

Поломка лопаток

4. Garmathy G. Grundlagen einer Theorie der Nabdampfturbine. – Zurich, 1962. – 284 p.
5. Склярів В.П. Измерение температуры влажного парового потока в паровых турбинах// Проблемы машиностроения. – 2005. – Т.8, №3. – С.8-15.
6. Пат. 74193 Украина, МКИ F01D5/28. Способ увеличения КПД паровых турбин / В. П. Склярів, А. А. Тарелин (Украина). – № 20030103319; Заявлено 14.12.03; Опубл. 15.11.05, Бюл. №11.

*Запропоновано ресурсозберігаючу технологію підготовки води для виробництва екологічної та енергетичної пари у газотурбінних установках транспортування природного газу. Технологія передбачає поєднання традиційних та новітніх методів обробки води, у тому числі баро- та електромембранні процеси. Головною перевагою запропонованої технології є відсутність твердих та рідких відходів*

*Ключові слова: технологія, підготовка води, газотурбінна установка*

*Предложена ресурсосберегающая технология подготовки воды для получения экологического и энергетического пара в газотурбинных установках транспортировки природного газа. Технология предусматривает сочетание традиционных и новейших методов обработки воды, в том числе, баро- и электромембранные процессы. Главным преимуществом предлагаемой технологии является отсутствие твердых и жидких отходов*

*Ключевые слова: технология, подготовка воды, газотурбинная установка*

*The resource-saving technology of water treatment is presented for obtaining the ecological and energetic steam in gas-turbine installations of the natural gas transportation. The technology used provides the combination of traditional and new methods of water treatment including the bar- and electric membrane processes. The main advantage of the technology proposed is the absence of solid and liquid waste*

*Key words: technology, water treatment, gas-turbine installation*

УДК 628.16.08

## РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ ВОДИ ДЛЯ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК «ВОДОЛІЙ»

**А. А. Тарелин**

Доктор технических наук, заведующий отделом\*

Контактный тел.: 8 (0572) 95-96-09

E-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua

**В. Г. Михайленко**

Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник\*

**О. И. Князева**

Ведущий инженер\*

\*Отдел общетехнических исследований в энергетике

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного

НАН Украины

ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

Контактный тел.: 8 (0572) 95-95-59

E-mail:port34@inbox.ru

**А. В. Антонов**

Ассистент

Кафедра химии

Харьковский государственный университет питания и торговли

ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051

Контактный тел.: 8 (0572) 95-95-59

E-mail:port34@inbox.ru

Згідно свого географічного положення Україна є транзитною державою, і від можливостей та надійності нашої газотранспортної системи залежить енергетична безпека країни. Транспортування газу здійснюється шляхом закачування його під

високим тиском на газоперекачувальних станціях у магістральні трубопроводи. Турбокомпресори газоперекачувальних станцій приводяться в дію за допомогою газових турбін, які спалюють так званий технологічний газ.

Миколаївське науково-виробниче державне підприємство «Зоря-Машпроект» виготовляє та впроваджує установки для перекачування газу типу «Водолій». Підвищення коефіцієнту корисної дії та зменшення екологічності викидів в установках «Водолій» досягається за рахунок додавання водяної пари у паро-газову суміш. Ця водяна пара утворюється у котлі-утилізаторі за рахунок надлишкового тепла вихлопних газів турбіни.

Воду для підживлення котла-утилізатора необхідно попередньо очищати від домішок. Вимоги до води підживлення котла-утилізатора наведені у табл. 1.

Вимоги до води підживлення оборотного контуру наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Вимоги до води підживлення оборотного контуру газової турбіни

№ з/п	Назва показника	Одиниця виміру	Значення показника
1	Загальна жорсткість	мг-екв/дм <sup>3</sup>	<0,01
2	Загальна лужність	мг-екв/дм <sup>3</sup>	<0,02
3	Загальний вміст солей	мг/дм <sup>3</sup>	<5,0
4	Загальний вміст сполук заліза	мг/дм <sup>3</sup>	<0,02

З наведених даних видно, що вода підживлення контуру газової турбіни не повинна містити жодних сторонніх домішок і має відповідати вимогам до води для котлів середнього тиску [1]. Такі жорсткі вимоги обумовлені тим, що, зрештою, вода потрапляє у котел-утилізатор, і там випаровується, лишаючи домішки на трубках обладнання. Крім того, наявність у воді сполук лужності призведе до появи у парі вільної вуглекислоти, що суттєво збільшить корозійну агресивність такої пари. Отже вода підживлення контуру повинна бути ретельно підготовлена. Потужність установки водопідготовки зазвичай має становити 20% від загальної кількості води у контурі. Додаткова складність полягає

в тому, що установка водопідготовки повинна бути універсальною, споживаючи ту воду, яка наявна у конкретному місці розташування газокompресорної станції.

Існуюча технологія підготовки води для котлів середнього тиску схематично представлена на рис. 1 [2].

Вхідна вода від поверхневого або підземного джерела подається на стадію вилучення завислих речовин та більшої частини сполук жорсткості у контактному просвітлювачі КП, в який подається також розчин залізного коагулянту, та вапнове молоко. Розчини готуються у відповідних збірниках ЗМ1, ЗМ2, та подаються у просвітлювач насосами-дозаторами НД1 НД2. У просвітлювачі відбувається відстоювання пластівців коагулянту разом з осадами карбонату кальцію та гідроксиду магнію. Згущений шлам випускається з апарату, фільтрується на фільтрпресі ФП та вивозиться на звалище, оскільки є непридатним для подальшого використання.

Оброблена у контактному просвітлювачі, вода проходить фільтрацію на зернистому фільтрі ФТМ та подається на двоступінчасту іонообмінну обробку. Остання полягає у фільтруванні води крізь водень-катіонітовий фільтр ФН1ст. для вилучення катіонів, а потім кисла вода фільтрується крізь ОН<sup>-</sup> - аніонітовий фільтр ФОН1ст., де вилучаються аніони кислот. Друга ступінь іонообмінної очистки побудована так само, як і перша. Після іонообмінної обробки вода загалом відповідає вимогам до води підживлення контуру турбіни.

Регенерація іонітних фільтрів відбувається:

- водень-катіонітових – розчином сірчаної кислоти;
- ОН<sup>-</sup> -аніонітових – розчином їдкого натру.

Відповідно після регенерації утворюється стічний розчин сульфату натрію, який зливається у каналізацію. Велика кількість рідких відходів та значна потреба в реагентах для регенерації іонітних фільтрів – головний недолік описаної схеми. Іншим недоліком є те, що ця технологія нездатна звільнити воду від органічних залізовмісних речовин.

Нами запропонована ресурсозберігаюча технологія очистки води, принципова схема якої наведена на рис. 2.

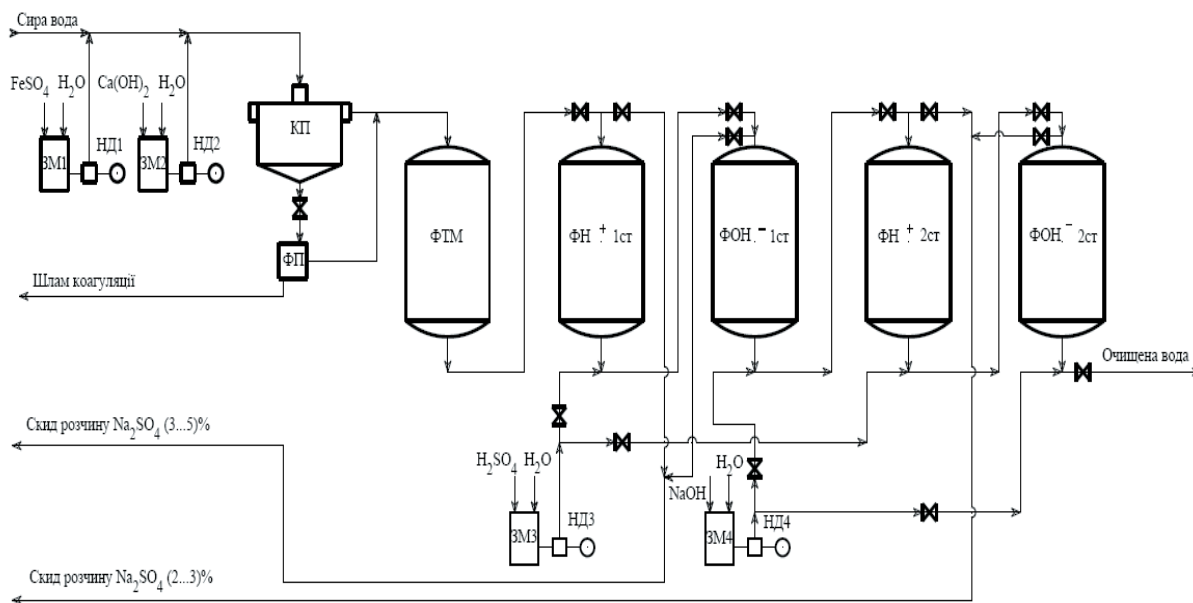


Рис. 1. Принципова схема існуючих установок підготовки води для енергетичних котлів середнього тиску

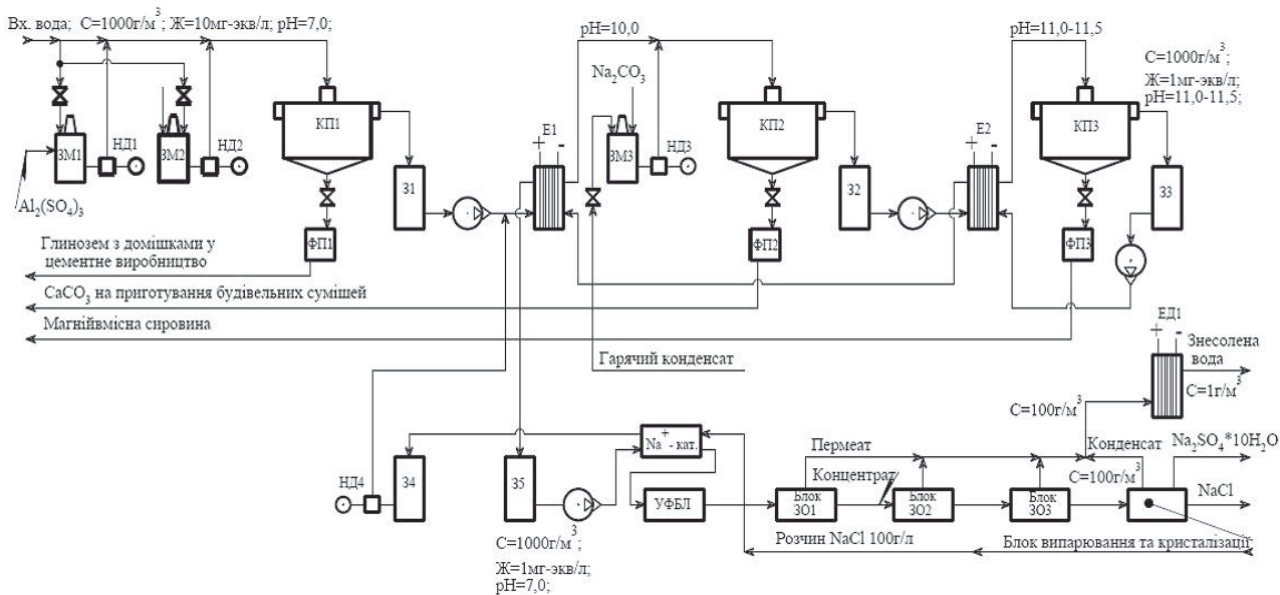


Рис. 2. Принципова схема ресурсозберігаючої установки підготовки води для газотурбінних установок транспортування газу

Вхідна вода подається на стадію вилучення газоподібних домішок та окиснення заліза. Процес відбувається шляхом аерації води в ежекторі, а далі вода потрапляє у контактний просвітлювач, в який додається невелика доза алюмінієвого коагулянту у вигляді розчину із збірника коагулянту. Просвітлена вода далі спрямовується на електрохімічне пом'якшення.

Процес електрохімічного пом'якшення за своєю суттю аналогічний реагентному частковому пом'якшенню води. Проте замість додавання у воду лужних реагентів воду обробляють у катодних камерах спеціального електрохімічного апарату, який схематично наведений на рис. 3. Апарат працює наступним чином.

Вода подається у катодну камеру апарату, яка відділена від анодної камери кат іонообмінною мембраною. При подачі електричного струму катіони натрію крізь катіонообмінну мембрану мігрують з анодної камери в катодну. Одночасно в катодній камері накопичуються гідроксил-іони, що утворюються на катоді під час розряду молекул води. Так у воді утворюється розчин їдкого натру, який вступає у взаємодію із сполуками

жорсткості, переводячи їх у нерозчинні карбонат кальцію та гідроксид магнію.

На відміну від реагентної обробки, осаді, утворені при електрохімічному пом'якшенні, легко відстоюються, і можуть бути відділені від води у невеликому відстійнику.

Рознесення стадій пом'якшення та коагуляційної очистки дозволяє замість відходу, що важко утилізувати, отримати два продукти, що є сировиною для виробництва будівельних матеріалів. Невідстояні рештки завислих частинок відділяються від води на механічному фільтрі.

Частково пом'якшену лужну воду далі глибоко пом'якшують у натрій-катіонітовому фільтрі, а після цього повертають в анодні камери електрохімічного пом'якшувача. Іони натрію з анодних камер крізь катіонообмінні мембрани мігрують до катодних камер, а вода в анодних камерах нейтралізується власною кислотою. Недостача іонів натрію компенсується додаванням у воду перед електропом'якшенням невеликої кількості розчину їдкого натру.

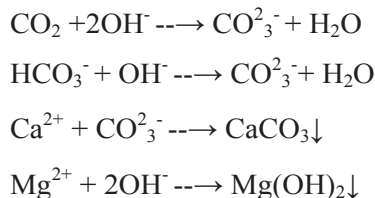
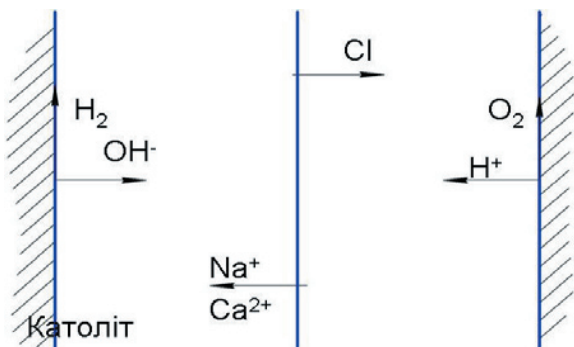


Рис. 3. Схема функціонування апарату електрохімічного пом'якшення води

Процес електрохімічного пом'якшення води відомий досить давно [3]. Проте, він досі не знайшов втілення у промисловості. Пояснюється це складністю його апаратурного оформлення.

Відомо [4], що звичайні конструкційні матеріали й навіть високолеговані нержавіючі сталі є нестійкими при анодній поляризації у розведених хлоридно-сульфатних

розчинах. Для використання у таких розчинах в якості анодів придатні лише платина або платинований титан. Нами розроблено спосіб отримання анодів для лужних та нейтральних хлоридно-сульфатних водних розчинів [5]. Спосіб полягає у захисті основи з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т ненапруженим шаром двооксиду плумбуму 2 мм завтовшки. Розроблений нами електроліт дозволяє покривати деталі складної конструкції з винесеними сітками двооксидом плумбуму з одного боку. Таким чином отримують біполярний електрод з винесеними анодною та катодною сітками, що дозволяє значно знизити напругу електролізу та енергетичні витрати процесу.

Проведені ресурсні випробування отриманих зразків анодів і встановлено, що у лужному та нейтральному середовищі ці аноди є стійкими при густині струму 100 А/м<sup>2</sup> протягом більш, ніж 4000 годин. Розпочато дослідження процесу електрохімічного пом'якшення води та встановлено, що максимальна глибина пом'якшення 0,3...0,6 мг-екв/дм<sup>3</sup> досягається за рН 11,5 (рис. 4).

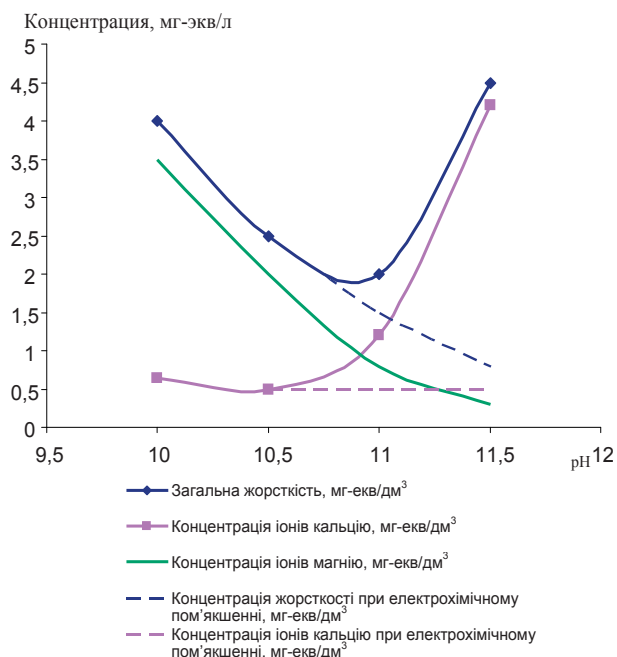


Рис. 4. Залежність залишкової концентрації сполук жорсткості води від рН завершення процесу реагентного та електрохімічного пом'якшення.

Пом'якшена і нейтралізована до рН 5,5...6,5 вода знезаражується ультрафіолетовим опроміненням та кавітаційною обробкою і подається на знесолення зворотним осмосом. Цей процес вже має тривалу (в Україні – більше 15 років) історію використання у промисловості. Сучасні зворотноосмотичні модулі на пом'якшеній та очищеній від завислих речовин воді працюють надійно і стабільно протягом 3...5 років без заміни мембран. В результаті зворотного осмосу можна отримати частково обезсолену воду з концентрацією 25...30 мг/дм<sup>3</sup>. Основна кількість розчинених солей накопичується у розсолі, концентрація якого наближається до 100 г/дм<sup>3</sup>. Одна з промислових зворотноосмотичних установок наведена на рис. 5.



Рис. 5. Зворотноосмотична установка, пущена у 2003 р. на фірмі «Сандора»

Подальше обезсолення пермеату зворотного осмосу відбувається у процесі електродеіонізації. Сутність процесу електродеіонізації полягає у глибокому обезсоленні води шляхом її обробки у камерах обезсолення плоскокамерного електродіалізатора з горизонтальною віссю електричного поля. Для зменшення напруги на електродіалізаторі зменшують омичний опір його камер знесолення шляхом заповнення їх іонообмінною насадкою, яка складається з суміші катіонообмінної та аніонообмінної смол. Фактично процес електродеіонізації являє собою обезсолення води на фільтрі із змішаним шаром іонообмінної смоли, з безперервним відновленням Н<sup>+</sup> та ОН<sup>-</sup> форм катіоніту та аніоніту відповідно шляхом електрогенерації.

Процес електродеіонізації ґрунтовно досліджений В. Д. Гребенюком [6]. Ним встановлено, що для ефективного протікання процесу шар іонообмінних смол повинен бути завтовшки в одне зерно. Проте, залишилися недослідженими питання надійності роботи електродіалізатора. Необхідно провести дослідження процесів взаємоотруєння іонів, встановити умови відсутності цього явища і провести ресурсні випробування апарату. Електродеіонізаційний апарат продуктивністю 2...5 м<sup>3</sup>/год. зображений на рис. 6.



Рис. 6. Електродеіонізатор «Джерело-2»

Процес електродеіонізації дозволяє знизити залишкову концентрацію солей менш, ніж до  $2,0 \text{ мг/дм}^3$ . Вилученні з води солі зливаються з розсолних камер електродеіонізатора у вигляді розчину концентрацією  $50...70 \text{ г/дм}^3$ . Цей розсіл змішується з концентратом, отриманим в результаті багатоступінчатого зворотного осмосу, і спрямовується на випарювання та кристалізацію. В результаті кристалізації утворюється мірабіліт (десятиводний сульфат натрію), який може використовуватися як сировина у виробництві скла та цементу. При випарюванні маточника кристалізації мірабіліту утворюється кристалічна кухонна сіль (хлорид натрію). При цьому на 70% хлорид натрію може бути отриманий чистим реактивної кваліфікації, а 30% - у вигляді технічного продукту.

Запропонована технологія має безсумнівні техніко-економічні та екологічні переваги перед традиційною. Витрата електроенергії на процес водопідготовки становить  $3 \text{ кВт*год./м}^3$ , вартість реагентів коливається в межах від 1 до 3 грн./ $\text{м}^3$  в залежності від складу вхідної води. Нижче наведені вартісні характеристики чотирьох типів блоків водопідготовки (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика блоків водопідготовки для газотурбінних установок

Тип газотурбінної установки	Водо-лій-4	Водо-лій-16	Водо-лій-25	Водо-лій-40
Витрата пари, т/год.	6,9	21	29,3	46,4
Продуктивність блоку водопідготовки, $\text{м}^3/\text{год.}$	1,5	4	6	10
Вартість зворотно осмотичного модуля, тис. Є.	6	15	19	27
Орієнтовна вартість решти обладнання та монтажу, тис. Є	15	28	36	50
Вартість попереднього обстеження, проекту та пуско-налагоджувальних робіт, тис. Є	11	14	15	16
Економічний ефект від впровадження ресурсозберігаючого блоку водопідготовки, тис. Є./рік у порівнянні з існуючою схемою	5	11	14	19

Таким чином, розроблено та запропоновано до впровадження на газотурбінних установках для транспортування природного газу ресурсозберігаючих блоків водопідготовки. Попередні розрахунки показують, що термін їх окупності складає 5...6 років.

## Література

1. Мещерский Н.А. Контроль водного режима на электростанциях и в котельных. М: Энергия, 1970 г. -272с.
2. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М: Энергия, 1976 г. – 288с.
3. Рогов В.М. Электрохимическая технология изменения свойств воды./В.М.Рогов, В.Л.Филипчук – Л.: Выща школа., 1989 – 125с.
4. Панов В. И., Михайленко В. Г., Микулина И. Г. Выбор устойчивого анодного материала для очистки суспензии осажденного кремнезема от примесей соды электролизом // Интенсификация технологических процессов и аппаратов содового и смежных производств: Сб. науч. тр. – Харьков.: ХНПО «Карбонат», 1985. – С. 52 – 57.
5. Пат. № 38849 (Україна). Спосіб електроосадження плюмбуму двооксиду / Антонов О. В., Михайленко В. Г. Заявл. 01.07.2008р., Опубл. 26.01.2009р., Бюл. №2, 2009 р.
6. Гребенюк В. Д., Мазо А. А. Обработка воды ионитами. – М.: Химия, 1980 г. – 256 с.