд:

$$\alpha_{\text{скл}} = 1,51 \cdot \rho \cdot U_0.$$

Для навітряного боку приймається з урахуванням зміни за висотою:

$$\alpha_{\text{скл}} = 1,51 \cdot \rho \cdot U_0 \cdot \left(\frac{h}{H} \right)^{0,33},$$

де h – висота розташування вікон від рівня землі, H – висота, на якій замірюється швидкість U_0 .

Опір теплопередачі алюмінієвої віконної рами та її елементів визначається за схемою рисунку 3.

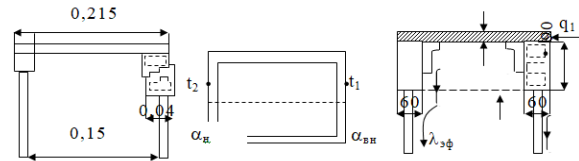


Рис. 3. Схема елементів віконного блока

Як відомо, $q = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{l} \Delta t$, при цьому $t_2 = t_3$, теплопровідність алюмінієвої частини віконної рами $\lambda \approx 204 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, а алюмінієвої із залізом $\lambda_1 = \lambda_2 \approx 159 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Опір теплопередачі горизонтальної частини віконної рами дорівнює:

$$R_{\text{гор}} = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_b}{\lambda_{\text{эф}}} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{\text{зов}}},$$

де $l_1 = l_2 = 0,06$ м, $\lambda_{\text{эф}} \approx 0,243$, в результаті підстановки отримуємо:

$$R_{\text{гор}} = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + 0,6827.$$

Опір теплопередачі верхньої віконної рами визначимо через Gr_x за $l = 100$ м, тоді для $\Delta t = 25$ °С, $t_{\text{ср}} = 0$ °С, $\nu = 13,28 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

$$Gr_x = 9,81 \cdot \frac{1}{273} \cdot \frac{25 \cdot 0,1^3}{(13,28 \cdot 10^{-6})^2} = 5,0939 \cdot 10^6.$$

Тоді $Gr_x \cdot Pr = 3,617 \cdot 10^6$, $\varepsilon = 0,4 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,2} = 8,198$, $\lambda_{\text{эф}} = 0,20004 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Опір теплопередачі горизонтальної частини віконної рами становить:

$$R_{\text{гор}} = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{зов}}} + 0,5008 \frac{\text{м}^2 \text{К}}{\text{Вт}}.$$

Опір теплопередачі горизонтальної планки віконної рами визначаємо аналогічно, з урахуванням того, що $\Delta t = 10$ °С, $t_{\text{ср}} = 15$ °С, $\nu = 14,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с,

$$\lambda_b = 0,0254 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}. \text{ Кількість планок } Z = 2.$$

Якщо довжина $L = 4,5$ м, висота $0,06$ м, тоді $F = 2 \cdot 4,5 \cdot 0,06 = 0,54$ м².

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ Б В.2.6-23:2009. Блоки віконні та дверні. Загальні технічні умови. Київ : Мінрегіон України, 2009.
2. ДБН Б В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. Київ : Мінрегіон України, 2016, 31с.
3. Маляренко В. А., Редько А. Ф., Чайка Ю. И., Поволочко В. Б. Техническая теплофизика ограждающих конструкций и сооружений. Под ред. проф. Маляренко В. А. Харьков : Рубикон, 2000.
4. Дешко В. И., Шовкалюк М. М., Ленкин А. В. Моделирование теплового состояния помещений при измерении режимов параметров отопления. *Промышленная теплотехника*. Т. 31, № 6. 2009. С. 75–80.
5. Гагарин В. Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий. *Строительные материалы*. 2010. № 3. С. 8–16.
6. Тарасов А. Е. Новые технологии. Энергия стекла. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2012. № 3 (158). С. 39–41.
7. Савин В. К., Дворцов В. Н. Инженерный метод расчета теплопередачи через световые проемы. *Исследования по строительной теплофизике* : науч. тр. Москва : НИИСФ, 1984. С. 22–29.
8. Дроздов В. А., Савин В. К., Александров Ю. П. Теплообмен в светопрозрачных ограждениях. Москва : Стройиздат, 1979. 306 с.
9. Мурадян М., Саркисов М., Спиридонов А., Морозов А. Некоторые тенденции развития производства современных стеклопакетов. *Окна и двери*. 2001. № 3 (48). С. 32–36.
10. Фаренюк Е. Г., Калюх Ю. И. К анализу расчетных методов для определения теплотехнических характеристик светопрозрачных конструкций. *Архитектура и строительство в Азербайджане*. 2014. № 3. С. 18–24.
11. Подковырина К. А. Светопрозрачные ограждающие конструкции (методы снижения тепловых потерь и мировой опыт применения). *Архитектура и дизайн*. 2018. № 1. С. 46–51.

REFERENCES

1. DSTU B V.2.6-23:2009. *Bloky vikonni ta dverni. Zahal'ni tekhnichni umovy* [DSTU B V.2.6-23:2009. Window and door blocks. General technical conditions]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009, 36 p. (in Ukrainian).
2. DBN B V.2.6-31:2016. *Teplova izolyatsiya budivel'* [DBN B V.2.6-31:2016. Thermal insulation of buildings]. Kyiv : Ministry of Regions of Ukraine, 2016, 31 p. (in Ukrainian).
3. Malyarenko V.A., Redko A.F., Chaika Yu.I. and Povolochko V.B. *Tekhnicheskaya teplofizi ka ogradzhayushchikh konstruksiy i sooruzheniy* [Technical thermal physics of enclosing structures and structures]. Ed. Prof. Malyarenko V.A. Kharkiv : Rubikon Publ., 2000. (in Russian).
4. Deshko V.I., Shovkalyuk M.M. and Lenkin A.V. *Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya pomeshcheniy pri izmerenii rezhimov parametrov otopleniya* [Modeling of the thermal state of premises when measuring heating parameters]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heating Engineering]. Vol. 31, no. 6, 2009, pp. 75–80. (in Russian).
5. Gagarin V.G. *Makroekonomicheskiye aspekty obosnovaniya energosberegayushchikh meropriyatiy pri povyshenii teplozashchity ogradzhayushchikh konstruksiy zdaniy* [Macroeconomic aspects of substantiation of energy-saving measures when increasing the thermal protection of building envelopes]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials]. 2010, no. 3, pp. 8–16. (in Russian).
6. Tarasov A.E. *Novyye tekhnologii. Energiya stekla* [New technologies. Energy of glass]. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka* [Construction Materials, Equipment, Technologies of the 21st Century]. 2012, no. 3 (158), pp. 39–41. (in Russian).
7. Savin V.K. and Dvortsov V.N. *Inzhenernyy metod rascheta teploperedachi cherez svetovyye proyemy* [Engineering method for calculating heat transfer through light openings]. *Issledovaniya po stroitel'noy teplofizike : nauch. tr.* [Research on Building Thermal Physics : scient. works]. Moscow : NIISF Publ., 1984, pp. 22–29. (in Russian).
8. Drozdov V.A., Savin V.K. and Aleksandrov Yu.P. *Teploobmen v svetoprozrachnykh ogradzheniyakh* [Heat transfer in translucent fences]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1979, 306 p. (in Russian).
9. Muradyan M., Sarkisov M., Spiridonov A. and Morozov A. *Nekotoryye tendentsii razvitiya proizvodstva sovremennykh steklopaketov* [Some trends in the development of production of modern double-glazed windows]. *Okna i dveri* [Windows and Doors]. 2001, no. 3 (48), pp. 32–36. (in Ukrainian).
10. Farenjuk E.G. and Kalyukh Yu.I. *K analizu raschetnykh metodov dlya opredeleniya teplotekhnicheskikh kharakteristik svetoprozrachnykh konstruksiy* [On the analysis of calculation methods for determining the thermal characteristics of translucent structures]. *Arkhitertura i stroitel'stvo v Azerbaydzhanе* [Architecture and Civil Engineering in Azerbaijan]. 2014, no. 3, pp. 18–24. (in Russian).
11. Podkovyrina K.A. *Svetoprozrachnyye ogradzhayushchiye konstruksii (metody snizheniya teplovykh poter' i mirovoy opyt primeneniya)* [Translucent enclosing structures (methods for reducing heat losses and world experience in application)]. *Arkhitertura i dizayn* [Architecture and Design]. 2018, no. 1, pp. 46–51. (in Russian).

Надійшла до редакції: 16.09.2023.

УДК 72.01

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.110.999

КОЕФІЦІЄНТ ЕКОЛОГІЧНОГО СЛІДУ АРХІТЕКТУРИ ЯК ФАКТОР ФОРМУВАННЯ НАЦІОНАЛЬНИХ ЗЕЛЕНИХ СТАНДАРТІВ

ФОМЕНКО О. О.^{1*}, *докт. арх-ри, проф.*,
ЧЕЧЕЛЬНИЦЬКИЙ С. Г.², *докт. арх-ри, проф.*

^{1*} Кафедра інноваційних технологій у дизайні архітектурного середовища, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (057) 706-15-37, e-mail: oksana.fomenko@kname.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0588-4186

² Кафедра інноваційних технологій у дизайні архітектурного середовища, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (057) 706-15-37, e-mail: Serhii.Chechelnytskyi@kname.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-0247-9054

Анотація. Стаття є спробою узагальнити та адаптувати до архітектурної науки цикли досліджень, присвячених проблемі формування національних зелених стандартів в умовах виходу міст та прилеглих до них регіонів «за межі зростання». Цей підхід ґрунтується на циклах досліджень принципів сталого функціонування міст України проведених фахівцями кафедри інноваційних технологій у дизайні архітектурного середовища Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. Результатом досліджень стало переконання авторів у тому, що існуючі методи та інструментарії адаптації архітектурної складової міст України до глобальних викликів не в повній мірі відповідають вимогам часу. Зокрема, існуючі світові рейтингові системи оцінювання впливу архітектури на довкілля за змістом та формою стали дуже потужним фактором формування екопозитивної архітектури, але не відображають усієї картини її впливу на екологічні системи регіонів. З цієї причини ми почали дослідження, спрямоване на формування національної системи добровільної екологічної сертифікації будівель засноване на «Коефіцієнті екологічного сліду архітектури». Даний коефіцієнт скомпільований як сума коефіцієнтів усіх елементів архітектурного об'єкта і відбиває динаміку її функціонування протягом життєвого циклу – від виробництва до утилізації. Завдяки такій зміні системи кредитування з'являється можливість визначити «Екологічний дефіцит регіону» і, через нього, рівень негативно-позитивного впливу архітектурних об'єктів на навколишнє середовище.

Ключові слова: *межі зростання; архітектура; сталий розвиток; зелені стандарти; екологічний слід архітектури*

THE ECOLOGICAL FOOTPRINT COEFFICIENT OF ARCHITECTURE AS A FACTOR IN THE FORMATION OF NATIONAL GREEN STANDARDS

FOMENKO O.O.^{1*}, *Dr. Sc. (Arch.), Prof.*,
CHECHELNITSKY S.G.², *Dr. Sc. (Arch.), Prof.*

^{1*} Department of Innovative Technologies in Architectural Environment Design, O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, 17, Marshal Bazhanov St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (057) 706-15-37, e-mail: oksana.fomenko@kname.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0588-4186

² Department of Innovative Technologies in Architectural Environment Design, O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, 17, Marshal Bazhanov St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (057) 706-15-37, Serhii.Chechelnytskyi@kname.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-0247-9054

Abstract. The article is an attempt to generalize and adapt to architectural science the cycles of research devoted to the problem of national green standards formation in the context of the exit of cities and adjacent regions “beyond growth”. This approach is based on cycles of research on sustainable functioning principles of Ukrainian cities, conducted by specialists of the Department of Innovative Technologies in the Design of the Architectural Environment of O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy. Results of these researches was the authors' conviction that the existing methods and tools for adapting the architectural component of Ukrainian cities to global challenges do not fully meet the requirements of the time. In particular, the existing world rating systems for assessing the impact of architecture on the environment in terms of content and form are a very powerful factor in the formation

of eco-positive architecture, but do not reflect the whole picture of its impact on the ecological systems of regions. For this reason, we have launched research aimed at the formation of a national system of voluntary environmental buildings' certification, based on the "Coefficient of the Ecological Footprint of Architecture". This coefficient is compiled as the sum of the coefficients for all elements of an architectural object and reflects the dynamics of its functioning during the life cycle – from production to disposal. Thanks to such a change in the lending system, it becomes possible to determine the "Environmental deficit of the region" and, through it, the level of negative and positive impact of architectural objects on the environment.

Keywords: *limits of growth; architecture; sustainable development; green standards; ecological footprint of architecture*

Постановка проблеми. «Наша нинішня ситуація настільки складна і є настільки віддзеркаленням різноманітної діяльності людини, однак жодна комбінація суто технічних, економічних чи правових заходів і засобів не може принести суттєвого покращання. Потрібні абсолютно нові підходи, щоб спрямувати суспільство до цілей рівноваги, а не зростання. Така реорганізація вимагатиме величезних зусиль розуміння, уяви та політичної та моральної рішучості. Ми віримо, що ці зусилля здійсненні, і сподіваємося, що ця публікація допоможе мобілізувати сили, щоб це стало можливим». (Донелла Х. Медоуз, «Limits to growth» [1]).

Стаття є спробою визначити можливі напрямки розвитку архітектури в умовах виходу міст та прилеглих до них регіонів «за межі зростання». Поняття «за межами зростання» взятє з роботи Донелли Медоуз, що має аналогічну назву [2]. У свою чергу, ця робота є розвитком концепції «Межі зростання», яка була викладена у доповіді Римському клубу в 1972 р. [3].

Використовуючи методологічні принципи системної динаміки, Медоуз розробила модель, за допомогою якої обґрунтувала деякі сценарії розвитку світової спільноти в умовах збереження темпів приросту чисельності населення, промислового та сільськогосподарського виробництва, екстенсивної експлуатації природних ресурсів та забруднення навколишнього середовища.

Відповідно до концепції Медоуз термін «за межами зростання» позначає такий стан системи (держави, регіону, міста), за якого кількість споживаних ресурсів і забруднень починає перевищувати можливості природного оточення до самопідтримання.

Медоуз розглянула декілька сценаріїв розвитку цього явища, серед них: обвальне скорочення чисельності населення; зниження населенням рівня споживання; радикальна зміна екологічної поведінки; розвиток «зелених» технологій та варіанти сполучення перерахованих сценаріїв [4].

З наведеної вище причини, ресурсозабезпеченість та забруднення навколишнього середовища стають основними чинниками, що формують уявлення про проблеми архітектурної складової міст за умов їх виходу за межі зростання.

В даному контексті архітектурну складову слід розглядати як значущого споживача життєво необхідних природних ресурсів та генератора шкідливих викидів, що стає істотним фактором негативного впливу на навколишнє середовище.

Виходячи з подібного бачення проблеми, ми згенерували інноваційну концепцію оцінення негативного/позитивного впливу архітектури на довкілля, яка базується на впровадженні в національні зелені стандарти «Коефіцієнта екологічного сліду архітектури».

Аналіз публікацій. Для такого дослідження велике значення мають роботи, присвячені сталому розвитку. У посібнику із забезпечення стійкості у стандартах ISO Guide 82:2014 дається таке тлумачення терміна «стійкість»: «Sustainability is the goal of sustainable development. It refers to any state of the global system in which the needs of the present are met without compromising the ability of future generations to meet their own needs». (Стойкість є метою сталого розвитку. Він належить до будь-якого стану глобальної системи, в якому потреби сьогодення задовольняються без шкоди

здатності майбутніх поколінь задовольняти власні потреби) [5].

Цей підхід став основою усвідомлення світовою спільнотою того факту, що люди, природа та економіка – це тісно взаємопов'язані компоненти єдиної планетарної системи. На нашу думку, це ствердження актуальне більше для періоду написання Медоуз доповіді Римському клубу. Наразі світова екологічна проблема та ситуація з ресурсозабезпеченням стала настільки гострою, що актуальним стає інший погляд, а саме: людство брало у природи кредити під великі проценти. Настав час погашення боргів.

Донелла Медоуз свого часу виконала замовлення від Римського клубу на проведення незвичайного на той час дослідження [6]. Суть замовлення зводилася до зіставлення деяких ключових тенденцій світового розвитку за впливу та взаємовпливу екологічної, демографічної, економічної та ресурсної сфер. 13 березня 1972 року у Вашингтоні в Смітсонівському інституті вперше було проведено презентацію колективної праці «Межі зростання, Доповідь Римському клубу».

Автори книги проаналізували 12 розрахованих сценаріїв можливого майбутнього світового співтовариства, у проміжку часу між поточним 1970 та 2100 роком. Частина з розрахованих сценаріїв закінчувалася різкою депопуляцією планети та падінням матеріального рівня життя. Але були представлені розрахунки стійких варіантів майбутнього, у яких гармонійно поєднувалися чисельність населення, задоволення його фізичних і духовних потреб. [7]. Книга досі актуальна та викликає дебати. Після 1972 року побачили світ роботи Донелли Медоуз «Межі зростання: 30 років по тому» в 2004 р., [1] і Йоргена Рандерса «2052: Глобальний прогноз на наступні сорок років» у 2012 [8]. Ці праці є продовженням роботи Медоуз та багато в чому підтверджують та уточнюють зроблені ним розрахунки.

Фундаментальні дослідження, проведені групою експертів OECD (Організації

економічного співробітництва та розвитку) у роботі «За межами зростання: до нового економічного підходу» [9] дали розгорнуту картину соціально-економічних проблем, що формують критичну загрозу сталого існування світової спільноти. На думку авторів, сучасні міста стоять перед гострою необхідністю різкої зміни екологічної поведінки. Це твердження підтримується численними дослідженнями у багатьох галузях людського знання, таких як:

– *соціологія*. Деніел Неттл досліджує екологічну поведінку людини адаптивної точки зору. Він зосереджується, зокрема, на тому, як поведінка людини змінюється залежно від екологічного контексту [10]. Маньяна Мілкорейт розробляє концепцію соціальних переломних моментів, яка розуміється як нелінійні процеси трансформаційних змін у соціальних системах, зокрема пов'язаних зі зміною клімату [11];

– *мінералогія*. У. Барді пише, що видобуток корисних копалин має тяжкий вплив на екологію планети – забруднення, яке набуває різних форм і спричиняє багато наслідків, включаючи зміну клімату. Ґрунтовно розграбувавши планету Земля, ми вступаємо в новий світ. [12];

– *економіка*. В своїй книзі Дж. Блювітт розглядає перспективи «розвитку економіки за межами зростання» [13], Т. Джексон відкрито ставить під сумнів найціннішу мету як політиків, так і економістів: продовження прагнення до експоненціального економічного зростання [14];

– *екологія*. Дж. Рокштрюм пропонує новий підхід до глобальної стійкості визначаючи планетарні межі, в яких людство може існувати та працювати безпечно [15];

– *політологія*. А. Салех опублікувала безкомпромісні есе жінок-мислителів, присвячені глобальному неолібералізму, екологічному боргу, зміні клімату та триваючій девальвації репродуктивної та натуральної праці [16] та багато інших.

Мета статті – обґрунтування логіки та перспектив застосування «Коефіцієнта

екологічного сліду архітектури» в системі національних зелених стандартів.

Методи дослідження. На початковому етапі дослідження автори застосували метод контент-аналізу [17] публікацій, наявних у найбільш відомих базах даних статей, у тому числі: Scopus, Web of Science и Google Scholar.

Визначення питання дослідження: дослідження містить декілька груп запитів, серед яких: системи добровільної екологічної сертифікації, екологічний слід людства, глобальні кризи, сталий розвиток у стандартах ISO.

Підбір матеріалу: з усього континууму публікацій (386) відібрано статті та книги з найбільшою кількістю цитувань, загалом 64 об'єкти.

Аналіз даних: сформовано основні положення дослідження, які оцінюються як такі, що мають найбільшу об'єктивність за перехресними посиланнями.

Інтерпретація результатів: аналіз дозволив виявити основні тенденції, патерни або закономірності обраної теми дослідження.

Підсумковий звіт: сформульовано гіпотезу дослідження, яка не суперечить зібраним та проаналізованим результатам.

Для вивчення структури архітектурного об'єкта з точки зору його впливу на навколишнє середовище застосовано метод морфологічного аналізу [18]. Цей метод дозволив структурувати дані про склад об'єктів, включаючи їх соціальні, екологічні та техногенні характеристики. Використання морфологічного аналізу дозволило створити ієрархічне дерево елементів об'єкта, сформувати уявлення про загальну характеристику коефіцієнта значущості для кожного елемента. У свою чергу, такий підхід дозволив сформулювати основні положення щодо виведення загального для всього архітектурного об'єкта «Коефіцієнта екологічного сліду архітектури».

Індикатор екологічного сліду людини (або екологічний слід) [19] – це показник впливу людської діяльності на навколишнє середовище, заснований на споживанні

ресурсів та розподілі відходів. Цей показник оцінює, скільки площі суші та поверхні моря потрібно для підтримання рівня споживання ресурсів та поводження з відходами, створеними людиною.

Індикатор екологічного сліду вимірюється в «глобальних гектарах» (gha) і порівнюється з біопродуктивною ємністю Землі. Якщо споживання ресурсів та викиди відходів перевищують біопродуктивні можливості планети, це свідчить про екологічний борг, який може спричинити погіршення екологічної стійкості.

Індикатор екологічного сліду включає різні аспекти людської діяльності, такі як споживання продуктів харчування, енергії, води, а також викиди парникових газів і утворення відходів. Цей інструмент дає можливість проаналізувати сталість споживання ресурсів та оцінити, наскільки воно вписується в межі можливостей планети.

Методи розрахунку показника екологічного сліду людства на даному етапі розвитку знань ще не доведені до аксіом, визнаної всіма зацікавленими сторонами [20]. Ми згодні з думкою більшості досліджуваних за цією темою робіт, які стверджують надзвичайно високий потенціал показника в політиці, екології, будівництві та багатьох інших сферах практичної діяльності. Це чітка заява про надмірне споживання, яка досі не була прийнята урядами і не була широко оцінена широкою громадськістю.

Методи системної динаміки Форрестера [21] дозволяють обчислити за укрупненими показниками взаємний вплив соціальних, техногенних та природних ресурсів, швидкість та прискорення їх споживання. На основі даних про наявні світові запаси були спрогнозовані приблизні темпи вичерпання викопної сировини, а також розраховані швидкість та прискорення зростання антропої дії на навколишнє середовище. Такий широкий підхід дав можливість науковій спільноті світу створити цикл послідовних висновків.

Результати досліджень. Місто: екосфера, техносфера, соціум.

У концепції цього дослідження місто сприймається як набір демографічних, природних і техногенних артефактів. Подібний підхід ґрунтується на необхідності розподілу матеріальної складової та процесів функціонування міста. В нашому уявленні природне середовище поділяється на сфери-компоненти, а саме: геосферу, гідросферу, біосферу та атмосферу. Сукупність сфер-компонентів називається екосфера [22]. Набір штучно створених артефактів у дослідженні позначено терміном «Техносфера», який часто асоціюється з терміном «Антропосфера» [23].

Вибір такого базового терміна дослідження пов'язаний із необхідністю позначити накопичені людством знання як матеріальну складову цієї сфери. З цього погляду термін «Техносфера» повніше характеризує це явище. Виходячи з потреб розподілу процесів функціонування міст та матеріальних об'єктів, логічним бачиться уявлення населення міста як набору одухотворених артефактів, що мають континуум імперативів, знань, навичок та умінь. Даному уявленню найбільше відповідає термін «Соціум» [24].

Описаний вище підхід дозволяє розглядати населення міста як носія матеріальних та нематеріальних потреб, які мають бути задоволені. Задоволення потреб соціуму відбувається за допомогою реалізації ресурсного потенціалу техносфери, екосфери та соціуму.

Архітектура – один із значних споживачів техногенного, соціального та природного ресурсів. Із цієї причини стратегічне планування розвитку архітектурної складової міст має спиратися на прогностичні карти їх доступності. В іншому випадку дефіцити життєво важливих ресурсів можуть викликати соціальні потрясіння. Ці висновки узгоджуються з доповіддю Римському клубу Едуарда Пестеля «За межами зростання» [25].

Концепція «Органічного розвитку цивілізації (міст)», викладена Пестелем у його доповіді, логічна і послідовна.

Відносно архітектури основні положення цієї концепції можна сформулювати так:

- органічний розвиток – це системний процес, тому архітектурна складова перебуває у системному взаємозалежному розвитку з іншими підсистемами міста, при цьому жодна підсистема не може зростати на шкоду іншим; прогресивні зміни в будь-якій одній підсистемі набувають реального сенсу тільки в тому випадку, коли їм відповідають прогресивні процеси в інших частинах;

- подвійність – проблема функціонування міста зводиться до дихотомії: на регіональному рівні підсистеми міста приводяться в рух діями людей, на глобальному рівні місто піддається потужним зовнішнім діям, впливати на які практично не може;

- інтенсивний шлях розвитку – зниження доступу до життєво важливих ресурсів спонукає міста та їх архітектурну складову відмовитися від методів екстенсивного приросту;

- унікальність – багатоаспектний розвиток, що відповідає потребам різних частин міста та регіону як системи створює унікальну «карту» його функціонування, яка помітно відрізняється від «карт» інших регіонів;

- цілісність – гармонійна координація цілей функціонування підсистем міста забезпечує їх несуперечність життєвим інтересам регіону;

- мобільність, гнучкість – здатність складових елементів системи у процесі розвитку поглинати негативні впливи, тобто слідувати своїм курсом, попри несподівані впливи та зміни;

- прогнозованість – нагальна необхідність передбачати майбутні труднощі та коригувати цілі розвитку з урахуванням складності очікуваних проблем;

- незалежних елементів немає. Кожен, навіть найменший елемент у сумарній сукупності впливів на систему всіх аналогічних елементів здатний вивести систему міста на межу гострої кризи.

Більшість висновків, які можна зробити з контексту даної моделі, зводяться до тези про те, що архітектурна складова міст і самі міста, які прагнуть зберегти комфортний рівень життя в найближчому майбутньому, будуть змушені будувати сценарії свого функціонування на основі раціонального управління регіональними природними ресурсами, справедливого розподілу життєвих благ та змінювати екологічну поведінку населення. Це твердження дуже близьке до основних положень 17 цілей сталого розвитку, що декларує Організація Об'єднаних Націй.

Зелені стандарти в архітектурі.

В архітектурі до вирішення питань, поставлених Організацією Об'єднаних Націй, найближче за всіх підійшли «Зелені стандарти». Найбільш поширеними серед систем добровільної екологічної сертифікації будівель стали національні стандарти: BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), Англія, www.bregroup.com; HQE (Haute Qualité Environnementale), Франція, www.assohe.org; MINERGIE (Minergiestandard), Швейцарія, www.minergie.ch; LEED® (Leadership in Energy and Environmental Design), США, www.usgbc.org; KlimaHaus (KlimaHaus Agentur), Італія, www.klimahaus.it; BCA Green Mark (Building and Construction Authority), Сінгапур, www.bca.gov.sg; DGNB (Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen), Німеччина, www.dgnb.de; GRIHA (Green Rating for Integrated Habitat Assessment), Індія, www.grihaindia.org; ÖGNI (Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft), Австрія, www.ogni.at.

Зелені стандарти – потужний інструментарій екологізації архітектурного середовища. Але тут слід зазначити декілька моментів, які спонукають нас розглядати їх не як кінцевий продукт, а як деяку перехідну модель від екстенсивного до інтенсивного типу функціонування архітектури.

Екстенсивний тип розвитку архітектури – це бізнес-модель, заснована на постійному прирості та нормах прибутку. В умовах

необмеженого доступу до ресурсів екстенсивний тип розвитку дуже гнучкий і здатний швидко та якісно задовольнити попит на нерухомість. При виході «За межі зростання» головним недоліком такої моделі господарювання стає орієнтованість на інтереси інвесторів та кінцевого споживача виробленого продукту. Для цього розвитку «екологічні норми» стали стримувальним чинником, що істотно знижує очікувані прибутки.

Інтенсивний шлях розвитку архітектури – це соціально-орієнтована економічна модель. У цій моделі довгострокові інтереси територіальних громад становлять основу формування архітектурної складової міст. Фактично, на сьогодні це дещо ідеалістичне бачення проблеми симбіотичного співіснування міста та прилеглих територій [26].

В існуючій формі «Зелені стандарти» в архітектурі є інструментом стримування, а не вирішення існуючих глобальних криз. Стандарти змушені орієнтуватися на екстенсивний тип розвитку архітектури. Це логічно, та, на жаль, виправдано. Без потужних інвестиційних уливань екологізація архітектури неможлива. Такий висновок ґрунтується на порівняльному аналізі найпоширеніших стандартів. Практично у всіх групах показників, за які нараховуються кредити у цих стандартах, використовуються технології, що руйнують довкілля.

Коефіцієнт екологічного сліду архітектури. На багатьох уже побудованих прикладах можемо побачити, що «Зелені стандарти» стимулюють розвиток екологічно позитивної архітектури, але в той же час маскують деякі негативні сторони її існування. Ми усвідомлюємо, що вплив на навколишнє середовище будівель, які отримали зелені сертифікати, набагато менший, ніж тих, що побудовані на основі національних будівельних норм. Але слід також зазначити, що вони вже починають відставати від актуальності екологічної проблеми.

На нашу думку, виходячи з необхідності переведення життєвого циклу будівель до

основ регіонального природокористування, система рейтингової оцінки екологічності будівель має бути скоригована. Ми з глибокою повагою ставимося до винахідників і розробників «Зелених стандартів». Ця концепція чудова, і її основні постулати не потребують змін. Є лише один момент, який ми хотіли би внести в український «Зелений стандарт», а саме – змінити систему кредитування. Мається на увазі не принцип, а підхід до нарахування кредитів.

На нашу думку, кредити за всіма пунктами стандартів доцільно нараховувати на основі «Коефіцієнта екологічного сліду архітектури» (ЕКА). Екологічний слід споживання (Ecological Footprint of consumption). Він визначається як площа, необхідна для виробництва спожитих ресурсів, і площа, необхідна для поглинання вироблених забруднювальних речовин [27].

КЕСА – робоче найменування коефіцієнта, обчисленого в діапазоні від -1 до +1. В дослідженні запропоновано розглядати існуючі екологічні вимоги законодавства України як нижню межу. Такий підхід дуже близький до стандарту MINERGIE (Швеція) [28]. Всі елементи об'єкта, що оцінюються, мають власний КЕСА і коефіцієнт значимості. Такий підхід дозволяє при виведенні загального КЕСА будівлі враховувати різницю між показниками, наприклад, системою опалення будинку та дверними ручками. Негативні значення дозволяють оцінити рівень екологічного тиску на довкілля. Нульовий коефіцієнт означає практичну нейтральність споруди всіх етапах життєвого циклу. Позитивні показники свідчать про внесок архітектурної споруди у відновлення природного балансу. Вищий бал +1 може бути присвоєний лише у тому випадку, якщо всі компоненти будівлі є екологічно позитивними. Пропонований підхід до оцінювання екологічного впливу архітектурної складової міст на довкілля найближче до поняття «Екологічний дефіцит».

Екологічний дефіцит (ecological deficit) – різниця між біоємністю регіону і

екологічним слідом господарської діяльності населення. Екологічний дефіцит виникає, коли економіка вилучає ресурси, що перевищують здатність екосистеми їх відновлювати або перевантажує екосистему відходами понад її здатність поглинати їх. Накопичення екологічного дефіциту спричинює довгострокові екологічні борги, що виявляються в таких явищах як зниження родючості ґрунту або збільшення накопичення вуглецю в атмосфері.

Із суто естетичних міркувань нам більше подобається назва «Коефіцієнт екологічного сліду архітектури», ніж «Коефіцієнт екологічного дефіциту архітектури». У запропонованому підході нарахування кредитів є безперечні позитивні сторони. Цей підхід спрямовано на інтенсивний тип розвитку архітектури. Він має добрий потенціал у разі взаємодії з органами місцевого самоврядування та територіальними громадами. У потенціалі запровадження коефіцієнта може сприяти розвитку екологічно позитивних, але збиткових виробництв.

Останню тезу пояснимо на такому прикладі: перед студентами-магістрами було поставлене завдання спроектувати міський аграрний комплекс, який забезпечує необхідними продуктами харчування 600 осіб. Внаслідок цього звільнялося 100 га орних земель, які пропонувалося використовувати для раціонального лісознавства. На основі раціонального лісознавства студенти спроектували SMART комплекс лісового господарства. Також було спроектовано комплекс з утилізації відходів цих двох господарств.

Розрахунки економічної складової цих комплексів показали їх потенційну збитковість. У той же час із погляду інтересів міської громади поєднання їх у єдине господарство та очікувані екологічні переваги мали однозначний позитивний потенціал. Цей приклад дуже добре демонструє різницю між екстенсивним і інтенсивним шляхами розвитку архітектури.

Істотний недолік запропонованого підходу – той опір, який він зустріне в інвесторів та виробників будівельної

продукції. Це зауваження має кілька серйозних аргументів:

– Складність розрахунку коефіцієнта. Тут проблема не в математиці, а в «інформаційній логістиці». У глобальному світі навіть виготовлення звичайного грифельного олівця може стати результатом зусиль безлічі виробників. Адекватно оцінити всю лінійку технічного процесу дуже складно. Не кажучи вже про такі надскладні предмети як технології SMART CITY.

– Негативність у кінцевого споживача сприйняття мінусових величин КЕСА. Тут дуже хочеться відмітити концепцію подачі рейтингових оцінок розробників LEED. Їхня система рейтингового оцінювання, прив'язана до дорожочинних металів, інтуїтивно зрозуміла споживачеві і несе позитивний семантичний зміст. Це вигідно відрізняє її від індійської системи GRINA, яка привласнює від 1 до 5 зірочок. Будинки з однією зірочкою асоціюються з готелем нижчої категорії комфорту. При цьому будівлі, що отримали нижчі оцінки, за своїми екологічними якостями у всіх «зелених стандартах» стоять помітно вище за ті, які побудовані відповідно до національних будівельних норм.

– Проблеми з економічною складовою. Вартість 1 м² будівлі, зведеної на принципах позитивного екологічного дефіциту (оцінка від +0,1 до +1), перевищить усі принципи економічної доцільності.

Незважаючи на очевидні проблеми (їх не можна назвати недоліками), ми усвідомлюємо, наскільки необхідний пропонований підхід. На нашу думку, тут треба стверджувати новий принциповий етичний підхід: ми повинні почати

повертати з відсотками кредити, взяті у природи.

Висновки

У статті сформовано комплекс перспективних напрямів досліджень, пов'язаних із розробленням методів розрахунку коефіцієнта «Екологічного сліду архітектури». Відомо, що стійкість архітектури «За межами зростання» належить до інтенсивного типу господарювання. За такого типу розвитку основне навантаження лягає на ресурси техносфери і соціуму. Принцип експлуатації цих ресурсів і формує «Коефіцієнт екологічного сліду архітектури».

Формування уявлень про зростання «Екологічного дефіциту» на всіх етапах життєвого циклу будівлі дає потенційну можливість на перших етапах уповільнити, а потім і повернути деградацію навколишнього середовища. Розроблення принципів нарахування кредитів, заснованих на КЕСА у національному «Зеленому стандарті» України, здатне дати нове уявлення про «екологічність» архітектурних об'єктів.

При цьому слід зважати на той факт, що багато потрясінь в історії людства радикально змінювали суспільну свідомість. За минулі тисячоліття ми освоїли правила гігієни, перестали виливати помий на вулиці міст та сформували комплекс позитивних правил поведінки. З погляду давньої людини всі ці заходи збиткові. Але ми навчилися їх регулярно виконувати. Тому ми не втрачаємо надію, що нові засади формування архітектури «За межами зростання» стануть нормою, незважаючи на вкрай низьку інвестиційну привабливість.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Meadows Donella H., Randers Jorgen, Meadows Dennis L. The Limits to Growth : The 30-Year Update. White River Junction VT : Chelsea Green Publishing Company, 2004. ISBN 193149851.
2. Meadows Donella H., Meadows Dennis L., Randers J. Beyond the Limits. Post Mills, VT : Chelsea Green Publishing Company, 1992.
3. Meadows Donella H., Meadows Dennis L., Randers Jorgen, Behrens III, William W. The Limits to Growth. A Report for Club of Rome's Project on Predicament of Mankind. New York : Universe Books, 1972. ISBN 0876631650.
4. Dennis L. Meadows, Donella H. Meadows, Jorgen Randers. Beyond the Limits : Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future. Chelsea Green Publishing, 1993. 320 p. ISBN 0-930031-62-8.

5. ISO GUIDE 82:2014. Guidelines for addressing sustainability in standards. URL : <https://www.iso.org/standard/57775.html>
6. Nørgård Jørgen Stig, Peet John, Ragnarsdóttir Kristín Vala. The History of The Limits to Growth. *The Solutions Journal*. 2010. № 1 (2). Pp. 59–63.
7. Randers Jørgen. 2052: A Global Forecast for the Next Forty Years. White River Junction VT : Chelsea Green Publishing Co., 2012. ISBN 978-1-60358-467-8.
8. OECD. Beyond Growth : News Economic Approach Paris. 2020. URL : <https://doi.org/10.1787/33a25ba3-en>. ISBN 978-92-64-63834-1.
9. Daniel Nettle, Mhairi A. Gibson, David W. Lawson, Rebecca Sear. Author Notes. Human behavioral ecology: current research and future prospects. *Behavioral Ecology*. Vol. 24, iss. 5. September-October 2013. Pp. 1031–1040. URL : <https://doi.org/10.1093/beheco/ars222>
10. Milkoreit M. Social tipping points everywhere? – Patterns and risks of overuse. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2023. № 14 (2). Art. № e813. DOI: 10.1002/wcc.813.
11. Bardi U. Extracted. How the Quest for Mineral Wealth Is Plundering the Planet. Vermont, USA : Chelsea Green Publishing, 2014.
12. Blewitt J., Cunningham R. The Post-Growth Project: how the end of economic growth could bring a fairer, happier society. London : London Publishing Partnership, 2014.
13. Jackson T. Prosperity Without Growth. *Foundations for the Economy of Tomorrow*. London : Routledg, 2009/2017.
14. Rockström J. et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*. 2009. № 14 (2). P. 32.
15. Salleh A. Eco-Sufficiency & Global Justice : women write political ecology. London : Pluto Press and New York: Palgrave Macmillan, 2009.
16. Krippendorff Klaus Content Analysis : An Introduction to Its Methodology. SAGE Publications, Inc. 2019. DOI: <https://doi.org/10.4135/9781071878781>.
17. Zwicky Fritz, Page T. Discovery, Invention, Research, through the Morphological Approach. Science. New York : Macmillan, 1969. doi:10.1126/science.163.3873.1317.
18. Ruzevicius Juozas. Ecological footprint : Evaluation methodology and international benchmarking. Verslo ir teisės aktualijos. 2010. № 6. doi: 10.5200/1822-9530.2011.01.
19. Wiedmann Thomas & Barrett John. A Review of the Ecological Footprint Indicator. *Perceptions and Methods. Sustainability*. 2010. № 2. Pp. 1645–1693. doi: 10.3390/su2061645.
20. Jay W. Forrester. World Dynamics. WRIGHT-ALLEN PRESS, INC. 238 Main Street. Cambridge, Massachusetts, 1973. P. 02142.
21. Gillard A. On the Terminology of Biosphere and Ecosphere. *Nature*. 1969. № 223 (5205). Pp. 500–501. doi:10.1038/223500a0. S2CID 4167249.
22. Kuhn A., Heckelei T., Speth Peter, Christoph Michael, Dieckrüger Bernd and oth. Anthroposphere. Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa. 1969. Pp. 282–341. doi:10.1007/978-3-642-12957-5_8. ISBN 978-3-642-12956-8.
23. Open Stax. Introduction to Sociology. 3rd edition (PDF). Rice University. 2022. P. 99. Archived (PDF) from the original on 9 October 2022.
24. Pestel Eduard. Beyond the Limits to Growth : A Report to the Club of Rome. Universe Books, 1989. 191 p.
25. Diemer Arnaud Coelho, Patricia Morales Manuel. Analyzing Symbiotic Relationships in Sustainable Cities. A framework. 2017.
26. Global Footprint Network. Glossary. URL : <https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/>
27. Beyeler Franz Beglinger and Nick Roder Ursina. Minergie : The Swiss Sustainable Building Standard. *Innovations : Technology, Governance, Globalization*. 2009. № 4. Pp. 241–244. doi: 10.1162/itgg.2009.4.4.241.
28. Harris Jonathan M. Responding to Economic and Ecological Deficits. *GDAE Working Paper*. 2019. № 19-01 : Responding to Economic and Ecological Deficits. URL : https://www.bu.edu/eci/files/2019/06/19-01_Harris_RespondingtoEconomicEcologicalDeficits.pdf.

REFERENCES

1. Meadows Donella H., Randers Jørgen and Meadows Dennis L. The Limits to Growth : The 30-Year Update. White River Junction VT : Chelsea Green Publishing Co., 2004. ISBN 193149851.
2. Meadows Donella H., Meadows Dennis L. and Randers J. Beyond the Limits. Post Mills, VT : Chelsea Green Publishing Company, 1992.
3. Meadows Donella H., Meadows Dennis L., Randers Jørgen, Behrens III, William W. The Limits to Growth. A Report for Club of Rome's Project on Predicament of Mankind. New York : Universe Books, 1972. ISBN 0876631650.
4. Dennis L. Meadows, Donella H. Meadows and Jørgen Randers. Beyond the Limits : Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future. Chelsea Green Publishing, 1993, paperback, 320 p. ISBN 0-930031-62-8.

5. ISO GUIDE 82:2014. Guidelines for addressing sustainability in standards. URL : <https://www.iso.org/standard/57775.html>
6. Nørgård Jørgen Stig, Peet John and Ragnarsdóttir Kristín Vala. The History of The Limits to Growth. The Solutions Journal. 2010, no. 1 (2), pp. 59–63.
7. Randers Jørgen. 2052 : A Global Forecast for the Next Forty Years. White River Junction VT : Chelsea Green Publishing Co., 2012. ISBN 978-1-60358-467-8.
8. OECD. Beyond Growth : News Economic Approach Paris. 2020. URL : <https://doi.org/10.1787/33a25ba3-en>. ISBN 978-92-64-63834-1.
9. Daniel Nettle, Mhairi A. Gibson, David W. Lawson and Rebecca Sear. Author Notes. Human behavioral ecology: current research and future prospects. Behavioral Ecology. Vol. 24, iss. 5, September–October 2013, pp. 1031–1040. URL : <https://doi.org/10.1093/beheco/ars222>.
10. Milkoreit M. Social tipping points everywhere? – Patterns and risks of overuse. Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change. 2023, no. 14 (2), art. no. e813. DOI: 10.1002/wcc.813.
11. Bardi U. Extracted. How the Quest for Mineral Wealth Is Plundering the Planet. Vermont, USA : Chelsea Green Publishing, 2014.
12. Blewitt J. and Cunningham R. The Post-Growth Project: how the end of economic growth could bring a fairer, happier society. London : London Publishing Partnership, 2014.
13. Jackson T. Prosperity Without Growth. Foundations for the Economy of Tomorrow. London : Routledg, 2009/2017.
14. Rockström J. et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecology and Society. 2009, no. 14 (2), p. 32.
15. Salleh A. Eco-Sufficiency & Global Justice : women write political ecology. London : Pluto Press and New York : Palgrave Macmillan, 2009.
16. Krippendorff Klaus Content Analysis: An Introduction to Its Methodology. SAGE Publications, Inc. 2019. DOI: <https://doi.org/10.4135/9781071878781>
17. Zwicky Fritz and Page T. Discovery, Invention, Research, through the Morphological Approach. Science. New York : Macmillan, 1969. doi:10.1126/science.163.3873.1317.
18. Ruzevicius Juozas. Ecological footprint : Evaluation methodology and international benchmarking. Verslo ir teisės aktualijos. 2010, no. 6. doi: 10.5200/1822-9530.2011.01.
19. Wiedmann Thomas & Barrett John. A Review of the Ecological Footprint Indicator. Perceptions and Methods. Sustainability. 2010, no. 2, pp. 1645–1693. doi: 10.3390/su2061645.
20. Jay W. Forrester. World Dynamics. WRIGHT-ALLEN PRESS, INC. 238 Main Street. Cambridge, Massachusetts, 1973, p. 02142.
21. Gillard A. On the Terminology of Biosphere and Ecosphere. Nature. August 1969, no. 223 (5205), pp. 500–501. doi:10.1038/223500a0. S2CID 4167249.
22. Kuhn A., Heckelee T., Speth Peter, Christoph Michael, Dieckrüger Bernd and oth. Anthroposphere. Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa. Pp. 282–341. doi:10.1007/978-3-642-12957-5_8. ISBN 978-3-642-12956-8.
23. Open Stax. Introduction to Sociology, 3rd edition (PDF). Rice University. 2023, p. 99. Archived (PDF) from the original on 9 October 2022.
24. Pestel Eduard. Beyond the Limits to Growth : A Report to the Club of Rome. Universe Books, 1989, 191 p.
25. Diemer Arnaud Coelho and Patricia Morales Manuel. Analyzing Symbiotic Relationships in Sustainable Cities. A framework. 2017.
26. Global Footprint Network. Glossary. URL : <https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/>
27. Beyeler Franz Beglinger and Nick Roder Ursina. Minergie : The Swiss Sustainable Building Standard. Innovations : Technology, Governance, Globalization. 2009, no. 4, pp. 241–244. doi: 10.1162/itgg.2009.4.4.241.
28. Harris Jonathan M. Responding to Economic and Ecological Deficits. GDAE Working Paper. 2019, no. 19-01: Responding to Economic and Ecological Deficits. URL : https://www.bu.edu/eci/files/2019/06/19-01_Harris_RespondingtoEconomicEcologicalDeficits.pdf.

Надійшла до редакції: 21.09.2023.

Відповідальність за достовірність інформації, що міститься в друкованих матеріалах,
несуть автори.

Редколегія не завжди поділяє авторську точку зору.

Комп'ютерну верстку виконано в редакційно-видавничому відділі ПДАБА.

Адреса редакції:

✉ вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Україна, м. Дніпро
кімната 501 (відповідальний секретар)

☎ +38 (050) 452-43-63

e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Підписано до друку 05.11.2023 р. Формат 60×84 1/8.

Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 7,50. Умовн. фарб.-відб. арк. 7,50.

Обл.-видавн. арк. 15,00. Наклад 50 прим. Зам. 204

Authors are responsible for the accuracy of the information
contained in the printed materials.

Editors do not always agree with the author's point of view.

Desktop publishing is performed in the Editorial Department of PSACEA.

Editorial address:

✉ room 501 (Executive Secretary)

24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine

☎ +38 (050) 452-43-63

e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Sent to press on 05 November 2023. Format 60×84 1/8.

Digital printing. Conventional quire 7,50. Conventional colour imprints 7,50.

Publisher's signatures 15,00. Number of copies 50. Order 204