



## О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ СХЕМ ОБЕССОЛИВАНИЯ ВОДЫ МЕМБРАННЫМИ МЕТОДАМИ НА ТЭС С ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКОЙ В КАЛИНИНГРАДСКОМ РЕГИОНЕ

Игнатущенко К. В., магистрант  
Филонов А. Г., к.т.н., доцент  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

Приводятся результаты расчета предлагаемой двухступенчатой схемы мембранного модуля обратноосмотической водоподготовительной установки для ТЭС с парогазовой установкой (ПГУ) 440 МВт. На основании оптимизационных расчетов с использованием программы ROSA 9.1 построены зависимости технологических показателей от расхода питательной воды.

*тепловая электрическая станция, водоподготовка, обратный осмос, ультрафильтрация, пермеат, электродеионизация, удельные энергозатраты, мембранный декарбонизатор, рециркуляция концентрата, двухступенчатая схема.*

В настоящее время энергосистема Калининградского региона входит в состав электроэнергетического кольца БРЭЛЛ (Белоруссия, Россия, Эстония, Латвия, Литва) и соединяется с энергосистемой Литвы, которая по заявлениям литовского правительства в ближайшие несколько лет отсоединится от БРЭЛЛ и синхронизируется с энергосистемой Европейского союза. В этих условиях энергосистема Калининградской области окажется изолированной, поэтому Министерством энергетики Российской Федерации было принято решение о строительстве в Калининградской области четырех тепловых электростанций, в том числе Прегольской ТЭС с парогазовой установкой мощностью 440 МВт.

Согласно правилам технической эксплуатации тепловых электрических станций добавочная химобессоленная вода для подпитки утилизационного контура ПГУ давлением 8,3 МПа новой Прегольской ТЭС должна иметь: содержание соединений натрия - не более 10 мкг/кг, содержание кремниевой кислоты - не более 10 мкг/кг, общую жесткость - не более 1 мкг-экв/кг. Для получения воды такого качества в соответствии с российской нормативно-технической документацией на ТЭС с ПГУ необходимо применить схему водоподготовительной установки (ВПУ), разработанную по «стандартной» технологии: известкование и коагуляция в осветлителе – механическая фильтрация в насыпных фильтрах – двухступенчатое обессоливание в катионитных и анионитных фильтрах с промежуточной декарбонизацией – дообессоливание в ионитном фильтре смешанного действия (ФСД) (рис. 1).

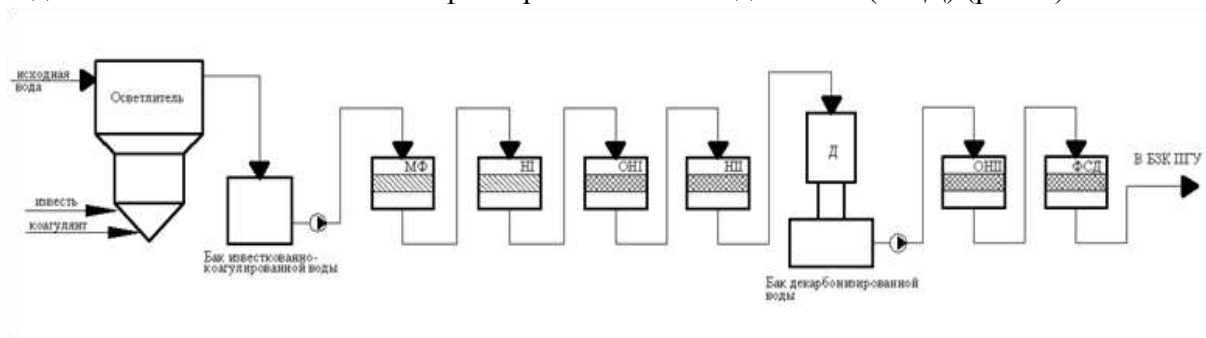


Рисунок 1 – «Классическая» схема подготовки химобессоленной воды на основе ионного обмена

Однако к настоящему времени такая схема очистки воды является устаревшей, так как она не отвечает современным требованиям по экологичности из-за большого количе-

ства сбрасываемых высокоминерализованных, регенерационных сточных вод. Анализ схем обессоливания воды, применяемых на современных зарубежных ТЭС с ПГУ, показывает, что наилучшими технико-экономическими и стоимостными показателями обладает схема водоподготовки «пятого поколения», основанная на двухступенчатом обессоливании воды методом обратного осмоса и представленная на рис. 2 [1-2].

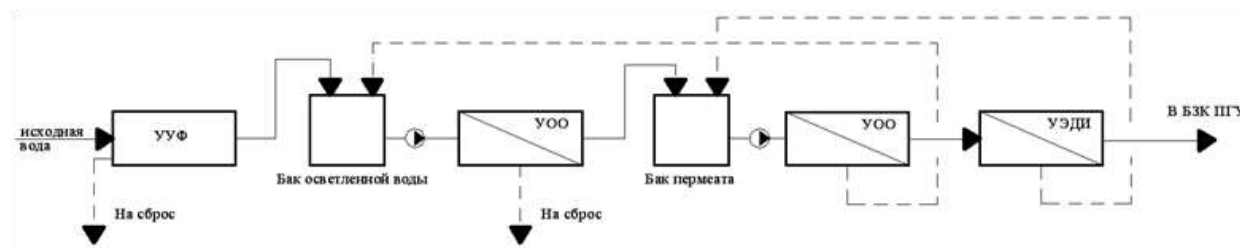


Рисунок 2 - Принципиальная схема предлагаемой водоподготовительной установки  
Прегольской ТЭС с ПГУ 110 МВт

В этой схеме исходная вода сначала подвергается предварительной очистке в установке ультрафильтрации (УУФ) и далее проходит обессоливание в двухступенчатой обратноосмотической установке с промежуточным баком пермеата и рециркуляцией концентрата второй ступени. После предварительной декарбонизации пермеата, окончательная его очистка от растворённых примесей происходит в установке электродеионизации (УЭДИ), откуда глубокообессоленная вода направляется в бак запаса конденсата (БЗК ПГУ) и далее вводится в конденсатор утилизационного турбогенератора.

Использование ультрафильтрации в качестве предварительной очистки перед обратным осмосом в сравнении с «классической» технологией (осветление и известкование воды в осветлителе) позволяет получить фильтрат с коллоидным индексом  $SDI = (0,9 - 3)$ , против  $SDI > 5$  в «стандартной» технологии с использованием осветлителя. При этом качество фильтрата на выходе из УУФ мало зависит от качества исходной воды.

Опыт внедрения УУФ на Новочеркасской ГРЭС показывает, что низкие значения коллоидного индекса позволяют в (1,2 - 1,5) раза увеличить выход пермеата с мембран обратноосмотической установки (УОО), а также в (4 - 6) раз снизить количество их химических очисток. При этом удельная электрическая проводимость пермеата после УОО снижается с 25 до 15 мкСм/см [1, 3].

Внедрение ультрафильтрации и обратного осмоса в схеме водоподготовительной установки ТЭС с ПГУ имеет также дополнительные преимущества:

- существенно снижаются расходы реагентов (коагулянта, едкого натрия, серной кислоты), отсутствует известкование;
- концентрат ООУ с солёностью (1 - 2) г/кг становится возможным сбрасывать в канализацию или в природный водоём после предварительного разбавления;
- возможность автоматизации процессов очистки воды.

Использование двухступенчатой схемы обессоливания в УОО с последующей декарбонизацией позволяет получить на выходе высококачественный пермеат с удельной электрической проводимостью менее 20 мкСм/см, содержанием железа менее 10 мкг/кг и растворённой углекислоты не более 5 мг/кг. Это дает возможность перейти с экологически чистой схемы ВПУ, основанной только на мембранных технологиях с финишной очисткой воды в ФСД, на более «экологически чистой» схему с электродеионизатором, в котором процесс непрерывного обессоливания воды проходит с использованием ионообменных смол и ионо-селективных электродиализных мембран [1, 3].

Так как основным узлом новой «мембранной» схемы ВПУ является двухступенчатый обратноосмотический мембранный модуль с рециркуляцией концентрата второй ступени, а в литературных источниках отсутствуют данные о проектировании подобных аппаратов, даль-

нейшая работа была посвящена разработке его принципиальной схемы, которая представлена на рис. 3.

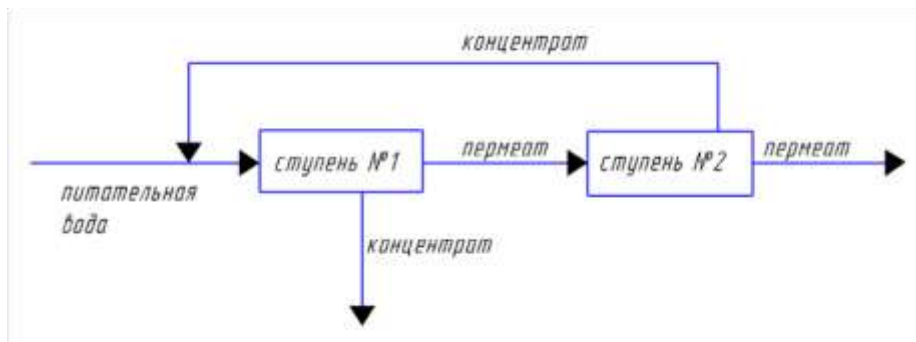


Рисунок 3 - Принципиальная расчетная схема мембранного модуля обратноосмотической установки Прегольской ТЭС с рециркуляцией концентрата

Исходными данными для проектирования схемы мембранного модуля являлись: производительность водоподготовительной установки, равная 47,4 м<sup>3</sup>/ч, и наихудший ионный состав исходной воды забираемой из р. Преголи.

Для оптимизации состава оборудования схемы и проведения сравнительного анализа предлагаемых вариантов на различных режимах работы была использована уже применявшаяся ранее программа ROSA 9.1, разработанная американским концерном «DOW CHEMICAL» для расчета обратноосмотических установок с применением мембранных элементов рулонного типа фирмы «FILMTEC» [2].

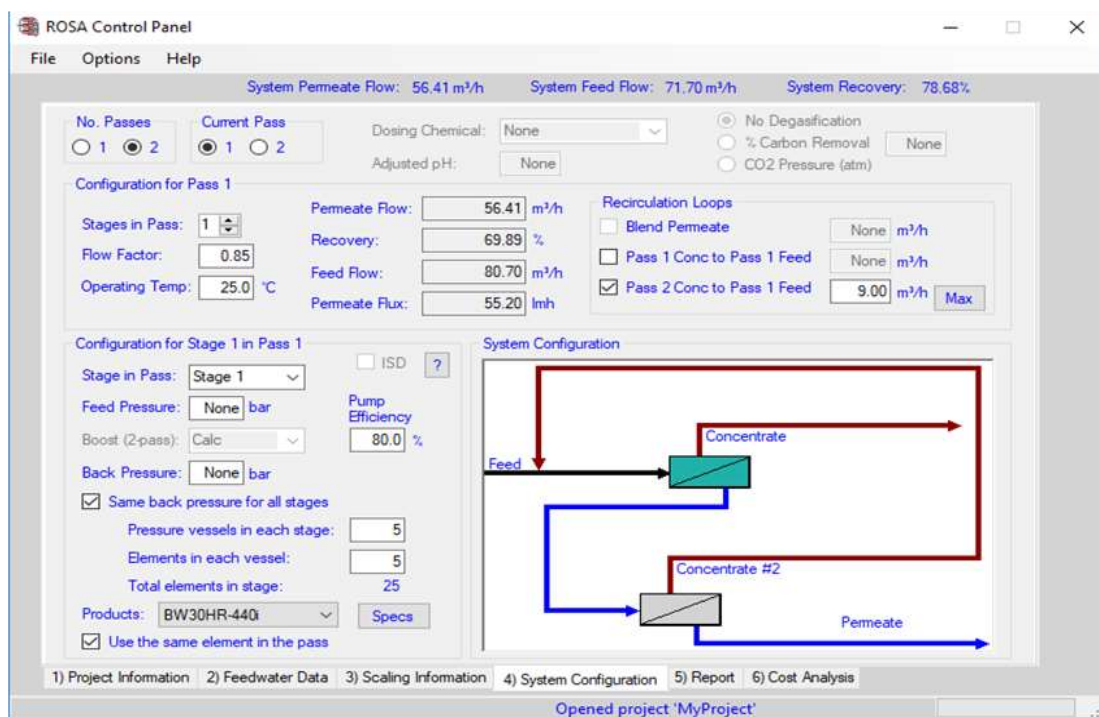


Рисунок 4 - Интерфейс программы ROSA 9.1 для расчета двухступенчатой схемы мембранного модуля обратноосмотической установки Прегольской ТЭС

Даная программа, используя известные математические модели теории обратного осмоса (зависимости (1-3)), позволяет рассчитать состав пермеата и концентрата после первой и второй ступеней, удельные энергозатраты, потерю давления, степень выхода пермеата и подобрать фильтрующий элемент (мембрану) для ООУ.

$$Q_0 C_0 + Q_K C_K + Q_\Phi C_\Phi = 0; \quad (1)$$

$$\frac{C_{\phi}}{C_0} = \frac{1 - \alpha^{1-\varphi}}{1 - \alpha} ; \quad (2)$$

$$\frac{C_K}{C_0} = 1 - \alpha^{1-\varphi} , \quad (3)$$

где  $C_0$ ,  $C_{\phi}$ ,  $C_K$  – мольные концентрации примесей (ионов) в исходной воде, пермеате и сбрасываемом концентрате, моль/л;  $Q_0$ ,  $Q_K$ ,  $Q_{\phi}$  – расходы исходной воды, концентрата и пермеата соответственно, л/ч.

Таблица 1 – Результаты расчета рециркуляционной схемы двухступенчатого модуля обратноосмотической установки производительностью 47,4 м<sup>3</sup>/ч

Величина	Результат
Производительность установки по пермеату	47,4 м <sup>3</sup> /ч
Температура воды на входе в ООУ	20 °С
Солесодержание исходной воды	402 мг/л
Расход исходной воды	71,7 м <sup>3</sup> /ч
Поток воды на входе в модуль ООУ	80,7 м <sup>3</sup> /ч
Марка мембраны	BW30HR-440i.
Количество сосудов:	
- в первой ступени	5
- во второй ступени	5
Количество мембран:	
- в первой ступени	5
- во второй ступени	5
Расход воды на входе:	
- в первую ступень	80,7
- во вторую ступень	56,4
Выход концентрата:	
- в первой ступени	24,27 м <sup>3</sup> /ч
- во второй ступени	9,0 м <sup>3</sup> /ч
Рециркуляция концентрата 2-й ступени	9,0 м <sup>3</sup> /ч
Выход пермеата:	
- в первой ступени	56,41 м <sup>3</sup> /ч
- во второй ступени	47,42 м <sup>3</sup> /ч
Давление воды на входе:	
- в первую ступень	20,8 бар
- во вторую ступень	15,7 бар
Давление концентрата:	
- первой ступени	18,8 бар
- второй ступени	14,4 бар
Общее солесодержание пермеата:	
- первой ступени	2,04 мг/л
- второй ступени	0,13 мг/л
Потребляемая электрическая мощность	89,1 кВт
Удельный расход электроэнергии	1,68 кВт·ч/м <sup>3</sup>

При анализе различных вариантов схем варьировались: количества сосудов и мембран в первой и второй ступенях; расходы питательной и рециркуляционной воды; тип мембраны. Расчетный интерфейс программы ROSA 9.1 двухступенчатой схемы приводится на рис. 4, а результаты расчета основных её технологических показателей - в табл. 1. Для обессоливания речной воды предлагается использовать в первой и второй ступенях УОО тонкоплёночные мембраны рулонного типа BW (Brackish Water), сравнительный анализ которых показал, что

оптимальным вариантом для использования в проектируемой схеме ВПУ будет мембрана BW30HR-440i, обладающая низкими удельными энергозатратами, большой площадью фильтрующей поверхности ( $41 \text{ м}^2$ ), широким рН-диапазоном работы (1-13), высокой селективностью и надёжностью [2]. Расчетный ионный состав питательной воды, концентрата и пермеата приводится в табл. 2. По результатам расчетов были построены графические зависимости параметров работы УОО от расхода входного потока воды и определены их оптимальные значения (см. рис. 5-7)

Таблица 2 – Расчетный ионный состав питательной воды, концентрата и пермеата после 1-й и 2-й ступеней мембранного модуля обратноосмотической установки

Показатель	Питательная вода	Концентрат		Пермеат	
		I ступень	II ступень	I ступень	II ступень
	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л
Na	74	218,8	2,09	0,35	0,02
Mg	15,55	45,96	0,25	0,04	0,0
Ca	102,6	303,25	1,6	0,26	0,01
CO <sub>3</sub>	1,67	10,17	0	0	0
HCO <sub>3</sub>	242	217	10,1	1,72	0,39
Cl	130	871,47	5,93	0,97	0,03
SO <sub>4</sub>	58	171,39	0,52	0,09	0,0
CO <sub>2</sub>	3,38	6,77	4,34	4,29	4,0
S <sub>общ</sub>	402	1675,7	12,08	2,04	0,13
pH	7,9	8,05	6,57	5,82	5,22

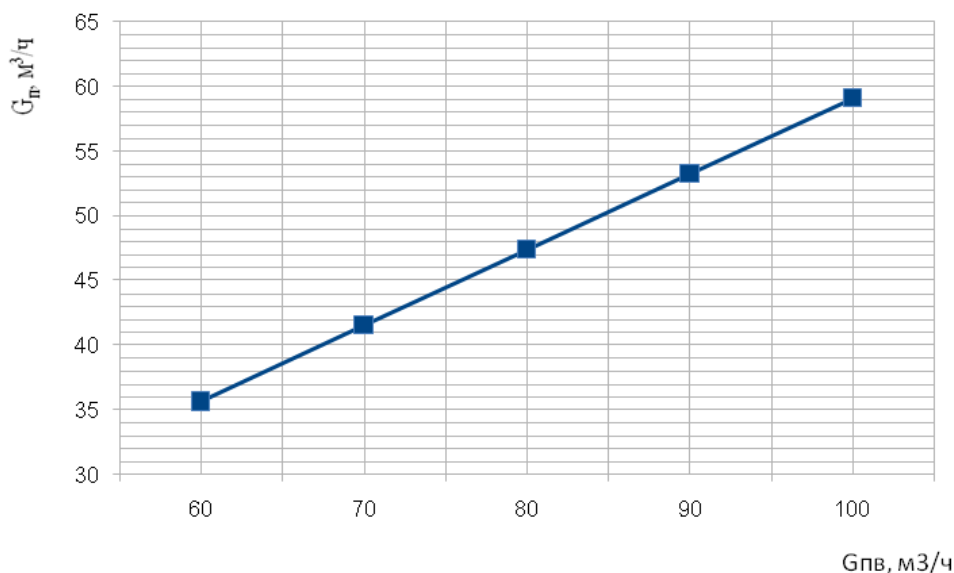


Рисунок 5 - Зависимость выработки пермеата от расхода питательной воды

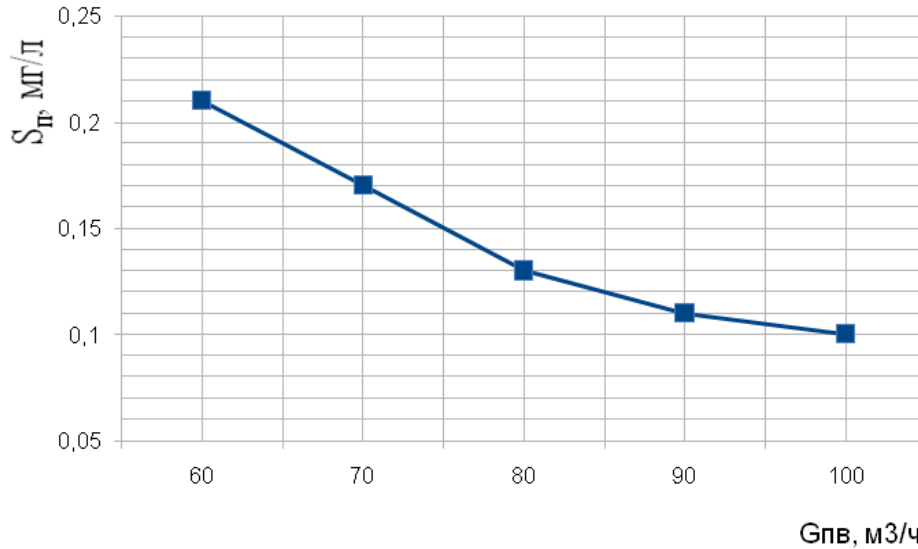


Рисунок 6 - Зависимость солесодержания пермеата от расхода питательной воды

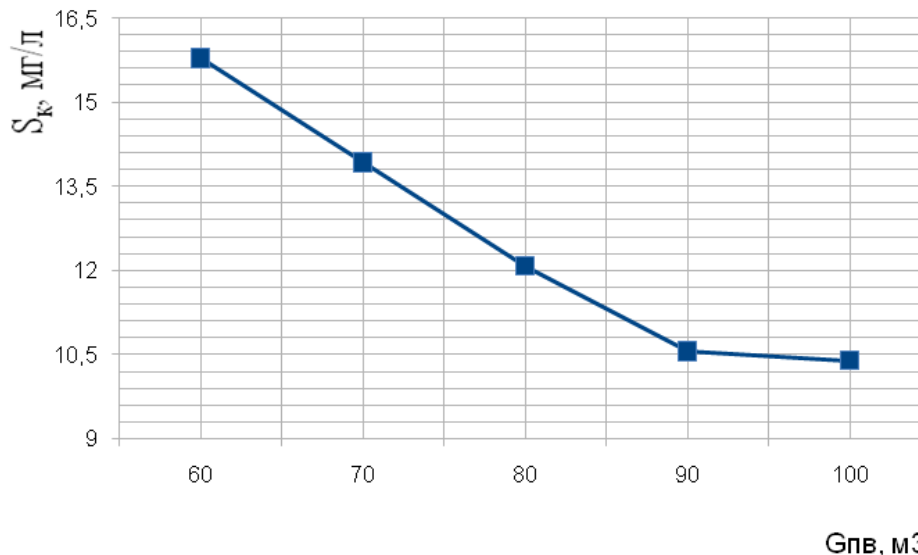


Рисунок 7 - Влияние расхода питательной воды на солесодержание концентрата

Для наиболее оптимальной двухступенчатой схемы мембранного модуля было установлено влияние подачи питательной воды на солесодержание и выход пермеата, солесодержание концентрата, а также на расход энергии (рис. 5-7). Анализ ионного состава пермеата второй ступени показывает, что качество получаемой воды удовлетворяет требованиям правил технической эксплуатации тепловых электрических станций по всем технологическим показателям, а также требованиям к качеству воды перед УЭДИ.

С целью предотвращения обрастания мембран в поток исходной предварительно очищенной воды перед УОО дозируется раствор антискаланта HydroChem 525, являющийся ингибитором образования отложений плохо растворимых неорганических солей. Расчетная доза антискаланта составляет примерно 3-6 г на 1 м<sup>3</sup> исходной предварительно очищенной воды. Максимальный расход будет 484 мл/ч. Для обеспечения надежности УОО предполагается установка по одному резервному модулю в первой и второй ступенях. Регулирование производительности ООУ будет осуществляться путем отключения фильтрующих модулей в первой и второй ступенях и уменьшения расхода питательной воды на обратноосмотический модуль.

Для новой схемы мембранного модуля был произведён выбор оборудования предварительной и завершающей очистки: фильтров осветления воды ФОВ-2К-3,4-0,6; блока бактерицидной обработки Wedeco LBX производительностью 150 м<sup>3</sup>/ч; ультрафильтрационной установки, состоящей из 24-х модулей DOW IntegraFlo DW74-1100 общей производительностью 120 м<sup>3</sup>/ч; фильтров тонкой очистки УОО марки Fil-Trek, мембранного декарбонизатора Liqui-CelHigh Pressure 10×28 производительностью 50 м<sup>3</sup>/ч (4 шт.); установки электродеионизации, состоящей из трёх модулей EDI VNX 50E-2 общей производительностью 45 м<sup>3</sup>/ч [2-7]. Выбрано вспомогательное оборудование ВПУ: подогреватель сырой воды, насосы высокого давления УОО, промежуточные баки, фильтры. Основное и вспомогательное оборудование ВПУ компонуется в двухэтажном здании на территории Прегольской ТЭС.

Расчет экономической эффективности новой схемы ВПУ Прегольской ТЭС показывает, что срок окупаемости её составит от 1,5 до 2,0 лет, себестоимость химобессоленной воды – около 46,3 руб./м<sup>3</sup>

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слесаренко, В.В. Совершенствование систем водоподготовки для теплоэнергетических установок с применением мембранных технологий (на примере Дальневосточного региона): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Слесаренко Вячеслав Владимирович; ДВГТУ. – Владивосток, 2006. – 23 с.
2. Сайт концерна DOW CHEMICAL <http://www.dow.com>
3. Копылов, А.С. Водоподготовка в энергетике / А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – Москва: Изд-во МЭИ, 2003. – 309 с.
4. Сайт предприятия «ТЭКО – ФИЛЬТР» <http://www.teko-filter.ru>
5. Сайт компании WEDECO <http://wedeco.su>
6. Сайт фирмы «Fil-Trek Corporation» <https://fil-trek.com/about-us/>
7. Сайт ЗАО «НПК “Медиана-фильтр”» <http://www.mediana-filter.ru/>

#### ABOUT POSSIBILITIES OF PROMOTION TWO-STEP WATER DECOMPOSITION SCHEMES WITH MEMBRANE METHODS ON THE CCGT THERMAL POWER STATIONS OF THE KALININGRAD REGION

K. V. Ignatushchenko, student, [karinkaizaiw@mail.ru](mailto:karinkaizaiw@mail.ru),  
A. G. Filonov, Associate Professor, [sudfac@yandex.ru](mailto:sudfac@yandex.ru)  
Kaliningrad State Technical University

The results of calculation of the proposed two-stage scheme of the membrane module of the reverse osmosis water treatment plant for CCGT thermal power station 440 MW are presented. Based on optimization calculations using the program ROSA 9.1, the dependencies of technological indicators on the flow of feed water are constructed

*thermal power station, water treatment, reverse osmosis, ultrafiltration, permeate, electrodeionization, specific energy inputs, membrane de-carbonizer, concentrate recycling, two-stage scheme.*