

Энергоснабжение,
водоснабжение и
теплоснабжение
объектов военного
назначения

Исследования и
разработки в области
эффективности,
надежности и боевого
использования
вооружения и военной
техники

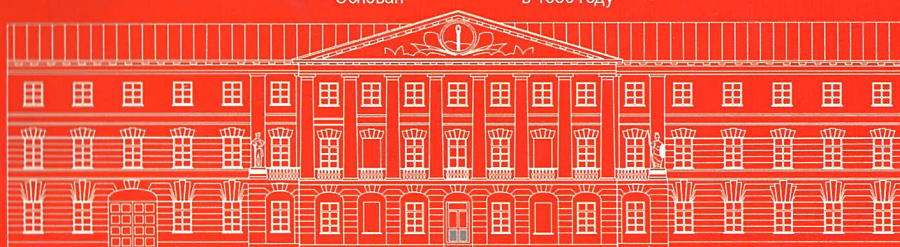
Отходы и их переработка.
Вторичное сырье.
Ресурсосбережение

Проектирование,
строительство и
реконструкция объектов
военного назначения



Основан

в 1939 году



ВВМИСУ * ВИТУ ВМФ * ВВИТКУ * ЛВВИСКУ имени генерала армии А.Н.Комаровского * ВИСИ * ВИТУ

Военный институт (инженерно-технический)

Фесенко Л.Н., Пчельников И.В., Териков А.С.
Fesenko L.N., Pchelnikov I.V., Terikov A.S.

Оценка экономической эффективности обеззараживания питьевой воды прямым электролизом

Estimation of cost efficiency of drinking water disinfection by direct electrolysis

Аннотация:

Представлены исследования экономической эффективности прямого электролиза природных вод в сравнении с электролизом искусственно приготовленного 3%-ного раствора пищевой поваренной соли. В исследовании использовали морскую воду (воду из Черного моря); минерализованную воду (подземную воду ст. Мелиховская скв. «Огненная»); слабоминерализованную воду (подземную воду ст. Грушевской Аксайского района); 3%-ный раствор пищевой поваренной соли. В результате выполненной работы получены зависимости, характеризующие прямой электролиз природных вод различной минерализации, с экономической и энергетической сторон. Определена рациональная область электролиза для каждого исследуемого раствора.

Abstract:

Studies of the economic efficiency of natural waters direct electrolysis in comparison with electrolysis of artificially prepared 3% solution of cooking salt are presented. Sea water (water of the Black Sea); mineralized water (underground water at Melikhovskaya well, "Ognennaya"); weakly mineralized water (groundwater of the Grushevskaya Aksai district); 3% solution of cooking salt were studied. As a result of the work done, the dependencies characterizing the direct electrolysis of natural waters of different mineralization were obtained in economic and energy terms. A rational electrolysis region for each solution is determined.

Ключевые слова: прямой электролиз природных вод, электролизер, низкоконцентрированный гипохлорит натрия, обеззараживание, удельная стоимость килограмма активного хлора

Keywords: direct electrolysis of natural waters, electrolyzer, low-concentration sodium hypochlorite, disinfection, unit cost per kilogram of active chlorine

Известно, что в процессе обеспечения питьевой водой нормативного качества воинских частей силовых структур Российской Федерации в местах их постоянной дислокации на станциях водоочистки широко используется гипохлорит натрия (ГХН). Среди эксплуатационных расходов на ГХН, наряду с затратами электроэнергии наибольшее влияние оказывает стоимость поваренной соли, используемой как источник хлорид-ионов [1]. Поэтому одним из перспективных и менее затратных методов химико-бицидной обработки воды является получение ГХН электролизом хлоридсодержащих растворов, в качестве которых могут использоваться морская, подземная и поверхностная вода.

Для метода прямого электролиза характерны такие недостатки, как низкая производительность по активному хлору (до 1–2 кг/сут), значительное ужесточение условий работы анодов при небольших концентрациях хлоридов и температурах (менее 10°C), низкий выход активного хлора по току (1520 %) [2].

Исследования прямого электролиза природных подземных и поверхностных вод приведены в работах [3–6]. Так, в работе Д.Л. Басина [3], установлено, что при обработке природных вод с содержанием хлоридов 20–350 мг/л выход хлора на электродах из ОРТА составляет 4–30 %, затраты электроэнергии 20–200 кВт·ч на 1 кг активного хлора. Метод прямого электролиза рекомендован для хлорирования воды, содержащей >20 мг/л хлоридов [3].

В работах [5, 6] представлены лабораторные и производственные исследования прямого электролиза донской воды с концентрацией хлоридов 100–130 мг/дм³ [5] и подземной воды ст. Грушевская [6] с концентрацией хлоридов 200–230 мг/дм³.

В работе [5] определен оптимальный режим работы электролизера со следующими параметрами: плотность тока до 100 А/м²; скорость протока воды в электролизере 0,2–0,3 м/с; время работы электрода в режиме анода τ^+ 300 с, в режиме катода τ^- 1 ч. Электрод — оксидно-иридий-рутениево-титановый анод (ОИРТА) с массовым соотношением рутения и иридия 20:80.

Результаты производственных испытаний [6] показали возможность обеззараживания природной воды путем её прямого электролиза со следующими параметрами: плотность тока 25 А/м²; скорость подачи воды в электролизер

0,3–0,5 м/с (расход 16 м³/ч); время работы электрода в режиме анода 300 с, в режиме катода 1 ч (τ^+ — 300 с, τ^- — 1 ч), что устраняет отложения на поверхности электродов и увеличивает срок службы электрода до 4000 часов; электрод ОИРТА, состоящий из Ru–20% и Ir–80 %.

Можно ожидать, что природные минерализованные воды с повышенными концентрациями хлорид ионов, обеспечат значительную экономию при получении растворов ГХН и упростят технологическую схему его производства. Однако из-за существенного различия в составе природных вод, особенно в концентрации хлорид ионов, электролиз минерализованной воды может протекать в экономически неэффективной зоне с большим расходом электроэнергии и низким выходом активного хлора, что делает актуальным определение экономически эффективной области производства низкоконцентрированного гипохлорита натрия прямым электролизом природных вод.

В качестве исследуемых растворов использовали (см. табл. 1): морскую воду (воду Черного моря); минерализованную воду (подземную воду ст. Мелиховская скв. «Огненная» разбавленная до 3% концентрации по NaCl); слабоминерализованную воду (подземная вода ст. Грушевской Аксайского района); 3%-ный раствор пищевой поваренной соли.

Таблица 1

Состав исследуемых минерализованных вод										
Показатели	Минерализованная подземная вода (ст. Мелиховская)		Минерализованная подземная вода (ст. Мелиховская) разбавленная до 3% по NaCl		Раствор поваренной пищевой соли (3% по NaCl)		Черноморская вода		Слабоминерализованная подземная вода (ст. Грушевской)	
	Концентрации									
	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л
Ca ²⁺	2000,0	100,0	1160	58,0	130,0	6,5	200,0	10,0	176,0	8,8
Mg ²⁺	972,0	80,0	449,6	37,0	54,68	4,5	733,9	60,4	75,33	6,2
Ca ²⁺ + Mg ²⁺	2972,0	180,0	1609,6	95,0	184,68	11,0	933,9	70,4	251,33	15,0
Na ⁺ + K ⁺	16640,5	723,5	10221,2	444,4	11782,9	512,3	6131,8	266,6	385,25	16,75
HCO ₃ ⁻	610,0	10,0	244,0	4,0	189,1	3,1	183,0	3,0	378,2	6,2
CO ₃ ²⁻	-	-	-	-	-	-	15,0	0,5	-	-
SO ₄ ²⁻	960,0	20,0	576,0	12,0	187,2	3,9	1248,0	26,0	385,25	8,03

Состав исследуемых минерализованных вод										
Показатели	Минерализованная подземная вода (ст. Мелиховская)		Минерализованная подземная вода (ст. Мелиховская) разбавленная до 3% по NaCl		Раствор поваренной пищевой соли (3% по NaCl)		Черноморская вода		Слабоминерализованная подземная вода (ст. Грушевской)	
	Концентрации									
	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л
Cl ⁻	30948,0	873,0	18568,7	523,8	18303,0	516,3	10919,0	308,0	230,0	6,49
Fe ³⁺	9,4	0,5	7,5	0,4	-	-	-	-	-	-
P, мг/л	52139,9		31227,0		30646,9		19430,0		1630,0	
pH, ед.	7,4		7,34		7,9		8,4		7,6	

Электролиз исследуемых растворов проводили в бездиафрагменной электрохимической ячейке ($V_{\text{яч}}=66$ мл) на постоянном электрическом токе в проточном режиме работы (рис. 1) с плотностью тока 1000 A/m^2 . Из-за низкой минерализации электролиз подземной воды ст. Грушевской исследовали при плотности тока 100 A/m^2 . Во времени электролиза измеряли напряжение на электрохимической ячейке и определяли концентрацию активного хлора. Исследования проводили при температуре $22-24^\circ\text{C}$. В исследовании использовали оксидно-иридиево-рутевый-титановые аноды (ОИРТА) с межэлектродным расстоянием 2 мм. Рабочие площади анода и катода были равными и составляли по 14 cm^2 , размер электродов — $70 \times 10 \text{ мм}$, толщина 1 мм. В качестве источника постоянного напряжения использовали инверторный блок питания марки GW INSTEK 3610 с системой автоматического поддержания силы постоянного тока.

Как видно из таблицы 1 в исследуемой воде (минерализованная подземная вода ст. Мелиховской) присутствует железо, наличие которого в электролизере нежелательно, так как на его окисление расходуется гипохлорит ион. Поэтому перед подачей воды в электролизную ячейку железо удаляли окислением кислородом воздуха, аэрируя необходимый объем исследуемого раствора и затем отфильтровывая осадок $\text{Fe}(\text{OH})_3$ на бумажном фильтре.

Во время эксперимента изменяли расход воды через ячейку ($0,1-6,0 \text{ л/ч}$) и определяли концентрацию активного хлора в получаемом ГХН. Результаты эксперимента представлены на рис. 2 в виде гра-

фика зависимости концентрации активного хлора от времени пребывания электролита в ячейке.

Полученные зависимости изменения концентрации активного хлора (рис. 2) характеризуются кривыми, достигающими некоторого предельного значения, величина которого зависит от природы электролита его соледержания и концентрации хлоридов. При электролизе исследуемых растворов были получены следующие максимальные концентрации активного хлора: воды Черного моря — $5,5 \text{ г/л}$, вода скв. «Огненная» — $6,5 \text{ г/л}$; 3% раствора NaCl — $6,6 \text{ г/л}$ и подземной воды ст. Грушевской $0,09 \text{ г/л}$ (рис. 2).

Для определения экономической эффективности производства ГХН прямым электролизом природной воды оценивали затраты электроэнергии на электролиз и определяли удельную стоимость килограмма активного хлора.

Величина затраченной электроэнергии на получение килограмма активного хлора может быть рассчитана по формуле:

$$W = \frac{I \cdot U}{C \cdot q}, \quad (1)$$

где W — расход электроэнергии на получение 1 кг активного хлора, кВт·ч/кг; I — сила тока, А; U — напряжение на электрохимической ячейке, В; C — концентрация активного хлора, г/л; q — расход электролита, $\text{дм}^3/\text{ч}$.

На рисунке 3 представлены зависимости, характеризующие расход электроэнергии на получение 1 кг активного хлора от продолжительности электролиза исследуемых растворов.

С увеличением продолжительности электролиза (уменьшением расхода) расход электроэнергии на производство килограмма активного хлора увеличивается. Так, при электролизе воды

Черного моря он находился в пределах $4,2-9,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$; вода скв. «Огненная» — $3,6-7,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$; 3% раствора NaCl — $3,1-5,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$; вода ст. Грушевской — $15,0-49,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$ (рис. 3).

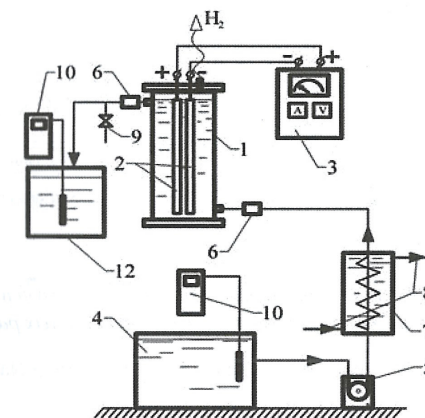


Рис. 1. Схема экспериментальной установки проточного типа:

1 — электролизная ячейка; 2 — электроды; 3 — блок питания; 4 — емкость-накопитель; 5 — перистальтический насос; 6 — термометр; 7 — термостат; 8 — патрубок подвода и отвода охлаждающей воды; 9 — пробоотборник; 10 — pH-метр; 11 — магнитная мешалка; 12 — накопитель ГХН

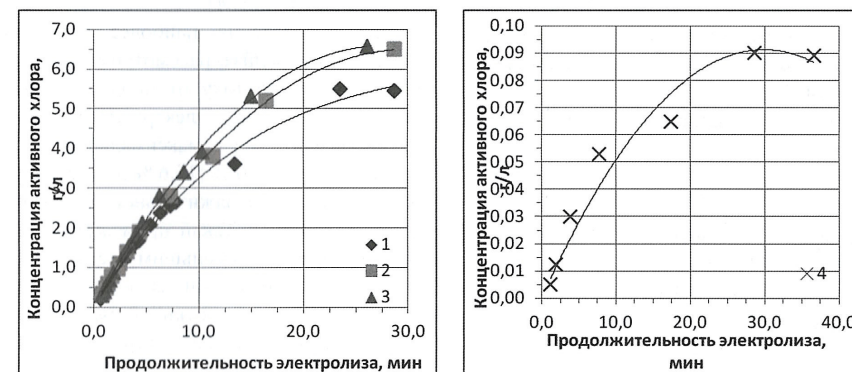


Рис. 2. Зависимость концентрации активного хлора от времени пребывания электролита в ячейке:

1 — вода Черного моря; 2 — скв. «Огненная»; 3 — 3% раствор NaCl; 4 — подземная вода ст. Грушевской

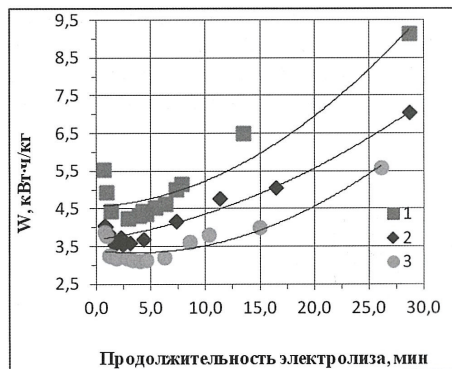


Рис. 3. Зависимость расхода электроэнергии, пошедшей на получение 1 кг активного хлора от продолжительности электролиза исследуемых растворов:

1 — вода Черного моря; 2 — скв. «Огненная»; 3 — 3% раствор NaCl; 4 — подземная вода ст. Грушевской

Графики, представленные на рисунке 4, получены путем вычисления стоимости одного килограмма гипохлорита, которая для 3%-го раствора пищевой поваренной соли, Ц_{3%с.р.} составит, руб./кг:

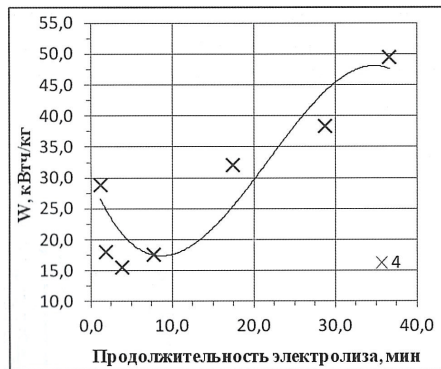
$$\Pi_{3\%с.р.} = W \cdot \Pi_{эл} + 5 \cdot \Pi_c \quad (2)$$

где $\Pi_{эл}$ — стоимость киловатт-час электроэнергии, 4,06 руб./кВт·ч; Π_c — стоимость килограмма соли, 3,5 руб.

Аналогично для природной воды, Ц_{п.в.}, руб./кг:

$$\Pi_{п.в.} = W \cdot \Pi_{эл} \quad (3)$$

Удельная стоимость ГХН, полученного электролизом 3% раствора поваренной соли, находилась на уровне 30-40 руб./кг, что объясняется стоимостью пищевой соли, которая составляет от 40 % до 60 % себестоимости килограмма активного хлора. Самая высокая стоимость килограмма активного хлора (до 200 руб./кг) была получена при электролизе слабоминерализованной подземной воды ст. Грушевской (рис. 4), что очевидно связано с её невысокой минерализацией (1,63 г/л) и от-



носительно низкой концентрацией хлоридов (до 230 мг/л).

На рисунке 4 кривые 1 и 3 пересекаются, следовательно, электролиз воды Черного моря экономически выгоднее электролиза раствора поваренной соли до концентрации 5,0 г/л по активному хлору (рис. 4).

Для определения наиболее эффективной области электролиза рассмотрим зависимость выхода хлора по току от продолжительности электролиза (рис. 5). Электролиз исследуемых растворов протекал с максимальным выходом хлора по току 75-90 % (16,6 % для воды ст. Грушевской) при продолжительности электролиза от 2,5 до 5 минут. Такой промежуток времени характеризуется наименьшим удельным потреблением электроэнергии на электролиз и минимальной стоимостью килограмма активного хлора, которая составила для (рис. 4): воды Черного моря 17,2-18,3 руб./кг; воды скв. «Огненная» — 14,3-15,0 руб./кг; 3% раствора NaCl — 30,1 руб./кг; воды ст. Грушевской — 63,0-73,0 руб./кг.

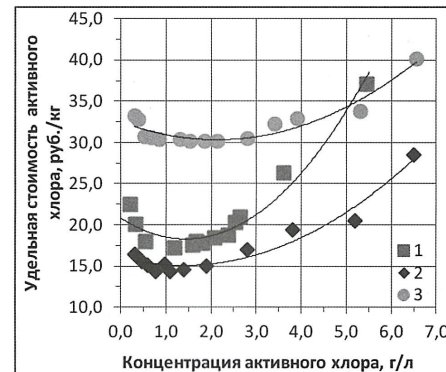


Рис. 4. Стоимость килограмма активного хлора от его концентрации:

1 — вода Черного моря; 2 — скв. «Огненная»; 3 — 3% раствор NaCl; 4 — подземная вода ст. Грушевской

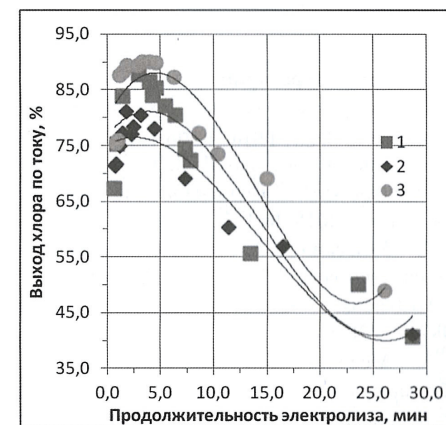
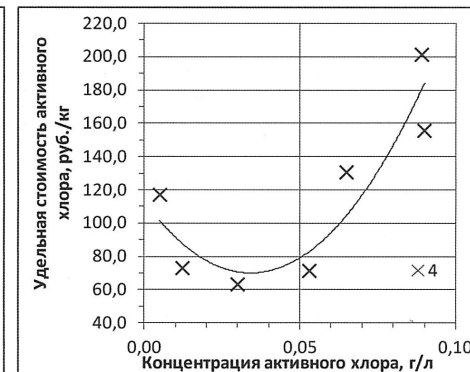
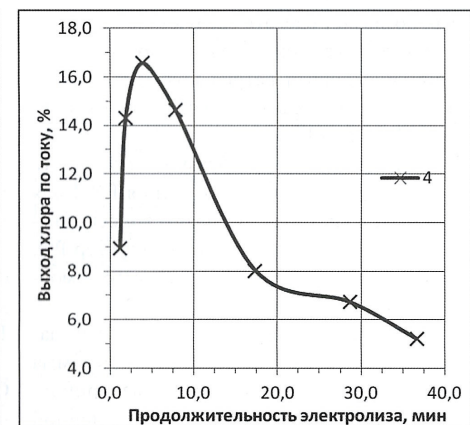


Рис. 5. Влияние продолжительности электролиза на выход хлора по току:

1 — вода Черного моря; 2 — скв. «Огненная»; 3 — 3% раствор NaCl; 4 — подземная вода ст. Грушевской



Результаты экспериментов (рис. 2-5) сведены в таблицу 2. Представленные значения характеризуют весь диапазон работы электролизера, в скобках указана оптимальная область работы.

Таблица 2

Показатели эффективности электролиза исследуемых растворов				
Показатель Черноморская вода		Минерализованная подземная вода (ст. Мелиховская) разбавленная до 3% по NaCl	3% раствор NaCl	Слабоминерализованная подземная вода (ст. Грушевская)
Концентрация активного хлора, г/л	0,25-5,5 (1,0-2,0)	0,3-6,4 (1,0-2,0)	0,3-6,6 (1,0-2,0)	0,005-0,09 (0,05-0,03)
Напряжение, В	4,91	3,9	3,72	3,4
W, кВт·ч/кг	4,2-9,1 (4,2-4,5)	3,6-7,0 (3,5-3,7)	3,1-5,6 (3,1-3,2)	15,0-49,5 (15,0-18,0)
Удельная стоимость активного хлора, руб./кг	17,2-37,1 (17,2-18,3)	12,7-29,8 (14,3-15,0)	30,1-40,2 (30,1-30,2)	63,0-201,0 (63,0-73,0)
Выход хлора по току, %	40,9-87,7 (84,0-87,7)	40,8-81,2 (78,0-81,2)	50,0-90,0 (89,3-90,0)	36,7-16,6 (14,2-16,6)

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Существует корректная возможность получения гипохлорита натрия прямым электролизом природной воды с концентрацией хлоридов от 230 мг/л до 18,6 г/л.

2. Наиболее целесообразно применять предлагаемую технологию получения ГХН для водоочистки в системах питьевого водоснабжения тех воинских частей силовых структур РФ, которые дислоцируются вдоль океанских и морских побережий государства.

3. Для определения действительных затрат электроэнергии и стоимости килограмма активного хлора прямой электролиз природной вод необходимо вести с определенной плотностью тока, соответствующей концентрации хлорид-ионов в данном растворе и его минерализации. Для установления такой зависимости (плотность тока — концентрация хлоридов) необходимо проведение дальнейших исследований.

4. Стоимость килограмма активного хлора, полученного прямым электролизом воды: Черного моря 17,2-18,3 руб./кг; ст. Мелиховская скв. «Огненная» 14,3-15,0 руб./кг; 3% раство-

ра NaCl — 30 руб./кг; ст. Грушевской — 63,0-73,0 руб./кг.

Список литературы:

1. Совершенствование технологии производства гипохлорита натрия электролизом морской воды. Фесенко Л.Н., Игнатенко С.И., Пчельников И.В. // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 1. С. 11-20.
2. Кульский Л. А. Электрохимия в процессах очистки воды [Текст] // Л. А. Кульский, В. Д. Гребенюк, О. С. Савлук. — Киев: Техника, 1987. — 220 с.
3. Медриш Г.Л., Тейшева А.А., Басин Д.Л. Обеззараживание природных и сточных вод с использованием электролизера. — М.: Стройиздат, 1982. — 81с.
4. Басин Д. Л. Исследование технологии и разработка аппаратуры для обеззараживания питьевой воды прямым электролизом [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Басин Дмитрий Лазаревич. — Москва, 1978. — 140 с.
5. Бреус С. А., Скрыбин А. Ю., Фесенко Л. Н. Разработка технологии очистки природной воды для питьевых целей на период чрезвычайных ситуаций: производство активного хло-

ра электролизом воды // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3655 (дата обращения 12.04.2017).

6. Производственные испытания обезза-

раживания питьевой воды прямым электролизом. Фесенко Л.Н., Скрыбин А.Ю., Бреус С.А., Пчельников И.В. Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 5. С. 15-20.

УДК 355.673.5:696.115

Подпорин А.В., Сизон Е.К.

Podporin A.V., Sizon E.K.

К вопросу обоснования расчетов проектных расходов воды в системах водоснабжения жилых и казарменных зон военных городков

On the question of justification of project costs calculations of water consumption in water supply systems of residential areas and barracks of garrison towns

Аннотация:

В статье рассматривается вопрос определения расчетных расходов во внутренних системах водоснабжения. Приводится сравнение результатов расчета по методике СП30.13330.2016 [1] и DIN 1988 [2]. Оцениваются последствия проектирования систем водоснабжения по завышенным и заниженным расходам.

Abstract:

The article considers the issue of determining rated water flow in domestic water supply systems. Comparison of calculation results by the method of SP30.13330.2016 [1] and DIN 1988 [2] is given. The consequences of designing water supply systems at inflated and underestimated costs are estimated

Ключевые слова: проектные расходы, оптимальный диаметр, методика расчета, потребности воды, режим работы оборудования, система водоснабжения.

Keywords: design water flow, optimal diameter, calculation methodology, water users, equipment operation mode, water supply system.

При разработке энергоэффективных систем водоснабжения жилых и казарменных зон военных городков, основным фактором, определяющим их эффективность, является соответствие проектных расходов, определяемых в процессе проектирования, фактическим, протекающим по системам при эксплуатации. По проектным расходам определяются диаметры трубопроводов, и подбирается необходимое оборудование, а вот то, как вся система будет работать в целом, уже зависит от фактических эксплуатационных расходов в каждый временной отрезок.

Если расчетные расходы будут значительно превышать эксплуатационные, то в этом случае завышаются непосредственные затраты на саму систему водоснабжения, а установленное оборудование будет работать с очень низким КПД. Работа насосов с низким КПД, при малых расходах, приводит к увеличению количества потребляемой энергии, относительно единицы перекачиваемой жидкости, увеличению давления в сети водоснабжения и, в случае использования одного рабочего насоса, сокращению рабочего ресурса насоса, из-за смещения рабочей точки из оптимальной зоны. А если при этом учесть, что затраты на транспортировку воды состав-