

© А.О. Хорольський<sup>1</sup>, В.Ю. Медяник<sup>2</sup>, О.О. Мартиненко<sup>2</sup>, Р.К. Сидоренко<sup>2</sup>,  
О.Р. Мамайкін<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, Дніпро, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ВУГЛЕДОБУВНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛАСТИЧНОСТІ ПРОДУКТИВНИХ ПОТОКІВ

© A. Khorolskyi<sup>1</sup>, V. Medianyuk<sup>2</sup>, O. Martynenko<sup>2</sup>, R. Sydorenko<sup>2</sup>, O. Mamaikin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics the National Academy Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## DEVELOPMENT OF A MODEL FOR SUPPORTING THE VITAL ACTIVITY OF COAL MINING ENTERPRISES BASED ON THE STUDY OF THE ELASTICITY OF PRODUCTIVE FLOWS

**Мета.** Розробити новий підхід, щодо проектування діяльності вугледобувних підприємств, який враховує різні програми (сценарії) діяльності.

**Методика.** Для розробки підходу застосовано методи управління проектами; функцію Кобба-Дугласа для визначення конфігурації продуктивних потоків (основний потік – вугілля; допоміжні: гірська порода, газ метан, вода); методику визначення коефіцієнтів еластичності для оцінки впливу кожного продуктивного потоку на загальний рівень продуктивності та верифікації підходу, який базується на врахуванні продуктивних потоків.

**Результати.** Було проаналізовано чотири сценарії виробництва, які враховували різні виробничі ситуації від взаємного впливу продуктивних потоків до стану, коли відсутній видобуток вугілля. Отримані виробничі функції були перевірені на лінійну однорідність. Встановлено, що сума коефіцієнтів еластичності знаходиться в межах 0,97–1,00, що свідчить про доцільність застосування усіх потоків. Гіпотеза про розподіл продуктивних потоків була підтверджена методами аналізу ієрархій АНР, PROMETHEE, ELECTRE, VICOR.

**Наукова новизна.** Розроблено методику проектування програми діяльності вугледобувних підприємств. Визначено вплив кожного продуктивного потоку на загальну ефективність підприємства.

**Практична значимість.** Було встановлено, що вугілля, як продуктивний потік, має від'ємну еластичність, що свідчить про прямий вплив на рівень ефективності, тобто при невідповідності обсягів видобутку раціональному відбувається неконтрольоване згортання виробничих потужностей. Порода, як і газ метан мають позитивну еластичність, що свідчить про постійну віддачу незалежно від обсягів виробництва. Вода має нульову еластичність, проте при відсутності видобутку вугілля є другим за перспективністю продуктивним потоком. Також було визначено границю неконтрольованого згортання виробничих потужностей за вугіллям.

**Ключові слова:** еластичність, продуктивний потік, обсяг виробництва, екологічний стан середовища, видобуток вугілля, функція.

**Вступ.** Вугільна промисловість України входить в стадію трансформації. В результаті трансформації будуть ліквідовані найбільш неефективні підприємства, а інші повинні стати життєздатними як в технологічному так і економічному вимірі [1, 2]. Під «життєздатністю» розуміється наявність у шахти, як проекту, таких властивостей, як оптимальна вартість, мінімальні строки реалізації, здатність до окупності проекту [3]. Показники вартості, термінів реалізації, окупності тісно пов'язані з технологічними параметрами вугледобувного підприємства. До цих параметрів відносяться: проектна потужність, довжина очисного вибою, потужність пласта, технологія виймання, транспортування, збагачення корисної копалини, обмеження на за газовим фактором, технологія підтримання виробленого простору, засоби боротьби з водопритоками та ін.

Здається, що чим більше параметрів тим точнішим буде прогноз, а отримане рішення буде оптимальним (під «оптимальним» розуміється рішення з найменшим або найбільшим значенням за величиною прийнятого оптимізаційного параметру), однак на практиці це важко реалізувати, а рішення бути не завжди достовірним. І ось чому, якщо пошук оптимального рішення за 1 параметром то це лінійна функція, за двома параметрами – поверхня, то вже за трьома і більше –  $2^N$  поверхня (де  $N$  – кількість параметрів, які слід врахувати), існуючі програмні комплекси математичного програмування дозволяють одночасно оптимізувати до 6 параметрів. Звісно, можна застосувати імітаційне моделювання і змінюючи покроково кожен параметр в межах  $y_1 \dots y_n$  на величину  $\Delta y = (y_n - y_1/n)$ , де  $n$  – кількість кроків (ітерацій), визначити його ступінь впливу на загальне рішення  $\lambda$ , однак це потребує великого набору даних, чіткого визначення меж зміни параметру. Наприклад, в роботі [4] вирішено задачу вибору оптимального способу активного керування станом гірського масиву для вибухонебезпечних вугільних пластів. Серед запропонованих 23 параметрів, які впливають на вірогідність раптового викиду, впливовими виявились лише 5, при цьому два параметри відносяться до тих, якими не можна керувати (глибина ведення робіт, параметри гірського масиву). Таким чином, запропонований спосіб не може влаштовувати з позиції «життєдіяльності», адже розглядається лише технологічний аспект.

Таким чином, ми повинні врахувати екологічні аспекти [5, 6], наявність додаткових продуктивних потоків у вигляді відвалів (породи), води, супутнього газу – метану [7, 8]. В роботі [9] запропоновано модель, яка враховує продуктивні потоки. В основу моделі покладено функцію Кобба-Дугласа [10], однак невирішеним залишається питання верифікації моделі та оцінки впливу кожного потоку на загальну ефективність, а також створення системи підтримки прийняття рішень – все це формує актуальність дослідження.

**Постановка завдання.** Для підтримки життєздатності вугільних підприємств слід визначити еластичність кожного продуктивного потоку. Під «еластичністю» розуміється врахування впливу усіх продуктивних потоків на рівень критерію оптимальності. Еластичність може бути позитивною і негативною. Під позитивною еластичністю розуміють однозначне збільшення рівня прибутку від збільшення обсягу потоку, під негативною еластичністю – розуміють наявність обмеження на рівень продуктивного потоку, тобто збільшення обсягу  $\epsilon$

доцільним до певного ліміту, при нульовій еластичності продуктивний потік не здійснює впливу на загальну економічну ефективність. «Нульова» еластичність є поширеною в гірничовидобувній діяльності, адже притік води є умовно постійним і незалежно від стадії розвитку підприємства існує необхідність у відкачуванні води. Навіть, після закриття шахти воду необхідно відкачувати. Таким чином, в представленому дослідженні, необхідно запропонувати модель оцінки балансу продуктивних потоків, визначити еластичність кожного продуктивного потоку, за допомогою методів аналізу ієрархій підтвердити гіпотезу про еластичність, розробити програмне забезпечення, дослідити можливі сценарії життєдіяльності підприємства. На основі дослідження сценаріїв можна визначити критичні показники згортання виробничих потужностей.

**Основна частина.** Для підтримки життєдіяльності шахти, як проєкту слід враховувати конфігурацію продуктивних потоків [11], наявність сировинної бази [12], а також доцільність збагачення відходів вуглевидобутку [13, 14]. Продуктивними потоками є: основний потік – вугілля, додаткові (супутні) – порода, вода, газ-метан. Вказана модель повинна враховувати декілька сценаріїв:

- Сценарій 1 – підприємство може використовувати усі продуктивні потоки з обмеженнями.
- Сценарій 2 – відсутній основний продуктивний потік – вугілля. Це ситуація, коли підприємство переходить в режим водовідливу та диверсифікує свою діяльність.
- Сценарій 3 – відсутній один із допоміжних продуктивних потоків. Це ситуація, коли шахта є безпечною за раптовими викидами газу метану, або існує технологія, коли порода залишається у виробленому просторі [15].
- Сценарій 4 – відсутні обмеження на рівні продуктивних потоків.

Для визначення рівня конфігурації продуктивних потоків може бути використана функція Кобба-Дугласа [10], а для основного продуктивного потоку – вугілля може бути використано маржинальний підхід [16]. В основу логіки відтворення життєдіяльності вугледобувного підприємства покладено принцип «еластичності» [17]. Вказаний показник набув популярності на початку 90-х років ХХ ст. для розробки стратегій приватних компаній [18, 19], а вже після 2010-х років почав використовуватись і в гірничовидобувній діяльності [20, 21]. Однак, наразі показник ще не використовувався для дослідження супутніх потоків, раніше аналізувалось лише моно-виробництво. Під «еластичністю» розуміють відносне прирощення залежної змінної від відсотку приросту незалежної змінної. Інакше кажучи, яким чином зміниться загальна ефективність підприємства від зміни конфігурації продуктивних потоків. Фізичний зміст «еластичності» полягає в тому, що максимальна ефективність (максимальний прибуток) досягається при сумі коефіцієнтів еластичності  $P = 1,00$ .

При значенні коефіцієнту еластичності  $p(N) < 0$  – робиться висновок про те, що загальна ефективність  $P$  залежить від обсягу продуктивного потоку  $N$ , інакше кажучи цей продуктивний потік має вплив на інші потоки; при зменшенні потоку змінюються і інші продуктивні потоки. Наприклад, при видобутку вугілля можуть утворюватися продуктивні потоки газу метану, породи, а при зменшенні видобутку – менше породи, метану.

При значенні коефіцієнту еластичності  $p(N)>0$  – робиться висновок про те, що загальна ефективність  $P$  не залежить від обсягу продуктивного потоку  $N$ , але цей продуктивний потік робить позитивний вплив на загальну ефективність.

При значенні коефіцієнту еластичності  $p(N)=0$  робиться висновок що цей продуктивний потік не має впливу на загальну ефективність. Наприклад, продуктивний потік – вода, адже воду слід постійно відкачувати, а її обсяг її умовно постійним.

В загальному випадку функцію Кобба-Дугласа можна описати наступним рівнянням

$$P = A \times C^{\alpha} \times M^{\beta} \times R^{\gamma} \times W^{\delta},$$

де  $P$  – рівень ефективності, який може бути визначений умовними грошовими одиницями;  $A$  – безрозмірний коефіцієнт масштабу;  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – безрозмірні коефіцієнти еластичності для відповідних продуктивних потоків  $C$  – вугілля,  $M$  – газу (метану),  $R$  – породи,  $W$  – води.

Для задачі підтримки життєдіяльності функцію можна записати наступним чином

$$\log(P) = \log A + \alpha \log(C) + \beta \log(M) + \gamma \log(R) + \delta \log(W).$$

На основі наведених формул можна визначити алгоритм дослідження сценаріїв підтримки життєдіяльності:

1) Спочатку необхідно застосувати логарифмування для представлення функції  $P$  у вигляді лінійної формули. У загальному визначенні функція Кобба-Дугласа є кусочно-лінійною, але в більшості випадків логарифмування дозволяє отримати лінійну функцію, що значно спрощує аналіз.

2) На основі регресійного аналізу визначити коефіцієнти еластичності.

3) На основі коефіцієнтів можна розрахувати максимальне значення прибутку  $P$  при різній конфігурації продуктивних потоків.

В представленому дослідженні ми аналізуємо 4 сценарії. Перший – відповідає поточній виробничій ситуації, коли обсяги продуктивних потоків метану та породи формуються рівнем видобутку вугілля. Другий – відсутні обмеження на рівень породи і газу, тобто паралельно може вестись видобуток метану і збагачення породи. Третій – максимізація прибутку і зменшення обсягів видобутку вугілля. Четвертий – видобуток вугілля не ведеться, є лише допоміжні потоки.

У якості об'єкту дослідження нами було розглянуто шахту, яка розташована на території Західного Донбасу. В умовах діючого військового стану, зважаючи на безпекові умови, інформація про підприємство, дату знімків та місце розташування не наводиться. На рис. 1 показано поверховий комплекс шахти, який включає не тільки будівлі, але і відвали, які утворені відходами виробництва.

Наявність підприємства спричиняє негативний вплив на навколишнє середовище. На рис. 2 показано супутниковий знімок TerraScope місцевості де розташоване підприємство з позначкою індексу NDVI: Нормалізований, Диференційний, Вегетаційний Індекс у сільському господарстві, він вимірює щільність зеленої маси рослинності, зафіксованої на супутниковому знімку. На рис. 2 показано максимальні вегетаційний індекс для літньої пори року. Умовно промайданчик ділиться на три області (в залежності від індексу): породи (індекс до 0.2), чагарники (індекс 0.3–0.4), зелена маса (0.6–0.8).





Рис. 1. Проммайданчик досліджуваного підприємства

Як видно із рис. 2 відвали не взаємодіють з навколишнім середовищем з точки зору продуктів горіння, що свідчить про доцільність збагачення породних відвалів. Також, в процесі відпрацювання вугільних пластів відбувається виділення газу метану.

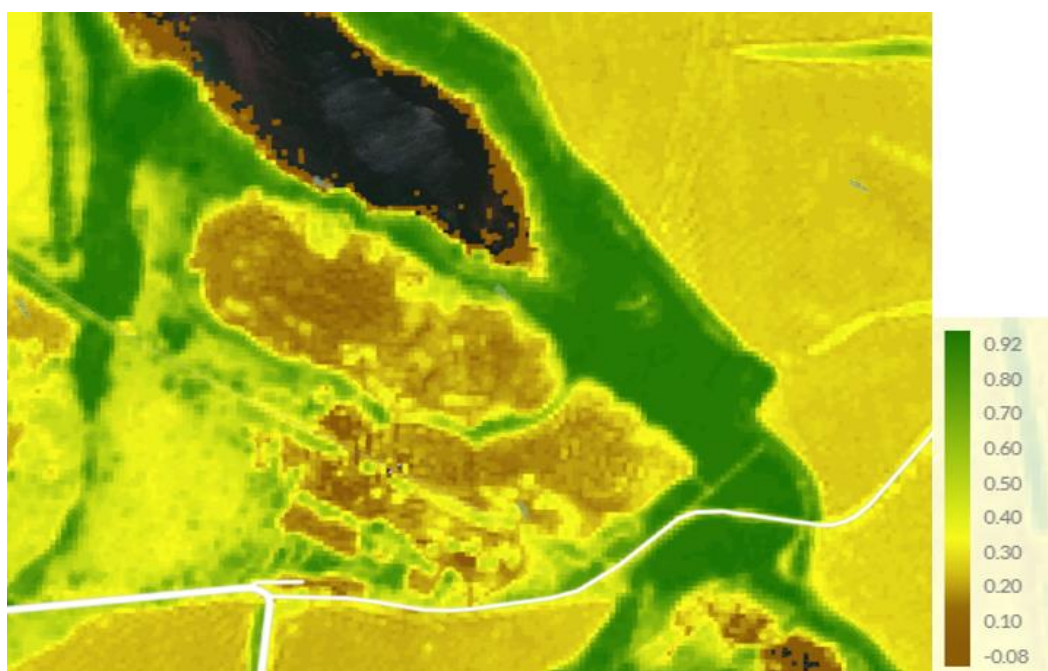


Рис. 2. Показники індексу рослинності NDVI в межах проммайданчику

Також варто зазначити високий ступінь мінералізації води, яка є у відстійниках та надходить на поверхню (рис. 3).



Рис. 3. Показники якості води в місці дослідження

Показники якості води свідчать про доцільність очистки та в подальшому використанні води, як додаткового продуктивного потоку.

Таким чином, на основі аналізу рис. 2, 3 та наявності метану, який утворюється в процесі видобутку, нами запропоновано враховувати усі продуктивні потоки. На основі наведеного в роботі алгоритму нами розраховано показники еластичності (табл.).

Таблиця

Показники еластичності продуктивних потоків

| Продуктивний потік | Сценарії 1 та 3 | Сценарій 2 | Сценарій 4 |
|--------------------|-----------------|------------|------------|
| Вугілля            | -44.72          | -44.78     | 0.00       |
| Метан              | 7.45            | 7.47       | 0.27       |
| Порода             | 38.23           | 38.20      | 0.60       |
| Вода               | 0.00            | 0.00       | 0.00       |
| Сума               | 1.00            | 0.98       | 0.97       |



Для підтвердження гіпотези про еластичність продуктивних потоків було проведено аналіз потоків за чотирма методами ухвалення рішень: АНР [22, 23], PROMETHEE [24], ELECTRE [25], VIKOR [26]. На рис. 4 показано зведений графік аналізу еластичності продуктивних потоків.

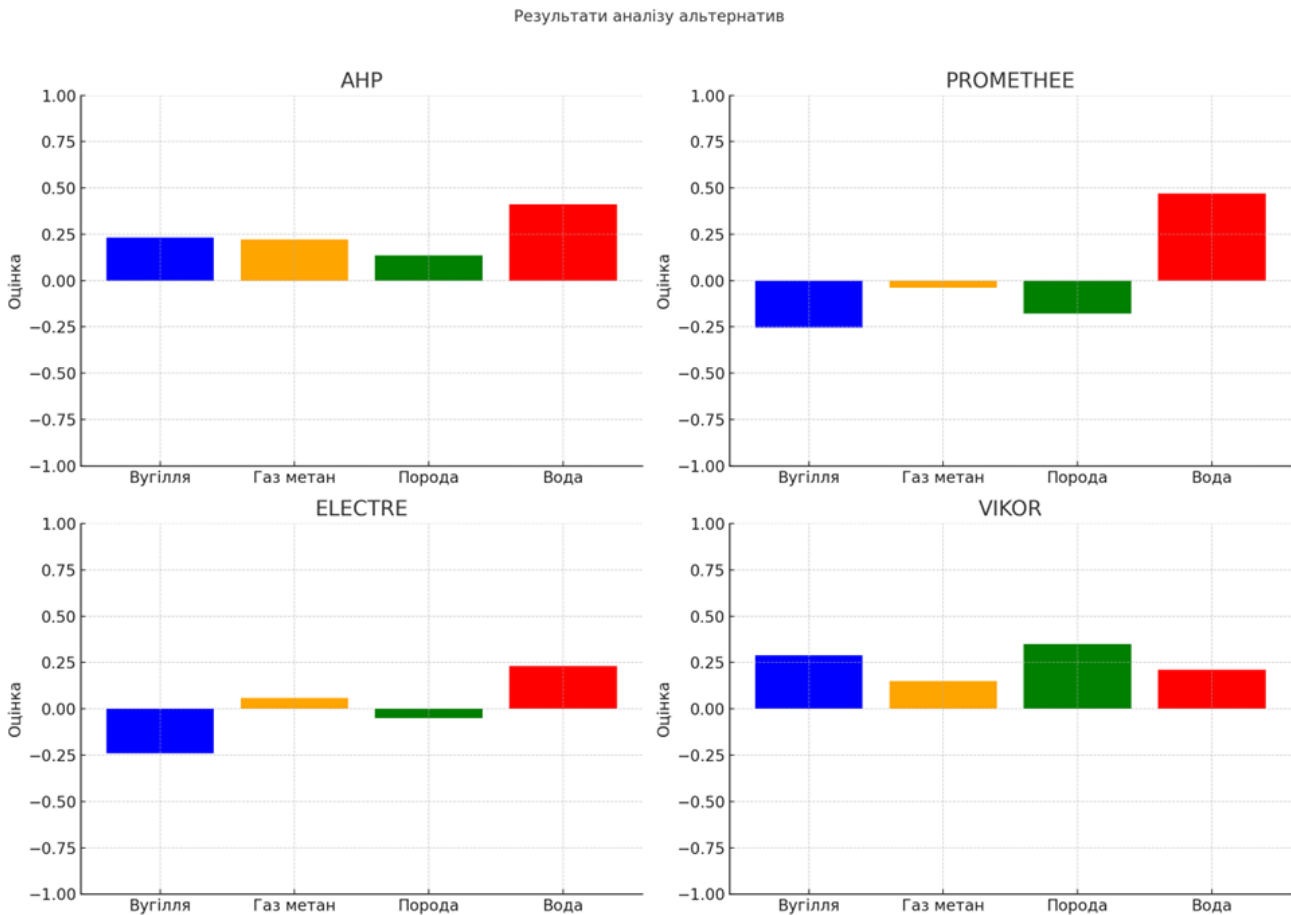


Рис. 4. Зведений аналіз продуктивних потоків за чотирма методами аналізу ієрархій

Для автоматизації процесу аналізу сценаріїв виробництва було написано програмне забезпечення. Програма написана мовою Python. В програмі враховано зв'язок між показниками еластичності, однак, можна не враховувати певні продуктивні потоки.

Програма дозволяє задавати рівні зміни продуктивних потоків. Також автоматично аналізуються сценарії. На робоче вікно виводяться одразу результати аналізу сценаріїв 1, 2, 4. А також з кроком 50 тис. т результати Сценарію 3 – тобто поступового зменшення видобутку вугілля і перерозподілу продуктивних потоків (рис. 5).

На основі дослідження сценарію поступового зменшення видобутку вугілля ми бачимо, що на першому етапі майже не змінюється конфігурація продуктивних потоків – до рівня видобутку 300 тис. т/рік – рівня неконтрольованого згорання виробничих потужностей [27]. При зменшенні видобутку вугілля перспективним є потік – порода, а на другому місці – вода (рис. 6).

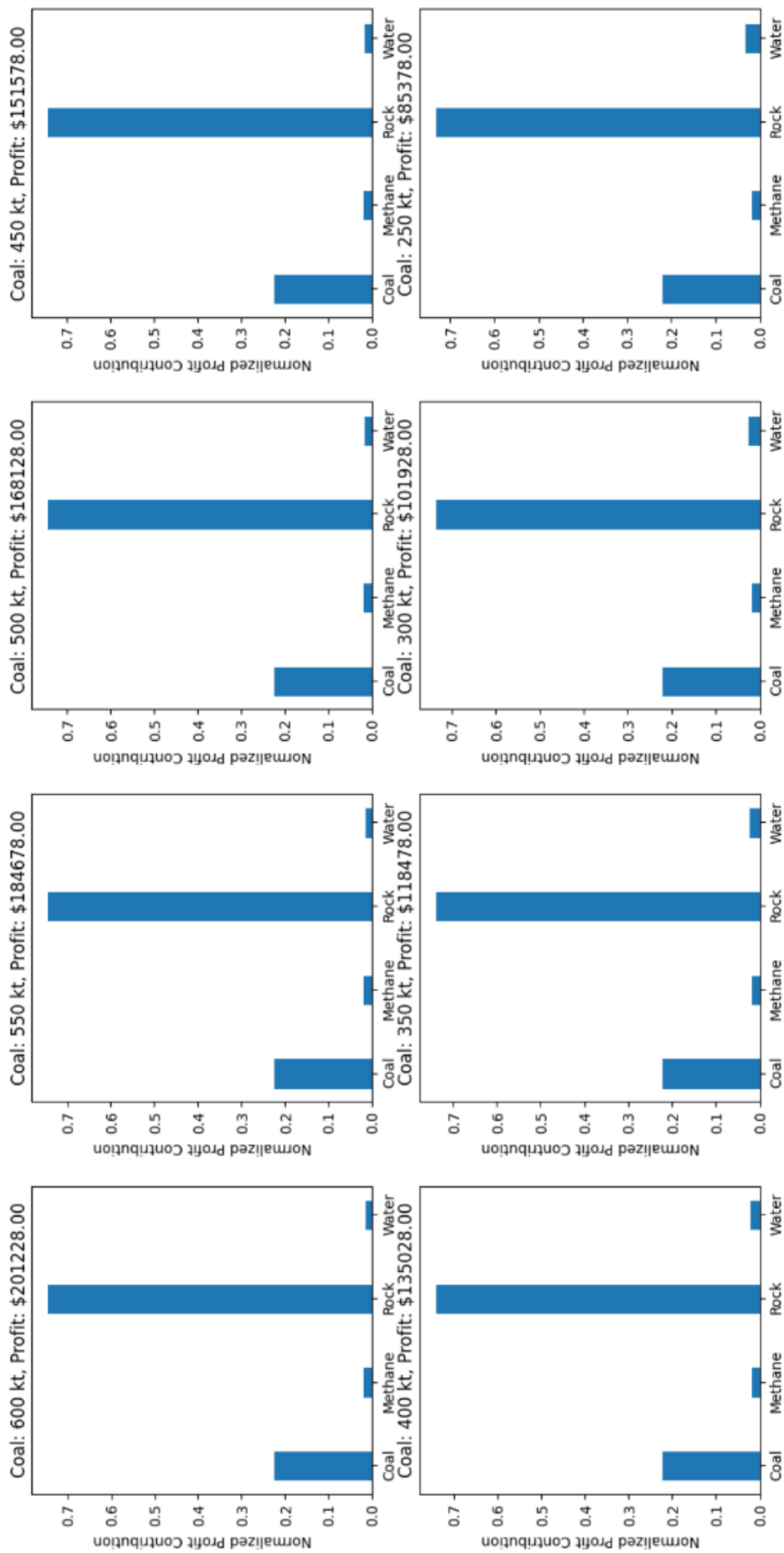


Рис. 5. Фрагмент аналізу сценарію поступового зменшення видобутку вугілля і досягнення економічної ефективності за рахунок допоміжних потоків



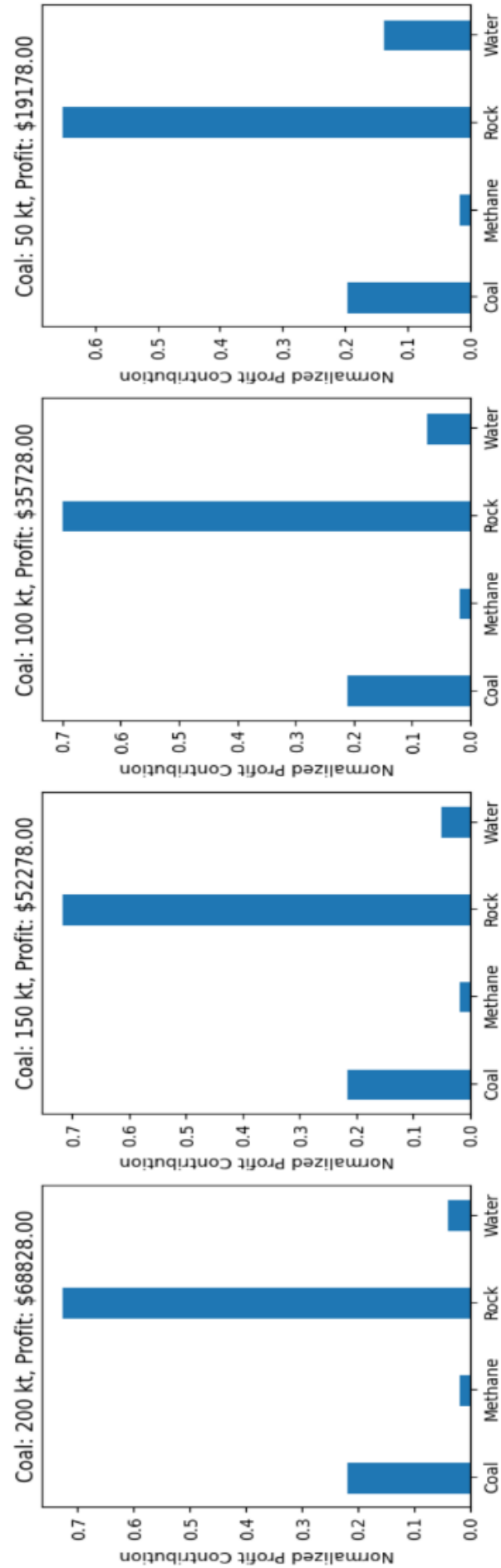


Рис. 6. Фрагмент аналізу сценарію поступового зменшення видобутку вугілля і досягнення економічної ефективності за рахунок допоміжних потоків на фінальній стадії

Таким чином, дослідження різних сценаріїв диверсифікації виробництва дозволяє нам стверджувати, що переробка породи є перспективним продуктивним потоком, але виключно після зменшення рівня видобутку вугілля до економічно недоцільного. Очистка стічних вод також є перспективним напрямком, адже це продуктивний потік з нульовою еластичністю, тобто не має негативного впливу на рівень ефективності виробництва, проте має потенціал до зростання. Отримані результати підтверджуються результатами попередніх досліджень [28, 29] в яких було аналізувались технології демінералізації стічних вод.

**Висновки.** В процесі виконання дослідження було запропоновано новий підхід, щодо розробки сценаріїв підтримки життєдіяльності вугледобувних підприємств. Для цього слід верифікувати існуючу модель Кобба-Дугласа, що передбачало аналіз умов діючого об'єкту дослідження, визначення коефіцієнтів еластичності продуктивних потоків, визначення критичних рівнів згортання виробництва. За результатами аналізу групи шахт Західного Донбасу встановлено, що в місці розташування вугледобувних підприємств спостерігається негативна екологічна ситуація, яка спричинена відвалами гірничого виробництва, високим ступенем мінералізації стічних вод. За результатами аналізу індексу вегетативного стану рослинності встановлено, що відвали порід придатні до збагачення, а вода може бути очищена і використана як джерело технічної води.

На основі порівняння продуктивних потоків методом АНР встановлено, що вугілля та вода мають найбільшу перевагу. Це й не дивно, адже вугілля є основним продуктивним потоком і від нього залежить загальна ефективність, а вода – є постійним продуктивним потоком і найбільш доцільна з точки зору екології. На основі метода PROMETHEE було встановлено, що дійсно вугілля і порода мають схильність до негативної еластичності, тобто загальна ефективність виробництва залежить від обсягу видобутку. На основі метода ELECTRE підтверджено гіпотезу про еластичність коефіцієнтів в моделі на основі функції Кобба-Дугласа. На основі метода VICOR встановлено, що при зменшенні основного потоку саме переробка породи є найбільш доцільним сценарієм диверсифікації.

Нами встановлено, що наразі найбільш перспективними сценаріями є переробка відходів гірничого виробництва, але при умові скорочення видобутку вугілля, та очистка шахтних вод. Нами було підтверджено гіпотезу про межу неконтрольованого згортання виробничих потужностей (300 тис. т/рік). При річній продуктивності вугледобувного підприємства, за основним продуктивним потоком, менше 300 тис. т/рік відбувається погіршення техніко-економічних показників, тому варто розробляти проекти диверсифікації. При річній продуктивності понад 300 тис. т/рік, за основним продуктивним потоком, слід на основі маржинального аналізу визначити величину основного продуктивного потоку і враховувати допоміжні.

#### Перелік посилань

1. Табаченко, М. М., Дичковський, Р. О., Фальштинський, В. С., Медяник, В. Ю., & Руських, В. В. (2012). *Довідник з гірничого обладнання дільниць вугільних і сланцевих шахт*. НГУ.

2. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Zubko, S., Lozynskyi, V., & Sai, K. (2021). Instability Assessment of Hanging Wall Rocks during Underground Mining of Iron Ores. *Minerals*, 11(8), 858. <https://doi.org/10.3390/min11080858>
3. Baspineiro, C. F., & Flexer, V. (2024). Comparison of simple and active solar stills for freshwater recovery during lithium brine mining. *Next Sustainability*, 4, 100055. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100055>
4. Хорольський А.О., & Косенко А.В. (2022). Розробка та реалізація моделі для обґрунтування оптимальних технологічних схем відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів. *Науковий вісник ДонНТУ*, 1(8)–2(9), 193–205. [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-193-205](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-193-205)
5. Bondarenko, V. I., Kovalevska, I. A., Podkopaiev, S. V., Sheka, I. V., & Tsivka, Y. S. (2022). Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>
6. Pavlychenko, A., Adamchuk, A., Shustov, O., & Anisimov, O. (2020). Justification of dump parameters in conditions of high water saturation of soils. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(3(56)), 22–26. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.218139>
7. Dong, M., Feng, L., & Qin, B. (2023). Characteristics of coal gasification with CO<sub>2</sub> after microwave irradiation based on TGA, FTIR and DFT theory. *Energy*, 267, 126619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126619>
8. Liao, Y., Wang, T., Ren, Z., Wang, D., Sun, W., Sun, P., Li, J., & Zou, X. (2024). Multi-well combined solution mining for salt cavern energy storages and its displacement optimization. *Energy*, 288, 129792. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129792>
9. Fomychov, V., Fomychova, L., Khorolskyi, A., Mamaikin, O., & Pochepov, V. (2020). Determining optimal border parameters to design a reused mine working. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(24), 3039–3049.
10. Хорольський, А. О., Лапко, В. В., Саллі, В. С., & Мамайкін, О. Р. (2020). Вибір технології демінералізації стічних вод, як складової технологічних потоків вугільних шахт. *Збірник наукових праць НГУ*, 63, 61–73. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.061>
11. Khorolskyi, A., Mamaikin, O., Fomychova, L., Pochepov, V., & Lapko, V. (2022). Developing and implementation a new model optimizing the parameters of coal mines under diversification. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 17(16), 1544–1553.
12. Adamchuk, A., Shustov, O., Panchenko, V., & Slyvenko, M. (2019). Substantiation of the method of determination the open-cast mine final contours taking into account the transport parameters. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 59, 21–32. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/59.021>
13. Pak, M. C., Han, U. C., & Kim, D. I. (2022). Suitable Mining Method Selection using HFGDM-TOPSIS Method: a Case Study of an Apatite Mine. *Journal of Mining and Environment*, 13(2), 357–374. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11713.2163>
14. Li, S., Huang, Q., Hu, B., Pan, J., Chen, J., Yang, J., ... & Yu, H. (2023). Mining method optimization of difficult-to-mine complicated orebody using Pythagorean fuzzy sets and TOPSIS method. *Sustainability*, 15(4), 3692. <https://doi.org/10.3390/su15043692>
15. Liu, Y., & Ohara, H. (2017). Energy-efficient fluidized bed drying of low-rank coal. *Fuel Processing Technology*, 155, 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.06.008>
16. Грінюв, В. Г., & Хорольський, А. О. (2020). Визначення раціонального обсягу вилучення корисних копалин із надр: маржинальний підхід. *Економіка промисловості*, 3(91), 82–95. <http://doi.org/10.15407/econindustry2020.03.082>
17. Shukor, A. A. A., Newaz, M. S., Rahman, M. K., & Taha, A. Z. (2021). Supply chain integration and its impact on supply chain agility and organizational flexibility in manufacturing firms. *International Journal of Emerging Markets*, 16(8), 1721–1744. <https://doi.org/10.1108/IJOEM-04-2020-0418>

18. Wang, Y., Xu, C., Yu, X., Zhang, H., & Han, M. (2022). Multilayer flexible electronics: Manufacturing approaches and applications. *Materials Today Physics*, 23, 100647. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100647>
19. Burger, N., Demartini, M., Tonelli, F., Bodendorf, F., & Testa, C. (2017). Investigating flexibility as a performance dimension of a Manufacturing Value Modeling Methodology (MVMM): a framework for identifying flexibility types in manufacturing systems. *Procedia CIRP*, 63, 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.343>
20. Ajak, A. D., Lilford, E., & Topal, E. (2018). Application of predictive data mining to create mine plan flexibility in the face of geological uncertainty. *Resources Policy*, 55, 62–79. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.10.016>
21. Groeneveld, B., & Topal, E. (2011). Flexible open-pit mine design under uncertainty. *Journal of Mining Science*, 47(2), 212–226. <https://doi.org/10.1134/S1062739147020080>
22. Ait-Mlouk, A., & Agouti, T. (2019). DM-MCDA: A web-based platform for data mining and multiple criteria decision analysis: A case study on road accident. *SoftwareX*, 10, 100323. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100323>
23. Erener, A., Mutlu, A., & Sebnem Düzgün, H. (2016). A comparative study for landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis (MCDA), logistic regression (LR) and association rule mining (ARM). *Engineering Geology*, 203, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.09.007>
24. Rosa, A. G. F., Silva, W. D. O., Fontana, M. E., Levino, N., & Guarnieri, P. (2024). A GIS-based multi-criteria approach for identifying areas vulnerable to subsidence in the world's largest ongoing urban socio-environmental mining disaster. *The Extractive Industries and Society*, 19, 101500. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101500>
25. Więckowski, J., & Zwiech, P. (2021). Can weighting methods provide similar results in MCDA problems? Selection of energetic materials study case. *Procedia Computer Science*, 192, 4592–4601. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.237>
26. Jeong, A., Kim, S., Kim, M., & Jung, K. (2016). Development of Optimization Model for River Dredging Management Using MCDA. *Procedia Engineering*, 154, 369–373. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.494>
27. Mamaikin, O., Sotskov, V., Demchenko, Y., & Prykhorchuk, O. (2018). Productive flows control in coal mines under the condition of diversification of production. *E3S Web of Conferences*, 60, 00008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000008>
28. Lousada, S., Delehan, S., & Khorolskyi, A. (2024). Application of Dynamic Programming Models for Improvement of Technological Approaches to Combat Negative Water Leakage in the Underground Space. *Water*, 16(14), 1952. <https://doi.org/10.3390/w16141952>
29. Mateo-Peinado, L. (2022). Natural resources, (Mis)governance, and the lack of diversification in mining regions: A reconsideration of the Dutch disease at a local level. *The Extractive Industries and Society*, 11, 101099. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101099>

## ABSTRACT

**Purpose.** To develop a new approach to designing the operations of coal mining enterprises, considering various activity programs (scenarios).

**Methodology.** To develop the approach, project management methods were applied, along with the Cobb-Douglas function to determine the configuration of productive flows (the main flow being coal; auxiliary flows: rock mass, methane gas, and water). A methodology for determining elasticity coefficients was used to assess the impact of each productive flow on the overall productivity level and to verify the approach based on the consideration of productive flows.

**Findings.** Four production scenarios were analyzed, considering various operational conditions, from the mutual influence of productive flows to a situation where coal extraction was absent. It was

established that the sum of elasticity coefficients ranged between 0.97 and 1.00, indicating the feasibility of considering all flows. The hypothesis regarding the distribution of productive flows was confirmed using the AHP, PROMETHEE, ELECTRE, and VICOR hierarchy analysis methods.

**Originality.** A methodology for designing operational programs for coal mining enterprises was developed. The influence of each productive flow on the overall efficiency of the enterprise was determined.

**Practical implications.** It was established that coal, as a productive flow, has negative elasticity, indicating a direct impact on efficiency levels. In other words, when production volumes do not align with rational levels, uncontrolled shutdowns of production capacities occur. Rock and methane gas have positive elasticity, indicating a consistent return regardless of production volumes. Water has zero elasticity but becomes the second most promising productive flow in the absence of coal mining. Additionally, the threshold for the uncontrolled shutdown of production capacities due to coal extraction was identified.

**Keywords:** *elasticity, productive flow, production volume, environmental condition, coal mining, function.*