

**Оценка эффективности основных способов  
обеззараживания шахтных вод**

© 2009. М.В. Россинская, д.э.н., профессор; Н.Г. Трегулова, к.э.н., доцент;  
Н.П. Россинский, к.т.н., доцент,  
Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса,  
ntregulova@mail.ru

Представлена оценка экономической, технологической, экологической и санитарно-эпи-демиологической эффективности основных наиболее распространённых методов обеззараживания шахтных вод. Более подробно представлен наиболее прогрессивный безреагентный электрохимический способ.

Economic, technological, ecological and sanitary-and-epidemiologic efficiency of the most widespread mine waters disinfecting methods are estimated. The most progressive reagentless electrochemical way is presented in more detail.

Ключевые слова: шахтные воды, обеззараживание, электрохимический способ, оценка эффективности, микроорганизмы

Существует много способов обеззараживания воды с различной их эффективностью. Цель данного исследования заключается в том, чтобы дать некоторую объективную оценку эффективности применения наиболее распространённых способов обеззараживания, позволяющую выбрать наиболее эффективный и безопасный способ обеззараживания воды для конкретных условий. Объектом исследования является шахта «Ростовская» ОАО «Угольная компания «Алмазная».

До 2007 года шахтная вода шахты «Ростовская», выдаваемая на поверхность в количестве до 900 м<sup>3</sup>/ч, подвергалась очистке в 3-секционном горизонтальном отстойнике с последующим обеззараживанием жидким хлором и самотеком поступала в пруды-осветлители. Из прудов вода сбрасывалась в реку Малая Гнилуша. Осадок из отстойника периодически удалялся на иловые карты для многолетнего хранения. Состояние хлораторной и всей системы обеззараживания вызывало тревогу из-за общей изношенности узла обеззараживания, что в конечном счете могло послужить источником возникновения чрезвычайных ситуаций с тяжёлыми последствиями. Поэтому возникла настоятельная необходимость в коренной реконструкции этого узла. Дезинфекция шахтных вод производится для уничтожения патогенных микробов и устранения опасности заражения водоёма при сбросе шахтных вод [1, 2].

Обеззараживание шахтной воды можно осуществлять различными способами. Основные наиболее подходящие для условий шахты «Ростовская» сведены в таблицу 1, где представлена их краткая характеристика. Метод обеззараживания шахтных вод выбирают с обязательным учётом технико-экономических и эколого-эпидемиологических показателей.

В 2007 – 2008 гг. совместно с Национальным университетом водного хозяйства и природопользования (г. Ровно) были проведены исследования по изысканию более экономичного и эффективного, более надёжного и безопасного способа и технологии обеззараживания шахтной воды для условий шахты «Ростовская». В результате этих исследований был разработан и внедрён способ безреагентного электрохимического обеззараживания шахтной воды.

Суть способа заключается в том, что шахтная вода до отстаивания подвергается электролизу с использованием нерастворимых комплексных биполярных точечных электродов специальной конструкции.

Процесс обеззараживания шахтной воды шахты «Ростовская» по этому способу заключается в следующем: шахтная вода с максимальным объёмом 900 м<sup>3</sup>/ч по подающему трубопроводу поступает в приёмную камеру электролизёра. Приёмная камера представляет собой четырехугольную железобетонную ёмкость длиной (L) – 2240 мм, шириной (B) – 1000 мм и высотой (H) – 1200 мм. В при-

Таблица 1

Технико-экономическая и санитарно-экологическая оценка методов обеззараживания шахтных вод шахты «Ростовская»  
ОАО «Угольная компания «Алмазная»

П/П №	Наименование способа обеззараживания шахтных вод	Примерные затраты		Количество обслуживающего персонала	Техногенное, экологическое, санитарное и пожарное воздействие
		капитальные	эксплуатационные		
1	Хлорирование жидким хлором	более 2,5 млн. руб.	более 3,0 млн. руб. в год	не менее 8 чел.	В атмосферу может выделяться ядовитый газ. При эксплуатации требуется обязательное строгое соблюдение специальных норм и правил промышленной безопасности, промышленной санитарии и охраны труда. Обязательное наличие приточно-вытяжной вентиляции, специальных средств индивидуальной и групповой защиты и специальных систем сигнализации. Происходит загрязнение окружающей среды выделяющимся хлор-газом, который ухудшает органолептические показатели качества воды, отрицательно влияет на здоровье обслуживающего персонала, на живые и растительные организмы водоёма.
2	Хлорирование хлорной известью	более 1,5 млн.руб.	более 4,0 млн.руб. в год	не менее 12 чел.	Выделение в атмосферу ядовитого газа хлора. Обязательное соблюдение специальных норм и правил промышленной безопасности, промышленной санитарии и охраны труда. Обязательное наличие вентиляции и средств индивидуальной защиты. Загрязнение окружающей среды пылью хлорной извести, выделение в атмосферу хлор-газа, загрязнение воды и почвы отходами хлорной извести. Ухудшает физико-химические и органолептические показатели качества воды. Отрицательно влияет на живые и растительные организмы водоёма.
3	Обеззараживание гипохлоритом натрия, полученным электролизом поваренной соли непосредственно на очистных сооружениях	более 3,5 млн. руб.	более 3,5 млн. руб. в год	не менее 12 чел.	выделение в атмосферу ядовитого хлор-газа. Требуется строгое соблюдение специальных норм и правил техники безопасности, промышленной санитарии и охраны труда. Обязательное наличие приточно-вытяжной вентиляции, средств индивидуальной и групповой защиты. Загрязнение окружающей среды солью и выделившимся в атмосферу хлор-газа (ПДК – 1 мг/м <sup>3</sup> ), ухудшение органолептических показателей качества воды, отрицательное влияние на живые и растительные организмы водоёма.

Продолжение табл. 1.

Технико-экономическая и санитарно-экологическая оценка методов обеззараживания шахтных вод шахты «Ростовская»  
ОАО «Угольная компания «Алмазная»

№ п/п	Наименование способа обеззараживания	Примерные затраты		Количество обслуживающего персонала	Техногенное, экологическое, санитарное и пожарное воздействие
		капитальные	эксплуатационные		
4	Обеззараживание озонном.	более 3,5 млн. руб.	более 4,0 млн. руб. в год	не менее 10 чел.	Выделение в атмосферу ядовитого газа-озона (ПДК – 0,0001 кг/м <sup>3</sup> ). Газ – взрыво- и пожароопасен. Требуется обязательного и строгого соблюдения специальных норм и правил промышленной безопасности, промсанитарии и охраны труда. Обязательное наличие приточно-вытяжной вентиляции, системы рекуперации, средств индивидуальной и групповой защиты. Существует некоторое загрязнение окружающей природной среды. Не ухудшает органолептические показатели качества воды.
5	Обеззараживание ультрафиолетовым и ультразвуковым облучением (УФО, УЗО)	более 1,5 млн. руб.	более 2,5 млн. руб. в год	не менее 8 чел.	Вреден для обслуживающего персонала. Требуется строгого соблюдения специальных норм и правил промышленной безопасности и охраны труда. Экологически маловреден. Не ухудшает общие показатели качества воды.
6	Безреагентный электрохимический (разработана кафедрой «Организация производства и управления» ЮРГУЭС)	не более 900 тыс. руб.	не более 2,2 млн. руб. в год	не более 4 чел.	Экологически безвредный. Не образует вторичных токсинов. Не требует соблюдения и выполнения специальных норм и правил охраны труда, промышленной безопасности, промсанитарии. Взрыво- и пожаробезопасен. Требуется только соблюдение общих правил промышленной безопасности и охраны труда. Не ухудшает органолептические и общие физико-химические показатели качества воды. Происходит некоторое снижение (до 15%) концентрации кальция и магния и других примесей. Обеззараженная вода положительно влияет на живые и растительные водные организмы водоёма.

**Таблица 2**  
 Эффективность электрохимического обеззараживания и очистки шахтной воды шахты «Ростовская» ОАО «Угольная компания «Алмазная»  
 по данным экспериментальных исследований

№ п/п	Наименование величины	Ед. изм.	До электролизера			После электролизера			После отстойника			После доочистки		
			min	max	сред.	min	max	сред.	min	max	сред.	min	max	сред.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	pH	-	7,15	8,2	7,46	7,24	8,34	7,52	7,22	8,1	7,38	7,46	8,14	7,66
2	Взвешенные вещества	мг/дм <sup>3</sup>	68,3	261,2	153,3	119,2	284,2	166,3	67,4	153,1	98,8	10,6	16,2	12,8
3	Хлориды	мг/дм <sup>3</sup>	182,4	395,6	295,7	178,6	385,4	286,6	162,7	365,2	270,6	149,4	341,7	247,8
4	Сульфаты	мг/дм <sup>3</sup>	998,8	2114,6	1686,3	962,4	2046,7	1618,6	912,9	1894,7	1537,9	900,7	1798,3	1435,6
5	Кальций	мг/дм <sup>3</sup>	83,7	215,8	162,4	78,8	203,4	158,3	75,9	193,6	148,4	74,8	164,4	119,7
6	Магний	мг/дм <sup>3</sup>	124,2	236,4	175,5	119,3	221,6	168,4	110,7	199,8	157,3	101,4	178,8	129,3
7	Натрий+калий	мг/дм <sup>3</sup>	499,6	934,7	808,2	499,4	933,9	807,6	498,9	933,6	807,4	476,6	931,4	802,6
8	Солесодержание	мг/дм <sup>3</sup>	1907,6	3936,1	3159,4	1856,8	3815,6	3062,5	1791,8	3623,7	2947,8	1685,3	3524,6	2897,8
9	Сумма тяжёлых металлов, в т. ч. Fe <sub>общ</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	2,95	31,78	17,35	0,65	10,26	2,98	0,18	0,27	0,19	следы	0,14	0,015
10	ОКБ	КОЕ/100мл	658	10720	2620	отсут.	<100	<10	отсут.	<10	<10	<10	<10	<10
11	ТКБ	КОЕ/100мл	467	6314	1280	отсут.	<100	<10	отсут.	<10	<10	отсут.	<10	<10
12	Колифаги	БОЕ/100мл	не обнар.	112	66	отсут.	<10	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.
13	Патогенные	шт/100мл	не обнар.	не обнар.	не обнар.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.

ёмной камере поток воды гасится и равномерно распределяется на два, каждый из которых через переливную стенку поступает в камеру электролизера. Камера электролизера представляет собой четырехугольную железобетонную ёмкость размерами:  $l = 1740$  мм,  $B = 1100$  мм,  $H = 900$  мм. В камере электролизера расположена корзина-кассетница из полиэтиленовых труб, размеры которой:  $l = 1200$  мм,  $B = 800$  мм и  $H = 600$  мм. В каждой корзине-кассетнице расположена электродная система, состоящая из 14 биполярных комбинированных электродов и по одному специальному электроду-катоде и электроду-аноду. Электроды представляют собой подложку, выполненную из токонепроводящего материала. Размеры подложки:  $l = 1000$  мм,  $B = 300$  мм, толщина = 25-30 мм. На этой подложке в шахматном порядке размещены точечные электроды диаметром от 13 до 35 мм. Все электроды в кассетницах расположены в один ряд в вертикально-горизонтальном положении. Расположение электродов в ряду – параллельное. Расстояние между соседними электродами составляет от 25 до 35 мм и фиксируется при помощи токонепроводящих ограничителей.

Подсоединение электролизеров к выпрямителю может осуществляться параллельно и последовательно и зависит от режима работы. При включении электролизера в работу, т. е. при подаче шахтной воды в электролизер и подаче напряжения на крайние электроды (160-380 В), через электролизеры потечёт постоянный ток силой 40-180 А. Величина тока зависит от режима работы узла обеззараживания. При прохождении электрического тока через шахтную воду, протекающую между электродами, на положительно заряженных сторонах точечных электродов образуются атомарный кислород ( $O^\circ$ ), атомарный хлор ( $Cl^\circ$ ), хлор-ион ( $Cl^+$ ) и некоторое количество хлорноватистой кислоты ( $HOCl$ ). Эти вещества являются сильными окислителями, обладают бактерицидными свойствами и совместно с высоким напряжением и высокой плотностью тока воздействуют на все без исключения микробы, и в первую очередь на болезнетворные, убивают их и таким образом обеззараживают воду, проходящую через электролизер. Контроль за процессом обеззараживания осуществляют не реже одного раза в сутки по остаточному активному хлору в воде на выходе из электролизера. На поверхности катодной стороны точечных электродов от-

лагается рыхлый труднорастворимый осадок в виде комплексного соединения гидроксидов, оксидов, гидрокарбонатов, сульфатов и хлоридов кальция, магния, марганца, железа, цинка и других тяжёлых металлов. Этот осадок постепенно осыпается и уносится потоком воды в отстойник, где и оседает совместно с другими грубодисперсными примесями. После отстаивания вода по существующему трубопроводу самотёчно поступает в существующие пруды – осветлители. Эффективность электрохимического обеззараживания шахтной воды шахты «Ростовская» представлена в таблице 2, а технико-экономическая оценка в таблице 3.

В результате обработки данных, полученных при выполнении лабораторных и производственных исследований на реальных шахтных водах шахты «Ростовская» методом математического планирования получена информация о влиянии различных факторов на процесс обеззараживания, выведено линейное уравнение процесса электролиза, позволяющее рассчитать и оценить эффект обеззараживания шахтных вод шахты «Ростовская» внутри предварительно выбранных или фактических интервалов варьированных факторов:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{об} = & 86,52 + \lambda * A + \delta * V + \eta * j + k * W + \\ & + C * C_{обц} - n * \frac{\sum C_{ca+me}}{\sum C_{Na+K}} - \delta \frac{C_{so_4^{2-}}}{C_{ce}^-} - \\ & - M * \frac{M}{N} - q * Q, \% \end{aligned}$$

где  $\mathcal{E}_{об}$  – бактерицидный эффект обеззараживания, который должен быть равен или больше 100%;

$\lambda$  – коэффициент, учитывающий влияние силы тока, проходящего через электрохимическую ячейку (анод-катод);

$A$  – сила постоянного электрического тока, проходящего через ячейку (катод-анод), или сила тока по прибору, А;

$\delta$  – коэффициент, учитывающий влияние напряжения постоянного тока;

$V$  – напряжение постоянного тока на электролизера, В (во время эпидемиологической обстановки или других чрезвычайных ситуаций – 380 В);

$\eta$  – коэффициент, учитывающий влияние плотности постоянного тока;

$j$  – истинная (расчётная или фактическая) плотность тока на точечном электроде, А/м<sup>2</sup>;

Таблица 3

Технико-экономическая оценка использования безреагентного электрохимического узла обеззараживания шахтных вод шахты «Ростовская» ОАО «Угольная компания «Алмазная»

№ п/п	Наименование основных статей	Способ обеззараживания	
		хлорирование	безреагентный-электрохимический
1.	Объём обрабатываемой шахтной воды	$Q_1 = q \cdot t \cdot 365 = 600 \cdot 20 \cdot 365 = 4380000 \text{ м}^3/\text{год}$	$Q_2 = 4380000 \text{ м}^3/\text{год}$
2.	Капитальные затраты	Более 3,0 млн. руб.	Не более 650 тыс. руб.
3.	Основные эксплуатационные затраты	3057980 руб./год	1759860 руб./год
3.1	Реагенты (хлор и др.)	$P_{3.1}^1 = Q \times d_{Cl_2} \times C_{Cl_2} = 4380000 \times 9.5 \times 2.44 = 1015200 \text{ руб./год}$	0 руб./год
3.2	Электроэнергия	$P_{3.2}^1 = Q_1 \times j_{Cl_2} \times C_0 = 4380000 \times 0.0214 \times 12 = 1124780 \text{ руб./год}$	$P_{3.2}^1 = Q_1 \times j_{эл} \times C_2 = 4380000 \times 0.028 \times 12 = 1471680 \text{ руб./год}$
3.3	Основная зарплата основного обслуживающего персонала	$P_{3.3}^1 = N_{Cl_2} \times P_{нз} = 8.1 \times 12 \times 5000 = 480000 \text{ руб./год}$	$P_{3.3}^1 = N \times P_{нз} = 4 \times 12 \times 5000 = 240000 \text{ руб./год}$
3.4	Прочие затраты, в том числе на обеспечение промышленной, санитарной, экологической безопасности труда	способ опасный и вредный $P_{3.4}^1 = Q_1 \times K_{Cl_2} = 4380000 \times 10 = 438000 \text{ руб./год}$	способ безопасный и безвредный $P_{3.4}^1 = 4380000 \times 1.1 = 48180 \text{ руб./год}$
4.	Экономическая эффективность (прибыль)	0 руб./год	1298120 руб./год
5.	Общий срок эксплуатации	до 10 лет	не менее 15 лет
6.	Гарантийный срок эксплуатации	не более 1 года	2,0 года
7.	Срок окупаемости	не окупается	до 1,5 лет

Примечание: где  $Q_1$  – среднегодовой объём шахтной воды, поступающей на обеззараживание,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;  
 $g_1$  – среднечасовой объём шахтной воды поступающей на обеззараживание,  $\text{м}^3/\text{час}$ ;  
 $t$  – средневзвешенное количество часов поступления воды, ч;  
 $d_{ce}$  – среднестатистическое значение хлороглащаемости шахтной воды шахты «Ростовская»,  $\text{мг/л}$  ( $\text{г/м}^3$ );  
 $C_{ce}$  – полная стоимость хлора,  $\text{коп/г}$  ( $\text{руб/кг}$ );  
 $j_{ce}$  – удельный расход электроэнергии при хлорировании, равный  $0,0214$ ,  $\text{кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ ;  
 $j_{эл}$  – удельный расход электроэнергии при электрохимическом обеззараживании, равный  $0,028$ ,  $\text{кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ ;  
 $C_a$  – стоимость  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , равная  $12 \text{ руб.}$   
 $K_{ce}$  и  $K_{эл}$  – удельные расходы на обеспечение безопасности, равный  $K_{ce} = 10 \text{ коп/м}^3$ ,  $K_{эл} = 1,1 \text{ коп/м}^3$ ;  
 $N$  – количество основного обслуживающего персонала, чел.

$K$  – коэффициент, учитывающий влияние объёмной плотности постоянного тока;  
 $W$  – (расчетная или фактическая) объёмная плотность тока,  $\text{А/м}^2$ ;  
 $g$  – коэффициент, учитывающий влияние концентраций сульфатов и хлоридов в обрабатываемой воде;  
 $C_{so+, ce}$  – фактическая концентрация сульфатов и хлоридов в шахтной воде,  $\text{г/м}^3$ ;

$n$  – коэффициент, учитывающий влияние концентраций щелочных и щелочземных металлов;  
 $C_{ca+mq+Na+k}$  – фактическая концентрация ионов щелочных и щелочземных металлов, а также тяжёлых металлов;  
 $n$  – коэффициент, учитывающий влияние общей бактериальной загрязнённости исходной шахтной воды;

$M$  – общая бактериальная (фактическая) загрязнённость исходной шахтной воды, по показателю ОКБ (КОЕ/100 мл);

$N$  – максимальная общая и допустимая бактериальная загрязнённость обеззараженной воды по показателю ОКБ (КОЕ/100 мл);

$\partial$  – коэффициент, учитывающий необработанный электролизом объём шахтной воды, поступающей на обеззараживание;

$Q$  – количество шахтной воды, поступающей на обеззараживание, м<sup>3</sup>/ч.

Из приведённых в таблицах 2 и 3 результатов видно, что разработанный и внедрённый безреагентный электрохимический способ обеззараживания шахтной воды обеспечивает не только требуемый высокий эффект обеззараживания воды, но и позволяет снизить концентрацию ряда примесей: например, сульфатов не менее чем на 15%, кальция, магния и других примесей на 18–20%, железа и тяжёлых металлов практически до нуля. Кроме того, этот способ не связан с применением каких-либо химических

реагентов, сложной аппаратуры, отличается компактностью и простотой конструктивного оформления, простотой эксплуатации и абсолютно безвреден и безопасен как для человека (обслуживающего персонала), так и для окружающей среды. И что очень важно, все затраты, понесённые на разработку и внедрение этого способа окупаются менее чем за 1,5 года за счёт отказа от использования хлора, а также за счёт мероприятий, направленных на обеспечение промышленной, экологической, санитарной безопасности и охраны труда, которые выполнялись при использовании хлора для обеззараживания.

### Литература

1. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Сан.П и Н 2.1.5.98-00. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000. 24 с.
2. Организация Госсанэпиднадзора за обеззараживанием сточных вод: МУ 2.1.5.800-99. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России. 2000. 27 с.