

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364886

**DETERMINING BASIC TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL REGENERATION OF HYDROCHLORIDE-ACID CONCENTRATED PROCESS SOLUTIONS (p. 6–19)**

**Mykola Yatskov**National University of Water and Environmental Engineering,  
Rivne, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6231-6583>**Natalia Korchyk**National University of Water and Environmental Engineering,  
Rivne, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4919-6510>**Nadia Budenkova**National University of Water and Environmental Engineering,  
Rivne, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2176-3405>**Oksana Mysina**National University of Water and Environmental Engineering,  
Rivne, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2556-0947>**Svitlana Kyryliuk**

Ostrog, Rivne region, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1030-4548>

This work investigates model chloride solutions, copper-containing chloride acid (peroxide and ammonia) spent technological solutions for etching printed circuit boards, in order to design unified technologies and equipment.

This paper reports results of research on determining basic technological parameters for electrochemical regeneration that provide energetically favorable conditions for the process. It was established that when maintaining Eh in the cathode chamber from 400 mV to 450 mV, the specific current consumption for the regeneration process (38–40% copper extraction degree) is from  $46 \cdot 10^3$  C/mol to  $48 \cdot 10^3$  C/mol (current consumption from  $15 \cdot 10^3$  C/l to  $36 \cdot 10^3$  C/l), which is 4 times less compared to electrolysis without Eh correction.

The study has made it possible to carry out regeneration in a diaphragm electrolyzer under energy-efficient conditions and increase the maximum degree of copper extraction from 43% to 98% by adjusting Eh. In this case, the specific current consumption is 4 times lower than that without adjusting Eh.

Maintaining Eh in the cathode chamber at about 450 mV allows for more complete extraction of copper. Adjustment of the composition and redox properties of the regenerated solutions is carried out by mixing in a certain ratio of SPS with catholyte and anolyte. It is recommended to send the mixture of catholyte and anolyte after electrolysis to a centralized wastewater treatment system.

Experimental and industrial studies of the basic elements in the schemes of electrochemical regeneration in a diaphragm electrolyzer given in this work have been carried out. These schemes are supplemented with additional elements for pre-treatment: an intermediate tank, a diaphragm-free electrolyzer (for adjusting Eh); and a chamber adjacent to the anode (for adjusting the composition of the solution after regeneration).

**Keywords:** electrochemical regeneration, copper-containing hydrochloric acid etching solutions, technological, redox parameters.

**References**

- Kyryliuk, S. V. (2017). Ochyshchennia kontsentrovanykh stichnykh vod halvanichnoho vyrobnytstva u kombinovanii systemi. Rivne: NUVHP, 206. Available at: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/20852/1/diss\\_Kyryliuk.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/20852/1/diss_Kyryliuk.pdf)
- Nester, A., Yakovyshyna, T., Salamon, I., Sheludchenko, L., Liubynskyi, O., Romanishina, O., Dzhumelia, E. (2024). Regenerating Etching Solutions for Circuit Boards while Extracting Copper. *Journal of Ecological Engineering*, 25 (5), 257–267. <https://doi.org/10.12911/22998993/186504>
- Astrelyn, Y., Ratnavyra, Kh. (Eds.) (2015). *Fyzyko-khymycheskye Metody Ochystry Vody. Upravlyenye Vodnymy Resursamy. Proekt «Water Harmony»*. Available at: <https://www.scribd.com/document/904560143/>
- Yang, Z., Huang, C., Ji, X., Wang, Y. (2013). A New Electrolytic Method for On-Site Regeneration of Acidic Copper (II) Chloride Etchant in Printed Circuit Board Production. *International Journal of Electrochemical Science*, 8 (5), 6258–6268. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)14759-6](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)14759-6)
- Nester, A., Petruk, R., Kalda, G., Pashechko, M., Yakovyshyna, T., Drobot, O., Kirchuk, R. (2025). Investigating electrodes for the extraction and utilization of copper from spent etching solutions. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19 (5), 366–374. <https://doi.org/10.12913/22998624/202364>
- Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *Npj Clean Water*, 4 (1). <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- Rimal, V., Srivastava, P. K. (2024). Sustainable electrochemical wastewater treatment techniques. *Water, the Environment, and the Sustainable Development Goals*, 281–303. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15354-9.00001-3>
- Wang, X., Wu, Y., Chen, N., Piao, H., Sun, D., Ratnaweera, H. et al. (2022). Characterization of Oxidation-Reduction Potential Variations in Biological Wastewater Treatment Processes: A Study from Mechanism to Application. *Processes*, 10 (12), 2607. <https://doi.org/10.3390/pr10122607>
- Nester, A. A. (2021). *Naukovi osnovy pidvyshchennia rivnia ekolohichnoi bezpeky halvanichnoho vyrobnytstva*. Khmelnitskyi: KhNU, 342. Available at: <https://uacademic.info/ua/document/0521U100186#/>
- Ru, C. (2022). Research on the regeneration technology of etching waste solution. *E3S Web of Conferences*, 338, 1051. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233801051>
- Merentsov, N. A., Bokhan, S. A., Lebedev, V. N., Persidskiy, A. V., Balashov, V. A. (2018). System for Centralised Collection, Recycling and Removal of Waste Pickling and Galvanic Solutions and Sludge. *Materials Science Forum*, 927, 183–189. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.927.183>
- Fylypchuk, L. V. (2025). Synthesis of local control systems of reagents consumption in reduction of toxic impurities at wastewater in a periodical action reactor. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. Technical sciences series*, 1 (109), 43–54. <https://doi.org/10.31713/vt120254>
- Wittstock, G. (2023). *Lehrbuch der Elektrochemie: Grundlagen, Methoden, Materialien, Anwendungen*. Wiley.

14. Yatskov, M., Korchyk, N., Budenkova, N., Mysina, O., Kovalchuk, S. (2025). Determining basic technological parameters for the process of electrochemical extraction of copper from acid sulfate concentrated technological solutions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (137)), 41–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341531>
15. Kopyto, D., Baranek, W., Myczkowski, Z., Leszczyńska-Sejda, K., Drzazga, M., Matuszewicz, M. et al. (2017). Environmentally friendly method for regeneration of copper chloride acidic solutions used in etching of printed circuits. *E3S Web of Conferences*, 18, 1021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171801021>
16. Korchyk, N. M., Nester, A. A., Romanishyna, O. V. (2005). Vidnovlennia vodnykh khlorydnykh travlynykh rozchyniv. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 1 (65), 178–182.
17. Wang, R., Souilamas, M., Esfandiar, A., Fabregas, R., Benaglia, S., Nevison-Andrews, H. et al. (2025). In-plane dielectric constant and conductivity of confined water. *Nature*, 646 (8085), 606–610. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09558-y>
18. Zapolsky, A. K., Pershina, K. D., Gerasymchuk, A. I., Kazdobin, K. A. (2013). Modern representations on the structure and conductivity of water. *Naukovo-tekhnicni visti*, 3, 24–40. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vvt\\_2013\\_3\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vvt_2013_3_4)
19. Li, S., Wang, Z. L., Wei, D. (2026). Chemical Reactions at Electrified Interfaces. *Accounts of Chemical Research*, 59 (2), 285–297. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5c00735>
20. Pershyna, K. D., Kokhanenko, Ye. V., Kokhanenko, V. V., Kliashtorna, O. S., Kazdobin, K. O., Herasymchuk, A. I., Masliuk, L. N. (2010). Redoks-reaktsiyyi na hidratovanykh mizhfaznykh mezhakh. *Visnyk NTU KhPI*, 47, 75–81. Available at: <https://scholar.google.com.ua/scholar?oi=bibs&cluster=15521158940409816928&btnI=1&hl=uk>
21. KND 211.1.4.035-95. Metodyka ekstraktsiyno-fotometrychnoho vyznachennia midi za dietylditiokarbamatom svyntsiu u poverkhnevyykh i stichnykh vodakh.
22. Newman, J., Balsara, N. P. (2021). *Electrochemical Systems*. John Wiley & Sons, 608. Available at: [https://books.google.com.ua/books/about/Electrochemical\\_Systems.html?id=JIYMEAAAQBAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Electrochemical_Systems.html?id=JIYMEAAAQBAJ&redir_esc=y)
23. Yusupova, M., Mamadjonova, M., Abdikamalova, A., Iskandarova, M., Isomidinova, M. (2025). Study of processes of electrochemical activation of water. "INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHYSICAL RESEARCH & ENGINEERING TECHNOLOGY PROBLEMS": (PRETP 2024), 3304, 40045. <https://doi.org/10.1063/5.0270089>
24. Yatskov, M. V., Korchyk, N. M., Prorok, O. A. (2016). Vyluchennia midi iz vysokokontsentrovanykh metalovmisnykh vidkhodiv iz podalshym yii vykorystanniam. *Visnyk NUVHP*, 3 (75), 222–229. Available at: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/6447>
25. Jackowska, K., Krysiński, P. (2020). *Applied Electrochemistry*. De Gruyter Brill. <https://doi.org/10.1515/9783110600834>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.363070

**CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR DUST TRANSPORT PROCESS AT AN INDUSTRIAL SITE WITH A PERFORATED PROTECTIVE SCREEN (p. 20–28)**

**Mykola Biliaiev**

Ukrainian State University of Science and Technologies,  
Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

**Oleksandr Berlov**

Ukrainian State University of Science and Technologies,  
Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7442-0548>

**Viktoriiia Biliaieva**

LLC «Technical University «METINVEST POLYTECHNIC»»,  
Zaporizhzhia, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2399-3124>

**Pavlo Kirichenko**

Kryvyi Rih National University,  
Kryvyi Rih, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4031-7693>

**Vitalii Kozachyna**

Ukrainian State University of Science and Technologies,  
Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

**Polina Mashykhina**

Kryvyi Rih National University,  
Kryvyi Rih, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3057-9204>

**Valerii Savin**

Kryvyi Rih National University,  
Kryvyi Rih, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6013-7371>

**Pavlo Semenenko**

Yuzhnoye State Design Office,  
Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0447-5591>

**Andrii Usenko**

Ukrainian State University of Science and Technologies,  
Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7467-6220>

**Svitlana Foris**

Private Enterprise "Expolight",  
Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7104-640X>

This work considers the process of dust pollution of the air at an industrial site when using a protective perforated screen. The removal of dust from contaminated land surfaces in areas where there are coal storage facilities leads to intensive air pollution in working areas. This poses a threat to the health of workers. Therefore, for practice, an important solution is to reduce the level of dust pollution of the air at industrial sites.

A likely engineering solution to such a task is to use protective screens, in particular, protective screens with perforations. These screens reduce the speed of the oncoming wind flow, which, in turn, reduces the intensity of dust formation. The location of the screens at an industrial site is important.

A laboratory experiment was conducted to determine the patterns of air flow velocity distribution behind a protective screen with perforations. The experimental data showed that the screen makes it possible to reduce the wind flow velocity by 5–6 times over an extension of the order of  $2H$  from the screen ( $H$  is the height of the screen). The air flow velocity increases intensively behind the screen in the area  $2H-4H$ . These results make it possible to determine the rational location of the screen relative to the dust formation area.

For theoretical assessment of the effectiveness of these screens, a numerical model was built based on the fundamental equations of continuum mechanics. The modeling equations include the dust mass transfer equation and the potential motion equation. Using the constructed numerical model, a computational experiment was conducted, which confirmed the effectiveness of using perforated protective screens: the area of dust air pollution in height decreased almost 3 times. The cost of computer time for conducting a computational experiment is 2 seconds. This makes it possible, when

carrying out design work, to perform a series of calculations in a short period of time.

**Keywords:** air pollution, protective screen, mathematical model, physical experiment, computational experiment.

#### References

1. Coal Yard Wind fence. ArcelorMittal Tubarão. YouTube. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=8UjAOZM4Cw>
2. Manufacturing Companies of PVC Coated Perforated Metal Sheet. Available at: <https://www.dj-metal-mesh.com/manufacturing-companies-of-pvc-coated-perforated-metal-sheet-products/>
3. Wang, H., Cheng, W., Sa, Z., Liu, J., Zhang, R., Chen, D. (2021). Experimental study of the effects of air volume ratios on the air curtain dust cleaning in fully mechanized working face. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126109. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126109>
4. Jing, D., Liu, H., Zhang, T., Ge, S., Ren, S., Ma, M. (2022). Study on coal dust diffusion law and new pneumatic spiral spray dedusting technology at transfer point of mine cross roadway. *Plos One*, 17 (8), e0272304. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272304>
5. Nie, W., Yang, B., Du, T., Peng, H., Zhang, X., Zhang, Y. (2022). Dynamic dispersion and high-rise release of coal dust in the working surface of a large-scale mine and application of a new wet dust reduction technology. *Journal of Cleaner Production*, 351, 131356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131356>
6. Zhao, Y., Ambrose, R. P. K. (2022). Predicting continuous dispersion and deposition of explosive dust in confined spaces using a discrete phase model. *Powder Technology*, 408, 117704. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117704>
7. Zou, C. (2021). Analysis on Dust Control Technology in Open-pit Quarry. *Journal of Energy and Natural Resources*, 10 (1), 28. <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20211001.13>
8. Wua, T., Yanga, Z., Zhanga, K., Wangb, B. (2023). Optimization study on the application of induced dust suppression cover in primary crushing station of open-pit mine. *Heliyon*, 9 (6), e16492. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16492>
9. Appiah, A., Li, Y., Aram, S. A., Utip, I. B., Saalidong, B. M., Li, Z. (2022). A Comparative Assessment of On-Site Application Effects of Mine Dust Prevention and Control Technology. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10 (09), 230–250. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.109014>
10. Biliaiev, M., Kozachyna, V., Kirichenko, P., Biliaieva, V., Semenenko, P. (2025). Numerical modeling of dust air pollution at industrial sites: Express modeling. *Polish Journal of Science*, 90, 31–36. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17170478>
11. Biliaiev, M., Kozachyna, V., Kirichenko, P., Biliaieva, V., Semenenko, P. (2025). Study of changes in coal moisture content at different air flow rates. *Slovak international scientific journal*, 99, 25–30. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17118961>
12. Venkatram, A., Heist, D. K., Perry, S. G., Brouwer, L. (2021). Dispersion at the edges of near road noise barriers. *Atmospheric Pollution Research*, 12 (2), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.11.017>
13. Zghurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., Beliaev, N. N. (1997). *Chyslennoe modelyrovanye rasprostraneniya zahriazneniya v okruzhaiushchei srede*. Kyiv: Naukova dumka, 368.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.365103

#### DEFINING THE PATTERNS OF CHANGE IN PM<sub>2.5</sub> CONCENTRATIONS IN KYIV UNDER MILITARY LOAD BASED ON SCENARIO ANALYSIS (p. 29–44)

**Viacheslav Hnatiuk**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-0709-0246>

**Anastasiia Skliarova**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
ORCID <https://orcid.org/0009-0003-7313-2901>

**Yuliia Kyrylenko**

Slovak University of Technology,  
Bratislava, Slovakia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5164-344X>

**Dmytro Sidorov**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9440-9872>

**Tetyana Shablii**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3454-675X>

This study examines the process of formation and change of the atmospheric air state over an urbanized territory under conditions of military-technogenic load. The task addressed is to define features in the spatial-temporal dynamics of PM<sub>2.5</sub> concentrations under the influence of military load on urbanized territories.

The work has assessed the impact of massive air attacks on the state of the atmospheric air in the city of Kyiv in 2025 based on the fine PM<sub>2.5</sub> particles concentrations. The study used data from air quality monitoring networks aggregated at the SaveEcoBot platform (Ukraine), as well as information on the nature, intensity, and consequences of military events in the capital's districts.

An integrated scenario approach to assessing the relationship between shelling and changes in PM<sub>2.5</sub> concentrations has been proposed, based on a combination of spatial, temporal, and event characteristics. The methodology takes into account the background values of PM<sub>2.5</sub> concentrations for each district, as well as the type of local impact of military events. Within the model, scenarios of direct and indirect impact, deterioration of air quality without shelling, situations without a significant increase in PM<sub>2.5</sub> and control cases were distinguished.

It was established that the largest share of observations (80.2%) is made up of cases of possible indirect impact – 340 episodes associated with the transfer of combustion products from the fire site and secondary aerosol pollution. For the category of direct possible impact, 28 cases (6.6%) were recorded at the highest average value of the integrated index of 0.79, which corresponds to a high level of connection between military events and deterioration of air quality. It has been shown that military events form short-term periods of extreme atmospheric air pollution.

The results of the study lay the groundwork for further integrated assessment of the combined impact of atmospheric, technogenic, and military factors on urbanized areas.

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>, fine aerosols, environmental safety, monitoring, scenario analysis, military impact.

#### References

1. Rawtani, D., Gupta, G., Khatri, N., Rao, P. K., Hussain, C. M. (2022). Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. *Science of the Total Environment*, 850, 157932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932>
2. Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*, 837, 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>
3. Harada, K. H., Soleman, S. R., Ang, J. S. M., Trzcinski, A. P. (2022). Conflict-related environmental damages on health: lessons learned from the past wars and ongoing Russian invasion of Ukraine. *Envi-*

- ronmental Health and Preventive Medicine, 27, 35. <https://doi.org/10.1265/ehpm.22-00122>
4. van der Vet, F. (2024). A polluting war: Risk, experts, and the politics of monitoring wartime environmental harm in Eastern Ukraine. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 42 (7), 1187–1206. <https://doi.org/10.1177/23996544241229553>
  5. Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC Text with EEA relevance. <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj>
  6. Necci, A., Krausmann, E. (2022). Introduction to eNATECH. Publications Office of the European Union. <https://dx.doi.org/10.2760/88277>
  7. Hnatiuk, V., Shabliy, T. (2025). Chemical hazard of the air component of Russia's aggression. Proceedings of the NTUU "Igor Sikorsky KPI". Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving, 1, 56–67. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2025.325838>
  8. Liquid Rocket Fuel in the OSCE Area: Overview of Disposal Aspects. Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE). Available at: <https://www.osce.org/fsc/35905>
  9. Kabinet ministriv Ukrainy. Rozporiadzhennia vid 28 lystopada 2012 r. No. 949-r Kyiv Pro zatverdzhennia pereliku komponentiv ridskoho raketnoho palyva, shcho pidlihaiut utylizatsiyi u 2013–2014 rokakh. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/949-2012-%D1%80#Text>
  10. Kabinet ministriv Ukrainy. Rozporiadzhennia vid 18 liutoho 2015 r. No. 108-r Kyiv. Pro zatverdzhennia pereliku komponentiv ridskoho raketnoho palyva, shcho pidlihaiut utylizatsiyi u 2015 i 2016 rokakh. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/108-2015-%D1%80#Text>
  11. Jiadan, D., Liqiao, T., Fang, C., Xiaobin, C., Xiaoling, C., Qiangqiang, X., Xinghui, X. (2023). Spatio-temporal variations of aerosol optical depth over Ukraine under the Russia-Ukraine war. *Atmospheric Environment*, 314, 120114. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120114>
  12. Bulhakov, Y., Hnatiuk, V., Shabliy, T. (2026). Resilience of composite environmental safety indices under wartime conditions: sensitivity to methodology and the impact of statistical distortions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (139)), 6–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.351699>
  13. Bondar, K., Tsiupa, I., Virshylo, M. (2025). Monitoring Air Pollution in Wartime Kyiv (Ukraine): PM2.5 Spikes During Russian Missile and Drone Attacks. *Urban Science*, 9 (11), 477. <https://doi.org/10.3390/urbansci9110477>
  14. Boychenko, S. G., Karamushka, V. I., Khlobystov, Ie. V. (2025). Assessment of pollutants emissions into the atmosphere due to the fire at the Kalynivka oil depot caused by a missile strike in March 2022. *Geofizicheskii Zhurnal*, 47 (2). <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322465>
  15. Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., Kelly, T. K. (2002). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems*, 21 (6), 11–25. <https://doi.org/10.1109/37.969131>
  16. Yashchenko, L., Androshchuk, O., Vasylenko, L., Chornoivan, Y. (2025). Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *European Journal of Environmental Sciences*, 15 (1), 18–27. <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>
  17. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., Mariychuk, R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13 (10), 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
  18. Savenets, M. V., Dvoretzka, I. V., Kozlenko, T. V., Komisar, K. M., Umansets, A. P., Zhemera, N. S. (2023). Status of atmospheric air pollution in Ukraine prior to the full-scale russian invasion. Part 1: ground-level content of pollutants. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 31, 69–87. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.05>
  19. Tsentralna heofizychna observatoriya imeni Borysa Sreznevskoho. Available at: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/>
  20. SaveEcoBot. Available at: <https://www.saveecobot.com/static/about>
  21. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha mista Kyieva u 2024 rotsi. Departament zakhystu dovkillia ta adaptatsiyi do zminy klimatu vykonavchoho orhanu Kyivskoi miskoi rady (Kyivskoi miskoi derzhavnoi administratsiyi). Available at: <https://ecodep.kyivcity.gov.ua/ekolohichniy-pasport-ta-rehionalna-dopovid/rehionalna-dopovid>
  22. Ukraine - Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4) : February 2022 - December 2024 (English). Washington, D.C. World Bank Group. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099022025114040022>
  23. Ukraine: Humanitarian Situation Snapshot (June - July 2025) [EN/UK]. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. Available at: <https://www.unocha.org/publications/report/ukraine/ukraine-humanitarian-situation-snapshot-june-july-2025>
  24. Live most polluted global major city ranking. Available at: <https://www.iqair.com/us/world-air-quality-ranking>
  25. SaveDnipro. Available at: <https://www.savednipro.org/about>
  26. Alves, C., Evtugina, M., Vicente, E., Vicente, A., Rienda, I. C., de la Campa, A. S. et al. (2023). PM2.5 chemical composition and health risks by inhalation near a chemical complex. *Journal of Environmental Sciences*, 124, 860–874. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.013>
  27. Sangkham, S., Phairuang, W., Sherchan, S. P., Pansakun, N., Munkong, N., Sarndhong, K. et al. (2024). An update on adverse health effects from exposure to PM2.5. *Environmental Advances*, 18, 100603. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100603>
  28. Okupanty vypustyly po Ukraini 19 raket ta ponad 120 BPLA – Povitriani Syly ZSU. Available at: <https://armyinform.com.ua/2025/02/11/okupanty-vypustyly-po-ukrayini-19-raket-ta-ponad-120-bpla-povitryani-syly-zsu/>
  29. Kyiv air pollution spikes following June 17 Russian assault. RBC-UKRAINE. Available at: <https://newsukraine.rbc.ua/news/kyiv-air-pollution-spikes-following-june-1750154550.html>

---

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364439

**IDENTIFYING PATTERNS OF CHANGE IN FIRE PROTECTION OF THE TENT FABRIC TREATED WITH AN EPOXY RESIN-BASED INTUMESCENT COATING (p. 45–56)**

**Yuriy Tsapko**

Kyiv National University of Construction and Architecture,  
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0625-0783>

**Oksana Berdnyk**

LLC «MC-Bauchemie»,  
Berezan, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5321-3518>

**Aleksii Tsapko**

Kyiv International University,  
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2298-068x>

**Ruslan Likhnyovskiy**

Institute of Scientific Research on Civil Protection  
of the National University of Civil Protection of Ukraine,  
Dmytrivkav vil., Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9187-9780>

**Tetiana Nehrii**

Kyiv National University of Construction and Architecture,  
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4239-3178>

**Oksana Kasianova**

Kyiv National University of Construction and Architecture,  
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5769-2496>

**Yurii Feshchuk**

Institute of Scientific Research on Civil Protection  
of the National University of Civil Protection of Ukraine,  
Dmytrivkav vil., Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4328-8473>

**Vasyl Lomaha**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0569-9987>

**Olga Bedratiuk**

Institute of Scientific Research on Civil Protection  
of the National University of Civil Protection of Ukraine,  
Dmytrivkav vil., Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0642-9399>

**Kseniia Bielikova**

Institute of Scientific Research on Civil Protection  
of the National University of Civil Protection of Ukraine,  
Dmytrivkav vil., Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7475-2115>

This study investigates the process of forming a fire-retardant coating based on modified epoxy resin on the surface of tent fabric. The task addressed is to ensure fire protection of tent fabric when treated with a coating based on modified epoxy resin. This is important given the relevance of fire-resistant materials for modern construction.

It has been proven that when treating tent fabric with epoxy resin, the free energy component of the fabric surface decreased by more than 2.3 times, while the polar component increased by 1.6 times, which indicates a change in the surface. At the same time, the tensile strength of tent fabric after treatment with epoxy resin increased by more than 4.1 times.

The study has shown that a sample of tent fabric caught fire when exposed to a burner flame for 5 s and continued to burn for 16 s when the ignition source was removed. The treatment of tent fabric with epoxy resin with flame retardant led to the formation of charring on the sample with a length of more than 70 mm, and the height of the swelling in the flame zone was about  $3 \div 5$  mm. When testing tent fabric samples for the flame spread index, it was found that the sample treated with epoxy resin caught fire in 524 s, the flame spread throughout the sample for 14 s, the burning length of the sample was 300 mm, and the flammability index was 36.3. However, for samples treated with epoxy resin filled with a mixture of ammonium polyphosphate and aluminum hydroxide, the flammability indices decreased by more than 30 times. The optimal concentration of components in the coating containing  $34 \div 35\%$  (wt.) of ammonium polyphosphate and  $9 \div 10\%$  (wt.) of aluminum hydroxide has been determined.

Thus, there are grounds for the possibility of designing fire-resistant coatings for construction.

**Keywords:** tent fabric, epoxy resin, mixture of ammonium polyphosphate and aluminum hydroxide, fire resistance of the fabric, surface energy.

**References**

- Bi, W., Tao, Z., Li, F., Nahar, Y., Jiang, C. (2025). Development of waterborne transparent intumescent coatings for timber buildings: Influence of phosphoric acid ratio. *Construction and Building Materials*, 493, 143225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143225>
- Riyazuddin, R., Bano, S., Husain, F. M., Khan, R. A., Alsalmeh, A., Siddique, J. A. (2020). Influence of Antimony Oxide on Epoxy Based Intumescent Flame Retardation Coating System. *Polymers*, 12 (11), 2721. <https://doi.org/10.3390/polym12112721>
- Zeng, L., Yang, L., Ai, L., Ye, Z., Liu, P. (2022). Synergistic Flame Retardant Effect of Ammonium Polyphosphate and Aluminum Hydroxide on Polyurethane. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 37 (3), 533–539. <https://doi.org/10.1007/s11595-022-2562-7>
- Shuklin, S. G., Makarova, L., Eremina, M. (2022). Epoxy Compositions Modified with Ammonium Polyphosphate and Boric Acid. *Key Engineering Materials*, 909, 21–27. <https://doi.org/10.4028/p-n42c64>
- Price, E. J., Covello, J., Tuchler, A., Wnek, G. E. (2020). Intumescent, Epoxy-Based Flame-Retardant Coatings Based on Poly(acrylic acid) Compositions. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12 (16), 18997–19005. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c00567>
- Doanh, T. C., Thi, N. H., Nguyen, H. T., Oanh, H. T., Doan, T. D., Tuyen, N. D. et al. (2025). Preparation and synergistic effect of aluminum hydroxide nanoplates on the fire resistance and thermal stability of the intumescent flame retardant epoxy composite. *RSC Advances*, 15 (21), 16814–16825. <https://doi.org/10.1039/d5ra00231a>
- Liu, Y., Yu, Z., Li, R., Wang, X., Qiao, Y. (2026). Ammonium polyphosphate modified epoxy-polyurethane system for high-performance bamboo composites with improved fire safety. *Materials Today Communications*, 51, 114726. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2026.114726>
- Liu, Y., He, J., Yang, R. (2015). The effects of aluminum hydroxide and ammonium polyphosphate on the flame retardancy and mechanical property of polyisocyanurate-polyurethane foams. *Journal of Fire Sciences*, 33 (6), 459–472. <https://doi.org/10.1177/0734904115609362>
- Inpravit, T., Niyomdacha, D., Promchantuek, C., Thangtong, T., Vanichvattanadecha, C., Pisitsak, P. (2026). Sustainable Intumescent Flame-Retardant Coating with Sericin, Phosphorus, and Silicon for Polyester Fabrics. *Polymers*, 18 (6), 682. <https://doi.org/10.3390/polym18060682>
- Wang, Y., Hu, Q., Ye, M., Huang, X., Chen, Q., Hu, C. (2026). Synergistic Flame Retardancy of Epoxy Resin with Aminated Multi-Walled Carbon Nanotubes and Ammonium Polyphosphate. *Polymers*, 18 (10), 1158. <https://doi.org/10.3390/polym18101158>
- Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., Drizhd, V. (2024). Fire-Retardant Epoxy Composition Modified with Nano-Clays. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 13 (8), 41–46. Available at: <https://www.ajer.org/papers/Vol-13-issue-8/13084146.pdf>
- Ramadan, N., Taha, M., La Rosa, A. D., Elsabbagh, A. (2021). Towards Selection Charts for Epoxy Resin, Unsaturated Polyester Resin and Their Fibre-Fabric Composites with Flame Retardants. *Materials*, 14 (5), 1181. <https://doi.org/10.3390/ma14051181>
- Tsapko, Y., Tsapko, A., Zhartovskyi, S., Likhnyovskyi, R., Kravchenko, M., Lialina, N. et al. (2024). Establishing fire protection patterns in wood using impregnation compositions from inorganic salts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (131)), 62–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313423>
- Rekiel, E., Zdziennicka, A., Jańczuk, B. (2021). Mutual influence of ethanol and surfactin on their wetting and adhesion properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 627, 127161. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127161>
- ASTM D5035-11. Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method). <https://www.mecmesin.com/standard/astm-d5035-11>

16. Tsapko, Y., Tsapko, Aleksii, Bondarenko, O., Chudovska, V. (2021). Thermophysical characteristics of the formed layer of foam coke when protecting fabric from fire by a formulation based on modified phosphorus-ammonium compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (10 (111)), 34–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233479>
17. Tsapko, Y., Tsapko, Aleksii, Bondarenko, O. (2019). Effect of a flameretardant coating on the burning parameters of wood samples. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (98)), 49–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163591>
18. Tsapko, Y., Tsapko, A. (2018). Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (94)), 62–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>
19. Tsapko, Y., Tsapko, A., Buiskykh, N., Horbachova, O., Mazurchuk, S., Matviichuk, A., Sarapin, Y. (2022). Establishing regularities of temperature conductivity reduction when protecting fabric against fire by intumescent coating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (116)), 74–80. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254546>
20. Tsapko, Y., Tsapko, A., Bondarenko, O. (2021). Defining patterns of heat transfer through the fire-protected fabric to wood. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (114)), 49–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245713>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364886

**ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ ХЛОРИДНОКИСЛИХ КОНЦЕНТРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗЧИНІВ (с. 6–19)**

М. В. Яцков, Н. М. Корчик, Н. М. Буденкова, О. І. Мисіна, С. В. Кирилок

Об'єктом дослідження були модельні хлоридні розчини, мідьвмісні хлоридноокислі (пероксидні та аміакатні) відпрацьовані технологічні розчини травлення друкованих плат з метою розробки уніфікованих технологій та обладнань.

Представлені результати досліджень щодо визначення основних технологічних параметрів електрохімічної регенерації, які забезпечують енергетично вигідні умови проведення процесу. Встановлено, що при підтримці в катодній камері Eh від 400 мВ до 450 мВ питома витрата струму на процес регенерації (ступінь вилучення міді 38–40%) складає від  $46 \cdot 10^3$  Кл/моль до  $48 \cdot 10^3$  Кл/моль (витрата струму від  $15 \cdot 10^3$  Кл/л до  $36 \cdot 10^3$  Кл/л), що у 4 рази менше порівняно з електролізом без корегування Eh. Дослідження дозволили корегуванням Eh проводити регенерацію в діафрагмовому електролізері в енергетично вигідних умовах та збільшити максимальний ступінь вилучення міді від 43% до 98%. При цьому питома витрата струму буде меншою у 4 рази, ніж без корегування Eh. Підтримка Eh в катодній камері близько 450 мВ дозволяє забезпечити більш повне вилучення міді. Корегування складу та окисно-відновних властивостей регенерованих розчинів здійснюється шляхом змішування у певному співвідношенні ВТР з католітом і анолітом. Суміш католіту та аноліту після електролізу рекомендовано направити в централізовану систему очищення стічних вод.

Проведені дослідно-промислові дослідження основних елементів наведених у роботі схем електрохімічної регенерації у діафрагмовому електролізері. Ці схеми доповнюються додатковими елементами для попередньої обробки: проміжною ємністю, бездіафрагмовим електролізером (для регулювання Eh); камерою, суміжною з анодною (для корегування складу розчину після регенерації).

**Ключові слова:** електрохімічна регенерація, мідьвмісні хлоридноокислі розчини травлення, технологічні, окисно-відновні параметри.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.363070

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕНОСУ ПИЛУ НА ПРОМИСЛОВИМУ МАЙДАНЧИКУ ПРИ НАЯВНІСТІ ЗАХИСНОГО ПЕРФОРОВАНОГО ЕКРАНУ (с. 20–28)**

М. М. Біляєв, О. В. Берлов, В. В. Біляєва, П. С. Кіріченко, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Савін, П. В. Семененко, А. Ю. Усенко, С. М. Форис

Об'єктом дослідження є процес пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при використанні захисного перфорованого екрану. Винос пилу з забруднених поверхонь землі на територіях, де є сховища вугілля, приводить до інтенсивного забруднення повітря в робочих зонах. Це створює загрозу здоров'ю працівників. Тому для практики важливе рішення по зниженню рівня пилового забруднення повітря на промислових майданчиках. Інженерним рішенням такої задачі може використання захисних екранів, в частоті, захисних екранів з перфорацією. Ці екрани зменшують швидкість набігаючого вітрового потоку, що, в свою чергу, зменшує інтенсивність пилоутворення. Важливим є місце розташування екранів на промисловому майданчику. Проведено лабораторний експеримент по визначенню закономірностей розподілу швидкості повітряного потоку за захисним екраном з перфорацією. Дані експерименту показали, що екран дає можливість зменшити швидкість потоку вітру в 5–6 разів на довжині порядку  $2H$  від екрану ( $H$  – висота екрану). Швидкість повітряного потоку інтенсивно збільшується за екраном на ділянці  $2H-4H$ . Ці результати дають можливість визначити раціональне місце розташування екрану відносно області пилоутворення.

Для теоретичного оцінювання ефективності даних екранів побудована чисельна модель на базі фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. Моделюючи рівняння включають в себе рівняння масопереносу пилу та рівняння потенціального руху. За допомогою побудованої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент, що підтвердив ефективність використання захисних екранів з перфорацією: область пилового забруднення повітря по висоті зменшилася практично в 3 рази. Витрати комп'ютерного часу на проведення обчислювального експерименту дорівнюють 2 секунди. Це дає можливість, при проведенні проєктних робіт, здійснити серію розрахунків за стислий проміжок часу.

**Ключові слова:** забруднення повітря, захисний екран, математична модель, фізичний експеримент, обчислювальний експеримент.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.365103

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЙ PM<sub>2.5</sub> У КИЄВІ В УМОВАХ ВОЄННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ СЦЕНАРНОГО АНАЛІЗУ (с. 29–44)**

В. В. Гнатюк, А. М. Складярова, Ю. І. Кириленко, Д. Е. Сідоров, Т. О. Шаблій

Об'єктом дослідження був процес формування та зміни стану атмосферного повітря урбанізованої території в умовах воєнно-техногенного навантаження. Вирішувалась проблема визначення особливостей просторово-часової динаміки концентрацій PM<sub>2.5</sub> під впливом воєнного навантаження на урбанізовані території.

У роботі проведено оцінювання впливу масованих повітряних атак на стан атмосферного повітря міста Києва у 2025 році за концентраціями дрібнодисперсних частинок PM<sub>2.5</sub>. Для дослідження використано дані мереж моніторингу якості повітря, агреговані платформою SaveEcoBot (Україна), а також інформацію щодо характеру, інтенсивності та наслідків військових подій у районах столиці.

Запропоновано інтегральний сценарний підхід до оцінювання взаємозв'язку між обстрілами та змінами концентрацій PM<sub>2.5</sub>, який базується на поєднанні просторових, часових і подієвих характеристик. Методика враховує фонові значення концентрацій PM<sub>2.5</sub> для кожного з районів, а також тип локального впливу військових подій. У межах моделі виділено сценарії прямого та непрямого впливу, погіршення якості повітря без обстрілів, ситуації без суттєвого зростання PM<sub>2.5</sub> та контрольні випадки.

Встановлено, що найбільшу частку спостережень (80,2%) становлять випадки можливого непрямого впливу – 340 епізодів, пов'язаного з переносом продуктів горіння з місця пожежі та вторинним аерозольним забрудненням. Для категорії прямого можливого впливу зафіксовано 28 випадків (6,6%) із найвищим середнім значенням інтегрального індексу 0,79, що відповідає високому рівню зв'язку між воєнними подіями та погіршенням якості повітря. Показано, що воєнні події формують короткочасні періоди екстремального забруднення атмосферного повітря.

Результати дослідження створюють основу для подальшого інтегрального оцінювання сумісного впливу атмосферних, техногенних і військових чинників на урбанізовані території.

**Ключові слова:** PM<sub>2.5</sub>, дрібнодисперсні аерозолі, екологічна безпека, моніторинг, сценарний аналіз, військовий вплив.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364439**

### **ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ ВОГНЕЗАХИСТУ НАМЕТОВОЇ ТКАНИНИ ПРИ ОБРОБЛЕНІ ІНТУМЕСЦЕНТНИМ ПОКРИТТЯМ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНОЇ СМОЛИ (с. 45–56)**

**Ю. В. Цапко, О. Ю. Бердник, О. Ю. Цапко, Р. В. Ліхнівський, Т. О. Негрій, О. М. Касьянова, Ю. Л. Фецуц, В. В. Ломага, О. І. Бедратюк, К. Г. Белікова**

Об'єктом досліджень є процес формування вогнезахисного покриття на основі модифікованої епоксидної смоли на поверхні наметової тканини. Проблема, яка досліджувалась, полягає у забезпеченні вогнезахисту наметової тканини при обробленні покриттям на основі модифікованої епоксидної смоли. Це важливо, оскільки виробництво вогнестійких матеріалів для сучасного будівництва є актуальним. Доведено, що при обробленні наметової тканини епоксидною смолою складова вільної енергії поверхні тканини знизилась понад 2,3 рази, натомість полярна підвищилась у 1,6 рази, що засвідчує про зміну поверхні. При цьому міцність до розриву наметової тканини після обробки епоксидною смолою підвищилась в понад 4,1 рази. Дослідження показали, що зразок наметової тканини при впливі полум'я пальника протягом 5 с загорівся і при видаленні джерела запалювання протягом 16 с продовжував горіти. Оброблення наметової тканини епоксидною смолою з антипіреном призвело до утворення обуглювання на зразку довжиною понад 70 мм, а висота спучення у зоні дії полум'я становила близько 3 ÷ 5 мм. Під час випробувань зразків наметової тканини на величину індексу поширення полум'я було встановлено, що зразок, оброблений епоксидною смолою, загорівся на 524 с, полум'я поширилося по всьому зразку протягом 14 с, довжина горіння зразка склала 300 мм, індекс горючості склав 36,3. Проте, для зразків, оброблених епоксидною смолою, наповненої сумішшю поліфосфату амонію та гідроксиду алюмінію, індекси горючості знизився понад 30 разів. Визначено оптимальну концентрацію компонентів у покритті, що містить 34 ÷ 35 % (мас.) амонію поліфосфату та 9 ÷ 10 % (мас.) гідроксиду алюмінію. Таким чином, є підстави про можливість створення вогнестійких покриттів для будівництва.

**Ключові слова:** наметова тканина, епоксидна смола, суміш поліфосфату амонію і гідроксиду алюмінію, вогнестійкість тканини, енергія поверхні.