

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ DEER ДЛЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕСНЕНИЯ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Салли В.С., Мамайкин А.Р.

*Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина,  
[alex.mamaikin80@gmail.com](mailto:alex.mamaikin80@gmail.com)*

Хорольский А.А.

*Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины, Днепр,  
Украина, [khorolskiyaa@ukr.net](mailto:khorolskiyaa@ukr.net)*

**Введение.** Все шахты Европейских стран с геологическими условиями приближенными или такими же как и в украинских реалиях Донецкого бассейна давно закрыты. Главной причиной закрытия шахт стала нерентабельность предприятий и нагрузки на бюджет, ведь экологический аспект не был насущной темой еще 30 лет назад [1, 2]. Масштабной задачей, что может принести с собой закрытие целого ряда шахтных предприятий, является реинтеграция целых городов и городков и перепрофилирования трудоспособного населения. Также, шахты, даже без развития горных работ, требующих постоянного капиталовложения, ведь нарушение водоносных слоев горными выработками привели к большой концентрации подземных шахтных вод в местах проведения горных работ [3, 4].

Природные ресурсы эволюционны. Характер и степень использования природной среды, как одного из условий производства, определяется уровнем развития производительных сил и производственных отношений. Если, например, сто лет назад в Донбассе подземные воды, которые находятся на большой глубине, не находили никакого практического применения, то по мере роста численности населения, высокие темпы индустриализации, в том числе и вследствие создания водоемких производств, шахтная вода, как продукт спецводопользования, становится ценным и дефицитным ресурсом. Вследствие этого возникает необходимость ее оценки как дополнительного природного ресурса, который имеет стоимостную форму [5, 6, 7].

Таким образом, обоснование параметров опреснения шахтных сточных вод, из исследования составляющих производительных потоков угольных шахт является актуальной научной задачей.

**Методы исследования.** В соответствии с определенной задачей формируется последовательность этапов исследования: на первом этапе - разрабатывалась модель, которая учитывает производительные потоки; на втором этапе - анализировались технологии очистки шахтных вод; на третьем - выбиралась технология и обосновывались ее параметры.

Как известно результатом производственной деятельности подземного комплекса горных работ является доставка на поверхность трех производительных компонентов, которые с позиций рационального ресурсо- и природопользования могут быть рассмотрены как факторы, которые могут оказывать негативное влияние на целесообразность инвестирования [8, 9]. Этими компонентами являются уголь, порода и газ метан. Учитывая их динамический характер, целесообразно для математического описания процессов перемещения угля (С), породы (R), метана (G) и воды (W) представить их в виде потоков в некоторой технологической системе преобразователей. При этом целью преобразований является получение основных и дополнительных ресурсов сырья, а также минимизация экологического ущерба [10, 11].

Основным методом исследования модели является метод многомерного статистического анализа. С учетом этих требований введем следующие обозначения

$$K_{\varepsilon} = \left\{ \frac{D_{pi}}{D_{Di}}, \frac{\alpha_{Di}}{\alpha_{pi}}, \frac{\sum \Pi_i}{\sum Z_i}, \frac{V_{\Pi i}}{V_i}, \frac{\sum Z_{\Pi i}}{\sum Y_{\Pi i}}, \frac{Q_{Bi}}{Q_i}, \frac{\sum Z_{Bi}}{\sum Y_{\varepsilon i}}, \frac{D_{Bi}}{V_i}, \frac{Q_{Bi*}}{Q_{i*}}, \frac{\sum Z_{Bi*}}{\sum Y_{\varepsilon i*}}, \frac{D_{Bi*}}{V_{i*}} \right\} \quad (1)$$

где  $\alpha$  - показатель качества угля (зольность), %;

Таким образом, результирующий признак для  $i$ -й шахты можно представить:

$$K_e = \left\{ \begin{array}{l} \frac{D_{pi}}{D_{Di}} Z_{i1}, \frac{\alpha_{Di}}{\alpha_{pi}} Z_{i2}, \frac{\sum \Pi_i}{\sum Z_i} Z_{i3}, \frac{V_{\Pi i}}{V_i} Z_{i4}, \frac{\sum Z_{\Pi i}}{\sum Y_{\Pi i}} Z_{i5}, \frac{Q_{Bi}}{Q_i} Z_{i6}, \frac{\sum Z_{Bi}}{\sum Y_{\Xi i}} Z_{i7}, \\ \frac{D_{Bi}}{V_i} Z_{i8}, \frac{Q_{Bi^*}}{Q_{i^*}} Z_{i9}, \frac{\sum Z_{Bi^*}}{\sum Y_{\Xi i^*}} Z_{i10}, \frac{D_{Bi^*}}{V_{i^*}} Z_{i11} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет учесть стабильность технологических потоков, а также качество продукции, поступающей из шахты.

Для того, чтобы можно было сравнить результат действия определенного параметра на объем значение  $X_{ij}$  сводятся в матрице в виде стандартизированных признаков. Стандартизация проводится общепринятыми методами с помощью среднеарифметических значений и среднеквадратических отклонений.

С точки зрения комплексности оценки работы шахт, объем добычи играет важную роль, но не определяющую. Особенно это проявляется в плане качественных характеристик угля и значит в объемах товарной продукции и в соотношении выдаваемой и переработанной (оставленной в шахте) породы. К сожалению, попутная добыча метана в последние годы практически не ведется. Это обстоятельство не повышает рейтинг технологических схем шахт региона [12, 13].

Входными параметрами, внешними условиями такой системы являются следующие.

Для потока  $C$  (уголь):

$D_i$ - объем добычи каждой  $i$ -й шахты с учетом расходов (т/год);

$D_m$  - объем товарной продукции, т/год;

$a_i$  - качество добываемого угля (зольность, %);

Для потока  $R$  (породы):

$V_i$ - объем породы, выдается на поверхность, т;

$V_n$ - объем породы перерабатываемой т.

Для потока  $G$  (газ):

$Q_i$  - прогнозный (возможный) объем выхода метана, м<sup>3</sup>/год;

$Q_n$  - объем метана, перерабатывается, м<sup>3</sup>/год.

Для потока  $W$  (вода):

$Q_i^*$  - прогнозный (возможный) объем откачиваемой воды, м<sup>3</sup>/год;

$Q_n^*$  - объем воды, опресняется, м<sup>3</sup>/год.

Целевой функцией такой системы будет максимизация выходных параметров (отношений преобразований) с оптимальным их распределением внутри системы (отношений связей) [14, 15].

Условие оптимальности для отношения преобразований

$$K_{OP} = \max\{D, A, V, Q\} \quad (3)$$

Кроме того, как указывалось выше для исследования отношений связи следует выполнять их оптимизацию, что в частном случае является задачей поиска оптимального распределения потоков угля между шахтами и обогатительными фабриками [16, 17].

С учетом изложенных выше условий можно сформулировать основное требование к модели, которая формализуется: решение модели должно позволять производить сравнения результативности работы всех шахт региона.

Таким образом, в работе впервые вода рассматривается как продуктивный поток в структуре производительных потоков угольных шахт. Обоснование параметров технологии очистки шахтных вод позволит повысить эффективность угольного предприятия.

**Результаты исследования.** Нами было проведено сравнительный анализ основных методов опреснения, используемых в мире. Основные методы были рассмотрены относительно региона Западного Донбасса и реализации очистного комплекса на территории одной из шахт или их комплекса. В таблице 1 приведены типичный размер основных из методов опреснения: СБД - система многоступенчатой дистилляции, ПД-ТК - пароконденсационная дистилляция - термальная компрессия пары, ПД-МК - пароконденсационная дистилляция - механическая компрессия пары, УМИ - установки мгновенного испарения, ЗО - обратный осмос и ЭД - электродиализ. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение технологий опреснения

Название	СБД	ПД-ТК	УМИ	ПД-МК	ЗО	ЭД
Типичный размер единицы, м <sup>3</sup> /с	5.000 - 15.000	10.000 - 35.000	50.000 - 70.000	100 -2500	24.000	<100-20000
Потребление электроэнергии, кВт · ч/м <sup>3</sup>	1.5-2.5	1.5-2.5	4-6	7-12	3-5.5	6,73
Потребление термальной энергии, кДж/кг	230 (КОВ = 10) -390 (КОВ = 6)	145 (КОВ = 16) -390 (КОВ = 6)	190 (КОВ = 12) -390 (КОВ = 6)	н/д	н/д	н/д
Эквивалент электрической энергии, кВт · ч/м <sup>3</sup>	5-8,5	9,5-25,5	9,5-19,5	н/д	н/д	н/д
Общее потребление энергии, кВт · ч/м <sup>3</sup>	6,5-11	11-28	13,5-25,5	7-12	3-3.5 (до 7 с очисткой Бором)	6,73 (увеличивается с концентрацией соли)

Для подсчета производительности, себестоимости и капитальных инвестиций предприятия деминерализации и водного опреснения было выбрано программное обеспечение Desalination Economic Evaluation Program (DEEP) [18, 19, 20], которая была разработана Международным Агентством Атомной Энергетики и в открытом доступе. Программа позволяет сравнить и вывести закономерности различных конфигурации при различных входных условий. В программе заложена возможность рассчитать не только показатели обратного осмоса, но и БСД и УМИ в паре или отдельно с расчетами электростанции, учитывая тип станции и топливо. Благодаря функционалу указанного программного обеспечения можно выполнить сравнительную характеристику показателей относительно ценового аспекта рациональности использования и подбора того или иного оборудования [21, 22, 23].



Рисунок 1 – Рабочее окно программы

Учитывая тот фактор, откачки воды можно принять за константу, было бы целесообразным компенсировать затраты на откачку воды из шахтных выработок, реализуя воду, как готовый продукт к употреблению. Поэтому первым и самым главным параметром целесообразности можно выбрать  $Q_{\text{вид}} = 1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Принимая во внимание, что объем шахтного водозабора не является постоянной величиной, объем раствора питания будет также колебаться в зависимости от сезонности. Так, границы флуктуации можно определить от  $24000 \text{ м}^3/\text{день}$  до  $31\,000 \text{ м}^3/\text{день}$ . Средняя величина подачи воды в опреснительные системы была выбрана  $W_{\text{гоп}} = 1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ , то есть в сутки  $W_{\text{го}} = 28800 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Годовое производство воды, что готова для потребительских нужд, составит  $W_{\text{пд}} = W_{\text{го}} \cdot A_{\text{рм}} \cdot 365 = 9460800 \text{ м}^3/\text{год}$ , где  $A_{\text{рм}}$  - объем обработанной воды напрямую влияет на себестоимость готового продукта.

С использованием программы было рассчитано себестоимость и график стоимости (рис. 2), что позволило сравнить технологии опреснения вод.

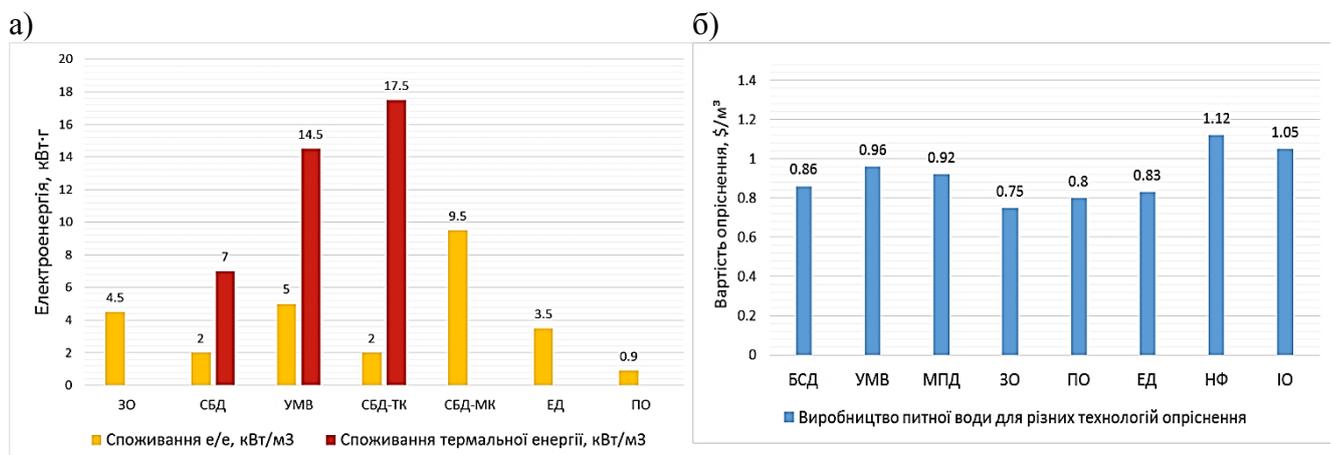


Рисунок 2 - Сравнительный анализ технологий опреснения вод: а) график использования термо- и электроэнергии на производство  $1 \text{ м}^3$  опресненной воды; б) график стоимости производства  $1 \text{ м}^3$  пресной воды

В работе предлагается рассмотреть практический пример сброса водных ресурсов на шахте «им. Сташкова», ведь шахта является наиболее обводненной в Западном Донбассе. Водоприток шахты достигает 1600 м<sup>3</sup>/ч в определенные промежутки времени, в общем водоприток шахты колеблется в пределах 1200 м<sup>3</sup>/ч, что является колоссальным объемом сточных вод с только одного добывающего предприятия. Сбросные шахтные воды были проверены санитарно-профилактической лабораторией и приведены в таблице 2 [24].

Таблица 2 – Результаты аналитического контроля шахтной воды за 07.03.2019

№ п/п	Наименование контролируемого вещества	Шахтная вода в отстойники	Шахтная вода после отстойников	Нормативы для питьевой воды
1	Алюминий, мг/л	-	<0,02	≤0,2
2	БПК5, мг О <sub>2</sub> /л	-	5,8	5,2
3	Водородный показатель, рН	8,15	8,05	6,5-8,5
4	Жесткость, мг-экв/л	28,25	27,44	≤7,0
5	Окрашенность, град	10,79	10,35	≤20
6	Железо общее, мг/л	0,64	0,63	≤0,2
7	Взвешенные вещества, мг/л	99,8	41,4	≤0,001
8	Кальций, мг/л	287,10	279,01	не определяется
9	Кобальт, мг/л	-	<0,02	<0,1
10	Магний, мг/л	169,30	164,39	не определяется
11	Марганец, мг/л	-	0,11	не определяется
12	Медь, мг/л	-	< 0,002	≤1,0
13	Нефтепродукты, мг/л	0,64	0,62	≤0,1
14	Нитраты, мг/л	<0,5	<0,5	<50,0
15	Полифосфаты, мг/л	-	0,07	≤3,5
16	Сульфаты, мг/л	385,58	378,99	≤250
17	Сухой остаток, мг/л	6410,00	6272,67	≤1000
18	Температура, t °С	13,3	13,0	не определяется
19	Хлор свободный	-	-	≤0,5
20	Хлориды, мг/л	3384,08	3313,79	≤250
21	Цинк, мг/л	-	<0,005	≤1,0

На основе вышеупомянутых условий был избран обратный осмос, как комплексную опреснительную систему, которая соответствует необходимым параметрам и является универсальной технологией, с большим мировым опытом использования (60% всего мирового опреснительное оборудование использует обратный осмос и только 6% - технологию электролиза) в различных условиях, особенно в условиях, похожих на такие как в Западном Донбассе [25, 26, 27].

**Выводы.** В работе проведена сравнительная характеристика основных методов опреснения, используемых в мире. Основные методы были рассмотрены относительно региона Западного Донбасса и реализации очистного комплекса на территории одной из шахт или их комплекса.

Для практического применения в работе предлагается выбрать шахту «им. Сташкова», как предмет исследования к использованию опреснительного комплекса через большие объемы загрязненных сбросных вод (1200 м<sup>3</sup>/час) и плановое закрытие угольной добычи на шахте с возможной последующей мокрой или сухой консервацией. Для полноценного и эффективного использования обратного осмоса были рассмотрены и избран комплекс работ по предварительной очистке, экранирование, коагуляции и флокуляции, смягчения и седимен-

тации (отстаивание) воды. Мембраны обратного осмоса наиболее уязвимы к мутности, хлоридов (и других тяжелых металлов), органических соединений и очень жесткой воды.

Для оценки эффективности было применено современное программное обеспечение.

Применение указанного подхода, который повышает эффективность очистки шахтных

вод позволяет оценивать шахтные воды, как действенную составляющую производительных потоков угольных шахт.

#### Список литературы:

1. Грінюв, В. Г., & Хорольський, А. О. (2020). Дослідження основ технології оптимального проектування раціонального користування родовищами цінних копалин. *Мінеральні ресурси України*, (2), 19-24.
2. Хорольський А.А. Возможности создания новой технологии оптимального проектирования природопользования / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Горно-геологический журнал. – 2020. – №61. – С. 4–12.
3. Grinov, V.G., & Horolskiy, A.O. (2018). MozhlivostI efektyvnogo osvoennya rudnih rodovisch iz zapasami ridkisnih i blagorodnih metaliv. *Fiziko-tehnicheskie problemyi gornogo proizvodstva*, (20), 113–122.
4. Грінюв, В.Г., Хорольський, А.О., & Каліущенко, О.П. (2019). Розроблення
5. Khorolskiy, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Fomychova, L. (2020). Research into optimization model for balancing the technological flows at mining enterprises. *E3S Web Of Conferences*, 201, 01030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101030>
6. Khorolskiy, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Demchenko Yu. (2019). Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4),53-62. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.053>
7. Hrinov, V. & Khorolskiy, A. (2018). Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment. *E3S Web of Conferences*, (60), 00017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>
8. Khorolskiy, A., Hrinov, V., & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3),463-471.
9. Khorolskiy, A., & Hrinov, V. (2020). Otsinka i vybir parametriv pry rozrobtsi rodovyshch korysnykh kopalyn. *Fyziko-tekhnycheskie problemyi hornoho proizvodstva*, (22), 118-140. <https://doi.org/10.37101/ftpgp22.01.009>
10. Hrinov, V., & Khorolskiy, A. (2019). Optymalne proektuvannia parametriv hirnychozbahachuvalnykh pidpriemstv dlia ratsionalnoho osvoiennia tsinnykh rodovyshch Ukrainy. *Fyziko-tehnicheskie problemyi hornoho proizvodstva*, (21), 128-145. <https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.008>
11. Хорольський А.А., Гринев В.Г. Выбор сценария освоения месторождений полезных ископаемых // Геология и охрана недр. – 2018. – № 3 (68). – С. 68–75.
12. Хорольський, А., Грінюв, В., & Мамайкін, О. (2019). Інноваційні перспективи підземної експлуатації вугільних родовищ. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, 1(83), 289-298. [https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-289-298](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-289-298)
13. Грінюв, В. Г., Хорольський, А. О., & Мамайкін, О. Р. (2019). Оцінка стану та оптимізація параметрів технологічних схем вугільних шахт. *Вісник Криворізького національного університету*, (48), 31-37.
14. Khorolskiy, A.A., & Hrinov, V.G. (2017). Systemni pryntsyipy ta otsinochni kryterii nadiinosti pry optymizatsii tekhnolohichnykh skhem vuhilnykh rodovyshch. *Visnyk Zhytomyrskoho Derzhavnoho Tekhnolohichnoho Universytetu*, 80(2), 225–233. [https://doi.org/10.26642/tn-20172\(80\)-225-233](https://doi.org/10.26642/tn-20172(80)-225-233)

15. Сынков, В. Г., Гринев, В. Г., & Хорольский, А. А. (2016). Применение базовых алгоритмов оптимизации для выбора очистного оборудования. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*, (2), 117-124.
16. Хорольский, А. О., Гринев, В. Г., & Сынков, В. Г. (2016). Выбор комплексов горно-шахтного оборудования на основе теории графов. *Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Гірництво*, (31), 57-64.
17. Хорольский, А. А., Гринев, В. Г., & Сынков, В. Г. (2016). Обоснование возможности применения классической теории графов для выбора комплексов горного оборудования. *Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта*, (3), 57-64.
18. Palacin, Luis & Tadeo, Fernando & Prada, C. & Touati, Khaled. (2012). Evaluation of the recovery of osmotic energy in desalination plants by using Pressure Retarded Osmosis. *Desalination and water treatment*. (in press). 10.1080/19443994.2012.715130.
19. Warsinger, David & Mistry, Karan & Nayar, Kishor & Chung, Hyung Won & V, John. (2015). Entropy Generation of Desalination Powered by Variable Temperature Waste Heat. *Entropy*. 17. 7530-7566. 10.3390/e17117530
20. R. Semiat and D. Hassan, Energy Issues in Desalination Processes - First UK-Israeli Workshop and Research Event on the Application of Membrane Technology in Water Treatment and Desalination (St Hilda's College, Oxford, 2008)
21. Joachim Koschikowski: Entwicklung von energieautark arbeitenden Wasserentsalzungsanlagen auf Basis der Membrandestillation Fraunhofer Verlag, 2011, 3839602602
22. T. Y. Cath, S. Gormly, E. G. Beaudry, M. T. Flynn, V. D. Adams, and A. E. Childress, *J. Membr. Sci.* 257(1), 85 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.08.039>
23. O. K. Buros, *The ABCs of Desalting* Topsfield, MA: International Desalination Association, (2000). pp. 30.
24. Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10)МОЗ України; Наказ, Норми, Правила від 12.05.2010 № 400
25. Хільчевський В.К., Осадчий В.І., Курило С.М. Основи гідрохімії: Підручник. - К.: Ніка-Центр, 2012. - 312 с.
26. URL: <http://www.lib.ua-ru.net/diss/cont/348686.html>, accessed on 21st May, 2020
27. URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128137222000194>, accessed on 21st May, 2020