

УДК 666.96

Гончар В.П., канд. техн. наук
ТОВ «АРТІДЕК», vadimus-p@ukr.net
Гончар О.А., канд. техн. наук, доцент
Кочевих М.О., канд. техн. наук, доцент,
kochevykh.mo@knuba.edu.ua
Анопко Д.В., канд. техн. наук, доцент,
anopko.dv@knuba.edu.ua
Київський національний університет будівництва і архітектури, gonchar.oa@knuba.edu.ua

НАПРЯМКИ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ CO₂ У ЦЕМЕНТНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Характерною особливістю виробництва портландцементу є значна емісія CO₂: залежно від сировини та застосованої технології викиди CO₂ становлять 0.657...0.822 тон на тону виробленого портландцементу [1, 2, 3]. Таким чином, обсяг викидів CO₂ цементною промисловістю сягає 2,7...3,4 мільярда тон на рік, що складає 6,5...10% від загальної річної антропогенної емісії вуглекислого газу, яку оцінюють в 40...53 млрд. тон [4, 5, 6]. Наведені дані свідчать про необхідність зниження вуглецевого сліду цементної промисловості.

Важливою особливістю виробництва портландцементу є наявність двох джерел викидів вуглекислого газу - близько 40...50 % від загальної кількості генерується за рахунок спалювання палива, ще 50...60% виділяються в процесі нагрівання карбонатної сировини [7, 8]. Отже, стратегії зниження викидів можна розділити на наступні групи, залежно від джерела викидів CO₂, яке розглядається в якості об'єкта:

1. перехід на сучасні енергоефективні технології здебільшого, вже відбувся. Заміна мокрого процесу на сухий, кульових млинів на вертикальні роторні, введення пре-кальцинаторів, циклонів-декарбонізаторів та оптимізація довжини печей вже призвели до суттєвого зниження викидів CO₂ за рахунок більш економного використання палива [9];

2. використання безвуглецевого або вуглецево-нейтрального палива;

3. використання кисню (процес OxyFuel), або збагачення киснем повітря також дозволяє знизити викиди CO₂ за рахунок підвищення ефективності згоряння палива та отримання високопотенційного теплоносія, що призводить до зниження витрат палива [10];

4. Утилізація низькопотенційного тепла та скорочення теплових витрат є очевидним та потенційно ефективним механізмом зниження емісії CO₂;

5. перехід на цементні зі зниженим вмістом клінкеру/безклінкерні;

6. використання бетону як поглинач CO₂ базується на концепції, що, з точки зору термодинаміки, є можливою взаємодія CO₂ з продуктами гідратації та твердіння портландцементу, аж до повної карбонізації всього наявного СаО, без значного погіршення (а іноді навіть з поліпшенням) властивостей бетону [11, 12].

Частину вищерозглянутих технологій, поєднує концепція під назвою **CCUS**: Carbon Capturing, Utilisation and Storage спрямована на зниження вуглецевого навантаження на атмосферу за рахунок ефективного вловлювання та утилізації CO₂. Наглядним прикладом втілення цієї концепції є проект **HERCCULES**, який реалізується в даний момент групою компаній з Європи та України за фінансування Європейським Союзом [13]. Цей проект передбачає реконструкцію двох цементних заводів в Європі шляхом:

- переведення пре-кальцинатора на процес кисневого спалювання OxyFuel, що дозволить отримати на виході потік концентрованого CO₂;
- встановлення на виході з пре-кальцинатору блоку компресування та очистки, який є більш ефективним, ніж традиційно застосовувані поглиначі на основі рідкого сорбенту для вловлювання та рафінування більшої частини CO₂;
- перехід на сучасні тверді сорбенти з поліпшеною здатністю до регенерації для вловлювання залишкового CO₂.

Завдяки наведеним заходам планується забезпечити ефективність вловлювання CO₂ на рівні 95...98% та отримати рідкий очищений CO₂ чистотою не нижче 99,9%, що дозволить використати його в якості ліквідного товару.

Список посилань

1. Li, C., Gong, X. Z., Cui, S. P., Wang, Z. H., Zheng, Y., & Chi, B. C. (2011). CO₂ Emissions due to Cement Manufacture. *Materials Science Forum*, 685, 181–187. URL:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.685.181>.
2. Khalil, E., & AbouZeid, M. (2025). Framework for Cement Plants Assessment Through Cement Production Improvement Measures for Reduction of CO₂ Emissions Towards Net Zero Emissions. *Construction Materials*, 5(2), 20. URL:<https://doi.org/10.3390/constrmater5020020>.
3. Peng, J. X., Huang, L., Zhao, Y. B., Chen, P., Zeng, L., & zheng, W. (2012). Modeling of Carbon Dioxide Measurement on Cement Plants. *Advanced Materials Research*, 610–613, 2120–2128. URL:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.610-613.2120>.
4. Dhakal, S., J.C. Minx, F.L. Toth, A. Abdel-Aziz, M.J. Figueroa Meza, K. Hubacek, I.G.C. Jonckheere, Yong-Gun Kim, G.F. Nemet, S. Pachauri, X.C. Tan, T. Wiedmann, 2022: Emissions Trends and Drivers. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.004. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-2/>.
5. Hannah R., Roser M, (2020) CO₂ emissions. URL:<https://ourworldindata.org/CO2-emissions>.
6. Briggs C, Gilfillan D, Hefner M, Marland E, Marland G. Annual estimates of global and national CO₂ emissions from fossil fuels: Tracking revisions to the United Nations energy statistics database input energy data. *Environmental Data Science*. 2023;2:e40. doi:10.1017/eds.2023.38.
7. CHATTERJEE, Anjan Kumar. *Cement production technology: Principles and practice*. CRC Press, 2018.
8. Ige, O.E., Von Kallon, D.V. & Desai, D. Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. *Clean Techn Environ Policy* 26, 579–597 (2024). URL:<https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0>. URL:<https://www.cambridge.org/core/journals/environmental-data-science/article/annual-estimates-of-global-and-national-co2-emissions-from-fossil-fuels-tracking-revisions-to-the-united-nations-energy-statistics-database-input-energy-data/3B5985C70DA555AC9ECDEB12C3100709>.
9. Sarfraz, S. et al. (2025). Potentials for Energy Savings and Carbon Dioxide Emissions Reduction in Cement Industry. In: Kohl, H., Seliger, G., Dietrich, F., Mur, S. (eds) *Sustainable Manufacturing as a Driver for Growth*. GCSM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. URL:https://doi.org/10.1007/978-3-031-77429-4_85.
10. Zhong, L., Hills, T.P., and Fennell, P. (2016). Phase evolution, characterisation, and performance of cement prepared in an oxyfuel atmosphere. *Faraday Discuss.* 192, 113–124. URL:<https://doi.org/10.1039/c6fd00032k>.
11. El-Gamal, S., El-Khouly, H., Fayek, S. et al. Enhancing sustainability: integrating carbon dioxide into Portland cement concrete. *Innov. Infrastruct. Solut.* 8, 278 (2023). URL:<https://doi.org/10.1007/s41062-023-01247-x>
12. Wang D, Xiao J, Duan Z (2022) Strategies to accelerate CO₂ sequestration of cement-based materials and their application prospects. *Constr Build Mater* 314:125646. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821033821?via%3Dihub>.
13. Spinelli, Maurizio & Scaccabarozzi, Roberto & Artini, Chiara & Giudici, Fabio & Gatti, Manuele & Romano, Matteo & Fantini, Martina & Liverani, Irene & Magli, Francesco & Canonico, Fulvio & Martínez, Isabel & Grasa, G. & Marchi, Norberto & Athitsou, Katerina & Katsiotis, Marios & Michalis, Vasileios & Panarisi, Lucio & Cioffi, Laura & Dütschke, Elisabeth & Consonni, Stefano. (2025). HERCCULES project: overview, objectives and early progress. *SSRN Electronic Journal*. 10.2139/ssrn.5070645. URL:https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5070645.