

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.321

Евгений Николаевич Бушуев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-78, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Анна Юрьевна Жолобова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-76, e-mail: kaf@tot.ispu.ru

Использование компьютерной программы «ПРОЕКТ ВПУ» для проведения технологического расчета и анализа технологий обессоливания воды на ТЭС и АЭС

Авторское резюме

Состояние вопроса. Существует множество возможных вариантов схем обессоливания, позволяющих получить очищенную воду требуемого качества. Для проведения технологического расчета водоподготовительной установки ТЭС и АЭС часто используют специализированные компьютерные программы, которые предоставляют фирмы-производители ионитов и мембранных элементов. Однако эти программы учитывают отдельные технологии водообработки, привязаны к фильтрующим и мембранным материалам конкретного производителя и не обеспечивают возможность рассчитывать полные схемы обессоливания воды, а также определять показатели работы водоподготовительной установки. Актуальной является разработка компьютерной программы, которая позволяет осуществлять технологический расчет полных схем водоподготовки, включающих различные технологии обработки воды, определять технологические, экологические и технико-экономические показатели. Проведение многовариантных расчетов при различных исходных данных позволит выявить преимущества и недостатки схемных решений, определить области их рационального использования.

Материалы и методы. Использован метод математического моделирования химико-технологических процессов водоподготовки на ТЭС и АЭС.

Результаты. Разработана прикладная компьютерная программа «ПРОЕКТ ВПУ», предназначенная для технологического расчета различных схем водоподготовки, которые визуально собираются из отдельных элементов, и позволяющая определять технологические, экологические и технико-экономические показатели работы водоподготовительной установки. Получены расчетные данные по коэффициенту собственных нужд для основных схем обессоливания воды и при различной минерализации исходной воды.

Выводы. Созданная компьютерная программа может быть использована для технологического расчета различных схем водоподготовки и оценки степени совершенствования технологии обессоливания воды.

Ключевые слова: водоподготовительная установка, технологический расчет, математическая модель, коэффициент собственных нужд

Evgeniy Nikolayevich Bushuev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Associate Professor, Head of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-78, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Anna Yurievna Zholobova

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-76, e-mail: kaf@tot.ispu.ru

Using “PROJECT WTP” software to carry out process design and analysis of water desalination technologies at thermal power plants and nuclear power plants

Abstract

Background. There are many viable options of desalination schemes that allow us to obtain purified water of the required quality. To conduct process design of a water treatment plant, thermal power plants and nuclear power plants use special software provided by manufacturers of ion exchangers and membrane elements. However, these software programs consider individual water treatment technologies and are attached to filter and membrane materials of a specific manufacturer. They do not provide the ability to calculate complete water desalination schemes, as well as determine the performance indicators of the water treatment plant. It is relevant to develop a software program that allows us to conduct process design of complete water treatment schemes, which include various water treatment technologies, and to determine technological, environmental, and technical-economic indicators. Multivariate calculations with different initial data will allow us to identify the advantages and disadvantages of scheme solutions and determine areas of their rational use.

Materials and methods. The method of mathematical modeling of chemical and technological processes of water treatment at thermal power plants and nuclear power plants has been used.

Results. An application software program “PROJECT WTP” has been developed. It is designed for process design of various water treatment schemes, which are visually assembled from individual elements, and allows one to determine the technological, environmental, and performance indicators of the operation of water treatment plant. Computation data on the auxiliary need coefficient has been obtained for the main water desalination schemes and under condition of different mineralization of the source water.

Conclusions. The developed software program can be used for process design of various water treatment schemes and assessment of the degree of improvement of water desalination technology.

Key words: water treatment plant, process design, mathematical model, auxiliary needs coefficient

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.4.005-014

Введение. Водоподготовительная установка (ВПУ) подпитки основного контура на ТЭС и АЭС используется для получения добавочной воды, которая необходима для восполнения потерь пара и конденсата в этом контуре. Традиционно эти установки в зависимости от уровня минерализации исходной воды реализовались по схемам химического или термического обессоливания с применением прямоточных ионитных фильтров. Эти схемы надежно позволяют получить обессоленную воду требуемого качества, однако они со-

держат значительное количество разнообразного водоподготовительного оборудования, характеризуются большой потребностью в химических реагентах и фильтрующих материалах, а также образованием значительного количества высокоминерализованных сточных вод и шлама.

В целях технологического, экологического и технико-экономического совершенствования ВПУ предложено большое количество различных мероприятий, технологий и схемных решений.

Применение противоточных ионообменных технологий (АПКОРЕ, Швебебетт и др.)

позволяет снизить потребность в химических реагентах на регенерацию, расход воды на собственные нужды, а также уменьшить необходимое количество ионитных фильтров [1]. Однако имеется и отрицательный опыт их практического применения [2].

Одним из основных направлений по совершенствованию термического метода обессоливания является использование испарителей мгновенного вскипания (ИМВ) [3], которые значительно менее металлоемки по сравнению с испарителями кипящего типа, на которые может поступать природная вода, прошедшая упрощенную предварительную очистку. Факторами, сдерживающими их распространение на отечественных предприятиях, являются высокие капитальные затраты, обусловленные значительной металлоемкостью оборудования и высокими трудозатратами изготовления, а также необходимость использования оборотной системы охлаждения для конденсации пара последней ступени испарителя [3].

В последнее время широко внедряются мембранные технологии водоподготовки [4], прежде всего на базе установки обратного осмоса (УОО), которая при небольших затратах реагентов позволяет удалять из обрабатываемой воды основную часть ионных примесей [5, 6]. Такие ВПУ характеризуются образованием значительного количества маломинерализованных сточных вод.

Большое количество возможных вариантов, позволяющих получить обессоленную воду близкого качества, ставит проблему проведения исследований, основанных на результатах технологического расчета в целях выявления основных преимуществ и недостатков, определения области их рационального использования. Актуальной также является задача выбора для конкретных исходных данных (показателей качества обрабатываемой воды, номинальной производительности ВПУ, требований потребителя и т.д.) оптимальной схемы водоподготовки.

Технологические схемы водоподготовки включают различные ступени обработки воды. В имеющейся технической литературе недостаточно представлены методики по расчету ряда современных технологий водоподготовки [7–9]. Для проведения технологического расчета часто используют специализированные компьютерные программы, такие как ROSA, CADIX, WAVE, IMSDesign, NanoTechPro и другие, которые предоставляют фирмы-производители

фильтрующих и мембранных материалов. Проведенный анализ существующих компьютерных программ по расчету систем водоподготовки показал, что большинство из них имеют интерфейс на английском языке, что затрудняет их практическое использование для отечественного пользователя. Кроме того, программы учитывают отдельные технологии водообработки, привязаны к фильтрующим и мембранным материалам конкретного производителя и не обеспечивают возможность рассчитывать полные схемы обессоливания (включающие предварительную очистку, ступени обессоливания, а при необходимости и дообессоливания, обработку и утилизацию стоков), а также определять показатели работы ВПУ.

Актуальной является разработка компьютерной программы, которая позволяет проводить технологический расчет полных схем водоподготовки, включая различные ступени обработки воды, определять технологические, экологические и технико-экономические показатели.

Методы исследования. При анализе степени совершенствования технологии обессоливания необходимо учитывать все основные ресурсы, используемые при обработке воды. В соответствии с принятой в промышленности классификацией, при водоподготовке на ТЭС и АЭС требуются следующие ресурсы:

- природная вода, которая чаще всего поступает на ВПУ из поверхностного вод источника, – основной ресурс (сырье);
- химические реагенты (коагулянт, едкий натр, серная кислота и т.д.), которые используются для обработки воды, – вспомогательные ресурсы;
- тепловая и электрическая энергии;
- фильтрующие, ионообменные и мембранные материалы – используются как вспомогательные материалы;
- металл и другие конструктивные материалы, используемые для изготовления основного и вспомогательного водоподготовительного оборудования.

Уменьшение потребности в ресурсах (ресурсосбережение) снижает объемы отходов, в первую очередь сбросы сточных вод в водоем, что, в свою очередь, уменьшает негативное воздействие ВПУ на окружающую среду. Таким образом, ресурсосбережение при водоподготовке позволяет повысить ее экологичность.

В ИГЭУ разработана прикладная компьютерная программа (ПП) «ПРОЕКТ ВПУ» [7, 10], которая позволяет выполнять технологический расчет при проектировании ВПУ на базе химического и термического методов обессоливания, определять основные технологические, экологические и технико-экономические показатели рассчитываемых схем ВПУ. Особенностью разработанной программы является то, что рассчитываемые схемы водоподготовки собираются из различных элементов – стадий водоподготовки. ПП основывается на единстве механизма взаимодействия между отдельными элементами, которое не зависит от их внутренних алгоритмов, что делает ПП открытой к добавлению новых элементов. В настоящее время производится доработка программы с учетом нового водоподготовительного оборудования, прежде всего на основе мембранных методов обработки воды.

В основе расчетной методики, реализованной в ПП, лежит математическая модель (ММ) ВПУ, включающая модели отдельных элементов, которые основываются на описании процессов и аппаратов водоподготовки.

ММ ступени обработки включает ММ изменения показателей качества воды по стадиям обработки, которая позволяет при известных концентрациях примесей в поступающей воде рассчитать содержание этих примесей в очищенной воде:

$$\bar{C}_{\text{Вых}} = f(\bar{C}_{\text{Вх}}),$$

где $\bar{C}_{\text{Вх}}$, $\bar{C}_{\text{Вых}}$ – вектор концентраций примесей в поступающей и обработанной водах соответственно, мг/дм³ (ммоль/дм³).

Расчет концентраций форм диссоциации слабых электролитов и показателя рН в технологических водах основывается на универсальном подходе с использованием преобразованного уравнения электронейтральности [11].

Разработанные ММ ступеней водоподготовки основаны на уравнениях материального баланса для стационарных условий:

– по массовому расходу отдельных примесей:

$$\sum_i G_k^{\text{Вх},i} = \sum_j G_k^{\text{Вых},j}, \quad (1)$$

или

$$\sum_i C_k^{\text{Вх},i} Q_{\text{Вх},i} = \sum_j C_k^{\text{Вых},j} Q_{\text{Вых},j}; \quad (2)$$

– объемному расходу технологических вод, подвергающихся или участвующих в водообработке:

$$\sum_i Q_{\text{Вх},i} = \sum_j Q_{\text{Вых},j}, \quad (3)$$

где $G_k^{\text{Вх},i}$ – массовый расход k -го компонента во входном i -м потоке, кг/ч; $G_k^{\text{Вых},j}$ – массовый расход k -го компонента в выходном j -м потоке, кг/ч; $C_k^{\text{Вх},i}$, $C_k^{\text{Вых},j}$ – концентрация k -го компонента во входном i -м и выходном j -м потоках соответственно, ммоль/дм³; $Q_{\text{Вх},i}$, $Q_{\text{Вых},j}$ – объемный расход технологической воды во входном i -м и выходном j -м потоках соответственно, м³/ч.

Например, для ступени прямоточных Na-катионитных фильтров уравнение материального баланса (3) принимает вид

$$Q_{\text{осв}} = Q_{\text{ум}} + Q_{\text{сн}},$$

где $Q_{\text{осв}}$, $Q_{\text{ум}}$ – среднечасовые расходы осветленной (поступающей на обработку) и умягченной вод соответственно, м³/ч; $Q_{\text{сн}}$ – среднечасовой расход воды на собственные нужды, который учитывает расходы на проведение операций по регенерации ионитных фильтров, м³/ч:

$$Q_{\text{сн}} = Q_{\text{взр}} + Q_{\text{рег.рр}} + Q_{\text{отм}} + Q_{\text{доотм}},$$

где $Q_{\text{взр}}$, $Q_{\text{рег.рр}}$, $Q_{\text{отм}}$, $Q_{\text{доотм}}$ – среднечасовые расходы воды на взрыхление, приготовление регенерационного раствора, отмывку и доотмывку соответственно, м³/ч.

В связи с тем что показатели качества исходной воды задаются на входе схемы, а требуемая производительность ВПУ – на выходе схемы, расчет проводится в два этапа. На первом этапе последовательно по элементам схемы рассчитывается изменение показателей качества воды по стадиям обработки (расчет по «воде») начиная с источника исходной воды и заканчивая последней ступенью обработки воды. На втором этапе расчет ведется в обратной последовательности – по объемному расходу с учетом расхода воды на собственные нужды для каждой ступени водоподготовки.

В качестве уравнений связи между ММ стадий водоподготовки используются следующие зависимости:

• концентрации примесей во входном потоке последующего элемента ($n+1$) равны концентрациям этих примесей в выходном потоке предыдущего элемента (n):

$$\bar{C}_{\text{Вх},i}^{n+1} = \bar{C}_{\text{Вых},j}^n;$$

• среднечасовой расход на выходе из ступени (производительность ступени) равен расходу воды, поступающей на последующую стадию водообработки:

$$Q_{\text{вых},i}^n = Q_{\text{вх},j}^{n+1}$$

На первом этапе выполнения расчета составляется структурная схема рассчитываемой ВПУ (рис. 1), которая включает условные изображения ее элементов, как реально существующего водоподготовительного оборудования (например, ступень Na-катионитных фильтров), так и условно существующих элементов (например, узлы, разветвители водного потока). Каждый элемент стадии обработки воды имеет набор входов и выходов водных потоков, которые используются для описания связей между стадиями обработки.

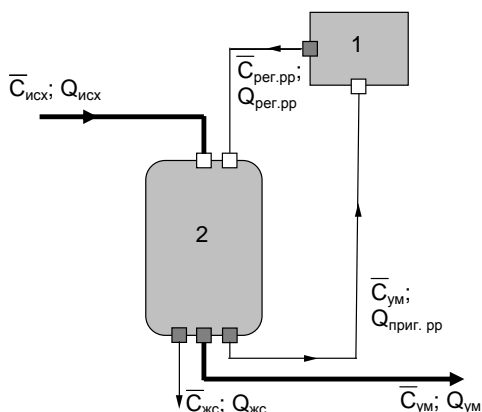


Рис. 1. Структурная схема проточного Na-катионитного фильтра: 1 – узел приготовления и дозирования раствора поваренной соли; 2 – ступень проточных Na-катионитных фильтров; □ – вход водного потока; ■ – выход водного потока

На основе структурной схемы формируется ММ рассчитываемой ВПУ.

Подход, основанный на сборке ММ схемы ВПУ из ММ отдельных элементов, потребовал и создания особой методики их расчета, основанной на реагировании на возмущения. Выделены два возможных типа возмущения для расчета ступени водообработки [7]: изменение концентраций примесей в воде и изменение расхода воды. Расчет элемента проводится в зависимости от того, какое возмущение (или их сочетание) поступило на определенный вход или выход водного потока. Например, когда поступает возмущение по качеству обрабатываемой воды на ММ ступени Na-катионитных фильтров (рис. 1), производится расчет качества очищенной (умягченной) воды, после чего гене-

рируется возмущение по показателям качества и рассчитанное качество воды передается связанному с этой ступенью элементом в схеме. Когда на ММ ступени поступают возмущения по необходимому расходу умягченной воды и по составу примесей в регенерационном растворе, производится технологический расчет ионитной ступени, в ходе которого также определяются характеристики потока сточной воды и расход воды, поступающей на обработку. Эти данные передаются связанным с ними элементам.

Такая методика расчета схем водообработки, основанная на ММ отдельных элементов и общем механизме взаимодействия между элементами через возмущения по расходу и показателям качества воды, является универсальной, позволяющей рассчитывать практически любую по сложности схему водоподготовки. Кроме того, возникает возможность вводить новые ММ элементы водообработки, увеличить точность расчета, так как учитываются конструктивные особенности схем, что позволяет отказаться от ряда упрощений, которые используются при традиционных расчетах [7–9, 12].

Разработанная ММ ВПУ реализована в ПП «ПРОЕКТ ВПУ» с использованием объектно-ориентированного программирования. Укрупненная блок-схема компьютерной программы приведена на рис. 2 [10].

ПП может находиться в четырех состояниях:

- ввод и редактирование структурной схемы водообработки;
- ввод необходимых исходных данных для расчета;
- расчет ВПУ;
- представление результатов расчета.

Отличительной особенностью ПП «ПРОЕКТ ВПУ» является визуальный ввод рассчитываемой схемы. Структурные технологические схемы собираются из отдельных элементов. На первом этапе пользователь компоует на экране монитора (рис. 3) расчетную схему водообработки из элементов различных типов (источник исходной воды, ступень механических фильтров, сброс сточных вод в водоисточник и т.д.). Связь между элементами технологической схемы формируется после нажатия кнопки мыши на выходе принимающего потока элемента схемы. При этом элемент «трубопровод» (носитель водного потока) не может присоединиться к выходу водного потока и к уже соединенному входу.

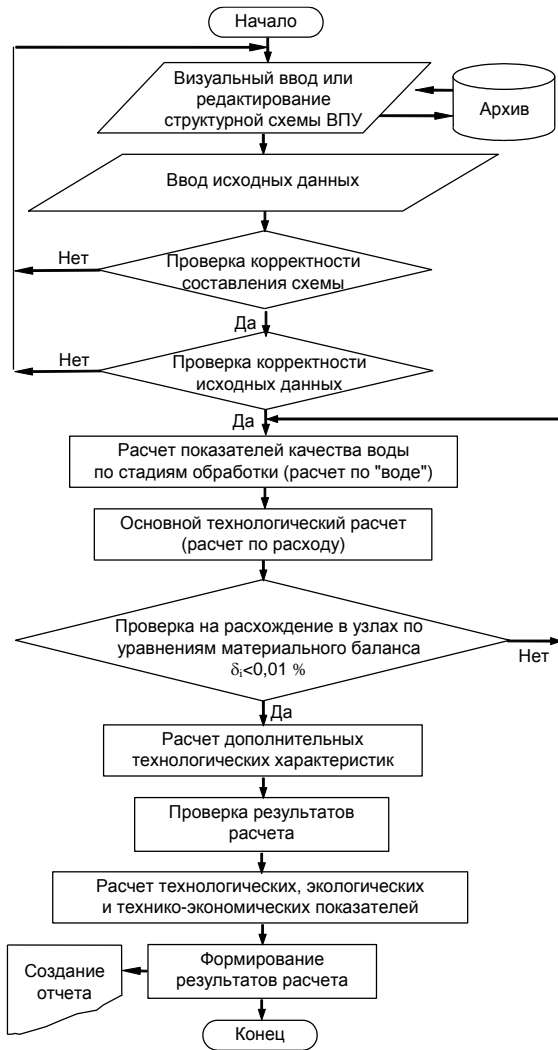


Рис. 2. Укрупненная блок-схема ПП «ПРОЕКТ ВПУ»

После создания структурной схемы переходят к вводу исходных для расчета

данных для каждой ступени обработки. Ввод осуществляется в окнах ввода данных, появляющихся при нажатии кнопки мыши на соответствующем элементе схемы. В ПП для упрощения ввода данных предусмотрено использование величин по умолчанию и списки возможных значений. Заложена также возможность альтернативного ввода некоторых исходных данных, например для многоступенчатой испарительной установки можно задавать как солесодержание продувочной воды, так и долю продувки от общей производительности установки.

В начале расчета производится его инициализация – генерируется возмущение по качеству воды на выходе из водоисточника, что заставляет рассчитать изменение показателей качества воды по стадиям обработки. Затем генерируется возмущение по расходу у потребителя очищенной воды, что заставляет проводить технологические расчеты схемы по расходу.

Наличие в структурных схемах ММ ВПУ элемента «узел водного потока» приводит к выполнению итерационных расчетов в целях постепенного уточнения характеристик. Поэтому в ММ этого элемента закладывается механизм «затухания» расчета и прекращение генерации возмущений при малом относительном расхождении ($\delta < 0,01 \%$) в балансовых уравнениях по расходу технологических вод и количеству вещества.

Разделение технологического расчета на два этапа – основной и дополнительный (рис. 2) – произведено для того, чтобы уменьшить количество расчетов, проводимых при итерациях.

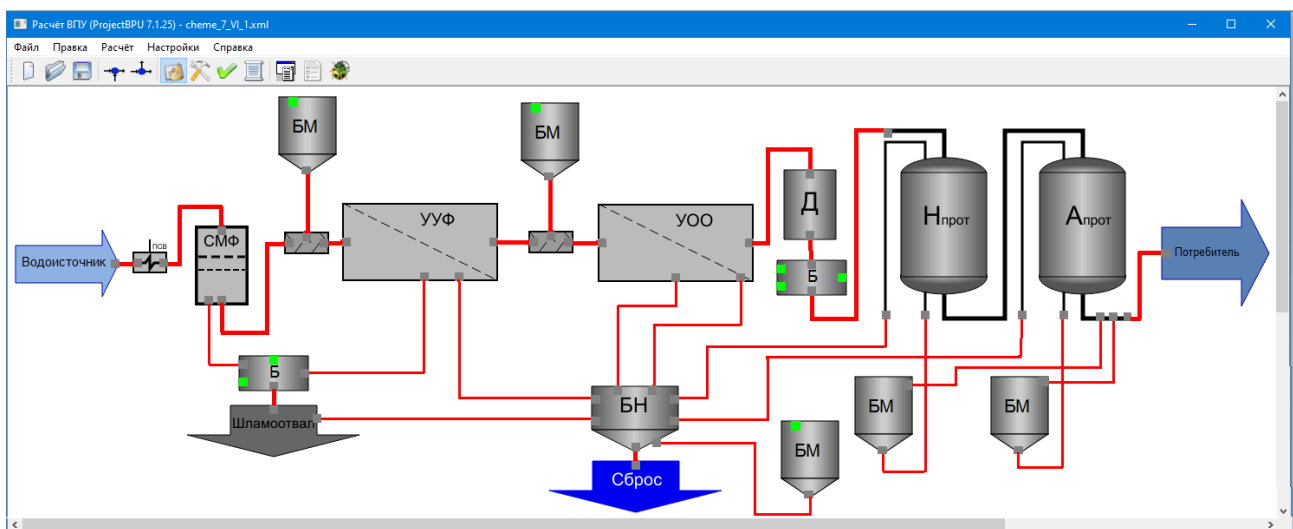


Рис. 3. Экранная форма редактирования структурной схемы обессоливания в ПП «ПРОЕКТ ВПУ»

После выполнения технологического расчета определяются основные технологические, экологические и технико-экономические показатели работы ВПУ. При подходе, когда расчет схем ВПУ производится при реагировании ММ отдельных элементов на возмущения, важна система контроля корректности его выполнения. Проверка правильности проведения расчета выполняется в следующей последовательности:

- проверка на отсутствие не обработанных элементами возмущений;
- обнаружение существования отрицательных значений расходов и концентраций примесей в водных потоках;
- проверка выполнения уравнений материального баланса для всех элементов по расходу воды и количеству по отдельным примесям;
- проверка выполнения уравнения электронейтральности во всех водных потоках;
- проверка материального баланса по количеству вещества для схемы в целом.

Проверка результатов расчета позволяет выявить ошибки в исходных данных, а также в расчетных методиках, что уменьшает вероятность принятия ошибочного решения.

После проведения расчета программа переходит в режим представления его результатов, в ходе которого можно получить как общий отчет для схемы в целом, так и отчет для любого отдельного элемента.

Адекватность полученных результатов оценивалось путем сопоставления расчетных характеристик с режимными картами для проектируемого и находящегося в эксплуатации водоподготовительного оборудования, а также совпадением отдельных результатов с данными, полученными другими авторами.

Результаты исследования. Разработанный ПП «ПРОЕКТ ВПУ» был использован для технологического расчета и анализа основных схем обессоливания воды на ТЭС и АЭС в широком диапазоне изменения минерализации исходных вод и при одинаковой производительности ВПУ, которая принята равной 350 м³/ч.

Показатели качества исходных вод для расчета охватывают диапазон изменения минерализации по анионам сильных кислот ($C_{э\kappa}(SO_4^{2-}) + C_{э\kappa}(Cl^-)$) от 0,35 до 15 мг-экв/дм³.

В качестве базовой воды принята вода р. Урал [12], которая характеризуется следующими показателями: $Ж_{Ca} = 5,41$ мг-экв/дм³; $Ж_{Mg} = 0,91$ мг-экв/дм³; $C_{э\kappa}(Na^+) = 4,48$ мг-экв/дм³; $C_{э\kappa}(SO_4^{2-}) = 4,79$ мг-экв/дм³; $C_{э\kappa}(Cl^-) = 2,21$ мг-экв/дм³; $Щ_0 = 3,8$ мг-экв/дм³; $C_{SiO_2} = 9,1$ мг/дм³. Остальные воды получены путем уменьшения и увеличения пропорционально всех показателей качества. Такой подход при определении показателей качества исходных вод позволяет получить плавные графические зависимости результатов расчета.

В качестве рассчитываемых схем ВПУ приняты наиболее распространенные и перспективные технологии обессоливания воды на ТЭС и АЭС:

- 1) двухступенчатое химическое обессоливание с использованием прямоточных Н-ОН-ионитных фильтров;
- 2) химическое обессоливание на базе противоточной ионообменной технологии АПКОРЕ (UPCORE) с двухслойным ОН-анионитным фильтром;
- 3) термическое обессоливание на основе многоступенчатой испарительной установки (МИУ) с использованием двух ступеней прямоточного Na-катионирования;
- 4) термическое обессоливание с предварительным умягчением на ступени противоточных фильтров, работающих по технологии Швебебед (Schwebbett);
- 5) термическое обессоливание на базе ИМВ с предварительной обработкой на карбоксильном Н-катионитном фильтре;
- 6) на базе УОО с последующим дообессоливанием на Н-ОН-ионитной ступени и традиционной предочисткой, включая ступени осветлителей и механических фильтров;
- 7) на базе УОО и ультрафильтрации с дообессоливанием на Н-ОН-ионитных фильтрах;
- 8) обессоливание на основе интегрированных мембранных технологий (ультрафильтрации, двухступенчатого обратного осмоса) [5].

Гидравлический КПД УОО, в соответствии с нормативными документами¹, задавался около 75 % за счет использования двухкаскадной схемы компоновки модулей. При очистке воды на УОО с

¹ СТО 70238424.27.100.027-2009 СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ НП «ИНВЭЛ». Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. Дата введения 2009-06-19. – 151 с.

$C_{\text{эк}}(\text{SO}_4^{2-}) + C_{\text{эк}}(\text{Cl}^-) \geq 5$ мг-экв/дм³ для предотвращения образования минеральных отложений на поверхности мембран предусматривалось подкисление исходной воды раствором серной кислотой.

Был выполнен технологический расчет основных схем обессоливания при различной минерализации исходной воды, в ходе которого был рассчитан коэффициент собственных нужд ВПУ (рис. 4).

Коэффициент собственных нужд ВПУ характеризует схему водоподготовки с точки зрения рациональности использования исходной воды (основного ресурса) и определяется как [12]

$$K_{\text{с.н.}} = \left(\frac{Q_{\text{сн}}}{Q_{\text{обес}}} \right) 100 = \left(\frac{Q_{\text{исх}}}{Q_{\text{обес}}} - 1 \right) 100 \%,$$

где $Q_{\text{исх}}$ и $Q_{\text{обес}}$ – расход исходной и обессоленной воды, м³/ч; $Q_{\text{сн}}$ – среднечасовой расход воды на собственные нужды ВПУ, м³/ч.

Высокие значения коэффициента собственных нужд показывают также повышенные потери тепловой энергии со сточными водами, которая затрачивалась на нагрев природной воды перед подачей на ВПУ.

Анализ полученных результатов показывает, что плохими показателями (высокое значение коэффициента собственных нужд) обладают схемы на базе УОО (схемы №№ 6–8) – более 30 %. Наибольшими значениями потребности в исходной воде (бо-

лее 36 %) характеризуется схема обессоливания на основе интегрированных мембранных методов (схема № 8). Этот недостаток может быть несколько сглажен за счет увеличения гидравлического КПД УОО при усложнении схемы УОО – применение трехкаскадной схемы, подмес концентрата к исходной воде и т.д.

Значение коэффициента собственных нужд для схем на базе УОО незначительно повышается (в пределах 2–3 %) с увеличением минерализации исходной воды.

Схемы обессоливания на базе термического метода (схемы №№ 3 и 4) характеризуются низкими значениями коэффициента собственных нужд. Наименьшими значениями этого показателя (от 2,5 до 9,6 %) характеризуется схема с использованием для подготовки питательной воды перед МИУ противоточных Na-катионитных фильтров. Схема термического обессоливания с ИМВ (схема № 5) характеризуется высоким коэффициентом собственных нужд (более 10 %), при этом значение показателя несущественно увеличивается с повышением минерализации обрабатываемой воды (при $C_{\text{эк}}(\text{SO}_4^{2-}) + C_{\text{эк}}(\text{Cl}^-) = 15$ мг-экв/дм³ составляет 12,2 %).

Значения коэффициента собственных нужд для схем химического обессоливания (схемы №№ 1 и 2) существенно зависят от минерализации исходной воды.

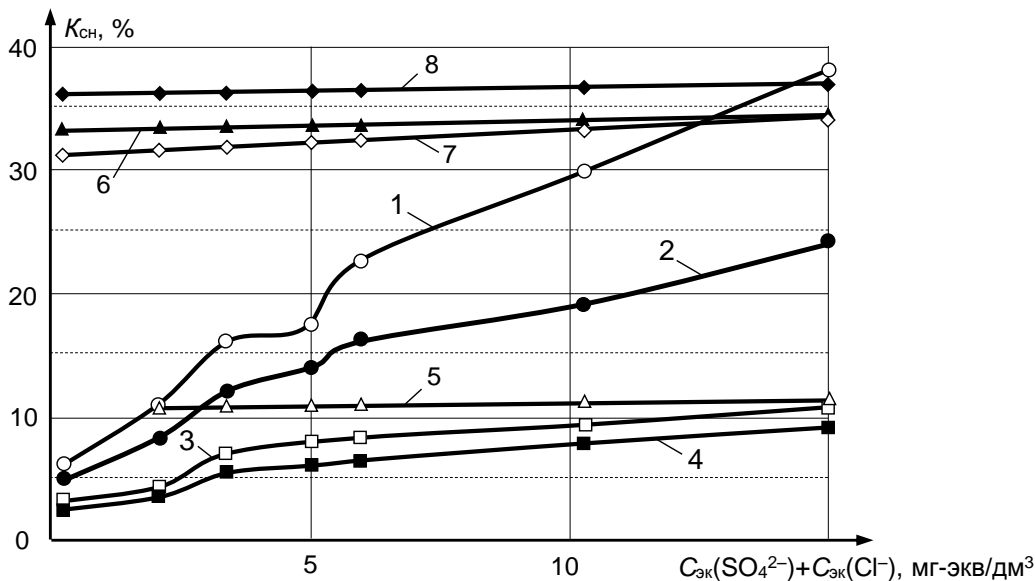


Рис. 4. Зависимость коэффициента собственных нужд ($K_{\text{сн}}$) от схемы обессоливания и минерализации исходной воды $C_{\text{эк}}(\text{SO}_4^{2-}) + C_{\text{эк}}(\text{Cl}^-)$: 1–8 – варианты схем обессоливания воды согласно принятой нумерации

При невысокой минерализации (до 2,5 мг-экв/дм³) коэффициент собственных нужд составляет не более 10 %. С повышением минерализации обрабатываемой воды происходит резкое повышение этого показателя и при минерализации более 10 мг-экв/дм³ он приближается к показателям мембранных схем, а при минерализации равной 15 мг-экв/дм³ и более – превышает их.

Не плавность изменения графика для схемы химического обессоливания на базе прямоточных Н-ОН-ионитных фильтров объясняется применением при обработке минерализованных вод (при $C_{\text{эк}}(\text{SO}_4^{2-}) + C_{\text{эк}}(\text{Cl}^-) \geq 5$ мг-экв/дм³) оптимизационного решения – использования ступенчатого противоточного Н-катионитного фильтра. Схема химического обессоливания с использованием противоточных фильтров (схема № 2) характеризуется меньшими потребностями в воде на собственные нужды по сравнению со схемой на основе прямоточных фильтров (схема № 1).

Выводы. Разработанный ПП «ПРОЕКТ ВПУ» может быть использован для технологического расчета различных схем водоподготовки, которые собираются из отдельных элементов (стадий обработки). В ходе расчета определяются технологические, экологические и технико-экономические показатели. Проведение многовариантных расчетов при различных исходных данных позволит выявить преимущества и недостатки схемных решений, определить области их рационального использования.

Результаты расчета могут быть использованы для анализа мероприятий по совершенствованию технологии обессоливания воды.

Полученные на основе выполненного технологического расчета графические зависимости коэффициента собственных нужд для основных схем обессоливания воды на ТЭС при изменении минерализации исходной воды в широком диапазоне $C_{\text{эк}}(\text{SO}_4^{2-}) + C_{\text{эк}}(\text{Cl}^-) = 0,35\text{--}15$ мг-экв/дм³, показали, что наибольшей потребностью в исходной воде характеризуются схемы обессоливания на базе УОО, наименьшей – термические схемы на базе многоступенчатой испарительной установки.

Список литературы

1. **Рябчиков Б.Е., Пантелеев А.А., Ларионова С.Ю.** Ионный обмен в водоподготовке. – М.: ДеЛи плюс, 2018. – 398 с.

2. **Модернизация** типовой водоподготовительной установки ТЭС / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина, М.Э. Колодяжная // Электротехнические станции. – 2020. – № 11(1072). – С. 2–8.

3. **Фардиев И.Ш., Петин В.С., Закиров И.А.** ИМВ «ЭКОТЕХ». Экологичная технология водоподготовки // Энергетика Татарстана. – 2005. – № 1. – С. 36–42.

4. **Повышение** экологических и эксплуатационных характеристик водоподготовительных установок ТЭС на основе баромембранных технологий / Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, А.А. Филимонова, С.Р. Сайтов // Теплоэнергетика. – 2017. – № 12. – С. 67–77.

5. **Юрчевский Е.Б., Первов А.Г., Пичугина М.А.** Применению обратноосмотической технологии обессоливания воды в энергетике – 20 лет // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 5(61). – С. 2–8.

6. **Проектные** решения водоподготовительных установок на основе мембранных технологий / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, А.В. Жадан, О.В. Хоружий // Теплоэнергетика. – 2012. – № 7. – С. 30–36.

7. **Бушуев Е.Н.** Исследование и математическое моделирование химико-технологических процессов водообработки на ТЭС: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2010. – 359 с.

8. **Лифшиц О.В.** Справочник по водоподготовке котельных установок. – М.: Энергия, 1976. – 288 с.

9. **Солодяников В.В.** Расчет и математическое моделирование процессов водоподготовки. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 384 с.

10. **Анализ** существующих технологий водоподготовки на тепловых электростанциях / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, М.Ю. Опарин, Н.В. Бушуева // Энергосбережение и водоподготовка. – 2002. – № 2. – С. 11–19.

11. **Бушуев Е.Н.** Использование преобразованного уравнения электронейтральности при проведении технологических расчетов водоподготовки на ТЭС и АЭС // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 1. – С. 5–11.

12. **Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В.** Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 252 с.

References

1. Ryabchikov, B.E., Panteleev, A.A., Lariovova, S.Yu. *Ionnyy obmen v vodopodgotovke* [Ion exchange in water treatment]. Moscow: DeLi plus, 2018. 398 p.

2. Larin, B.M., Bushuev, E.N., Eremina, N.A., Kolodyazhnaya, M.E. *Modernizatsiya tipovoy vodopodgotovitel'noy ustanovki TES* [Modernization of a typical water treatment plant at thermal power

plant]. *Elektricheskie stantsii*, 2020, no. 11(1072), pp. 2–8.

3. Fardiev, I.Sh., Petin, V.S., Zakirov, I.A. IMV «EKOTEK». Ekologichnaya tekhnologiya vodopodgotovki [Eco-friendly water treatment technology]. *Energetika Tatarstana*, 2005, no. 1, pp. 36–42.

4. Chichirova, N.D., Chichirov, A.A., Filimonova, A.A., Saitov, S.R. Povyshenie ekologicheskikh i ekspluatatsionnykh kharakteristik vodopodgotovitel'nykh ustanovok TES na osnove baromembrannykh tekhnologiy [Improving environmental and operational characteristics of water treatment plants at thermal power plants based on baromembrane technologies]. *Teploenergetika*, 2017, no. 12, pp. 67–77.

5. Yurchevskiy, E.B., Pervov, A.G., Pichugina, M.A. Primeneniye obratnoosmoticheskoy tekhnologii obessolivaniya vody v energetike – 20 let [Application of reverse osmosis technology for water desalination in the energy sector for 20 years]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2009, no. 5(61), pp. 2–8.

6. Panteleev, A.A., Ryabchikov, B.E., Zhadan, A.V., Khoruzhiy, O.V. Proektnye resheniya vodopodgotovitel'nykh ustanovok na osnove membrannykh tekhnologiy [Design solutions for water treatment plants based on membrane technologies]. *Teploenergetika*, 2012, no. 7, pp. 30–36.

7. Bushuev, E.N. *Issledovanie i matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov vodoobrabotki na TES*. Diss. ... d-ra tekhn. nauk: 05.14.14 [Study and mathematical modeling of chemical-technological processes of

water treatment at thermal power plants. Dr. tech. sci. diss.: 05.14.14.]. Ivanovo, 2010. 359 p.

8. Lifshits, O.V. *Spravochnik po vodopodgotovke kotel'nykh ustanovok* [Handbook for water treatment of boiler plants]. Moscow: Energiya, 1976. 288 p.

9. Solodyannikov, V.V. *Raschet i matematicheskoe modelirovanie protsessov vodopodgotovki* [Calculation and mathematical modeling of water treatment processes]. Moscow: Energoatomizdat, 2003. 384 p.

10. Larin, B.M., Bushuev, E.N., Oparin, M.Yu., Bushueva, N.V. Analiz sushchestvuyushchikh tekhnologiy vodopodgotovki na teplovykh elektrostantsiyakh [Analysis of current water treatment technologies at thermal power plants]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2002, no. 2, pp. 11–19.

11. Bushuev, E.N. Ispol'zovanie preobrazovannogo uravneniya elektroneytral'nosti pri provedenii tekhnologicheskikh raschetov vodopodgotovki na TES i AES [Using transformed equation of electroneutrality when carrying out technological calculations of water treatment at thermal power and nuclear power plants]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 1, pp. 5–11.

12. Kostrikin, Yu.M., Meshcherskiy, N.A., Korovina, O.V. *Vodopodgotovka i vodnyy rezhim energoob'ektov nizkogo i srednego davleniya* [Water treatment and water regime of energy facilities of low and medium pressure]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 252 p.