

Сетевой, открытый, интерактивный расчет «классической» схемы обессоливания

Очков В.Ф.

доктор техн. наук, профессор

заслуженный работник ЕЭС России

Кафедра технологии воды и топлива

Московского энергетического института (ТУ)

Гавриленко С.С.

аспирант

Данной статьей редакция продолжает цикл по программированному расчету процессов водоподготовки:

- Очков В.Ф. Программированный расчет известкования и коагуляции воды, №7 (19), 2009
- Очков В.Ф., Мельников И.А. Программированный расчет углекислотного равновесия в воде, №8 (20), 2009
- Очков В.Ф. Оптимизация модульных водоподготовительных установок, №9 (21), 2009
- Очков В.Ф. Фронт фильтрования: математическая модель и визуализация, №10 (22), 2009
- Очков В.Ф. Оптимизация «подарка теплотехников плохим химикам-водникам», №11 (23), 2009
- Очков В.Ф., Чудова Ю.В. Обработка охлаждающей воды для предотвращения карбонатных и сульфатных отложений в оборотных системах охлаждения, №1 (25), 2010
- Очков В.Ф., Чудова Ю.В. Анализ качества питательной воды и корректировка производительности для обратноосмотических мембран и нанофильтрационных установок, №2 (26) и №4 (28), 2010
- Очков В.Ф., Чудова Ю.В. Знаменский В.Е. Живые» диаграммы по свойствам ионитов, №5 (29), 2010
- Очков В.Ф., Гавриленко С.С. Программированный выбор фильтров, №6 (29), 2010
- Очков В.Ф., Хуснуллин А.Ш. Единицы жесткости воды и прочие концентрации, №6 (29), 2010

В статье представлено описание расчета «классической» схемы обессоливания. Даны описания сайтов Интернета, с помощью которых проводится банный расчет в открытом, интерактивном режиме.

The paper describes the calculation of the "classical" scheme of desalination. Given descriptions of sites on the Internet, through which the calculation is carried out in the open bath, online.

Основная часть водоподготовительных установок (ВПУ) на ТЭС, действующих в России и странах СНГ, построены в XX веке по традиционной схеме, включающей осветлитель с известкованием и коагуляцией либо только с коагуляцией, механические

фильтры (МФ) с соответствующей загрузкой, одну или две ступени обессоливания¹ (см. рис. 1). Такая схема считается «классической» для подготовки воды для восполнения потерь пара и конденсата на энергоблоках с барабанными котлами. На блоках с прямоточными котлами в «хвосте» ВПУ дополнительно ставят фильтры смешанного действия (ФСД).

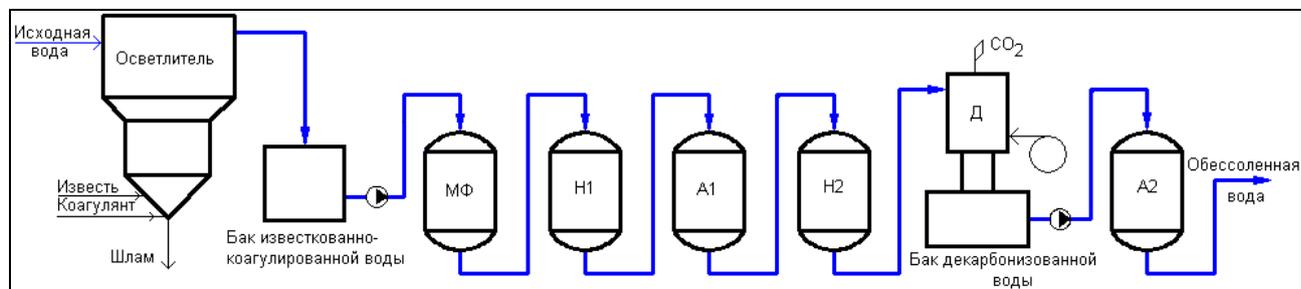


Рис. 1. Классическая схема обессоливания воды

Одной из причин распространенности данной схемы является возможность ее применения для очистки воды различного качественного состава (по солесодержанию и взвешенным веществам). В осветлителе при помощи процесса коагуляции происходит удаление взвешенных и коллоидных веществ. Известкование применяется для снижения щелочности и частично жесткости воды². В механических фильтрах происходит задержание твердой фазы, образовавшейся в результате коагуляции и известкования и не задержанной в осветлителе. Осветленная вода последовательно проходит Н-катионитный и ОН-анионитный фильтры 1-й ступени. Как правило, Н-катионитный фильтр 1-й ступени (Н₁), загруженный слабокислотным катионитом, работает по «проскоку» иона Na⁺. ОН-анионитный фильтр 1-й ступени (А₁), загруженный слабоосновным анионитом, в свою очередь, задерживает анионы сильных кислот SO₄²⁻ и Cl⁻. Ионы Na⁺, прошедшие Н-катионитный фильтр 1-й ступени, задерживаются Н-катионитным фильтром 2-й ступени (Н₂ он загружен сильнокислотным катионитом). В ОН-анионитном фильтре 2-й ступени задерживаются (А₂) анионы SO₄²⁻ и Cl⁻, не задержанные в ОН-анионитном фильтре 1-й ступени, а также анионы слабых кислот HCO₃⁻, HSiO₃⁻ и др. (ОН-анионитный фильтр 2-й ступени загружен высокоосновным анионитом). Основное количество свободной углекислоты, находившейся в исходной воде и образовавшейся за счет перехода HCO₃⁻ в CO₂, удаляется в декарбонизаторе³.

¹ Основным документом для разработки подобных схем являются «Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций ВНТП 81».

² Более подробно о процессах известкования и коагуляции см. в [1].

³ Интересным моментом, с технологической точки зрения, является выбор места установки декарбонизатора. В случае установки его после фильтра Н₂ мы получим более благоприятные условия для работы декарбонизатора – ионы Н⁺, поступившие в воду после фильтра Н₂, будут взаимодействовать с ионом HCO₃⁻ с образованием свободной углекислоты, которая и будет удаляться в декарбонизаторе. Но при этом потребуются установка насоса с большим напором (чтобы прокачать три фильтра). Дренажная система фильтра Н₁ будет работать в

Фильтры одной группы (Н-катионитные фильтры 1-й ступени, ОН-анионитные фильтры 1-й ступени и т.д.) соединяются, как правило, по параллельной схеме – «гребенке» (вода распределяется через входной коллектор по фильтрам, а после в выходном коллекторе собирается в один поток). Такая схема включения позволяет гибко управлять производительностью за счет отключения части фильтров. Для такой схемы будет не критично возможное изменение качества исходной воды. В альтернативной схеме включения – «цепочке» – фильтры и фильтрующая загрузка подбираются под строго определенную производительность и ионный состав воды, чтобы все фильтры «цепочки» выходили на регенерацию одновременно.

Несмотря на приличный возраст, водоподготовительные установки, построенные по подобной схеме, все же обладает рядом достоинств таких как: надежность работы и возможность ремонта на месте (учитывая огромные географические расстояния нашей страны, это во многом является определяющим фактором для сохранения таких ВПУ), отсутствие высоких требований к квалификации персонала, открытость для реконструкции и т.д. В свою очередь, главным минусом таких ВПУ является, так называемый «моральный износ», под которым подразумевается несоответствие технологии требованиям времени, очень большие эксплуатационные расходы, значительный расход реагентов на регенерацию фильтров (серная кислота и едкий натр) и, как следствие этого, большой объем сточных вод и т.д. Таким образом, при невозможности полномасштабной реконструкции⁴ подобных ВПУ, встает вопрос необходимости оптимизации работы ВПУ обессоливания с целью снижения эксплуатационных расходов и объемов сточных вод.

В данной статье представлено описание расчет такой схемы обессоливания. На рис. 2 и 3 показан сайт (<http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/VPU/VPU-Osv-H1-A1-H2-D-A2.xmcd>) с частью расчета (для примера взят ОН-анионитный фильтр второй ступени А₂). Остальные ступени ионирования, а также механические фильтры рассчитываются по аналогичной методике.

режиме повышенного давления, что может привести к ее повреждению. Если же декарбонизатор установить после фильтра А₁, часть уголекислоты (в виде НСО₃⁻) будет задерживаться на фильтре А₂, что вызовет дополнительный расход щелочи на регенерацию А₂, но при этом фильтр Н₁ будет работать в менее «экстремальном» режиме.

⁴ Реконструкции ВПУ очень часто финансируются по остаточному принципу, а в условиях экономического кризиса о них вообще забывают до «лучших времен».

<http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/VPU/VPU-Osv-H1-A1-H2-D-A2.xmcd>

Расчет обессоливания по схеме

"Механический фильтр-Н₁-А₁-Н₂-Д-А₂"

Производительность ступени А₂, м³/ч

Расчет анионитных фильтров 2-й ступени

Удельный расход NaOH на регенерацию, кг/м³ смолы

Удельный расход воды на взрыхление, л/(с м²)

Время взрыхления фильтра, мин

Концентрация раствора NaOH при регенерации, %

Концентрация SiO₃ в воде, поступающей на фильтр, мг/л

Концентрация CO₂ в воде, поступающей на фильтр, мг/л

Концентрация Cl⁻ в воде, поступающей на фильтр, мг-экв/л

Концентрация SO₄²⁻ в воде, поступающей на фильтр, мг-экв/л

Удельный расход воды на отмывку ионита м³ воды / м³ смолы

Рабочая обменная емкость, г-экв/м³

Скорость пропуска регенерационного раствора, м/ч

Скорость отмывки анионита, м/ч

Рекомендуемая скорость фильтрования, м/ч

Минимальное число фильтров

Рис. 2. Ввод исходных данных для фильтра А₂

Расчет схемы начинается с «хвоста» установки. Пользователь задает производительность ВПУ по обессоленной воде и другие необходимые исходные величины. Далее производится последовательный расчет А₂-Н₂-А₁-Н₁-М-Осветлитель⁵. При расчете каждой ступени пользователь вводит различные параметры работы фильтра: удельные

⁵ А – ОН-анионитный фильтр, Н – Н-катионитный фильтр, нижний индекс – номер ступени, М – механический (осветлительный) фильтр.

расходы воды и реагентов на регенерацию, время операций, концентрации удаляемых примесей на входе в фильтр, рабочую обменную емкость фильтрующего материала⁶, рекомендуемую скорость фильтрования и минимальное число фильтров в ступени.

⁶ Рабочая обменная емкость фильтрующего материала не является независимой исходной величиной. Она как минимум зависит от состава воды, поступающей на фильтр, и условий регенерации (прямоток-противоток) и удельного расхода регенеранта. На сайте <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/1/Dow> собраны сетевые расчеты обменной емкости смол фирмы Dow Chemical (<http://www.dow.com>) в зависимости от условий эксплуатации [4].

Параметры группы фильтров A_2	$d_{A2} = 1 \text{ м}$ $h_{A2} = 1.5 \text{ м}$ $n_{A2} = 2 + 1$ в резерве
Площадь фильтрования одного фильтра	$f_{A2} := \frac{\pi \cdot d_{A2}^2}{4} = 0.785 \text{ м}^2$
Площадь фильтрования всех фильтров	$F_{A2} := \frac{\pi \cdot d_{A2}^2}{4} \cdot n_{A2} = 1.571 \text{ м}^2$
Действительная скорость фильтрования	$w_{A2} := \frac{Q}{F_{A2}} = 37.815 \text{ м/ч}$
Ионная нагрузка	$C := \frac{C_{\text{SiO}_3}}{76.1 \frac{\text{г}}{\text{г-ЭКВ}}} + \frac{C_{\text{CO}_2}}{44 \frac{\text{г}}{\text{г-ЭКВ}}} + C_{\text{Cl}} + C_{\text{SO}_4} = 0.1212 \text{ мг-ЭКВ/дм}^3$
Продолжительность фильтрцикла	$\tau_{A2} := \frac{f_{A2} \cdot h_{A2} \cdot E_{\text{раб.}A2} \cdot n_{A2}}{Q \cdot C} = 2.728 \text{ сутки}$
Объем воды, прошедшей за 1 фильтроцикл	$\Sigma V_{A2} := Q \cdot \tau_{A2} = 3889.01 \text{ м}^3$
Суточное число регенераций	$m_{A2} := \frac{n_{A2}}{\tau_{A2}} = 0.733 \frac{1}{\text{сутки}}$
Расход NaOH на регенерацию	$\sigma_{A2} := f_{A2} \cdot h_{A2} \cdot b_{A2} = 117.81 \text{ кг}$
Суточный расход щелочи	$\sigma_{\text{сут.}A2} := \sigma_{A2} \cdot m_{A2} = 86.371 \frac{\text{кг}}{\text{сутки}}$
Расход воды на взрыхление одного фильтра	$V_{\text{взр.}A2} := f_{A2} \cdot i_{A2} \cdot \tau_{\text{взр.}A2} = 1.414 \text{ м}^3$
Расход воды на регенерацию одного фильтра	$V_{\text{рег.}A2} := \frac{\sigma_{A2}}{C_{\text{рег.}A2} \cdot \rho} = 2.945 \text{ м}^3$
Расход воды на отмывку одного фильтра	$V_{\text{отм.}A2} := f_{A2} \cdot h_{A2} \cdot a_{A2} = 10.603 \text{ м}^3$
Суммарный расход воды на регенерацию одного фильтра	$V_{\text{сум.}A2} := V_{\text{взр.}A2} + V_{\text{рег.}A2} + V_{\text{отм.}A2} = 14.962 \text{ м}^3$
Расход воды на собственные нужды	$q_{\text{сн.}A2} := V_{\text{сум.}A2} \cdot m_{A2} = 0.457 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$
Время на пропуск регенерационного раствора	$\tau_{\text{рег.}A2} := \frac{V_{\text{рег.}A2}}{f_{A2} \cdot w_{\text{рег.}A2}} = 45 \text{ мин}$
Время на отмывку фильтра	$\tau_{\text{отм.}A2} := \frac{V_{\text{отм.}A2}}{f_{A2} \cdot w_{\text{отм.}A2}} = 162 \text{ мин}$
Время на регенерацию одного фильтра	$\tau_{\text{сум.рег.}A2} := \tau_{\text{взр.}A2} + \tau_{\text{рег.}A2} + \tau_{\text{отм.}A2} = 217 \text{ мин}$

Рис. 3. Программированный расчет рабочих характеристик фильтров A_2

Алгоритм выбора фильтров был подробно описан в [2]. После определения диаметра и количества производится последовательный расчет параметров работы и регенерации фильтров, результаты которого для A_2 представлены на рис. 2. Для каждой ступени фильтров

определяются фильтроцикл, действительная скорость фильтрования, число регенераций в сутки, расход реагентов и воды на собственные нужды (общий и по всем операциям регенерации фильтра). Значение расхода на собственные нужды учитывается при определении производительности предыдущей ступени.

Если читатель сравнит формулы, приведенные в книге [3], где описан данный расчет, то он заметит некоторые отличия:

$T_{\text{отм}} := \frac{60 \cdot V_{\text{отм}}}{f \cdot \omega_{\text{отм}}}$	Формула в книге
$T_{\text{отм}} := \frac{V_{\text{отм}}}{f \cdot \omega_{\text{отм}}}$	Формула в расчете

Это связано с тем, что инженерный калькулятор Mathcad, в среде которого велся расчет, умеет автоматически пересчитывать единицы измерения. При ручном же расчете (а именно он описан в [3]), такой пересчет приходится делать вручную, помня о том, что в часе 60 минут (см. первую формулу).

После расчета основного оборудования ВПУ, производится расчет схемы нейтрализации сточных вод данной установки (см. рис. 4-5). Пользователь вводит только концентрации товарных щелочи и кислоты и их плотность, а программа, на основе предыдущих данных, рассчитывает объем склада хранения (по нормам на 30 суток) и баков-мерников для регенерации фильтров. Также определяется характер сточных вод (рис. 4).

Суточный расход 100%-ной кислоты на регенерацию катионита в фильтрах Н₁, Н₂ $\sigma_{K,сут} := \sigma_{сут,Н2} + \sigma_{сут,Н1} = 469.026 \frac{\text{кг}}{\text{сутки}}$

Вместимость баков-мерников серной кислоты

$\rho_K := 1.824 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}$ $C_K := 92 \%$

$V_{\text{БМК}} := \frac{1.25\sigma_{K,сут}}{C_K \rho_K} = 0.349 \frac{\text{м}^3}{\text{сутки}}$

Вместимость цистерн хранения серной кислоты из расчета 30-ти суточного запаса $V_{\text{МЕСК}} := \frac{30\sigma_{K,сут}}{C_K \rho_K} = 8.385 \frac{\text{м}^3}{\text{сутки}}$

Суточный расход 100%-ного едкого натра на регенерацию анионита в фильтрах ОН1, ОН2 $\sigma_{щ,сут} := \sigma_{сут,А2} + \sigma_{сут,А1} = 333.878 \frac{\text{кг}}{\text{сутки}}$

Вместимость баков-мерников едкого натра определяется из расчета с запасом 25% суточного расхода

$\rho_{щ} := 1.469 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}$ $C_{щ} := 42 \%$

$V_{\text{БМЩ}} := \frac{1.25\sigma_{щ,сут}}{C_{щ} \rho_{щ}} = 0.67644 \frac{\text{м}^3}{\text{сутки}}$ $E_{\text{раб,Н2}} = 400 \frac{\text{г-экв}}{\text{м}^3}$

Вместимость цистерн хранения едкого натра из расчета 30-ти суточного запаса $V_{\text{МЕСЩ}} := \frac{30\sigma_{щ,сут}}{C_{щ} \rho_{щ}} = 16.234 \frac{\text{м}^3}{\text{сутки}}$

Рис. 4. Программированный расчет схемы нейтрализации

Избыток 100%-ной серной кислоты в сточных водах за 1 сутки $I_K := \frac{\sigma_{K,сут} - \sigma_{KСТЕХ}}{\Delta_K} = 4.389 \frac{\text{кг-экв}}{\text{сутки}}$

Суммарный избыток кислоты на регенерацию катионита по сравнению со стехиометрическим $n_K := \frac{\sigma_{K,сут}}{\sigma_{KСТЕХ}} = 1.879$

Избыток 100%-ного едкого натра в сточных водах за 1 сутки, кг-экв $I_{щ} := \frac{\sigma_{щ,сут} - \sigma_{щСТЕХ}}{\Delta_{щ}} = 4.214 \frac{\text{кг-экв}}{\text{сутки}}$

Суммарный избыток едкого натра на регенерацию анионита по сравнению со стехиометрическим: $n_{щ} := \frac{\sigma_{щ,сут}}{\sigma_{щСТЕХ}} = 2.02$

Итак, в сточных водах ВПУ имеется избыток = "кислоты" $I_K - I_{щ} = 0.175 \frac{\text{кг-экв}}{\text{сутки}}$

Рис. 5. Определение характера сточных вод

Как уже было сказано выше, большинство действующих ВПУ в России работают по подобной схеме и иногда эксплуатационным персоналом станции, по незнанию или из-за недостатка квалификации, при проведении регенерации неоправданно завышаются расходы

воды и реагентов, время операций и др. Все это ведет к серьезному увеличению эксплуатационных расходов в связи с резким взлетом цен на реагенты в последние годы.

Используя описанную в данной статье методику, можно оптимизировать работу «классической» схемы обессоливания или ее часть, с целью уменьшения расхода реагентов на регенерацию фильтров и расхода воды на собственные нужды, что в свою очередь позволит снизить объем сточных вод.

При проектировании вновь сооружаемых ВПУ можно использовать часть описанного расчета, например, при расчете комбинированных схем водоподготовок, где совмещены мембранные и ионообменные технологии (ступень Н-ОН-фильтров после обратного осмоса).

Преимущество расчетов, показанных на рис. 2-5, в открытости. Посетитель сайта, показанного на рис. 2, может не только изменить исходные данные и увидеть новый ответ, но и имеет возможность полностью контролировать расчет, где открыты все формулы и выводятся результаты работы по ним. Это позволяет легко модернизировать расчет с учетом новых схем водоподготовки. Скачать данный расчет и открыть в среде инженерного калькулятора Mathcad можно с сайта <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/VPU-Osv-H1-A1-H2-D-A2.xmcdz>.

Литература:

1. Очков В.Ф. Программированный расчет известкования и коагуляции воды // Водоочистка, Водоподготовка, Водоснабжение, №7 (19), 2009
2. Очков В.Ф. Программированный выбор фильтров // Водоочистка, Водоподготовка, Водоснабжение, №5 (29), 2010
3. Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. Водоподготовка в энергетике. М.: Изд-во МЭИ, 2003
4. Очков В.Ф., Чудова Ю.В. Знаменский В.Е. Живые» диаграммы по свойствам ионов // Водоочистка, Водоподготовка, Водоснабжение, №5 (29), 2010