

УДК 622.513:628.165

Левченко Е.С., магистр
(ИГТМ НАН Украины)**ОПРЕСНЕНИЕ КАРЬЕРНЫХ И РУДНИЧНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ
КРИВБАССА*****Левченко К.С.,** магистр
(ИГТМ НАН України)**ОПРИСНЕННЯ КАР'ЄРНИХ І РУДНИХ ВОД В УМОВАХ КРИВБАССУ****Levchenko K.S.,** M.Sc. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)**WATER DESALINATION IN QUARRIES AND MINES OF KRIVBASS**

Аннотация. В статье рассмотрена проблема загрязнения рек карьерными и шахтными водами, а также излишками вод хвостохранилищ в условиях Криворожского железорудного бассейна. Показано, что несмотря на проводимые мероприятия по промывке р. Ингулец после сброса в нее отстоянных шахтных вод и вод хвостохранилищ, качество воды в контрольных створах является неудовлетворительным и приводит к засолению и деградации сельскохозяйственных земель, орошаемых водами р. Ингулец.

Выполнен анализ методов опреснения засоленных вод. Показано, что наиболее прогрессивные методы основаны на использовании опреснительных установок, работающих на возобновляемых источниках энергии, и применении молекулярной фильтрации растворов.

Предлагается проводить опреснение карьерных и шахтных вод с доведением их до кондиций питьевого водоснабжения, что позволит сберечь природные источники пресной воды, предотвращая их загрязнение и получить дополнительные водные ресурсы, а также оздоровить реки и сохранить качество почв. При этом для достижения экономической эффективности предлагается использовать энергонезависимые опреснительные установки, работающие на возобновляемых источниках энергии. Предложены направления складирования и использования рассолов, образующихся при опреснении вод.

Ключевые слова: высокоминерализованные шахтные и карьерные воды, опреснительные установки, концентрированные рассолы, извлечение минеральных веществ, экологоориентированный цикл производства.

Введение. Вода - наиболее распространённый и универсальный природный ресурс. Ежегодно из-за увеличения населения, стремительного роста промышленного производства и нерационального ее использования население мира ощущает недостаток пресной воды. Вода становится дефицитным полезным ископаемым. По данным ООН дефицит пресной воды в мире оценивается в 230 млрд. м³ в год. К 2025 году он увеличится до 1,3-2,0 трлн. м³ в год [1].

В Украине водные ресурсы распределены по территории очень неравномерно. Для южных и восточных регионов проблема питьевой воды остается наиболее острой. Ежегодная потребность населения и отраслей экономики Украины в водных ресурсах составляет около 15 млрд. м³ [2].

*Работа выполнена под руководством д.т.н., проф. Четверика М.С.

Питьевую воду получает из поверхностных пресных вод (более 90 %) и частично из подземных источников.

Ежегодная потребность населения и отраслей экономики Украины в водных ресурсах составляет около 15 млрд. м³. При этом потребление воды неравномерно как в территориальном разрезе (рис. 1) так и по видам экономической деятельности (рис. 2). Так наибольшее потребление воды характерно для предприятий промышленности и они же являются абсолютными лидерами по объемам сброса сточных вод в поверхностные водоемы (более 60 % от всего объема сточных вод в Украине).

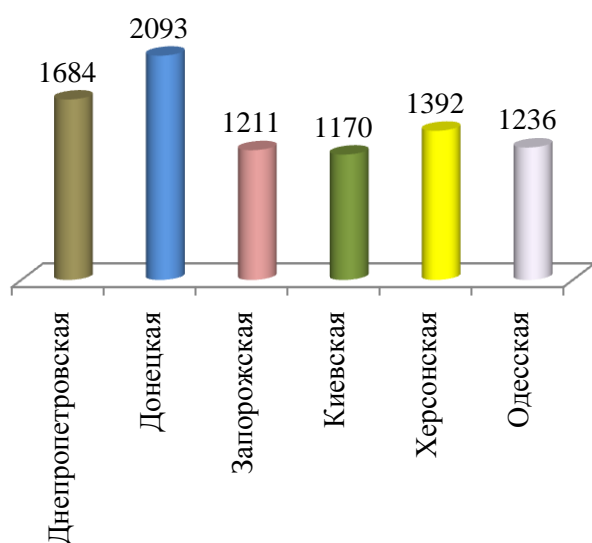


Рисунок 1 – Крупнейшие водопотребители в территориальном разрезе, млн. м³ воды

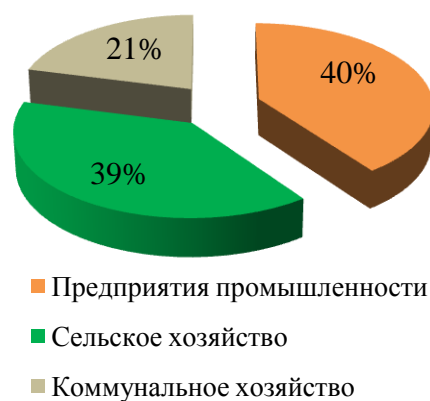


Рисунок 2 – Основные водопотребители в отраслевом разрезе

Постановка проблемы. Несмотря на то, что территория Украины богата ресурсами природных пресных вод, в результате хозяйственной деятельности они в большинстве случаев стали непригодными для питьевого снабжения. Около 75 % от всех загрязненных сточных вод сбрасывается в Донецкой, Днепропетровской, Луганской и Одесской областях. Наибольшее негативное воздействие на водные объекты оказывают сбрасываемые в огромном количестве недостаточно очищенные минерализованные шахтные и карьерные воды.

В обратных циклах горно-обогатительных комбинатов действует схема использования шахтных вод с накоплением ее излишков и ежегодным сбросом их в реки Ингулец и Саксагань и обязательной дальнейшей промывкой этих рек пресной водой. Сброс осуществляется в соответствии с распоряжением Кабинета Министров Украины и согласно «Регламента сброса излишков обратных вод горнорудных предприятий Кривбасса».

Кроме того, ежегодно в Кривбассе откачивается 20—22 млн. м³ высокоминерализованных шахтных вод (с минерализацией от 5 до 96 г/л при средней минерализации 30 г/л, в основном это хлоридные воды с высоким содержанием хлорид-, сульфат-, натрий-, калий-, магний- и кальций-ионов, превышающим предельно допустимые концентрации для поверхностных водных объектов) и почти 18—20 млн. м³ карьерных вод. Ежегодно в реку Ингулец сбрасывают 40

млн. м³ минерализованных вод рудников и карьеров [3]. В 2013 г. Кабинет министров Украины разрешил сброс из пруда-накопителя излишков возвратных вод в р. Ингулец. Тогда было сброшено в реку 12755,9 тыс. м³ воды [4].

На рисунке 3 показаны места сброса избыточных вод из хвостохранилищ южной группы рудников Кривбасса в р. Ингулец, который осуществляется ежегодно с ноября по март в соответствии с Распоряжением КМУ [4].



Рисунок 3 – Места сброса излишков вод из хвостохранилищ в р. Ингулец

Несмотря на мероприятия по промывке р. Ингулец качество воды в ней в контрольном створе в с. Андреевка неудовлетворительное (соленость р. Ингулец достигает 4-5 грамм/литр). Вода из р. Ингулец используется для оросительных работ в Херсонской и Николаевских областях, в результате чего в Николаевской области засолены и деградированы 58 тыс. га орошаемых земель, в Херсонской области — 1,5 тыс. га. Ежегодно на 1 га сбрасывается свыше 4 т разных солей, в том числе 1 т хлоридов.

Столкнувшись с такой проблемой, стоит вопрос очистки высокоминерализованных карьерных и шахтных вод.

Анализ исследований и разработок. Одно из главных направлений в оздоровлении рек Украины - опреснение карьерных, рудничных и шахтных вод с доведением их до кондиции питьевого водоснабжения, которое позволит сберечь природные источники пресной воды, предотвратить их загрязнение и получить дополнительные водные ресурсы.

Существующие методы очистки промышленных сточных вод разделяют на четыре группы [5]:

- механические - усреднение, процеживание, отстаивание (осветление), фильтрование;

- химические - нейтрализация и окисление;
- биологические - аэробное окисление и анаэробное сбраживание;
- физико-химические - флотация, сорбция, электрохимические (электрокоагуляция, электролиз, электродиализ), экстракция, ионных обмен, мембранные методы, термические методы (вываривание и испарение, сжигание, сушка осадка и др.), аэрация, кристаллизация и др.

В тоже время ни один из применяемых методов не имеет задачи очистки сточных вод до уровня питьевой воды.

В мире проблему с дефицитом пресной воды решают за счет опреснения морской.

Опреснение морской воды сконцентрировано на Ближнем востоке (70% от общего объема), в Европе – 9,9%. США – 7,4%, в Африке – 6,3% и остальные 5,8% – страны Азии.

Основными методами опреснения являются: дистилляция — перевод воды в пар (испарением, выпариванием) с последующей конденсацией пара на охлаждаемой поверхности; химическое удаление из воды катионов и анионов с помощью ионообменных смол; вымораживание — превращение морской воды в лёд, механическое отделение пресной воды от рассола с последующим расплавлением льда; мембранный — обратный осмос (удаление из воды ионов солей фильтрацией через специальные мембраны) и электродиализ (удаление из воды ионов солей через анионо- и катионообменные мембраны под воздействием электрического тока).

Каждый метод имеет свою рациональную область применения, которая зависит от многих факторов и прежде всего от расхода и качества минерализованной воды. В настоящее время в мировой практике получили широкое распространение опреснительные установки различных типов. В общем количестве используемых способов опреснения составляют:

- MSF (Multi Stage Flash — многоступенчатое мгновенное вскипание) — 55 % мирового рынка;
- RO (Reverse Osmosis — обратный осмос) –33 %;
- MED (Multi Effect Distillation — многоступенчатая пленочная дистилляция) — 9 %;
- остальные — 3 %.

За последние годы были также предложены новые альтернативные методы опреснения морской воды за счёт воздействия ультразвуком, акустическими, ударными волнами, электромагнитными полями и др.

Актуальной является технология опреснения морской воды, которая не требует больших затрат энергии. Это новый материал молекулярной фильтрации растворов на основе мембраны Perforene, разработанной американской оборонной компанией Lockheed Martin. Perforene представляет собой мембрану из материала графен. Графен представляет собой вещество из чистого углерода. Атомы углерода расположены в виде правильной шестиугольной сотовой структуры. В ней есть отверстия размером один нанометр и менее. Эти отверстия настолько малы, что способны удерживать частицы, несущие электрический заряд,

но в то же время достаточно велики для того, чтобы сквозь них проходили молекулы воды. Несмотря на толщину в один атом, Perforene является одновременно прочным и долговечным материалом, что делает его эффективным для опреснения морской воды в больших объемах. Проект опреснения воды компании Hitachi, реализованный в Арабских Эмиратах, в рамках государственной программы охраны и возрождения редких животных пустыни, которым требуется стабильное водоснабжение, показывает позитивный пример. Для этого опресняются грунтовые воды, обладающие высоким содержанием солей и примесей. Они удаляются посредством технологии обратного осмоса, и отправляются в водоемы для водопоя по трубам, которые проложены под песком. Источником энергии служат солнечные батареи и аккумуляторы избыточной электроэнергии, разработанные Hitachi.

Научные исследования по разработке установок по опреснению морской воды с использованием энергии солнца и ветра ведутся в Университете Кадиса. Научный проект «ETAP-ER project» (Evaluation del Tratamiento del Aqua Potable mediante Energia Renovable y Nanofiltration), финансируемый правительством Андалузии предполагает осуществление процесса опреснения также за счет возобновляемых источников, в том числе ветра. Установка предназначена для подготовки, очистки и опреснения воды, поступающей в водопроводную сеть города Порт Реал. Очистка воды производится с помощью специальных наномембран при многократном прогоне воды через них. Электропитание оборудования установки осуществляется от двух горизонтально-осевых ветро-энергетических установок общей мощностью 6 кВт и солнечной батареи на монокристаллическом кремнии с пиковой мощностью 4,2 кВт. В качестве дублирующего источника используется водородная установка мощностью 0,8 кВт [6].

Изложение материалов и результатов. Исходя из мирового опыта вместо сброса в поверхностные водотоки шахтные и карьерные воды можно доводить до кондиции пресной воды, как поступают с полезным ископаемым при обогащении, и использовать в дальнейшем [7].

Опреснение карьерных, рудничных и шахтных вод с доведением их до кондиций питьевого водоснабжения, которое позволит сберечь природные источники пресной воды, предотвращая их загрязнение и получить дополнительные водные ресурсы - одно из главных направлений в оздоровлении рек и сохранении почв.

Опреснение можно осуществлять по горизонтам, по предприятиям, группам предприятий в зависимости от степени загрязнения и минерализации различных водоносных горизонтов.

Универсального решения (метода) проблемы очистки шахтных и карьерных вод нет, так как состав этих вод значительно отличается. На начальном этапе стоит определиться с приоритетными загрязнителями и, исходя из них, подбирать методы (комплекс методов) очистки вод.

В общем виде процесс очистки шахтных и карьерных вод можно описать выражением

$$W_{\text{мин}} - S = W_{\text{пр}} + R$$

где $W_{мин}$ и $W_{пр}$ – соответственно минерализованные и пресные воды; S – соли; R – рассолы.

Неоднократно в различных инстанциях рассматривалась проблема опреснения шахтных и карьерных вод Кривбасса, поступающих в реки Ингулец и Саксагань. Но это направление так и не реализовалось. Возникли сопутствующие проблемы, которые не решены.

Во первых, процесс опреснения высокоминерализованных вод является энергоемким, что ведет к увеличению постоянно растущей себестоимости руды, концентрата. Но засоление черноземов приводит к еще большим убыткам.

В мире получили широкое распространение опреснительные установки различных типов, использующие тепловую, механическую или электрическую энергию, что достаточно экономически невыгодно. Но получают популярность и установки с использованием атомной энергии, солнца (солнечные батареи) и ветра (ветровые электростанции). В условиях горнодобывающих предприятий для достижения экономической целесообразности опреснения шахтных и карьерных вод, излишек вод хвостохранилищ и пр. рациональным представляется применения энергонезависимых опреснительных установок, работающих на возобновляемых источниках энергии.

При этом экономическая эффективность будет достигаться за счет сокращения водопотребления (следовательно платы за нее), сокращения экологических платежей за загрязнение водных объектов (платы за сброс загрязняющих веществ), получения дохода от продажи излишек пресной воды и электроэнергии. Таким образом, экономическая эффективность возможна при соблюдении условия

$$\Sigma D - \Sigma P > \Sigma П$$

где ΣD – суммарный доход от реализации излишек опресненной воды и электроэнергии; ΣP – сумма расходов, состоящая из амортизационный отчислений, отчислений на эксплуатацию установки, платежей за водопотребление и загрязнение водных объектов при внедрении опреснительной установки (если они будут иметь место); $\Sigma П$ - сумма платежей за водопотребление и сброс загрязняющих веществ без использования установки по опреснению, расходов на промывку р. Ингулец после сброса излишек вод хвостохранилищ.

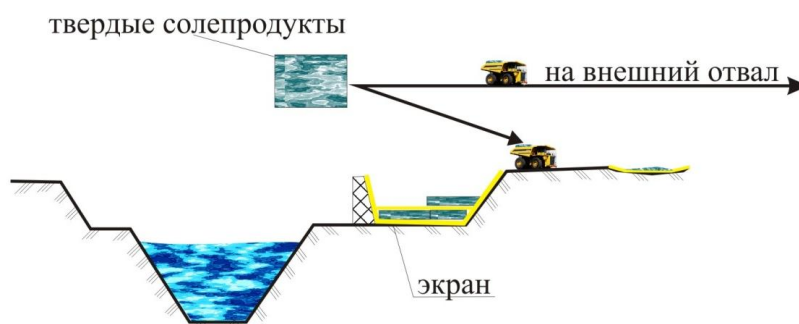
Второй проблемой, сдерживаемой реализацию решений по опреснению шахтных и карьерных вод является образование независимо от применяемого метода опреснения воды концентрированных рассолов, потенциально опасных для окружающей среды [8]. В настоящее время применяют антиэкологическое направление - закачивают рассолы в глубокие подземные горизонты, что приводит к засолению и загрязнению пресных подземных вод.

Другое направление - перевод рассолов в твердые солепродукты с последующим их захоронением или складированием. Складирование (или захоронение) возможно, например, в горные выработки или плоские породные стволы в гидроизолированной таре с дополнительной гидроизоляцией заложеного объема соли. Таким образом, проблема переработки рассолов, их утилизация и

складирование до сих пор не решена и нуждается в комплексном подходе в горнодобывающих районах.

При добыче полезных ископаемых эту проблему можно решить так: при подземной разработке месторождений рассолы можно опускать в специальные камеры или выработки с возможностью дальнейшего извлечения из них полезных компонентов; при открытой разработке рассолы можно размещать во внешних отвалах, при этом отсыпку отвала необходимо производить специальным образом – обеспечивая экранированную водонепроницаемыми породами емкость для рассолов с возможностью дальнейшего извлечения из них полезных компонентов (рис.4, а). Кроме того, на крупных месторождениях имеются небольшие отработанные карьеры, в которые после подготовительных мероприятий тоже можно размещать рассолы [9].

а)



б)



Рисунок 4 – Варианты складирования концентрированных рассолов, образовавшихся при опреснении шахтных и карьерных вод

Наиболее рациональным является складирование рассолов с последующим извлечением из них полезных компонентов (рис.4 б). Основными минеральными компонентами рассолов после опреснения, в зависимости от состава исходной воды, могут быть сульфаты натрия, хлориды натрия, хлориды кальция и магния, а также вещества, как йод, бром, калий и др. Выделяют из рассолов поваренную соль (хлорид натрия). Наибольшую сложность представляет разделение рассола, содержащего хлорида кальция и магния, вследствие близости их физико-химических констант.

Выводы. Предлагается извлечение и очистку шахтных вод, вод из хвостохранилищ и обогатительных фабрик включить в общий технологический цикл предприятия. Таким образом, создается полный экологически сориентированный цикл рационального природопользования и улучшения состояния окружающей среды.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The United Nations World Water Development Report. Water for a Sustainable World. – Paris: UNESCO, 2015. - 139 p.
2. Сташук, В.А. История, современные проблемы и перспективы развития водного хозяйства Украины / В.А. Сташук // Проблемы и прогресс в водном хозяйстве и мелиорации земель в странах ВЕКЦА: Материалы конференции Сети водохозяйственных организаций Восточной Европы, Кавказа, Центральной Азии. - Ташкент: НИЦ МКВК, 2012. – С. 7-15.
3. GEOnews. Куда текут соленые реки Кривбасса [Электронный ресурс]; режим доступа: <http://geonews.com.ua/news/detail/kuda-tekut-solenye-reki-krivbassa-14362>. - Загл. с экрана.
4. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 22 жовтня 2014 р. № 1035-р «Про скидання надлишків зворотних вод у р. Інгулець» [Електронний ресурс]; режим доступа: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1035-2014-%D1%80>. – Загол. з екрану.
5. Долина, Л.Ф. Сточные воды предприятий горной промышленности и методы их очистки. Справочное пособие. / Л.Ф. Долина. - Днепропетровск: Молодежная экологическая лига Приднепровья, 2000. - 61 с.
6. Кучеров, А. В. Опреснение воды: современное состояние и перспективы развития / А.В. Кучеров, О. В. Шибилева // Молодой ученый. — 2014. — №3. — С. 236-239.
7. Bubnova, Ye.A. Technology of Technogenic Deposits Development Improving / Ye.A. Bubnova, Ye.V. Babiy, Ye.S. Levchenko // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов. – ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2016. – Вып. 130. – с. 137-143.
8. Ивлева, Г.А. Анализ мирового опыта и научно-технических разработок в области кондиционирования опресненных высокоминерализованных вод для питьевых целей (применительно к шахтным водам восточного Донбасса). / Г.А. Ивлева, Н.Н. Гусев // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011. – Вып. 10. – С. 162-170.
9. Левченко, Е.С. Опреснение карьерных, рудничных и шахтных вод – один из путей оздоровления рек Украины / Е.С. Левченко // Збірник наукових праць за результатами роботи III Міжнародної науково-технічної конференції (Кривий Ріг, 19 червня 2015 р.). – Кривий Ріг: Вид. Р.А. Козлов, 2015. – с. 191 -193.

REFERENCES

1. The United Nations World Water Development Report (2015), “Water for a Sustainable World”, Paris, UNESCO.
2. Stashuk, V.A. (2012), “History, current problems and prospects for the development of water management in Ukraine”, *Problemy i progress v vodnov khozyaystve i melioratsii zemel v stranakh VEKTSА* [Problems and progress in water management and land reclamation in EECCA countries], *Konferentsiya Seti vodokhozyaystvennykh organizatsiy Vostochnoy Evropy, Kavkaza, Tsentralnoy Azii* [Conference Network of water management organizations in Eastern Europe, Caucasus, Central Asia], Tashkent, SIC ICWC, p. 7-15.
3. GEOnews (2014), “Where the salty rivers of Kryvbas flow”, available at: <http://geonews.com.ua/news/detail/kuda-tekut-solenye-reki-krivbassa-14362>, (Accessed 01.03.2017).
4. Cabinet of Ministers of Ukraine (2014), Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 22, 2014 No. 1035-p "On the dumping of surplus return waters in Ingulets river", available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1035-2014-%D1%80>, (Accessed 01.03.2017).
5. Dolina, L.F. (2000), *Stochnye vody predpriyatiy gornoy promyshlennosti I metody ikh ochistki. Spravochnoe posobie* [Wastewater from mining enterprises and methods for their purification. Reference manual], *Molodezhnaya ekologicheskaya liga Pridneprovya*, Dnepropetrovsk, Ukraine.
6. Kucherov, A.V. and Shibileva, O.V. (2014), “Desalination of water: current state and development prospects”, *Molodoy uchenyy*, vol.3, pp. 236-239.
7. Bubnova, Ye.A., Babiy, Ye.V. and Levchenko, Ye.S. (2016), “Technology of Technogenic Deposits Development Improving”, *Geo-Technical Mechanics*, vol. 130, pp. 137-143.
8. Ivleva, G.A. and Gusev, N.N. (2011), “Analysis of the world experience and scientific and technical developments in the field of conditioning desalinated high mineralized waters for drinking purposes (with reference to the mine waters of the eastern Donbass)”, *Mining Information and Analytical Bulletin*, vol. 10, pp. 162-170.
9. Levchenko, E.S. (2015), “Desalination of quarry, mine and mine waters is one of the ways of improving the rivers of Ukraine”, *Zbirnyk naukovykh prats za rezultatamy roboty konferentsii* [Collection of scientific works on the results of the Conference], 3 Mizhnarodna Naukova ta Tachnichna konferentsiya

[3 International Scientific and Technical Conference], Kriviy Rig, Ukraine, 19 October, 2015, pp. 191 -193.

Об авторе

Левченко Катерина Сергеевна, аспирант, инженер отдела Геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, ekaterinact@ya.ru.

About the author

Levchenko Kateryna Sergiivna, Doctoral Student, Engineer in Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, ekaterinact@ya.ru.

Анотація. В статті розглянуто проблему забруднення річок кар'єрними і шахтними водами, а також надлишками вод хвостосховищ в умовах Криворізького залізрудного басейну. Показано, що незважаючи на проведення заходів з промивки р. Інгулець після скидання в неї відстояних шахтних вод і вод хвостосховищ, якість води в контрольних створах є незадовільною і призводить до засолення і деградації сільськогосподарських земель, зрошуваних водами р. Інгулець.

Виконано аналіз методів опріснення засолених вод. Показано, що найбільш прогресивні методи засновані на використанні опріснювальних установок, що працюють на поновлюваних джерелах енергії, і застосуванні молекулярної фільтрації розчинів.

Пропонується проводити опріснення кар'єрних і шахтних вод з доведенням їх до кондицій питного водопостачання, що дозволить зберегти природні джерела прісної води, запобігаючи їх забрудненню і отримати додаткові водні ресурси, а також оздоровити річки і зберегти якість ґрунтів. При цьому для досягнення економічної ефективності пропонується використовувати енергонезалежні опріснювальні установки, що працюють на поновлюваних джерелах енергії. Запропоновано напрями складування і використання розсолів, що утворюються при опріснення вод.

Ключові слова: мінералізовані шахтні та кар'єрні води, опріснювальні установки, концентровані розсоли, витяг мінеральних речовин, екологоорієнтований цикл виробництва.

Abstract. The article deals with the problem of pollution of rivers with quarry and mine waters, as well as with excess tailings water in the conditions of the Krivoy Rog iron ore basin. It is shown that, in spite of the measures taken to flush the Ingulets river, the quality of water in control areas, after discharging the settled mine waters and tailings water into the river, is unsatisfactory and leads to salinization and degradation of agricultural lands, which are irrigated by the waters of the Ingulets river.

The desalination methods for saline water were analyzed, and the results show that the most progressive methods are those, which are based on the use of desalination plants operating on renewable energy sources with molecular filtration of solutions. It is proposed to perform desalination of quarry and mine waters, bringing them to the condition of drinking water supply, which will save natural sources of fresh water, prevent their pollution, give additional water resources, and improve the river state and preserve quality of soils. At the same time, in order to achieve economic efficiency, it is proposed to use nonvolatile desalination plants operating on renewable energy sources. The directions of storage advancement and use of brines formed during water desalination are proposed.

Keywords: highly mineralized mine and quarry waters, desalination plants, concentrated brines, mining of minerals, ecologically oriented production cycle.

Статья поступила в редакцию 11.12.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Четвериком М.С.