

ВСТ

ВОДОСНАБЖЕНИЕ
И САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

ISSN 0321-4044

1
2015



ЭКОТЕХНИКА КОМПАНИЯ

САМОВСАСЫВАЮЩИЕ САМОЗАЛИВНЫЕ НАСОСЫ

для коммунального хозяйства, строительства, агрессивных и сильнозагрязненных жидкостей с крупными включениями

GR
GORMAN-RUPP
PUMPS
The Pump People



- ПОДБОР • РАСЧЕТ • ПРОЕКТ • ПОСТАВКА • ШЕФМОНТАЖ • ПУСКОНАЛАДКА
- СЕРВИС • ГАРАНТИЙНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ • ЗАПАСНЫЕ ЧАСТИ

«КОМПАНИЯ ЭКОТЕХНИКА» 620062, Екатеринбург, проспект Ленина, 68, офис 21
Тел.: (343) 216 82 16 • 216 82 14 • 216 78 50 • mail@ecotechnika.ru • www.ecotechnika.ru

УДК 628.166.094.3

Совершенствование технологии производства гипохлорита натрия электролизом морской воды

Л. Н. ФЕСЕНКО¹, С. И. ИГНАТЕНКО², И. В. ПЧЕЛЬНИКОВ³

¹ Фесенко Лев Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Водное хозяйство, инженерные сооружения защиты окружающей среды», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова 346428, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел.: (8635) 25-53-34, e-mail: 65613@mail.ru

² Игнатенко Сергей Иванович, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, ООО НПП «ЭКОФЕС» 346400, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, Баклановский проспект, 200В, тел.: (8635) 26-56-13, e-mail: 65613@mail.ru

³ Пчельников Игорь Викторович, аспирант, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова 346400, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, Баклановский проспект, 200В, тел.: (8635) 26-56-13, e-mail: pchelnikov.igor@mail.ru

Рассмотрен альтернативный способ производства низкоконцентрированного гипохлорита натрия электролизом морской воды взамен гипохлорита натрия, получаемого по традиционной технологии из растворов пищевой поваренной соли. Представлены результаты исследований производства гипохлорита натрия, получаемого электролизом натуральной черноморской воды, модельной черноморской воды в сравнении с 3-процентным раствором поваренной пищевой соли. Экспериментально изучено влияние физико-химических параметров электролиза морской воды на количество образующегося активного хлора. Определен химический состав и структура катодных отложений, образующихся во времени при электролизе морской воды, декарбонизированной морской воды и 3-процентного раствора пищевой поваренной соли. Дана сравнительная оценка коррозионных и электрохимических показателей металлооксидных покрытий анодов (оксидных рутениево-титановых анодов и оксидных иридий-рутениево-титановых

анодов) при электролизе морской воды и 3-процентного раствора NaCl. Экспериментально подтверждена целесообразность производства гипохлорита натрия электролизом морской воды и определены оптимальные условия проведения процесса. Установлен оптимальный состав металлооксидных покрытий анодов для получения низкоконцентрированного гипохлорита натрия электролизом морской воды. На основе результатов научно-экспериментальных исследований составлены рекомендации по выбору технологических схем производства гипохлорита натрия электролизом морской воды в циркуляционном и проточном режимах электролиза и обоснованы рациональные области их применения. Проведена технико-экономическая оценка рекомендуемой технологии.

Ключевые слова: обеззараживание, газообразный хлор, гипохлорит натрия, электролиз, морская вода, оксидный рутениево-титановый анод, иридий-рутениево-титановый анод.

Транспортировка и хранение многотонных запасов хлора на водоочистных станциях, находящихся в основном в зоне плотной городской жилой застройки, представляют особую опасность. Токсичность сжиженного хлора, усиленная его высокой концентрацией, послужила основанием для многочисленных поисков менее опасного реагента, сочетающего преимущества хлорирования и отсутствие его недостатков. Сравнительный анализ различных дезинфици-

рующих средств и способов их получения свидетельствует о том, что в числе альтернативных хлору реагентов наиболее предпочтителен гипохлорит натрия [1–4].

Благодаря высокой антибактериальной активности и широкому спектру действия на различные микроорганизмы доля гипохлорита натрия на рынке дезинфицирующих средств продолжает расти и остается второй по объему применения после хлора [1].



Рис. 1. Распределение затрат на производство гипохлорита натрия

Производство гипохлорита натрия связано с многотоннажными поставками поваренной соли, ее складированием и хранением. С учетом последних событий на Украине, основного поставщика соли в Европейскую часть РФ, становится актуальным вопрос замены импортируемой соли другими хлоридсодержащими реагентами или готовыми природными рассолами. Установлено, что затраты на поваренную соль при использовании ее в качестве исходного электролита — искусственно приготовленного 3-процентного раствора NaCl — составляют до четверти от общей себестоимости производства низкоконтрированного гипохлорита натрия (рис. 1).

Получение электрохимического гипохлорита натрия возможно на основе природного сырья —

минерализованных хлоридных вод, а также воды морей и океанов, что позволит исключить этап искусственного приготовления солевых растворов.

Цель настоящих исследований — определение оптимальных технологических и электрохимических параметров бездиафрагменного электролиза морской воды и на этой основе совершенствование технологии получения низкоконтрированного электрохимического гипохлорита натрия на базе местного сырья. Исследования проводили на черноморской натуральной и модельной морской воде, которую сравнивали с 3-процентным раствором пищевой поваренной соли (ГОСТ Р 51574-2000 «Соль поваренная пищевая. Технические условия»). Результаты исследований представлены в табл. 1.

Экспериментальные исследования проводили по трем направлениям. Во-первых, изучали влияние физико-химических параметров электролиза морской воды (плотности тока, температуры раствора, расхода электролита и времени его пребывания в электролизере) на количество образующегося активного хлора в схемах проточного и циркуляционного режимов работы. По второму направлению определяли состав и различие структур катодных отложений, образующихся в процессе электролиза морской воды, декарбонизированной морской воды и 3-процентного раствора пищевой поваренной соли. По третьему направлению испытывали коррозионные и электрохимические показатели металлооксидных покрытий анодов (оксид-

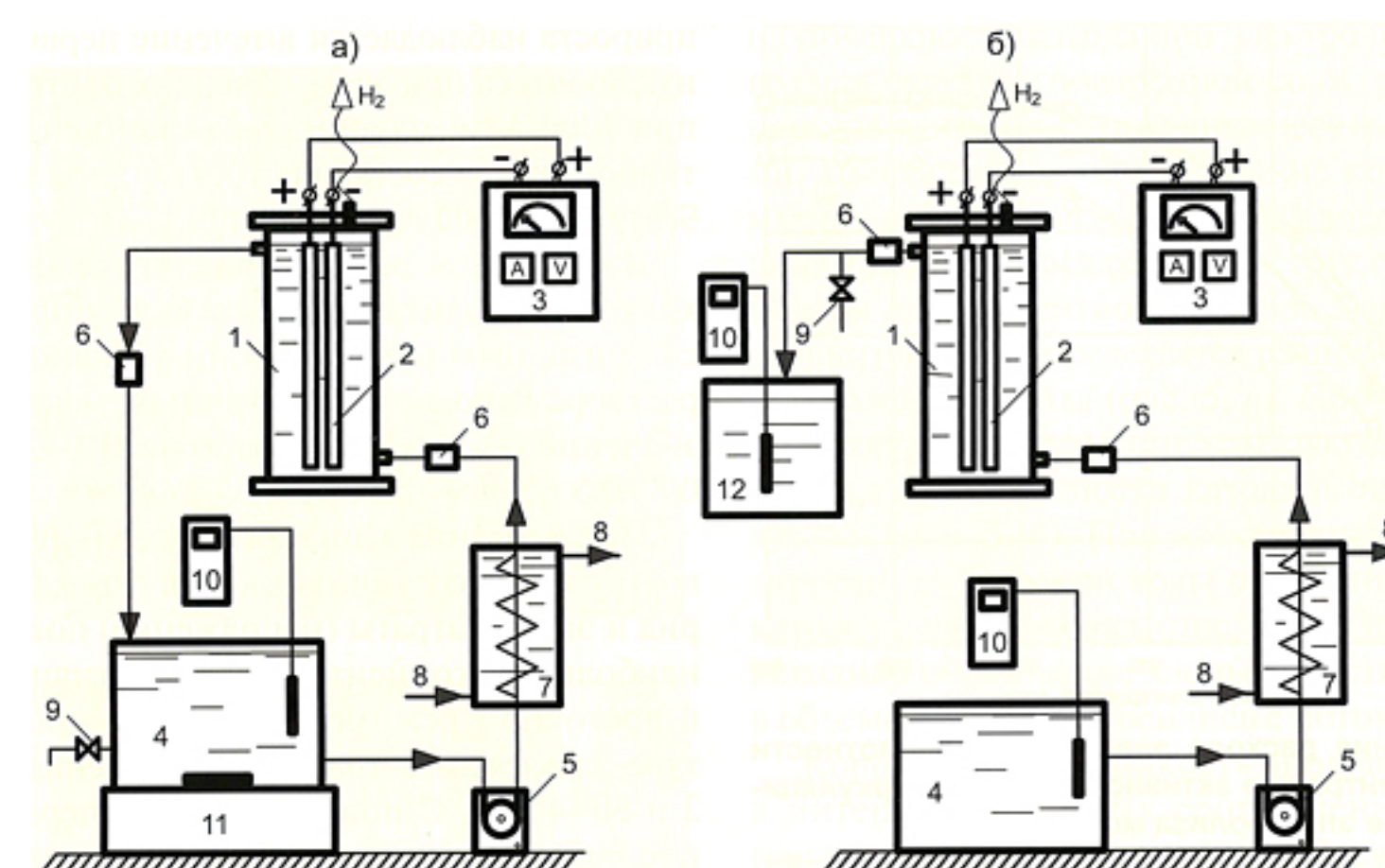


Рис. 2. Технологические схемы экспериментальных электролизных установок циркуляционного (а) и проточного (б) типа
1 — электролизная ячейка; 2 — электроды; 3 — блок питания; 4 — емкость-накопитель; 5 — перистальтический насос; 6 — термометр; 7 — термостат; 8 — патрубок подвода и отвода охлаждающей воды; 9 — пробоотборник; 10 — рН-метр; 11 — магнитная мешалка; 12 — накопитель гипохлорита натрия

ных рутениево-титановых анодов — ОРТА и оксидных иридий-рутениево-титановых анодов — ОИРТА), их технологические и энергетические характеристики при электролизе морской воды и 3-процентного раствора NaCl.

Электролиз исследуемых хлоридно-натриевых растворов проводили в бездиафрагменных электрохимических ячейках на постоянном электрическом токе в циркуляционном и проточном режимах работы.

Электролизная установка циркуляционного типа (рис. 2, а) включала цилиндрическую ячейку, изготовленную из прозрачного винипласта (объем ячейки 66 см³, циркулирующего раствора — 300 см³), состоящую из крышки, токоподводов, входного и выходного штуцеров и электродов; инверторного блока питания марки GW INSTEK 3610 с системой автоматического поддержания силы постоянного тока; емкости-накопителя; перистальтического насоса Etatron DS B-V-3-3 с регулируемой подачей.

Рабочий раствор из емкости перистальтическим насосом с заданным расходом подавали в ячейку через подводящий штуцер, расположенный в нижней части корпуса электролизной ячейки. Образующийся при электролизе раствор гипохлорита натрия отводили в емкость через верхний сливной штуцер, установленный на противоположной стороне корпуса ячейки.

Раствор гипохлорита натрия циркулировал через термостат LOIP LT-200 с контролем температуры гипохлорита натрия на входе и выходе из ячейки с помощью термометров ТБ-3. Для равномерности распределения концентрации активного хлора во всем объеме раствор перемешивали в емкости мешалкой типа ПЭ-6100. Величину pH определяли pH-метром «Эксперт-pH» с комбинированным электродом ТДС-3.

Электролизная установка проточного типа (рис. 2, б), также как и установка циркуляционного типа, состояла из электрохимической ячейки, электродов, блока питания, расходного бака и перистальтического насоса подачи электролита.

В соответствии с задачами первого направления исследований экспериментально установлено, что на количество активного хлора в получаемом гипохлорите натрия оказывают влияние продолжительность электролиза, расход и температура электролита, плотность тока. Полученные зависимости концентрации активного хлора для циркуляционного (рис. 3) и проточного (рис. 4) режимов электролиза характеризуются кривыми, достигающими некоторого предельного значения, зависящего от условий проведения электролиза.

Для циркуляционного режима электролиза (рис. 3) масса образовавшегося вещества (актив-

Показатель	Природная черноморская вода	Модельная черноморская вода	3-процентный раствор NaCl	Питьевая вода, г. Новочеркасск
Ca ²⁺ , мг/л	204	200	130	50
Ca ²⁺ , мг-экв/л	10,2	10	6,5	2,5
Mg ²⁺ , мг/л	704,7	733,9	54,68	36,5
Mg ²⁺ , мг-экв/л	58	60,4	4,5	3
Na ⁺ + K ⁺ , мг/л	6095	6131,8	11983	108,1
Na ⁺ + K ⁺ , мг-экв/л	264,5	266,6	521	4,7
HCO ₃ ⁻ , мг/л	173,9	183	189,1	183
HCO ₃ ⁻ , мг-экв/л	2,85	3	3,1	3
CO ₃ ²⁻ , мг/л	18	15	—	—
CO ₃ ²⁻ , мг-экв/л	0,6	0,5	—	—
SO ₄ ²⁻ , мг/л	1248	1248	187,2	182,4
SO ₄ ²⁻ , мг-экв/л	26	26	3,9	3,8
Cl ⁻ , мг/л	10741	10919	18300	120
Cl ⁻ , мг-экв/л	303	308	516,3	3,4
P, г/л	19,19	19,43	30,84	0,68
pH	8,5	8,4	7,9	7,8

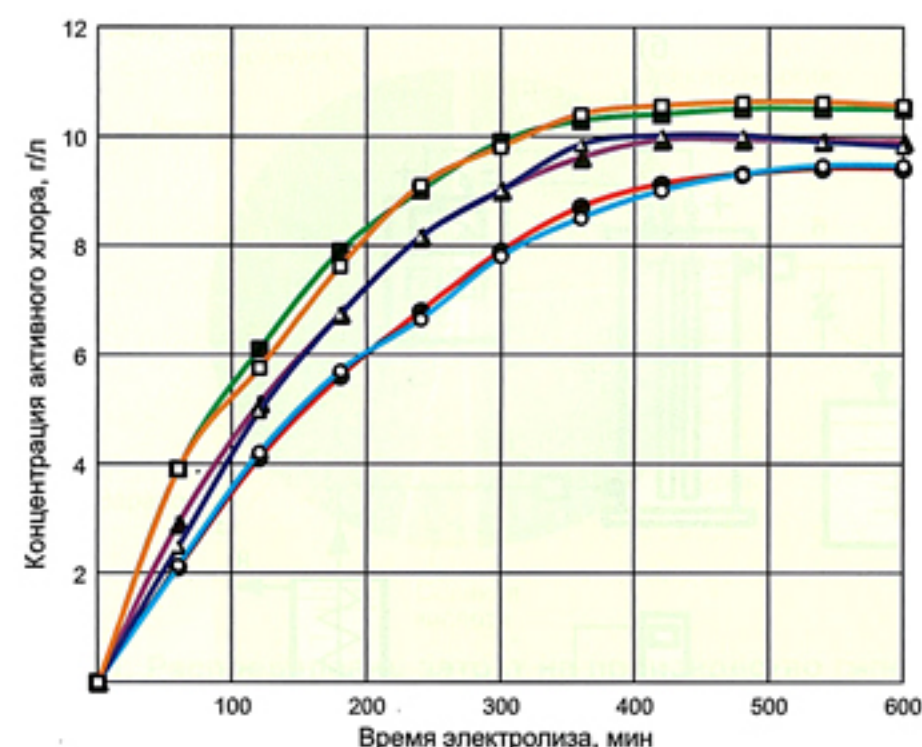


Рис. 3. Влияние расхода электролита и плотности тока на концентрацию активного хлора в циркуляционном режиме электролиза морской воды
плотность тока, А/м²: ●, ○ 600; ▲, ▼ 800; ■, □ 1000; расход, дм³/ч: ●, ▲, ■ 0,5; ○, ▼, □ 2,5; ▲, ▼, □ 4,5

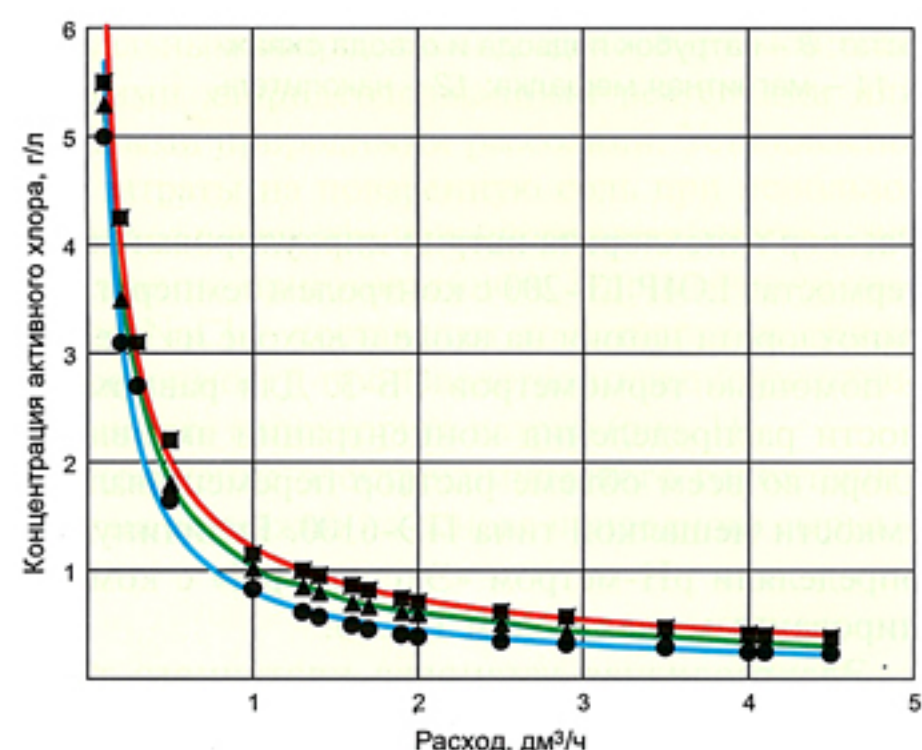


Рис. 4. Влияние расхода морской воды на концентрацию активного хлора в проточном режиме электролиза
плотность тока, А/м²: ● 600; ▲ 800; ■ 1000

ного хлора) определяется количеством электричества, пропущенного через раствор. Скорость циркуляции (расход) морской воды через электрохимическую ячейку практически не влияет на концентрацию активного хлора. Температура гипохлорита натрия становится постоянной через 200 минут электролиза и достигает 32 °С при анодной плотности тока 1000 А/м²; 30,5 °С – при 800 А/м² и 29 °С – при 600 А/м². Дальнейшая продолжительность процесса практически не влияет на температурный режим. Во время электролиза концентрация активного хлора возрастает (рис. 3), при этом наибольшая скорость

прироста наблюдается в течение первых 300 минут процесса при всех значениях плотности тока: при 1000 А/м² максимальная концентрация активного хлора составила 10,5 г/л; при 800 А/м² – 9,1 г/л; при 600 А/м² – 8,5 г/л.

В проточном режиме (рис. 4) увеличение расхода электролита через ячейку сопровождается снижением концентрации активного хлора в растворе гипохлорита натрия: от максимальных значений 3–5 г/л при расходе 0,1–2 дм³/ч до 0,3–0,5 г/л при расходе 2,5–3 дм³/ч.

Исследования влияния температуры морской воды на концентрацию хлора в гипохлорите натрия и энергозатраты (напряжение) показали, что наибольшая концентрация по активному хлору в проточном режиме достигается при температуре электролита 10–20 °С, наименьшая – при 2 и 30–40 °С. С повышением температуры, как и ожидалось, происходило снижение напряжения, и наоборот, при температуре 30 и 40 °С при всех значениях плотности тока и расходах электролита через ячейку напряжение составило 3,6–4,7 В, при 2 °С – 5,4–6,2 В. Максимальный выход хлора по току (60–80%) был получен при температуре морской воды 10–20 °С. Повышение температуры и, как следствие, снижение напряжения, смещает электролиз в область меньших затрат электроэнергии. При низких температурах (< 5 °С) выход хлора по току снижается, и электролиз становится экономически более затратным, поскольку удельный расход энергии на производство 1 кг хлора возрастает и достигает максимальных значений 6,5–7 кВт·ч/кг. Следовательно, при эксплуатации электролизной установки на практически бесплатном сырье должен быть найден оптимальный режим эксплуатации, при котором затраты на подачу сырья (морской воды), его температурное кондиционирование и электроэнергию будут минимальны.

Качественный состав и структуру отложений, образующихся при электролизе морской воды на катоде, оценивали в сравнении с 3-процентным раствором поваренной соли (рис. 5). Для предотвращения карбонатных отложений принят метод декарбонизации морской воды путем ее подкисления с последующим удалением выделившейся свободной углекислоты. Это более надежный и дешевый способ, чем умягчение.

Ионный состав черноморской воды и искусственно приготовленных растворов поваренной соли различается. Так, для морской воды характерно значительное, до 6 раз, превышение концентрации ионов магния над ионами кальция, при этом концентрации HCO_3^- примерно равны (табл. 1). Как следствие, осадки, образующиеся

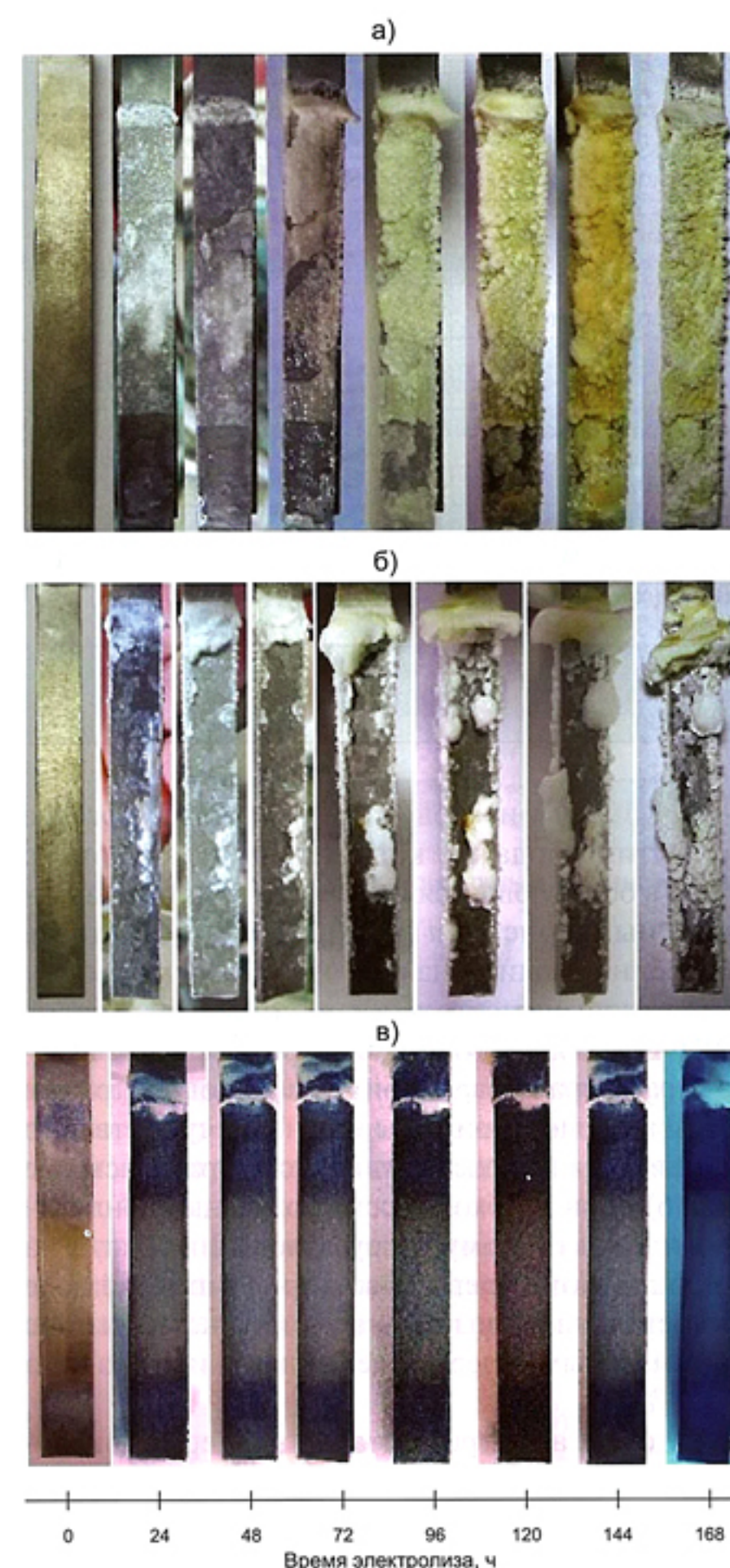


Рис. 5. Динамика образования осадка на катоде в проточном режиме электролиза в течение 168 часов
а – 3-процентный солевой раствор; б – морская вода; в – декарбонизированная морская вода

на поверхности катода при электролизе морской воды и раствора поваренной соли, различаются не только составом, но и физическими свойствами. Шестикратное преобладание концентрации магния над кальцием в морской воде определяет динамику роста осадка и его структуру (рис. 5). Осадок в 3-процентном растворе NaCl получается плотным и распределяется равномерно по всей поверхности катода (рис. 5, а). При электролизе морской воды осадок имел рыхлую структуру, отделялся от поверхности катода и оседал на дно ячейки (рис. 5, б). При электролизе декарбонизированной морской воды отложения осадка на катоде не наблюдались (рис. 5, в). При этом происходило образование хлопьев (частиц) осадка в объеме, которые уносились с потоком воды.

Коррозионную стойкость анодов определяли в интервале массовых соотношений металлов (рутения, иридия) в покрытии. В качестве анодного покрытия использовали смесь солей металлов платиновой группы – RuCl_3 , IrCl_3 в комбинации с TiCl_4 . Суммарная масса драгоценных металлов в покрытии была постоянной – 7,5 г/м². В опытах варьировали соотношение рутения и иридия в интервале от 0 до 100% с шагом 10%, масса TiO_2 во всех покрытиях составляла 2 г/м². Материалом катода и основой анода служил титан марки ВТ1-0 толщиной 1 мм. Тестовые испытания коррозионной стойкости анодного покрытия проводили в 1 М раствора H_2SO_4 при плотности тока 10000 А/м² по методике, изложенной в [5].

Установлено, что средняя величина коррозионной стойкости (время работы) анодов возрастала с 2,38 до 25 часов с увеличением содержания в покрытии иридия (Ir) с 10 до 80% (табл. 2). Последующее увеличение доли иридия в покрытии приводило к постепенному снижению коррозионной стойкости. Наибольшее время работы (25 часов) отмечено при процентно-массовом соотношении иридия к рутению 80:20 (анод № 9), наименьшее (3 часа) – при минимальном содержании иридия 10% или его полном отсутствии (анод № 1 и 2). Включение иридия в ок-

Таблица 2

Показатель	Номер анода										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Содержание Ir в покрытии: г/м², %	0, 0	0,75, 10	1,5, 20	2,25, 30	3, 40	3,75, 50	4,5, 60	5,25, 70	6, 80	6,75, 90	7,5, 100
Средняя коррозионная стойкость, ч	3	2,38	3,28	4,49	6,29	9	11,48	13	25	22	19

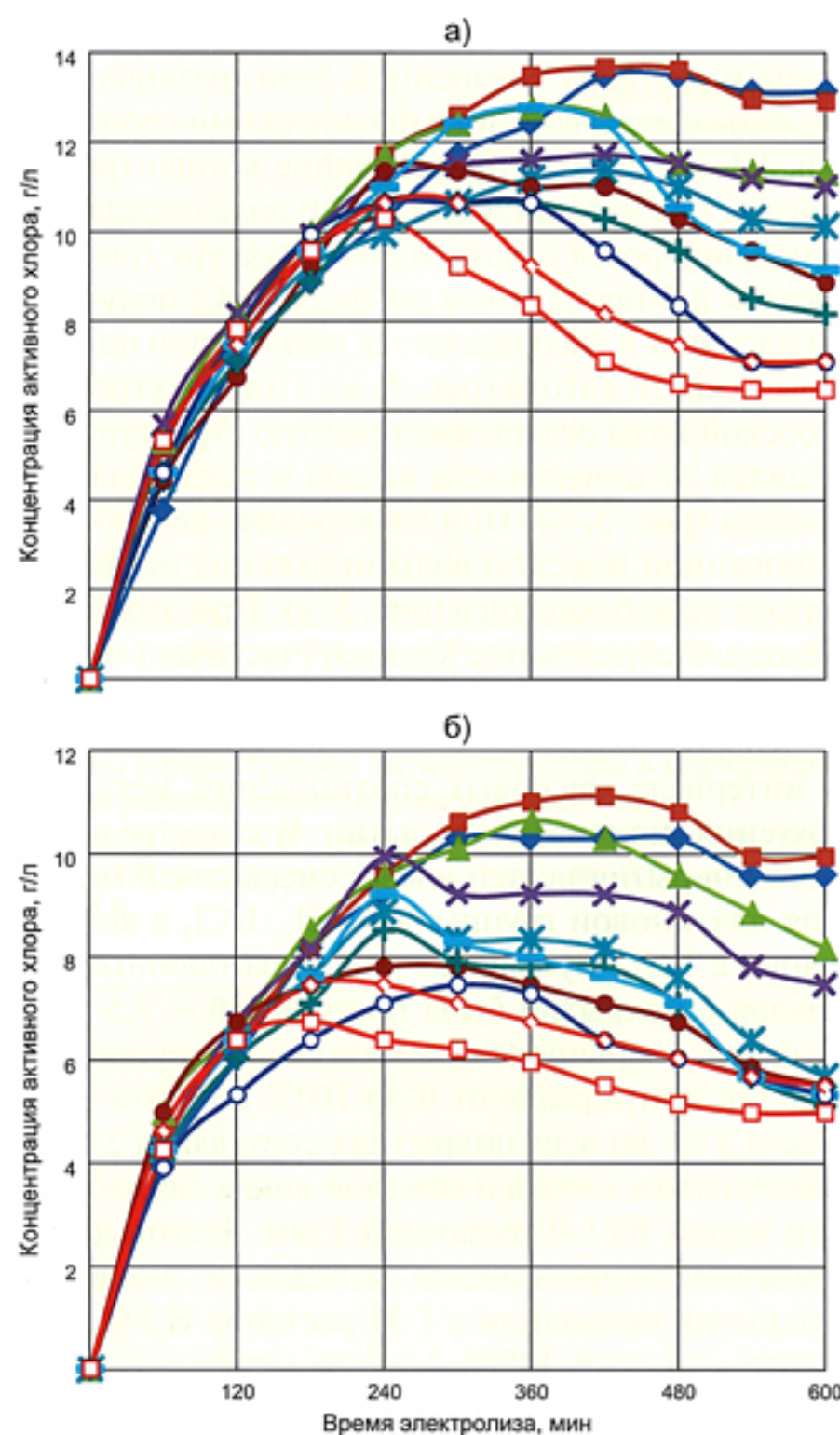


Рис. 6. Зависимость концентрации активного хлора от продолжительности электролиза 3-процентного раствора поваренной соли (а) и морской воды (б) на анодах

процентное соотношение Ir/Ru: — 0/100; — 10/90; — 20/80; — 30/70; — 40/60; — 50/50; — 60/40; — 70/30; — 80/20; — 90/10; — 100/0

сидное покрытие при процентно-массовом соотношении иридия к рутению 80:20 увеличивает коррозионную стойкость анодов в 8 раз.

Принципиальная схема	Производительность электролизера по активному хлору, кг/сут	Концентрация активного хлора, г/л	Объем обрабатываемой воды, тыс. м³/сут	Возможный объект использования
I	0,01–0,5	0,1–0,5	До 0,1	Бассейны, фонтаны
II	0,5–10	8	0,1–2	Столовые, санатории и др.
III	10–50	9	2–10	Аквапарки, бассейны, морские суда и др.
IV	50–1000	6	10–100	Канализационные и водопроводные очистные сооружения и др.
V	> 1000	0,1–1	> 100	Охлаждающие контуры ГРЭС, АЭС

Таблица 3

Показатель	Циркуляционный режим электролиза	Проточный режим электролиза
Плотность тока, А/м²	600	600
Покрывание анодов	ОИРТА (Ir:Ru – 80:20), закладка по массе 7,5 г/м²	
Продолжительность электролиза, мин	240	—
Расход электролита, дм³/ч	0,5–4,5	0,2–0,5
Температура морской воды на входе в электролизер, °С	5–20	10–20
Концентрация активного хлора, г/л	8	6
Выход хлора по току, %	60–50	40–50
Удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/кг	4,5–5,5	4–5

Результаты исследований влияния состава покрытия анода на концентрацию активного хлора в образующемся гипохлорите натрия представлены на рис. 6, а (в 3-процентном растворе поваренной соли) и на рис. 6, б (в морской воде).

Установлено, что состав покрытий анодов (ОРТА или ОИРТА) при электролизе 3-процентного раствора поваренной соли до концентрации 10–12 г/л и морской воды до 5–7 г/л существенно не влияет на прирост активного хлора в растворе (рис. 6). При необходимости получения концентрации по активному хлору более 12 и 10 г/л на 3-процентном солевом растворе и морской воде соответственно следует использовать покрытия с минимальным содержанием иридия или без него (0–20%).

На основании результатов экспериментальных исследований и расчетов установлены оптимальные технологические параметры электролиза морской воды для получения гипохлорита натрия в циркуляционном и проточном режимах работы электролизеров (табл. 3).

Таблица 4

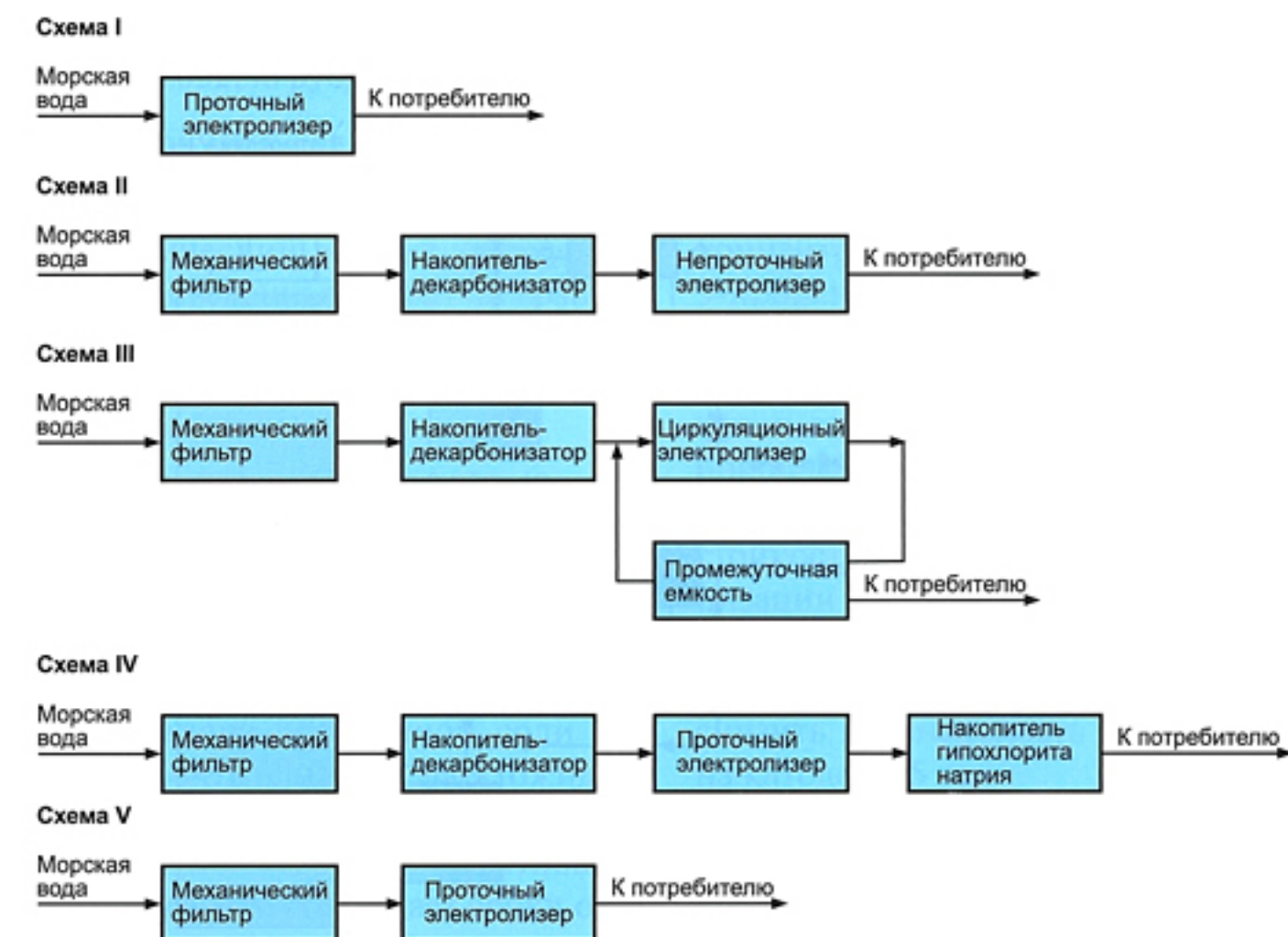


Рис. 7. Принципиальные схемы производства гипохлорита натрия электролизом морской воды

Технологическую схему производства гипохлорита натрия рекомендуется принимать исходя из требуемого суточного количества активного хлора, кг/сут, и объема дезинфицируемой воды, м³/сут, а также целевого назначения объекта (табл. 4, рис. 7).

Циркуляционный или проточный режимы электролиза назначаются исходя из требуемой производительности электролизной станции по

активному хлору. При суточной потребности в активном хлоре до 50 кг рекомендуется применять электролизеры непроводного типа (схемы II и III), свыше 50 кг – проточного типа (схемы IV и V). Для индивидуальных пользователей электролизных установок малой производительности предпочтительна схема I.

Результаты исследований легли в основу разработанных технологических схем производства

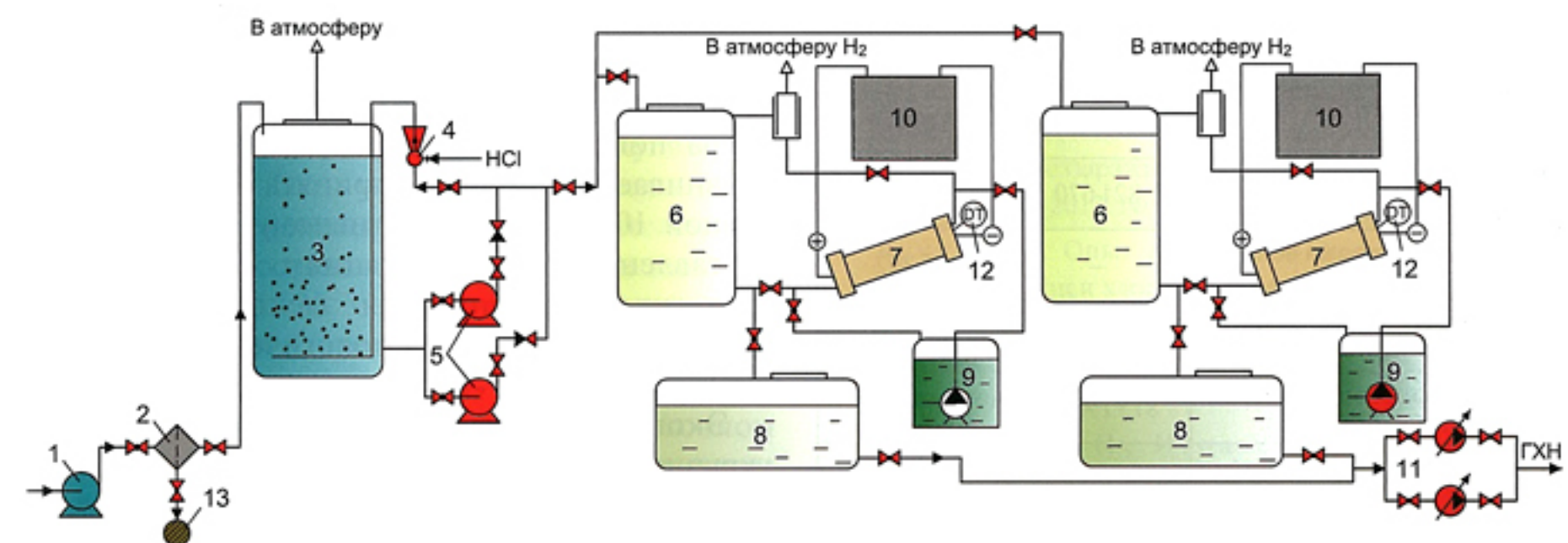


Рис. 8. Технологическая схема производства гипохлорита натрия электролизом морской воды в циркуляционном режиме

1 – подача морской воды; 2 – механический фильтр; 3 – декарбонизатор барботажного типа; 4 – эжектор дозирования HCl; 5 – насос подачи декарбонизированной морской воды на электролиз; 6 – электролизная ванна; 7 – электролизер; 8 – накопитель гипохлорита натрия; 9 – бак кислотной промывки электродного пакета; 10 – блок питания и АСУ ТП; 11 – насос-дозатор; 12 – датчик температуры; 13 – сброс промывной воды в канализацию

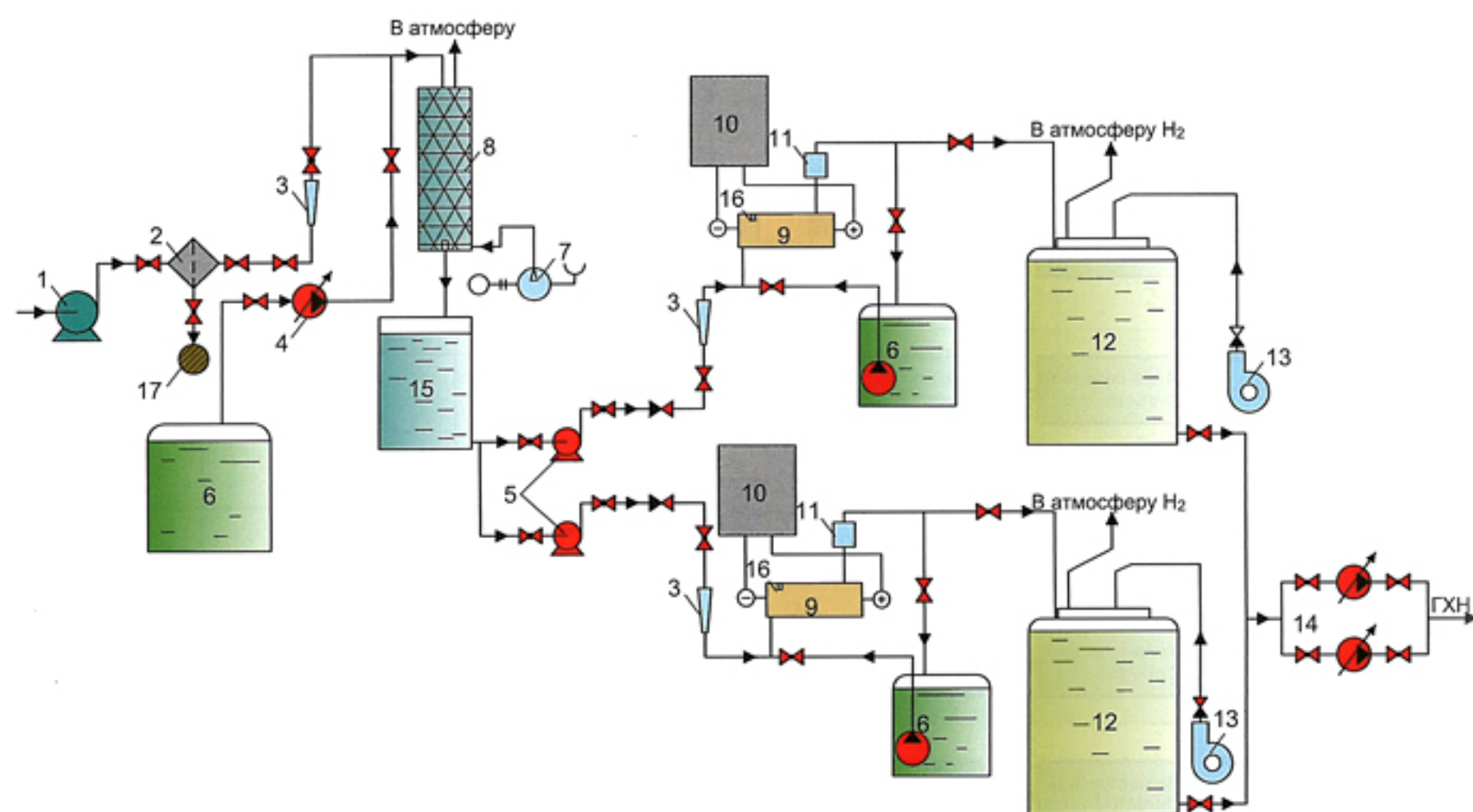


Рис. 9. Технологическая схема производства гипохлорита натрия электролизом морской воды в проточном режиме

1 – подача морской воды; 2 – механический самопромывающийся фильтр; 3 – ротаметр; 4 – насос-дозатор 5-процентного раствора HCl; 5 – насос подачи декарбонизированной морской воды на электролиз; 6 – емкость 5-процентного раствора HCl; 7 – воздуходувка; 8 – декарбонизатор; 9 – проточный электролизер; 10 – блок питания; 11 – газовый сепаратор; 12 – накопитель гипохлорита натрия; 13 – вентилятор; 14 – насос-дозатор гипохлорита натрия; 15 – накопитель декарбонизированной морской воды; 16 – датчик температуры; 17 – сброс промывной воды в канализацию

Таблица 5

Показатель	Способ получения гипохлорита натрия	
	из морской воды, P_1	из 3-процентного раствора NaCl, P_2
Годовое производство Q , т	36,5	36,5
Концентрация активного хлора, г/л	6	6
Годовые затраты на NaCl, руб.	—	520 670
Годовые затраты на оплату электроэнергии, руб.	821 670	697 170
Годовые затраты на воду, руб.	—	15 392
Годовые затраты на HCl, руб.	37 970	84 070
Амортизационные отчисления (12%), руб.	815 196,24	811 776,06
Годовая заработная плата, руб.	420 000	420 000
Сумма годовых эксплуатационных затрат C , руб.	2 094 836,24	2 549 078,06
Общая сметная стоимость строительства K , руб.	6 793 302	6 764 800,5
Себестоимость 1 кг активного хлора для обеззараживания воды C/Q , руб/кг	57,39	69,84

гипохлорита натрия электролизом морской воды в циркуляционном (рис. 8) и проточном (рис. 9) режимах при производительности установок соответственно 5 и 100 кг/сут по эквиваленту хлора (один рабочий и один резервный электролизные аппараты).

Экономическую эффективность получения гипохлорита натрия электролизом морской воды оценивали сравнением с производством гипохлорита натрия из 3-процентного раствора поваренной соли. Производительность сравниваемых станций принята одинаковой и равной 100 кг/сут по активному хлору. Следуя составленным рекомендациям для производства гипохлорита натрия электролизом морской воды, принята технологическая схема IV (рис. 7).

Экономический эффект рассчитывали по укрупненным показателям путем сопоставления капитальных затрат на соответствующее оборудование, монтажные работы и эксплуатационных затрат на приобретение реагентов и оплату электроэнергии (табл. 5).

Приведенные затраты по вариантам сравнения при сроке окупаемости 8,3 года ($E_n = 0,12$) составят:

$$P_1 = C + E_n K = 2\,094\,836,24 + 0,12 \cdot 6\,793\,302 = 2\,910\,032,48 \text{ руб/год};$$

$$P_2 = C + E_n K = 2\,549\,078 + 0,12 \cdot 6\,764\,800,5 = 3\,360\,854,12 \text{ руб/год}.$$

Годовой экономический эффект, определяемый по разности приведенных затрат по сравниваемым вариантам, при использовании технологии получения гипохлорита натрия электролизом морской воды составит:

$$\mathcal{E} = P_2 - P_1 = 3\,360\,854,12 - 2\,910\,032,48 = 450\,820 \text{ руб}.$$

Экономический анализ свидетельствует о том, что использование технологии электролиза морской воды в сравнении с электролизом 3-процентного раствора поваренной соли является более предпочтительным, дает ожидаемый годовой экономический эффект в размере 450 тыс. руб. при себестоимости 1 кг активного хлора 57,4 руб., тем самым сокращает сроки окупаемости и подтверждает целесообразность применения морской воды. Замена привозного жидкого хлора гипохлоритом натрия в технологиях обеззараживания воды позволит исключить потенциальную опасность для прилегающей жилой застройки и населения, а также повысить антитеррористическую устойчивость, технологическую надежность и экологическую безопасность систем водоподготовки.

Выводы

1. Показана возможность и целесообразность использования природных хлоридных растворов, в частности воды Черного моря, в качестве сырья для производства низкоконтентированного электрохимического гипохлорита натрия. Составлены рекомендации по назначению основных технологических параметров электролиза морской воды в проточном и циркуляционном режимах работы установок. В циркуляционном режиме рекомендуемая продолжительность электролиза составляет 240 мин, температура морской воды 5–20 °С, при этом выход хлора по току ожидается в пределах 60%, концентрация активного хлора до 8–9 г/л, удельные затраты электроэнергии 4,5–5,5 кВт·ч/кг. В проточном режиме рекомендован электролиз с поддержанием концентрации активного хлора на выходе из аппарата 5,5–6 г/л и оптимальной температуры воды на входе в электролизер 10–20 °С, при этом выход хлора по току составит 40–50%, затраты электроэнергии – 4–5 кВт·ч/кг.

2. Массовое соотношение рутения и иридия в составе металлооксидных покрытий анодов (ОРТА

или ОИРТА) при электролизе 3-процентного раствора поваренной соли до концентрации 9 г/л и морской воды до 6 г/л не оказывает значимого влияния на прирост активного хлора в растворе. При необходимости получения активного хлора концентрацией более 9 и 6 г/л соответственно на 3-процентном солевом растворе и морской воде следует использовать покрытия с содержанием иридия не более 20% по массе. Включение иридия в анодное рутиниево-титановое оксидное покрытие при массовом (в %) соотношении иридия к рутению 80:20 увеличивает коррозионную стойкость анодов в 8 раз. Применение декарбонизации морской воды методом ее подкисления соляной кислотой с последующей отдувкой образовавшейся свободной углекислоты позволяет снизить интенсивность карбонатных отложений на катоде до 5 раз.

3. На основе результатов научно-экспериментальных исследований разработаны и предложены технологические схемы производства гипохлорита натрия из морской воды в циркуляционном и проточном режимах электролиза и обоснованы рациональные области их применения. Техно-экономическая оценка рекомендуемой технологии получения гипохлорита натрия электролизом морской воды показала ее предпочтительность в сравнении с традиционным методом электролиза 3-процентного раствора поваренной соли с ожидаемым годовым экономическим эффектом 450 тыс. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягуд Б. Ю. Материалы конференции «Применение различных дезинфицирующих агентов в системах водоподготовки питьевой воды в США в 2007 г.». — М., 2007. 145 с.
2. Фесенко Л. Н., Игнатенко С. И., Бабаев А. А., Пчельников И. В. Сравнительный анализ электрохимических методов получения хлорсодержащих реагентов для обеззараживания воды // Водоснабжение и канализация. 2013. № 7–8. С. 34–38.
3. Ягуд Б. Ю. Опыт применения хлора, гипохлорита натрия, двуокиси хлора на зарубежных станциях водоподготовки: Всероссийский семинар «Техника и технология обеззараживания питьевых и сточных вод без использования элементарного хлора». — М., 2008.
4. Фесенко Л. Н., Игнатенко С. И., Скрябин А. Ю., Пчельников И. В. Пути решения экологичности и безотходности производства электролитического гипохлорита натрия для обеззараживания питьевых вод // Водоочистка. 2014. № 3. С. 9–16.
5. Пат. 2379380, РФ. МПК С 25 В 11/10. Высокоэффективное анодное покрытие для получения гипохлорита / Карлсон Р. К., Моутс М. С., Харди К. Л. // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 2.

