

УДК 551.49 (075.8)

Мендебаев Т.Н., Смашов Н.Ж. (ТОО «Научно-внедренческий центр «АЛМАС», Республика Казахстан), Нурханова Ж.К. (Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Республика Казахстан)

РЕСУРСНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ ЗАЛЕЖЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ИНЖЕКЦИОННО-ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ САМОИЗЛИВОМ

*Повышение эффективности вскрытия и освоения залежей подземных вод возможно при создании условий для проявления внутренней энергии водоносных пластов в сочетании с физическими принципами отбора воды и подъема на высоту без затрат энергии. На этой основе, с учетом элементов залегания водоносных пластов, направления движения воды в них, сформирована циркуляционная система разработки залежей подземных вод инъекционно-принудительным самоизливом. **Ключевые слова:** подземные воды, скважины, инъекция, самоизлив, гидроструйный аппарат.*

Mendebaev T.N., Smashov N.Zh. (Scientifically-promotional center «ALMAS», Republic of Kazakhstan), Nurkhanova Zh.K. (Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan)

RESOURCE CAPABILITIES OF THE CIRCULATION SYSTEM FOR THE DEVELOPMENT OF UNDERGROUND WATER DEPOSITS BY INJECTION FORCED SELF-DISCHARGE

*An increase in the efficiency of opening and developing groundwater deposits is possible when creating conditions for the manifestation of the internal energy of aquifers in combination with the physical principles of water withdrawal and ascent to a height without energy consumption. On this basis, taking into account the elements of the occurrence of aquifers, the direction of movement of water in them, a circulation system for the development of underground water deposits by injection forced self-pouring was formed. **Keywords:** underground water, wells, injection, self-discharge, hydraulic jet apparatus.*

Введение

По данным международных центров изучения экономики мира в 2025 г. 5,5 млрд человек или две трети населения планеты столкнутся с нехваткой пресной воды. За последние 65 лет потребление питьевой воды в мире увеличилось в 8 с лишним раз и в ближайшие десятилетия эта цифра будет расти в геометрической прогрессии. Пресная вода становится ключевым фактором геополитики XXI века.

Устойчивая тенденция роста температуры приземного воздуха привела к повышению интенсивности и

продолжительности таяния ледников — источников пресных вод. Растет температура воды и в океанах.

Во всем мире истощаются запасы месторождений подземных вод, особенно в районах интенсивного недропользования. Все глубже становятся горные выработки, нарушая геодинамику недр и системы жизнеобеспечения водоносных горизонтов. Происходит их загрязнение промышленными и бытовыми отходами.

В сфере недропользования нужен принципиально новый подход к решению проблем сохранения и освоения месторождений подземных вод. Традиционная методика разведки и разработки залежей группами вертикальных скважин морально устарела, не отвечает требованиям сбережения недр и рыночной экономики.

Недостатки — основной объем бурения скважин по пустым породам при незначительной площади вскрытия водоносных пластов на величину их мощности по вертикали, отсюда — низкая водоотдача. Другая проблема — необходимость использования для извлечения воды глубинных насосов, воздушных эрлифтов, энергозатратных в эксплуатации, сложных в обслуживании и ремонте.

Структурно циркуляционная система скважин состоит из наклонно проведенных во встречном направлении нисходящего и восходящего стволов, связанных плавным изгибом на глубине. Стволы обсажены фильтровой колонной труб со сбойкой встык на плавном изгибе. Система оснащена наземной емкостью, в восходящем стволе размещена водоподъемная труба с боковыми каналами, в нисходящем стволе установлена компоновка каскада гидроструйного аппарата, содержащего насадки, приемные камеры, камеры смешения и диффузор. Вход компоновки гидравлически связан с наземной емкостью, выход в виде диффузора введен в водоподъемную трубу, причем связка насадки — приемная камера — ориентирована на подошву залежей подземных вод.

В таком исполнении связанные стволы скважин и компоновка каскада гидроструйного аппарата в совокупности образуют циркуляционную систему отбора воды из водоносных пластов посредством инъекции и подъема на высоту силой гидротарана.

Методы исследования

Объекты исследования — гидродинамика потока воды через компоновку каскада гидроструйного аппарата, конструктивные особенности и технологические возможности средств сооружения скважин, установление критического расхода воды в водоподъемной трубе, при котором нарушается ламинарный режим движения.

Кроме гидродинамических характеристик водоносных пластов, структуры циркуляционной системы и средств ее сооружения, эффективность извлечения подземных вод принудительным самоизливом опре-

деляется силами инъекции и гидротарана, присущие гидроструйному аппарату.

В области гидравлики имеются множество исследований и разработок, направленных на совершенствование конструкции гидромашин и улучшение показателей работы эжекторов, повышение силовых характеристик гидротаранных установок при подъеме воды на высоту.

Разработана методика расчета высокопроизводительных эжекторов, где установлены оптимальные соотношения продольных размеров внутреннего сечения составляющих элементов, обеспечивающие повышение значения коэффициента эжекции [3].

Напорно-энергетические характеристики эжекторов улучшаются с увеличением минерализации рабочей жидкости [5]. Это указывает на выгодность использования эффекта инъекции при извлечении высокоминерализованных подземных вод.

Разработаны конструкции эжекторов с возможностью насыщения рабочего раствора пузырьками воздуха, чем достигнуто сокращение расхода воды до 18–25 % по сравнению со стандартными методами опрыскивания [7].

С целью повышения эффективности эжектора предложен вариант исполнения побудительного устройства в конструкции в виде вращающегося сопла, чем достигается максимальный прирост КПД на 37 % [6].

В исследовании [10] обсуждаются направления будущих научных поисков для решения проблем «многомерного эжектора» в различных областях человеческой деятельности. Есть работа, в которой изучены эффекты турбулентности и ее влияние на динамику и скорость газовой индукции в эжекторе.

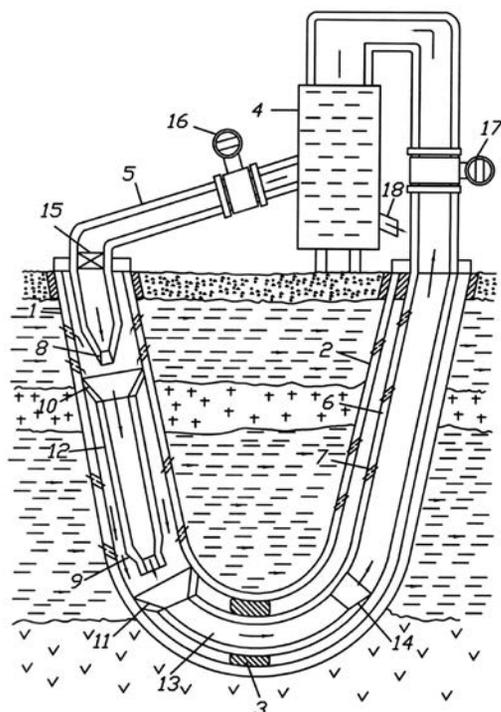


Рис. 1. Циркуляционная система разработки залежей подземных вод инъекционно-принудительным самоизливом: усл. обозначения см. в тексте

Гидротаран — самонастраивающееся автоколебательное устройство, преобразующее кинетическую энергию части воды, поступающей в него, в потенциальную энергию избыточного давления за счет периодически повторяющегося гидравлического удара. Термином «гидравлический удар» обозначают как повышение, так и понижение давления [8].

Гидротараны могут быть использованы в низконапорных гидроузлах. Известны конструкции гидротаранов зарубежных фирм, исследования характеристик которых проводились при питательном напоре 3 м.

Исследователи, занимающиеся разработкой гидротарана, пришли к выводу, что оптимальная длина нагнетательной трубы должна составлять не менее 10 м. Объясняется это тем, что для гидроудара, способного поднять поток жидкости на высоту, должна быть соответствующая масса потока [2].

В работах [9, 11, 12, 15] приведены принципы проектирования гидравлического тарана, сведения об оптимальном дизайне и результаты анализа производительности гидравлической таранной системы, влияние высоты подачи воды на производительность, конструкции и характеристики нового гидравлического тарана.

Благодаря изучению передовых идей в области разработки и эксплуатации эжекторов и гидротарана, была сконструирована компоновка каскада гидроструйного аппарата, встроенная в циркуляционную систему скважин.

Главные отличия от известных конструкций эжекторов и гидротарана — компоновка каскада гидроструйного аппарата одновременно выполняет функцию эжектора и гидротарана, предусматривает зарождение неполноценного гидравлического удара, оказывающего знакопеременные гидродинамические воздействия на водоносные пласты.

На рис. 1 приведена циркуляционная система разработки залежей подземных вод инъекционно-принудительным самоизливом.

Принцип действия. При открытии вентиля 15, рабочий поток воды из наземной емкости 4 по трубопроводу 5 через насадки 8 поступает в приемную камеру 10, увлекая массы воды за счет трений из водоносного пласта через фильтровую колонну труб 1 нисходящего ствола. Увлеченный поток называется инжектируемым, где кинетическая энергия воды из емкости 4 частично передается инжектируемому. Рабочий и инжектируемый потоки поступают в камеру смешения 12, где скорости их выравниваются, что сопровождается, как правило, повышением давления. Из камеры смешения поток поступает в приемную камеру 11, увлекая массу воды из нижележащего водоносного пласта. Далее поток перетекает в камеру смешения 13, где их скорости вновь выравниваются повышением давления. Из камеры смешения 13 на направляющей 3 вода поступает в диффузор 14, где происходит дальнейший рост давления. Давление смешанного потока на выходе из диффузора значительно выше давления инжектируемого потока, поступающего в приемную камеру 10.

В дальнейшем высоконапорный скоростной поток посредством инъекции, однонаправленно увлекая воду через фильтровую колонну труб 2 восходящего ствола, по водоподъемной трубе 6 с боковыми каналами 7 попадает в наземную емкость 4. По разности показаний расходомеров 16 и 17 определяют объем инжектируемой воды через патрубок 18 направляемой к потребителям.

Повышение давления инжектируемого потока без непосредственной затраты механической энергии — основное качество гидроструйных аппаратов [4]. В силу этого, компоновка каскада гидроструйного аппарата представляется более надежным средством отбора воды из водоносных пластов и подъема на высоту, по сравнению с глубинными, механическими насосами.

Благодаря наличию в циркуляционной системе плавного изгиба между стволами, переход воды из каскада гидроструйного аппарата в водоподъемную трубу происходит без потери напора и скорости, приобретением дополнительного ускорения и усилением подъемной силы.

Энергетические характеристики каскада гидроструйного аппарата оцениваются величиной скоростного напора и коэффициентом инъекции K_u :

$$K_u = \frac{Q_u}{Q_p},$$

где Q_u — расход инжектируемого потока воды, Q_p — расход рабочего потока воды.

Значение скоростного напора потока воды в водоподъемной трубе по формуле:

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g},$$

где P — давление воды на выходе из диффузора, γ — объемный вес воды, v — скорость движения потока воды в водоподъемной трубе.

Процесс перетекания воды через компоновку каскада гидроструйного аппарата сопровождается зарождением неполного гидравлического удара. При поступлении потока воды в насадки, из-за резкого уменьшения поперечных размеров насадки на выходе, часть потока задерживается, появляются волны повышенного давления, следующие одна за другой по трубопроводу в сторону емкости. Как только первая волна положительного давления дойдет до емкости, поток разожмется, часть воды выльется в емкость, в этом месте возникает отраженная отрицательная волна. К этому моменту к емкости подходит вторая волна повышенного давления от нижней насадки. Волны смешиваются, и суммарная отрицательная волна давлений движется от емкости к насадкам, где вновь зарождаются волны повышенного давления. Цикл повторяется.

При этом гидравлический удар называется неполным, поскольку выходы насадки остаются открытыми. Если волна повышенного положительного давления будет направлена на увеличение силы гидротарана, то последующая, отраженная от емкости отрицательная волна, может создать вакуум на связки насадка-при-

емная камера, способствуя раскрытию пор и трещин пород, увеличением водоотдачи.

Таким образом, возможности гидравлического удара используются для создания динамических депрессий на водоносные пласты.

Для изучения механизма зарождения неполного гидравлического удара и проверки состоятельности циркуляционной системы, придерживаясь схемы, приведенной на рис. 1 и в соответствии с принципами физического моделирования гидравлических явлений, спроектирована экспериментальная установка.

Проведением серии экспериментов на установке с изменениями соотношения расхода рабочего потока и поперечных размеров выходной части насадок, удалось установить границы зарождения неполного гидравлического удара в условиях приближенных к реальным.

Внешние признаки — переход экспериментальной установки в резонансный автоколебательный режим работы, пульсирующий подъем воды на дневную поверхность.

Безусловно, изучение механизма зарождения неполного каскадного гидравлического удара в компоновке гидроструйного аппарата, динамика знакопеременного взаимодействия с водоносными пластами требуют проведения объемных исследований. Однако есть уверенность, что регулируемый гидравлический удар может стать весомым ресурсом повышения эффективности циркуляционной системы извлечения подземных вод.

Следующая задача в выявлении ресурсных возможностей циркуляционной системы — выбор способа и средств сооружения стволов при меньших динамических нагрузках на горную среду, сохранение естественной пористости, проницаемости пород, заданной трассы.

Неустойчивые водоносные пласты склонны к обрушению при воздействии ударных нагрузок вращающейся бурильной колонны; осевая нагрузка и высокие частоты вращения породоразрушающего инструмента — основные причины искривления стволов.

Закупорка водоносных пластов проникновением в поры и трещины шлама выбуренной породы и дисперсной фазы глинистых растворов снижает водоотдачу в 10–20 раз [1]. Накопление шлама характерно способу бурения скважин со сплошным забоем.

Решением проблемы представляется способ бурения скважин с отбором керна без вращения бурильной колонны, использованием глубинной гидромашины, присоединенной к колонковому набору с возобновляемым, забойным источником энергии [13].

При этом процесс разрушения горных пород, формирование наклонных стволов осуществляется при низких значениях осевой нагрузки и частоты вращения буровой коронки, умеренном расходе промывочной жидкости в виде полимерных, безглинистых растворов.

Колонковый набор содержит наружную трубу с ярусными направляющими, опоры скольжения с продольными отверстиями, установленную на тонкостенной матрице буровой коронки; в верхнем окончении

колонковая труба присоединена к корпусу гидромашин. В полости наружной трубы посредством подшипникового узла расположен керноприемник, присоединенный к вращающемуся ротору гидромашин, в нижней части керноприемник отцентрирован опорой скольжения и соединен с буровой коронкой с тонкостенной матрицей и раздельной системой промывочных каналов.

Конструктивные особенности колонкового набора без вращения наружной трубы — создание возобновляемого, забойного источника энергии гидроструйного разрушения горных пород, без воздействия на стенки скважин.

Преимущество тонкостенной матрицы буровой коронки (рис. 2) — меньшая площадь разрушения забоя, следовательно, меньшее количество шлама, полученные увеличенного диаметра керна, более устойчивого к разрушению и размыву [14].

Слежение за направлением трассы стволов, их сбойки плавным изгибом встык осуществляется системой контрольно-измерительных приборов, скважинной телеметрией ССВ-01.

При повышении эффективности циркуляционной системы также важно изучение возможностей создания стабильного ламинарного режима движения потока воды в водоподъемной трубе. При турбулентном режиме движения сопротивления пропорциональны квадрату скорости течения, увеличению энергозатрат и снижению высоты подъема воды.

Критический расход, при котором режим движения потока воды отклоняется от ламинарного течения в трубах рассчитывают по формуле:

$$Q = 0,182d^3g,$$

где Q — критический расход, л/с, d — внутренний диаметр труб, мм, g — кинематический коэффициент вязкости, см²/сек.

Для установления достоверных граничных значений сохранения ламинарного режима течения воды в водоподъемной трубе были проведены опытные работы на экспериментальной установке. В повариантном исполнении, с целью визуального наблюдения за ре-



Рис. 2. Алмазные коронки с тонкостенной матрицей и раздельной системой промывочных каналов

Значение критического расхода отклонения воды от ламинарного движения в зависимости от внутреннего диаметра водоподъемной трубы (кинематическая вязкость воды при температуре 200 °С равняется — 0,01006 см²/сек)

Показатели критического расхода воды Q, л/мин	Внутренний диаметр водоподъемной трубы геологоразведочного сортамента, мм			
	80	98	114	130
1. Расчетные	8,788	10,765	12,523	14,281
2. Экспериментальные	22,4	25,6	30,2	37,5

жимом движения воды использована водоподъемная труба с прозрачными стенками, на емкость сверху был установлен бачок с красной краской, подаваемой в емкость через вентиль и патрубок. Расходы воды определялись по показанию расходомера, вмонтированного в водоподъемную трубу перед входом в емкость.

Ниже в таблице приведены результаты расчетов и данные экспериментов по определению критического расхода потока воды, при которых режим движения отклоняется от ламинарного.

Результаты экспериментов сильно различаются с расчетными данными критического расхода воды, что указывает на некорректность формулы расчета, которая не учитывает факторы, влияющие на режим движения воды, такие как шероховатость внутренней стенки трубопровода. Возможно, на режим движения воды повлияли плавный изгиб между условными стволами и материал изготовления водоподъемной трубы из прозрачного стекла. Чем плавней вход в трубу, тем позже наступает турбулентный режим.

Отсюда следует, что при проектировании циркуляционной системы разработки залежей подземных вод, применительно к конкретной гидрогеологической ситуации, необходимо руководствоваться результатами экспериментов.

Заключение

Взятая из практики бурения и опытной откачки гидрогеологических скважин идея циркуляционной системы разработки залежей подземных вод жизнеспособна, реализуема на практике.

Исходная идея, определяющая структуру циркуляционной системы — минимальный объем бурения скважин по пустым породам и максимальное вскрытие водоносных пластов, извлечение воды из недр земли без затрат энергии.

При непрерывной, замкнутой циркуляции потока воды по линии наземная емкость — компоновка каскада гидроструйного аппарата — водоносные пласты — водоподъемная труба — наземная емкость, давление воды в водоподъемной трубе значительно выше, чем в наземной емкости.

Весомый ресурс в повышении эффективности циркуляционной системы разработки залежей подземных вод — зарождение неполного, гидравлического удара с чередующимися повышением и понижением волны давления в компоновке каскада гидроструйного аппарата, усилением эффекта инъекции и силы гидротарана.

По технологическим возможностям циркуляционная система может быть использована не только в

напорных и высоконапорных артезианских водах, но и в низконапорных.

Установлены требования к способу и средствам проведения наклонных стволов с плавной сбойкой встык, место размещения компоновки каскада гидроструйного аппарата, ориентированного на элементы залегания водоносных пластов.

При выборе средств проводки стволов, особый интерес представляет конструкция колонкового набора с возобновляемым забойным источником энергии разрушения горных пород.

Предпочтительные материалы для изготовления техники бурения скважин, элементов гидроструйного аппарата — легкосплавные трубы, высокопрочные композиционные материалы, стойкие к знакопеременным нагрузкам и агрессивной водной среде.

Циркуляционная система разработки залежей подземных вод инъекционно принудительным самоизливом по объему водоотдачи может заменить 3–5 вертикальных скважин, пробуренных по традиционной методике.

В перспективе система может стать средством перевода сельского хозяйства страны на орошаемое земледелие, достижением огромной экономии водных ресурсов, решением проблем сохранения недр и водной безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башкатов, Д.Н. Справочник по бурению скважин на воду / Д.Н. Башкатов. — М.: Недра, 1979. — С. 478–482.
2. Галингер, Э.В. Идеальный гидротаран / Э.В. Галингер // II Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2011. — №11(103). — С. 69–71.
3. Горбунов, А.К. Эжекция и инъекция реагентов в технологиях подготовки / А.К. Горбунов, О.П. Петросян, Д.В. Рябленков // Сб. статей Междунар. научно-практ. конф.: Прорывные научные исследования как двигатель науки. — Уфа: Изд-во ООО «Аэтерна», 2018. — С. 40–42.

4. Дерусов, В.П. Обратная промывка при бурении геологоразведочных скважин / В.П. Дерусов. — М.: Недра, 1984. — С. 101–105.
5. Дроздов, А.Н. Влияние минерализации рабочей жидкости на характеристики жидкостно-газовых эжекторов / А.Н. Дроздов, Н.А. Дроздов, Я.А. Горбылева, Е.И. Горелкина // Бурение и нефть. — 2019. — № 7 и 8. — С. 42–45.
6. Исмагилов, А.П. О повышении эффективности эжектора с жидкой струей / А.П. Исмагилов, Е.К. Спиридонов, О.В. Белкина // Источник Пром-Инжиниринг: Тр. III Междунар. научно-техн. конф. — Челябинск, 2017. — С. 13–17.
7. Ксенз, А.Я. К расчету водовоздушного эжектора для серийного опрыскивателя / А.Я. Ксенз, С.И. Камбулов, В.В. Колесник, С.Д. Ритный. — Владикавказ, 2016. — Т. 53. — № 1. — С. 90–97.
8. Людеке, Х.Й. Гидроудар: причины, анализ и способы предотвращения / Х.Й. Людеке, Б. Котэ, К. Паули // Водоснабжение и санитарная техника. — 2015. — № 8. — С. 62–69.
9. Diwan, P. Design and Fabrication of Hydraulic Ram with Methods of Improving Efficiency / P. Diwan, A. Patel, L. Sahu // in International Journal of Current Engineering and Scientific Research. — 2016. — vol. 3. — № 4. — pp 5–13.
10. Besaghi, G. Ejectors on the cutting edge: The past, the present and the perspective / Giorgio Besaghi // Energy Elsevier. — 2019. — vol.170(C). — pp. 908–1003.
11. Guo, X. Optimal Design and Performance Analysis of Hydraulic Ram Pump System / X. Guo, J. Li, K. Yang, H. Fu, T. Wang, Y. Guo, Q. Xia and Wei Huang // Proceeding of Institution of Mechanical Engineering, 2018, Part A: J Power and Energy 0(0), pp. 1–15.
12. Da. Grygo. Effect of the Height of the Delivery Water on Performance of Water Ram / Da. Grygo // Technical Sciences. — 2016. — 19 (2). — pp. 139–149.
13. Mendebaev, T.N. Development of a resource-saving, small-sized downhole hydraulic machine for well drilling / T.N. Mendebaev, N.Zh. Smashov, H.K. Ismailov, B.K. Izakov // Eastern-European journal of enterprise technologies. — 2019. — 6/1 (102). — pp. 70–75. Процентиль — 51.
14. Mendebaev, T.N. Water jet destruction of rocks in well drilling by diamond tools with independent flushing ports / T.N. Mendebaev, N.Zh. Smashov, M.Zh. Kuvatova. // Eurasian mining. — 2019. — 2(32). — pp. 41–43. Процентиль — 63.
15. Vang, K.L. Design and Hydraulic Performance of a Novel Hydraulic ram / K.L.Vang, et al. // 11th International Conference on Hydroinformatics, New York, City, 8 January, 2014, paper no 108.

© Мендебаев Т.Н., Смашов Н.Ж., Нурханова Ж.К., 2021

Мендебаев Токтамыс Нусипхулович // nvc_almas@mail.ru
Смашов Нурлан Жаксобекович // nvc_almas@mail.ru
Нурханова Жания Камбарбек // zhaniya.nurkhanova@bk.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 504.06

Шадрунова И.В., Петрова А.И. (ФГБУН ИПКОН РАН)

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

В статье представлен обзор экологических проблем, связанных с переработкой редкоземельных руд. Рассмотрено развитие рынка РЗМ в связи с расширением использования в различных областях. Показана расчетная удельная стоимость РЗМ для ряда реализуемых в мире проектов. Представлена классификация видов воздействия на окружающую среду при разработке месторождений РЗМ и примеры таких воздействий. Выявлено распределение содержания

радиоактивных элементов и РЗМ в рудах разных месторождений. **Ключевые слова:** редкоземельные элементы (металлы), месторождения, технологические схемы, воздействие на окружающую среду, радиоактивные элементы.

Shadrunova I.V., Petrova A.I. (FGBUN IPKON RAS)

ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE PROCESSING OF RARE EARTH RAW MATERIALS

The article provides an overview of the environmental problems associated with the processing of rare earth ores. The development of the REM market in connection with the expansion of use in various fields is considered. The estimated specific cost of REM for a number of projects implemented in the world is shown. A classification of types of environmental impacts during the development of REM deposits and examples of such impacts are