

Сучасні тренди та перспективи розвитку досліджень технології гідроабразивного різання матеріалів у гірництві та загальній інженерії

Гідроабразивна технологія різання (AWJ) є ефективним методом обробки матеріалів, що забезпечує високу точність, мінімальний термічний вплив і широкий спектр застосування в різних галузях промисловості. У статті проведено бібліометричний аналіз досліджень у сфері гідроабразивного різання, використовуючи дані наукометричних баз Scopus та Web of Science (WoS). Основна увага приділена аналізу динаміки публікацій, ключових напрямів досліджень та технологічних трендів, пов'язаних із оптимізацією параметрів процесу, чисельним моделюванням, застосуванням у гірничодобувній промисловості та екологічними аспектами використання технології. Для проведення дослідження використано аналітичний пакет R «bibliometrix» та програмне забезпечення VOSviewer, що дозволило візуалізувати мережеві зв'язки між ключовими термінами, авторами, тематиками досліджень і трендами розвитку технології. Аналіз результатів виявив основні напрями розвитку гідроабразивного різання, враховуючи оптимізацію параметрів різання, покращення якості оброблених поверхонь, моделювання процесів взаємодії абразивних частинок із матеріалом та автоматизацію керування технологічними процесами. Значна частина наукових праць присвячена застосуванню гідроабразивного різання у видобувній промисловості, де ця технологія є альтернативою традиційним методам буріння та вибухових робіт. Також спостерігається зростання досліджень, спрямованих на зменшення екологічного впливу, включаючи повторне використання води та розробку нових видів абразивних матеріалів. Результати дослідження дозволяють систематизувати сучасні наукові тенденції та визначити перспективи подальшого розвитку гідроабразивної технології різання, зокрема у контексті промислового впровадження та вдосконалення методів обробки матеріалів.

Ключові слова: гідроабразивне різання; бібліометричний аналіз; оптимізація; каменеобробна промисловість; відкриті гірничі роботи; технології видобування та обробки каменю.

Постановка проблеми. Гідроабразивна технологія різання є сучасним методом обробки матеріалів, що широко використовується в промисловості завдяки своїм унікальним перевагам, таким як висока точність, відсутність термічного впливу на матеріал і можливість обробки широкого спектра матеріалів, враховуючи метали, композити, кераміку та скло. Ця технологія знаходить застосування у таких сферах, як авіаційна та автомобільна промисловість, машинобудування, видобуток корисних копалин і медична інженерія. З огляду на швидкий розвиток промисловості та зростаючі вимоги до якості обробки матеріалів, дослідження у сфері гідроабразивного різання активно розширюються. Науковці зосереджують увагу на оптимізації параметрів процесу, підвищенні ефективності технології, покращенні якості оброблених поверхонь та зменшенні негативного екологічного впливу.

Попри значний обсяг наукових досліджень у галузі, актуальним залишається питання комплексного аналізу сучасних тенденцій і ключових наукових напрямів у дослідженнях гідроабразивного різання. Дослідження, засновані на аналізі наукометричних даних, дозволяють не лише виявити основні тренди, але й визначити перспективи подальшого розвитку технології.

Аналіз наукометричних баз даних, таких як Web of Science та Scopus, дозволяє оцінити динаміку наукових публікацій, визначити найважливіші тематичні напрями та простежити еволюцію досліджень у цій сфері. Використання методів бібліометричного аналізу дозволяє ідентифікувати найбільш цитовані роботи, ключові концепції та взаємозв'язки між дослідницькими тематиками.

Аналіз досліджень і публікацій, на які спирається автор. Гідроабразивна технологія різання (AWJ) розглядається як високоефективний метод механічної обробки, що забезпечує точне розділення матеріалів без значного термічного впливу. Останні наукові дослідження, представлені в базі Scopus, охоплюють широкий спектр аспектів, зокрема, оптимізацію параметрів процесу, моделювання взаємодії абразивних частинок із матеріалом, впровадження технології у гірничодобувну промисловість, а також екологічні аспекти застосування.

Одним із ключових напрямів досліджень є застосування гідроабразивного різання у гірничодобувній промисловості. Дослідження Gauert та ін. розглядає перспективи використання технології високого тиску для підземного видобутку корисних копалин, зокрема золота та платинових руд [3]. Автори зазначають, що AWJ дозволяє суттєво знизити споживання вибухових матеріалів і витрати на підняття породи на поверхню, що робить цей метод економічно вигідною альтернативою традиційному бурінню та вибуховим роботам.

Дослідження Feng та ін. зосереджується на моделюванні процесу гідроабразивного різання за допомогою методу згладжених частинок (SPH) [2]. Використання цього підходу дозволяє моделювати складні фізичні взаємодії між різальним струменем та матеріалом, що особливо важливо для розуміння механізмів руйнування вугільних пластів. Отримані результати свідчать, що використання абразивного водяного струменя значно підвищує ефективність різання порівняно зі стандартними водяними струменями, що відкриває можливості для вдосконалення технології. Іншим важливим аспектом досліджень є оптимізація параметрів процесу різання. У роботі Oh та ін. розглядається вплив подачі абразиву на продуктивність різання гірських порід [5]. Автори визначили оптимальні співвідношення абразиву та води, що дозволяє підвищити ефективність процесу, зменшуючи при цьому витрати матеріалу. Встановлено, що збільшення подачі води сприяє кращій продуктивності різання, тоді як надлишок абразиву не завжди дає позитивний ефект. Окремий напрям досліджень стосується застосування високого тиску для зниження напруженості в гірських породах. У дослідженні Wen та ін. представлено методику розрахунку оптимальних параметрів різання з високим тиском для зняття напруги у вугільних пластах, що піддаються ризику гірничих ударів [10]. Використання AWJ у цьому контексті дозволяє не лише підвищити безпеку гірничих робіт, але й зменшити витрати на профілактичні заходи. Аналізуючи екологічні аспекти гідроабразивного різання, у дослідженні Radvanska застосовується метод аналізу наслідків відмов (FMEA) для оцінки ризиків та розробки заходів щодо підвищення безпечності технології [6]. Результати дослідження вказують, що автоматизація та цифрове управління AWJ допомагають мінімізувати вплив людського фактора, підвищуючи ефективність та надійність процесу. Важливе значення має дослідження Valíček та ін., що зосереджене на визначенні параметрів топографії поверхні після обробки [7]. Автори аналізують взаємозв'язок між параметрами різання, глибиною різку та характеристиками матеріалу, пропонуючи оптимальні налаштування технології для покращення якості поверхонь. Окремі дослідження доповнюють аналіз гірничих процесів, орієнтуючись на вивчення характеристик поверхонь після різання та оптимізацію енергоспоживання в процесах гідроабразивної різки [11, 9]. Ma та ін. досліджують зміни в характеристиках бетонних конструкцій під дією гідроабразивного різання, що може мати значення для гірничих робіт і тунелебудування [4]. Також важливими є дослідження, що демонструють, як різні форми водяного струменя впливають на розпад порід під час обробки [8], а також аналіз взаємодії різального струменя з гірничими породами в умовах екстремального навантаження [1].

Загалом аналіз літератури свідчить про активний розвиток досліджень у сфері гідроабразивного різання, що охоплюють механічні, фізичні, екологічні та економічні аспекти. Сучасні дослідження спрямовані на оптимізацію параметрів процесу, вдосконалення технологічного моделювання, розширення застосування AWJ у видобувній промисловості та підвищення екологічної безпеки.

Метою статті є аналіз сучасних наукових досліджень, присвячених гідроабразивному різанню, виявлення ключових напрямів розвитку цієї технології та оптимізація її параметрів.

Викладення основного матеріалу. Для проведення дослідження використовувалися дані наукометричних баз Scopus та Web of Science, що забезпечило доступ до найактуальніших наукових публікацій, присвячених гідроабразивному різанню. Аналіз здійснювався на основі бібліометричного підходу, що дозволило визначити ключові наукові тренди, дослідницькі напрями та взаємозв'язки між різними аспектами технології AWJ. До огляду входили статті та конференційні матеріали, що висвітлюють оптимізацію параметрів процесу, моделювання взаємодії абразивних частинок із матеріалом, впровадження технології у гірничодобувну промисловість та екологічні аспекти її використання. Використання даних зі Scopus та WoS дозволило забезпечити комплексний підхід до оцінки наукових трендів у дослідженнях у сфері гідроабразивного різання, що сприяє розумінню сучасних тенденцій та перспектив розвитку цієї технології.

На рисунку 1 представлено динаміку наукових публікацій у наукометричній базі Web of Science, що стосуються досліджень у сфері гідроабразивного різання. Аналіз представлених даних дозволяє виявити періоди активного зростання наукового інтересу до тематики та можливі чинники, що вплинули на ці зміни.

Спостерігається нерівномірний розподіл кількості публікацій за роками. Декілька пікових періодів свідчать про підвищену наукову активність, що, ймовірно, зумовлено появою нових технологічних рішень, вдосконаленням методів дослідження або впровадженням інновацій у промисловості. Найбільша кількість публікацій зафіксована в один із років, що може вказувати на проведення масштабних досліджень або активне фінансування цієї тематики. Періоди спаду кількості публікацій можуть бути пов'язані з тимчасовим зменшенням інтересу до теми, економічними факторами, а також зосередженням уваги дослідників на суміжних галузях. Однак навіть у роки зі зниженими показниками науковий інтерес до технології гідроабразивного різання не зникає повністю, що підтверджує її значущість у сучасних виробничих процесах. Аналіз графіка дозволяє зробити висновок про циклічний характер розвитку досліджень у цій сфері, що відповідає загальним трендам наукової діяльності: періоди активного експериментування змінюються фазами теоретичного осмислення отриманих результатів. Подальше дослідження динаміки може допомогти визначити майбутні перспективи розвитку гідроабразивного різання та його потенційні напрями застосування.

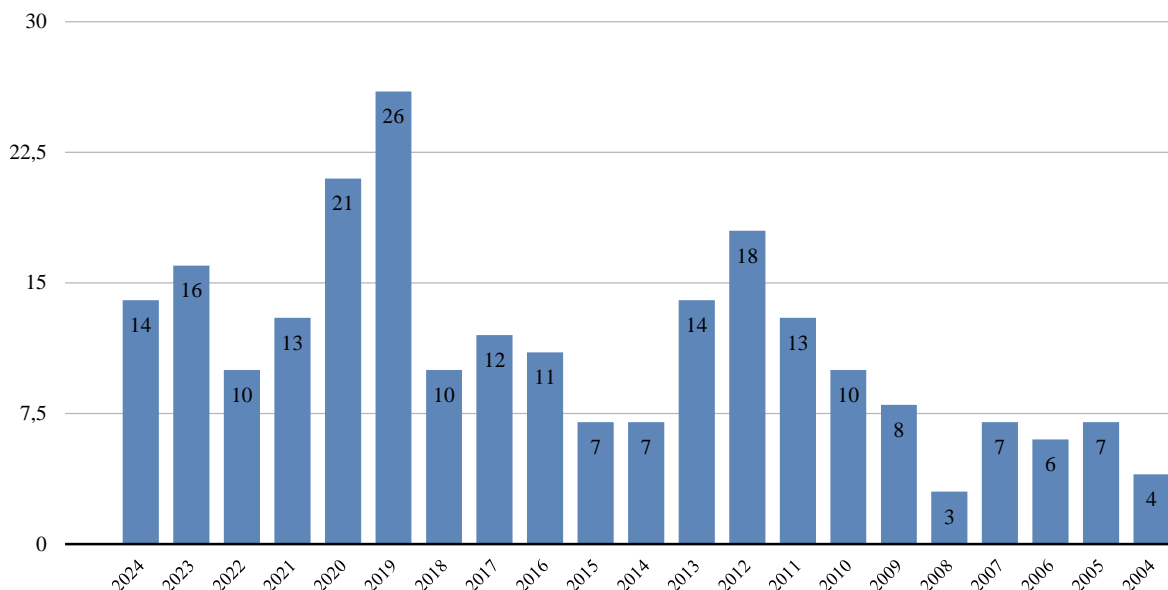


Рис. 1. Кількість наукових публікацій у наукометричній базі WoS з проблематики технології гідроабразивного різання в період 2005–2024 рр.

На рисунку 2 представлено ієрархічну діаграму (Треємар), що відображає розподіл наукових досліджень за тематичними напрямками в наукометричній базі WoS у сфері гідроабразивної технології різання.

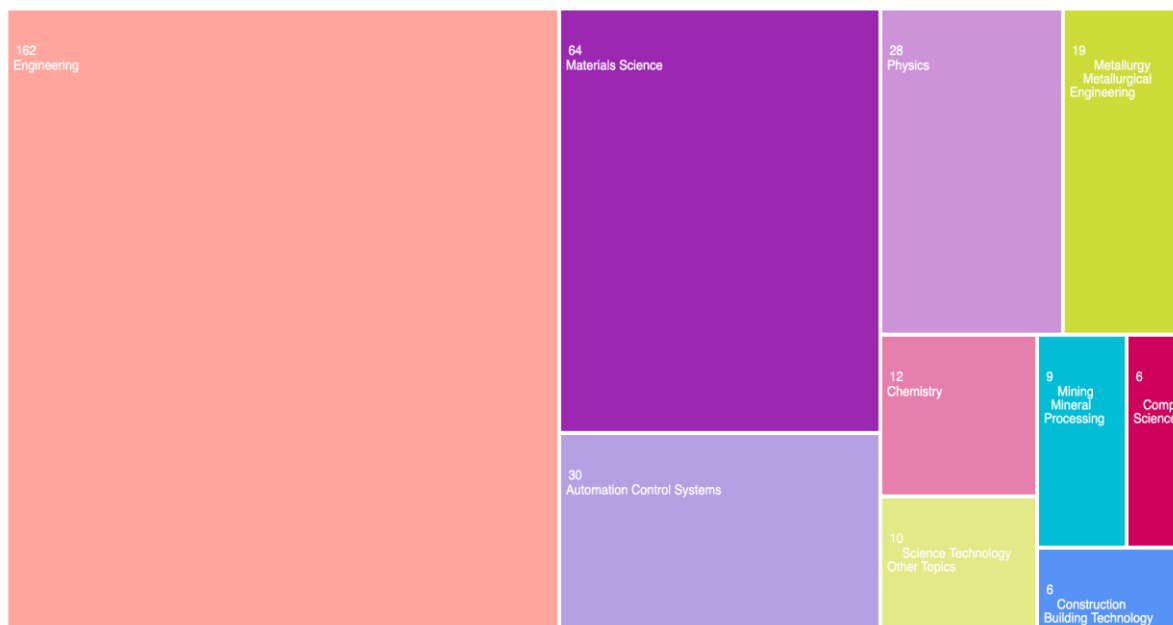


Рис. 2. Напрями наукових досліджень з проблематики технології гідроабразивного різання

Найбільша частка досліджень зосереджена в галузі інженерії, що свідчить про технічну спрямованість даної тематики. Значний внесок мають дослідження в галузях матеріалознавства, систем автоматизованого керування, фізики та металургії, що вказує на міждисциплінарний характер наукових підходів до вивчення процесів гідроабразивного різання. Також представлено менші за обсягом дослідження, пов’язані з хімією, комп’ютерними науками, технологіями будівництва та збагачення корисних копалин, що вказує на широке застосування цієї технології в різних галузях промисловості. Інженерія є основним напрямом наукових досліджень, що зосереджує свою увагу на вдосконаленні технологічних параметрів гідроабразивного різання, розробці нових конструкцій різальних сопел, оптимізації процесів обробки та підвищенні ефективності різання матеріалів різної твердості. Різноманітність наукових напрямів у цій сфері свідчить про широкі можливості розвитку та вдосконалення гідроабразивної технології різання, що забезпечує її застосування у високоточних виробничих процесах та перспективних галузях промисловості.

Рисунок 3 ілюструє еволюцію наукових досліджень у сфері гідроабразивного різання, відображаючи трендові теми та їх частоту в різні періоди часу.

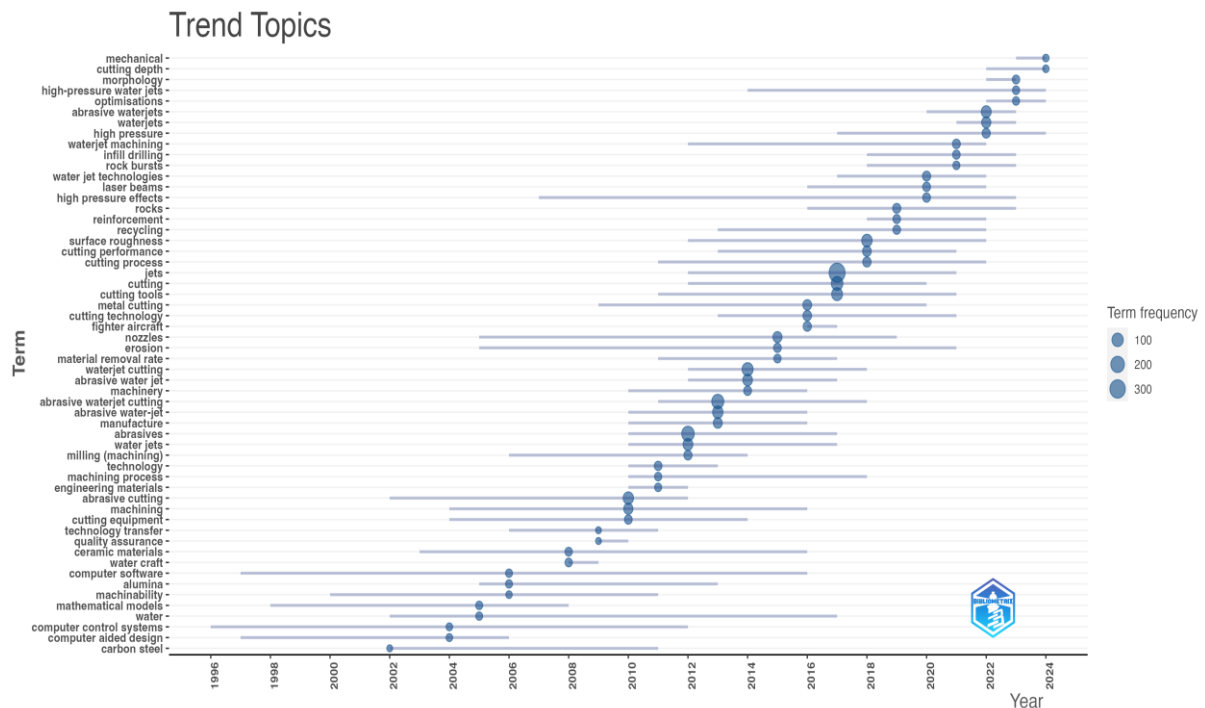


Рис. 3. Тренди наукових досліджень з проблематики технології гідроабразивного різання в період 2005–2024 рр.

Візуалізація представлена у вигляді бульбашкової діаграми, де кожен термін позначає ключові напрями досліджень, а розмір бульбашки відображає частоту його згадування у наукових публікаціях. На ранніх етапах дослідження (1996–2005 рр.) домінували теми, пов'язані з механічними аспектами процесу різання, такими як глибина різання, морфологія різі, високий тиск і абразивні водяні струмені. Це свідчить про фундаментальні дослідження механізмів взаємодії високошвидкісного водного струменя з різними матеріалами. У період 2006–2015 рр. науковий інтерес змістився у бік оптимізації процесу різання, контролю параметрів обробки, дослідження якості поверхонь і продуктивності матеріалу. У цей час активно вивчалися такі поняття, як поверхнева шорсткість, ерозія, швидкість видалення матеріалу та технології металорізання. Після 2015 р. зростає увага до автоматизації процесу та застосування комп'ютерного моделювання, що відображено у зростанні кількості публікацій за такими ключовими термінами, як комп'ютерне проектування (CAD), комп'ютерні контрольні системи та математичні моделі. Це вказує на інтеграцію передових цифрових технологій у процеси гідроабразивного різання. Останні роки (2020–2024) характеризуються посиленням досліджень у сфері інженерних матеріалів, технологічних процесів, а також розвитку абразивних матеріалів і їхніх властивостей. Зокрема, помітно зростає кількість досліджень, пов'язаних із циркуляцією та повторним використанням води, підвищенням екологічності процесу та розширенням спектра оброблюваних матеріалів. На рисунку 3 спостерігається поступова еволюція наукових досліджень від фундаментальних досліджень механіки процесу до інноваційних рішень в автоматизації, цифровому моделюванні та екологічності гідроабразивного різання, що свідчить про прагнення наукової спільноти до вдосконалення технології, підвищення її ефективності та розширення сфер застосування.

На рисунку 4 візуалізовано взаємозв'язок між ключовими словами, що застосовуються в назвах статей (TL_TM), ключовими словами авторів (DE) та ключовими словами, що використовуються в базі даних (ID) у сфері гідроабразивного різання. Ліва частина (TL_TM) містить найпоширеніші терміни, що зустрічаються у заголовках наукових публікацій. Основними ключовими поняттями є «abrasive», «waterjet», «cutting», «surface», «parameters», що вказує на фокус досліджень на процесах різання, обробки поверхонь та параметрах технологічного процесу. Центральна частина (DE) містить ключові слова, які використовували самі автори під час подачі статей. Тут вже з'являються більш конкретні терміни, такі як «abrasive waterjet»,

«surface roughness», «cutting performance», «water jet cutting», «optimization», що вказує на актуальність вивчення параметрів технології різання та її впливу на якість обробленої поверхні.



Рис. 4. «Three-fields plot» ключових слів у наукових дослідженнях з проблематики технології гідроабразивного різання

Права частина (ID) представляє терміни, що використовуються в наукометричних базах для індексації статей. Тут зустрічаються такі поняття, як «abrasive waterjet cutting», «cutting performance», «machining», «cutting process», «nozzles», «metal cutting», що свідчить про систематизацію досліджень у категоріях, пов'язаних із механічною обробкою матеріалів та параметрами процесу.

Фокус досліджень зосереджений на характеристиках процесу різання та обробки матеріалів, що проявляється у вивченні ефективності технології, шорсткості обробленої поверхні, оптимізації параметрів та продуктивності різання. Аналіз взаємозв'язків між ключовими термінами свідчить про сталість дослідницьких тем, адже терміни з категорії TL_TM безпосередньо корелюють із ключовими словами DE та ID. Водночас це дозволяє виявити нові напрями досліджень та оцінити їхню динаміку. Також спостерігається інтеграція нових технологій, що простежується через використання таких термінів, як «optimization» та «laser cutting». Це може свідчити про взаємопроникнення технологічних підходів та перспективи комбінованого застосування методів різання.

На рисунку 5 наведено візуалізацію мережевого аналізу ключових слів, що використовуються у дослідженнях з гідроабразивного різання, відповідно до даних з наукометричної бази Scopus. Візуалізація відображає взаємозв'язки між основними термінами, що згруповані за різними тематичними напрямками, а розмір вузлів (ключових слів) свідчить про частоту їхнього використання у наукових публікаціях:

Технічні аспекти гідроабразивного різання (зелений кластер) зосереджені навколо ключових понять, таких як «abrasive water-jet», «machining», «metal cutting», «machining centers», «precision engineering», «roughness», «hardness», «titanium», «ceramics» та «material removal rate». Ця група слів характеризує дослідження, спрямовані на оптимізацію процесу обробки матеріалів, підвищення точності різання та покращення механічних властивостей оброблюваних поверхонь.

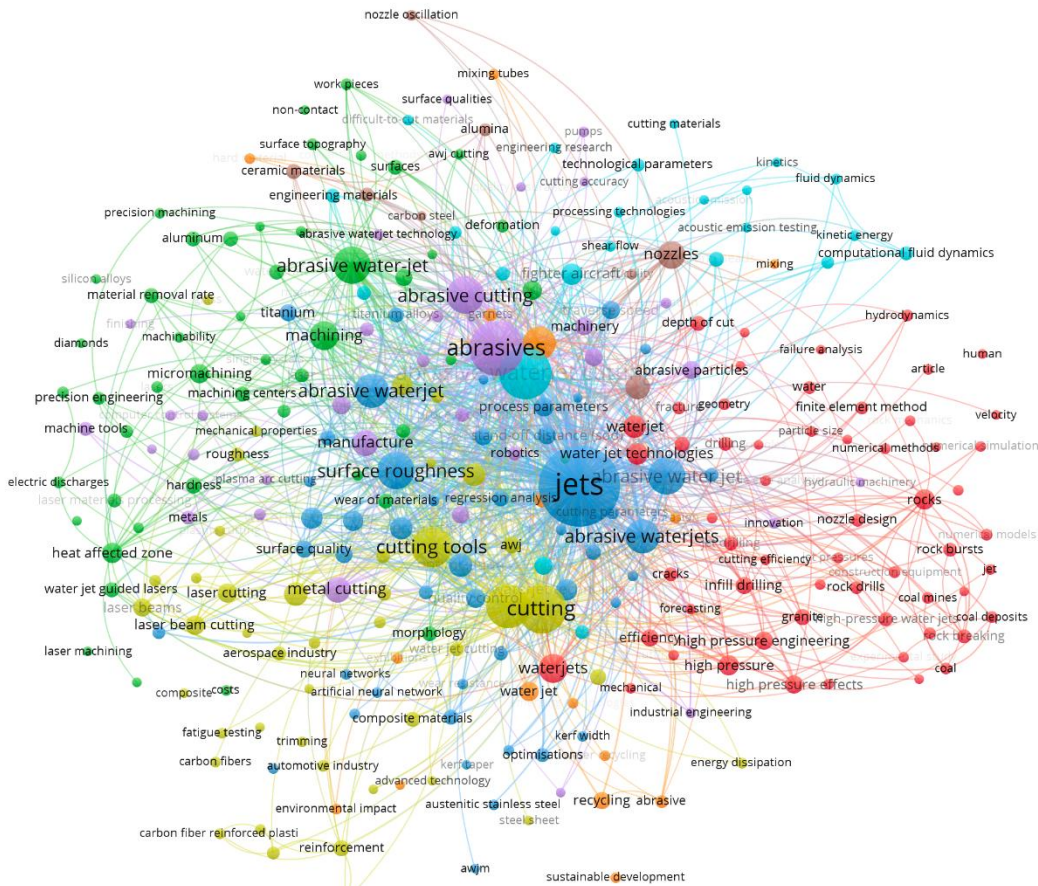


Рис. 5. Візуалізація мережевого аналізу ключових слів у наукових дослідженнях з проблематики технології гідроабразивного різання в наукометричній базі Scopus

Фізичні та динамічні процеси (синій кластер) містять терміни, пов'язані з «nozzles», «process parameters», «fluid dynamics», «computational fluid dynamics», «kinetic energy», «hydrodynamics», «depth of cut» та «numerical methods». Це вказує на широкий інтерес до моделювання та аналізу динамічних характеристик водно-абразивного струменя, що є критично важливими для підвищення ефективності процесу різання. Мікроструктурні зміни та якість поверхні (жовтий кластер) містять терміни, такі як «surface roughness», «surface quality», «wear of materials», «cutting efficiency», «cutting tools», «kerf width» та «optimisations». Цей кластер відображає дослідження, спрямовані на оцінку параметрів обробленої поверхні, що є важливим аспектом у точному виробництві та промисловому застосуванні. Вплив високого тиску та новітні технології (червоний кластер) охоплює такі ключові поняття, як «high pressure», «high pressure effects», «rock drilling», «rock bursts», «coal», «cracks» та «finite element method». Це свідчить про значну увагу до застосування технології у видобувній промисловості, розвідці корисних копалин та підвищенні ефективності буріння. Екологічні аспекти та перспективи сталого розвитку (помаранчевий кластер) містять такі терміни, як «recycling», «sustainable development», «environmental impact», «carbon fibers» та «reinforcement». Це вказує на зростаючий інтерес до питань екологічної безпеки процесу гідроабразивного різання, враховуючи зменшення відходів та повторне використання матеріалів. Аналіз ключових слів у Scopus демонструє, що дослідження у сфері гідроабразивного різання мають міждисциплінарний характер, охоплюючи як механічні та фізичні аспекти процесу, так і екологічні аспекти сталого виробництва. Основними напрямками є вдосконалення характеристик різання, моделювання динаміки процесу, аналіз якості поверхонь та застосування технології у видобувній промисловості. Це вказує на перспективи розвитку технології та її інтеграцію у різні галузі промисловості.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Гідроабразивне різання є технологією, що активно розвивається та має широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема у гірничодобувній сфері, машинобудуванні, авіаційній та будівельній індустрії. Бібліометричний аналіз на основі наукометричних баз Scopus та Web of Science, проведений із використанням аналітичного пакета R «Bibliometrix» та VOSviewer, дозволив виявити ключові наукові тренди та основні напрями розвитку цієї технології. Дослідження показало, що серед головних напрямів розвитку гідроабразивного різання виокремлюється оптимізація параметрів процесу, що сприяє підвищенню продуктивності та зниженню експлуатаційних витрат. Важливим аспектом є автоматизація та цифрове управління процесом, що сприяє підвищенню

точності обробки та стабільності технології. У гірничодобувній промисловості AWJ розглядається як безпечна альтернатива традиційним методам буріння та вибухових робіт, що робить цю технологію перспективною для подальшого розвитку. Також зростає інтерес до екологічних аспектів, враховуючи мінімізацію відходів, повторне використання води та розробку нових типів абразивних матеріалів.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розвитку інтелектуальних систем керування процесом різання з використанням алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту. Актуальним є питання вдосконалення енергоефективності технології шляхом розробки нових конструкцій різальних сопел та оптимізації використання абразивних матеріалів.

References:

1. Bourgeois, J., Miller, H. and Charrier, E. (2021), «Characterizing the Mitigation of Substrate Damage Within Underground Structural Liners Through Utilization of Waterjet Technology for Rehabilitation Work», *Mining, Metallurgy & Exploration*, doi: 10.1007/s42461-021-00491-y.
2. Feng, L., Dong, X., Li, Z. et al. (2019), «Modeling of Waterjet Abrasion in Mining Processes Based on the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method», *International Journal of Computational Methods*, No. 17 (09), doi: 10.1142/s0219876219500750.
3. Gauert, C.D.K., Van Der Westhuizen, W.A., Claasen, J.O. et al. (2013), «A progress report on ultra-high-pressure waterjet cutting underground: The future of narrow reef gold and PGE mining», *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 113 (6), pp. 441–448.
4. Ma, C., Xu, B., Wang, C. et al. (2024), «Study on depth weakening of reinforced concrete piles cutting by abrasive waterjets under submerged conditions», *Marine Georesources & Geotechnology*, pp. 1–10, doi: 10.1080/1064119x.2024.2362914.
5. Oh, T.M., Joo, G.W. and Cho, G.C. (2019), «Effect of Abrasive Feed Rate on Rock Cutting Performance of Abrasive Waterjet», *Rock Mechanics and Rock Engineering*, No. 52 (9), pp. 3431–3442, doi: 10.1007/s00603-019-01784-x.
6. Radvanská, A. (2010), «Abrasive waterjet cutting technology risk assessment by means of failure modes and effects analysis method», *Tehnički vjesnik*, No. 17 (1), pp. 121–128, [Online], available at: <https://hrcaak.srce.hr/50631>
7. Valiček, J., Harničárová, M., Kušnerová, M. et al. (2013), «Proposition of a Solution for the Setting of the Abrasive Waterjet Cutting Technology», *Measurement Science Review*, No. 13 (5), pp. 279–285, doi: 10.2478/msr-2013-0041.
8. Wan, L., Lu, W., Qian, Y. et al. (2023), «Experimental study on the cutting performance of abrasive waterjet using steel slag as the particles», *Journal of Manufacturing Processes*, No. 108, pp. 877–888, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.11.041.
9. Wang, S., Hu, D., Yang, F. and Lin, P. (2021), «Investigation on kerf taper in abrasive waterjet machining of aluminium alloy 6061-T6», *Journal of Materials Research and Technology*, No. 15, pp. 427–433, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.08.012.
10. Wen, Y., Cao, A., Ding, C. et al. (2023), «Optimization of Destressing Parameters of Water Jet Slits in Rock Burst Coal Seams for Deep Mining», *Processes*, No. 11 (4), doi: 10.3390/pr11041056.
11. Yu, Y., Sun, T., Yuan, Y. et al. (2020), «Experimental investigation into the effect of abrasive process parameters on the cutting performance for abrasive waterjet technology: a case study», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 107 (5–6), pp. 2757–2765, doi: 10.1007/s00170-020-05183-3.

Махно Артур Миколайович – аспірант кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-7428-9578>.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи; сучасні способи обробки та видобування облицювального каменю;
- раціональне використання природних ресурсів та сталий розвиток; екобезпека.

Makhno A.M.

Current trends and prospects for the development of research in hydroabrasive cutting technology in mining and general engineering

Hydroabrasive cutting technology (AWJ) is a practical material processing method that provides high accuracy, minimal thermal impact, and various industry applications. The article conducts a bibliometric analysis of waterjet cutting research using data from the scientometric databases Scopus and Web of Science (WoS). The primary attention is paid to analyzing the dynamics of publications, key research areas, and technological trends related to optimizing process parameters, numerical modeling, application in the mining industry, and environmental aspects of using technology. The R analytical package «bibliometrics» and VOSviewer software were used to conduct the study, which allowed us to visualize network connections between key terms, authors, research topics, and technology development trends. The analysis of the results revealed the main directions of development of waterjet cutting, including optimization of cutting parameters, improvement of the quality of machined surfaces, modeling of the processes of interaction of abrasive particles with the material, and automation of technological process control. A significant part of the scientific work is devoted to applying waterjet cutting in the mining industry, where this technology acts as an alternative to traditional drilling and blasting methods. There has also been increased research to reduce environmental impact, including water reuse and developing new abrasive materials. The study results allow us to systematize modern scientific trends and determine the prospects for further development of waterjet cutting technology, particularly in the context of industrial implementation and improvement of material processing methods.

Keywords: waterjet cutting; bibliometric analysis; optimization; stone cutting industry; open-pit mining technology.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2024.