

**С. П. Высоцкий, д-р техн. наук профессор, Ф. В. Недопекин, д-р техн. наук профессор,
М. В. Коновальчик**

**Автомобильно-дорожный институт ГВУЗ
«Донецкий национальный технический университет», г. Горловка**

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ СБРОСА СТОКОВ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Определены показатели использования солнечных испарителей для уменьшения объемов сбросов засоленных стоков. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования аппаратов идеального вытеснения для упаривания высокоминерализованных стоков. Разработано и обосновано применение испарительного аппарата для высокоминерализованных стоков обратноосмотических установок. Получена математическая зависимость степени упаривания от толщины слоя воды в солнечном испарителе, режим работы которого приближается к идеальному вытеснению.

***Ключевые слова:** идеальное вытеснение, солнечный испаритель, обратный осмос, высокоминерализованные стоки, реактор, ионный обмен*

Постановка проблемы

Промышленные предприятия энергетической и химической отраслей промышленности являются потребителями большого количества поверхностных вод. Воды используются для покрытия потерь конденсата в технологических циклах генерации энергии и на подпитку циркуляционных систем охлаждения конденсаторов турбин. На химических предприятиях поверхностные воды используются на установках приготовления обессоленной воды для технологических нужд и как теплоноситель для отвода тепла реакций.

В процессе обессоливания воды в поверхностные водоемы сбрасываются нейтрализованные регенерационные растворы, которые вызывают засоление поверхностных водных источников и ухудшают или вообще исключают возможность использования названных источников. Это привело к тому, что в техногенных регионах поверхностные водные источники превратились в сточные канавы. Качество воды в них ухудшилось настолько, что вода стала непригодной к использованию не только для питьевых целей, но даже для полива сельскохозяйственных угодий.

В ряде стран с развитой экономикой (США, Германия) повсеместно внедряется концепция нулевого сброса загрязнений (ZDL). Эта концепция основана на применении возобновимых источников энергии для упаривания стоков и повторного использования чистой воды. В ряде стран в качестве возобновимого источника энергии используется солнечная радиация.

Задачи исследования

Задачей исследования была оценка путей исключения сброса засоленных стоков путем использования солнечной радиации в нашей стране. При оценке возможности использования такого решения необходимо определить объем стоков, величину солнечной радиации и интенсивность испарения воды в зависимости от величины радиации.

© Высоцкий С. П., Недопекин Ф. В., Коновальчик М. В., 2012

Основная часть работы

В современных условиях на большей части водоподготовительных установок (ВПУ) используются ионитные технологии обессоливания воды. При этом ионитные фильтры включаются в работу по схеме технологических цепочек. Это позволяет существенно сократить потребление поверхностной воды за счет рециркуляции большей части отмывочных вод на вход системы очистки воды при достижении показателей качества близких к качеству исходной воды. На современных ВПУ расход воды на собственные нужды при отложенном режиме работы фильтров и использовании рециркуляции составляет 10–12 %. Очевидно, что для внедрения концепция «нулевого сброса» необходимо стремиться к максимальному сокращению объема сточных вод.

Для современной тепловой электростанции, на которой установлены энергетические блоки сверхкритических параметров 300 МВт при расходе воды на восполнение потерь конденсата 2 % производительность ВПУ составит:

$$Q = G_k \cdot p \cdot 10^{-2} \cdot n_k = 950 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \approx 100, \text{ т/ч}, \quad (1)$$

где G_k – производительность котлов по пару, 950 т/ч;

p – потери конденсата на ТЭС, 2 %;

n_k – число котлов, шт.

Соответственно, расход сточных вод q_{cm} составит 10–12 т/ч (10–12 %).

Концентрация солей в сточных водах составит в соответствии с положениями, разработанными в [1]:

$$C_k = \frac{C_0 \cdot (d + 1)}{q_k}, \text{ мг} \cdot \text{экв/кг}, \quad (2)$$

где C_0 – солесодержание исходной воды, поступающей на ионитный блок обессоливания, мг·экв/л;

d – удельный расход регенеранта на регенерацию водород-катионитных фильтров, г·экв/г·экв (принимается удельный расход регенеранта на регенерацию водород-катионитных фильтров, т. к. сумма удаляемых реагентным методом катионов на величину щелочности воды больше суммы анионов, а для нейтрализации избыточной кислоты применяется известь).

При концентрации солей в исходной воде 10–12 мг·экв/кг и удельном расходе регенеранта 2,5 г·экв/г·экв концентрация солей в стоках составит:

$$C_k = \frac{12 \cdot (2,5 + 1)}{0,12} = 350, \text{ мг} \cdot \text{экв/кг}.$$

Эта величина примерно в 1,5 раза ниже минерализации воды Черного моря.

Из приведенных данных видно, что концентрирования солей в сточных водах увеличивается, а объем стоков соответственно уменьшается при сокращении расхода воды на собственные нужды водоподготовительной установки. Так рациональная организация режимов регенерации фильтров по принципу технологических цепочек обеспечивает снижение доли собственных нужд до 0,07–0,12. В аналогичных условиях, при параллельно-точной работе фильтров в ионитных схемах обессоливания (режим включения фильтров по принципу «гребенка»), доля расхода воды на собственные нужды составляет 0,25–0,3 (для вод повышенной минерализации).

Для определения удельной производительности «солнечного» упаривания при различной интенсивности солнечной радиации была проведена серия экспериментов при использовании специально изготовленного испарителя. Глубина нагреваемой в испарителе воды поддерживалась 50–60 мм. Интенсивность солнечной радиации измерялась прибором Пиранометр М-80 м (для измерения суммарной и рассеянной радиации) и Актинометром термоэ-

лектрическим М-3 (Савинова–Янишевского для измерения прямой радиации). Зависимость производительности испарителя от интенсивности радиации приведена на рисунке 1.

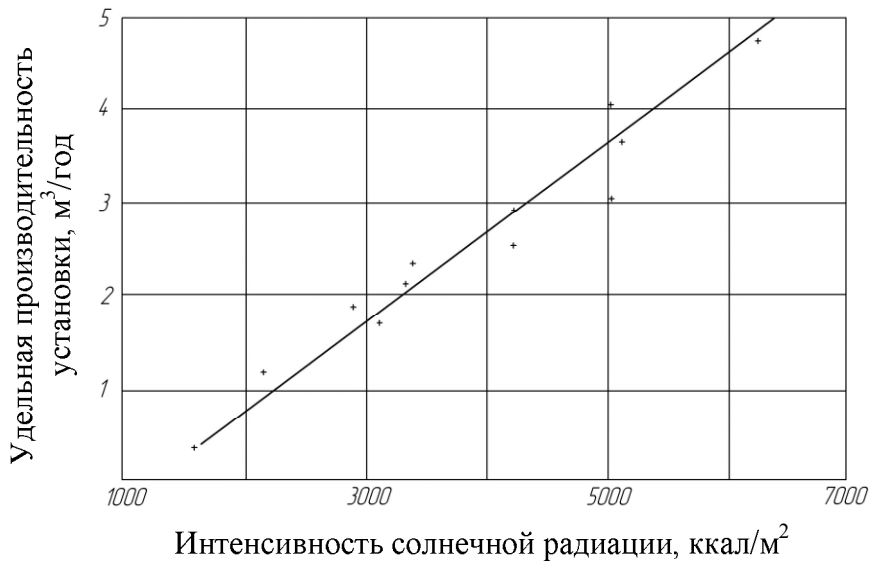


Рисунок 1 – Зависимость производительности горизонтального солнечного опреснителя парникового типа от интенсивности солнечной радиации

Для оценки возможности применения «солнечного» упаривания по справочным данным найдено годовое значение суммарной радиации (усредненное по многолетним данным) на территории Украины (рисунок 2).

Из приведенных данных для широты Донецкой области суточная суммарная радиация составит $4660 \text{ (МДж)} / 630 = 1,11 \cdot 10^6 / 360 = 3083 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{сутки}$.

Для приведенной выше производительности ВПУ при упаривании воды приблизительно до пределов растворимости солей требуется весьма большая площадь упаривания, достигающая 13 га.

Следует отметить, что этот подход не решает проблем продувки циркуляционной системы. Нулевой сброс загрязнителей в последнем случае может быть решен за счет применения воздушно-конденсационных систем.

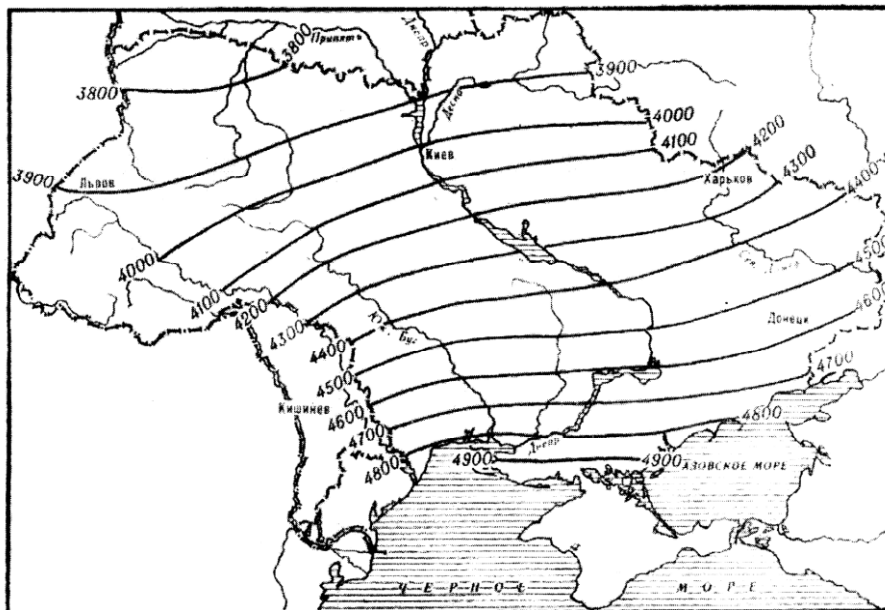


Рисунок 2 – Годовое распределение многолетних значений суммарной радиации (в МДж/м²)

При испарении происходит концентрирование раствора, обеспечивающее приближение концентрации солей к насыщенному состоянию и выпадение кристаллов солей. Чем выше температура воды, тем интенсивнее происходит испарение, а значит концентрирование стоков. Применение этого метода для концентрации стоков особенно целесообразно в теплых южных районах нашей страны, в теплые периоды года, в дневное время.

Очень важно подобрать такую конструкцию установки упаривания, при которой достигался бы максимальный эффект при оптимальных размерах установки. Наиболее целесообразной является установка нагревания и упаривания высокоминерализованных стоков, работа которой приближается к аппарату идеального вытеснения.

Аппарат (реактор) идеального вытеснения по сравнению с аппаратом идеального смешения характеризуется равномерным движением потока жидкости по всему живому сечению аппарата при отсутствии продольного перемешивания при равномерном распределении субстанции в направлении, перпендикулярном движению. В этом случае время пребывания всех частиц у аппарата одинаково и равняется отношению объема к объемному расходу [2].

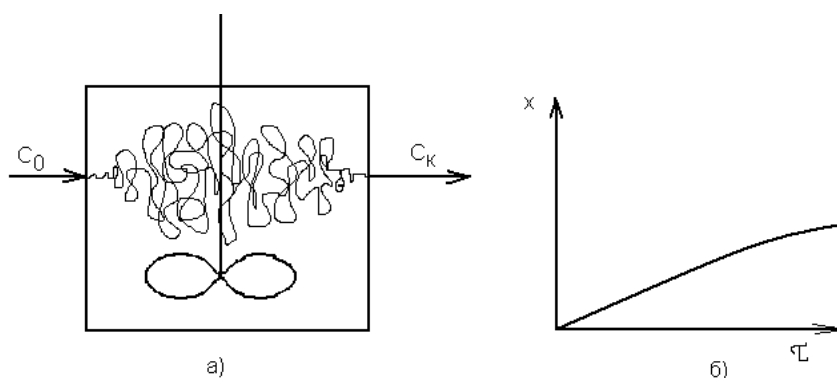


Рисунок 3 – Схема потока (а) и зависимость выхода (количества упаренного раствора или степени его концентрирования) (б) в реакторе полного смешения

В аппаратах химической технологии в описании процессов реакций часто используют критерий Дамкелера, который представляет собой отношение количества вещества, образующегося во время реакции, к количеству вещества, переносимого потоком, и выражается следующей формулой:

$$Da_1 = \frac{v_i \cdot r}{c} \cdot \bar{t}, \quad (3)$$

где v_i – стехиометрический коэффициент;

r – скорость реакции.

В нашем конкретном случае критерий Дамкелера представляет собой отношение количества упаренной жидкости к общему количеству раствора, переносимому потоком.

Поскольку процесс упаривания может рассматриваться как реакция первого порядка, то ход процесса определяется уравнением (рассматриваются однонаправленные реакции первого порядка) [3]:

$$x = 1 - \frac{1}{1 + Da_1} = 1 - \frac{1}{1 + r/\tau}, \quad (4)$$

где x – выход в реакторе;

Da_1 – первый критерий Дамкелера;

τ – среднее время пребывания в реакторе.

Проведем сравнение эффективности моделей идеального смешения и идеального вытеснения на примере реакции первого порядка (по времени пребывания) [2].

Для модели идеального вытеснения:

$$\bar{t}_B = -\ln(1-x)/k. \quad (5)$$

Для модели идеального смешения:

$$\bar{t}_3 = x/k(1-x). \quad (6)$$

Разделив уравнение (6) на уравнение (5) найдем:

$$\frac{\bar{t}_3}{\bar{t}_B} = -\frac{x}{(1-x)\ln(1-x)}. \quad (7)$$

Учитывая, что время пребывания прямо пропорционально объему реактора, найдем, что необходимый объем реактора идеального смешивания всегда будет больше объема реактора идеального вытеснения.

Согласно [3] выход для аппарата составленного из каскадов составляет:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} x_{\text{каскад}} = x_{\text{зр}} = 1 - e^{-\frac{kV_R}{B}} = 1 - e^{-k\bar{t}}. \quad (8)$$

Такой же выход, как из реактора идеального вытеснения, можно получить из бесконечного ряда последовательно соединенных малых реакторов смешивания (рисунок 4). Чем больше реакторов смешивания включено последовательно, тем более будет приближение к реактору вытеснения.

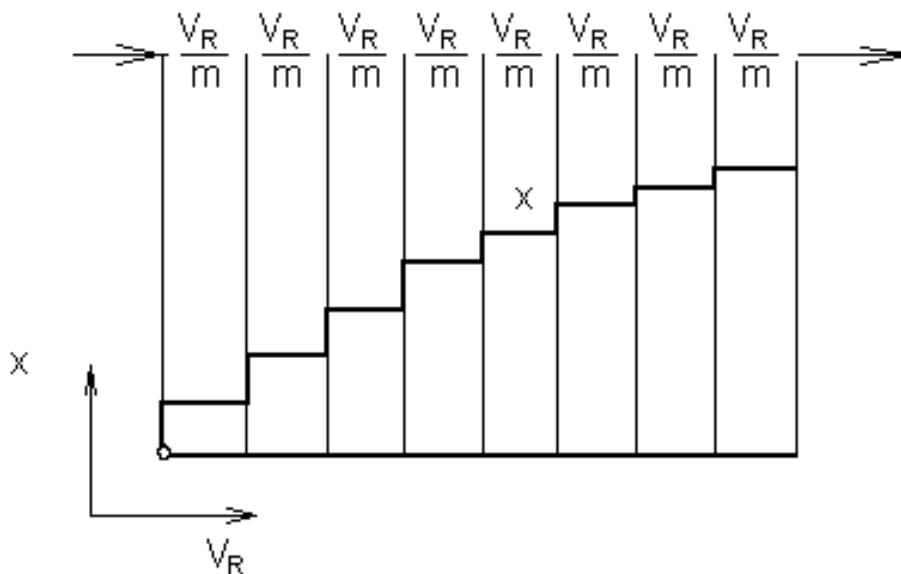


Рисунок 4 – Изменение выхода в каскаде реакторов смешения, которые составлены из m элементов одинакового объема

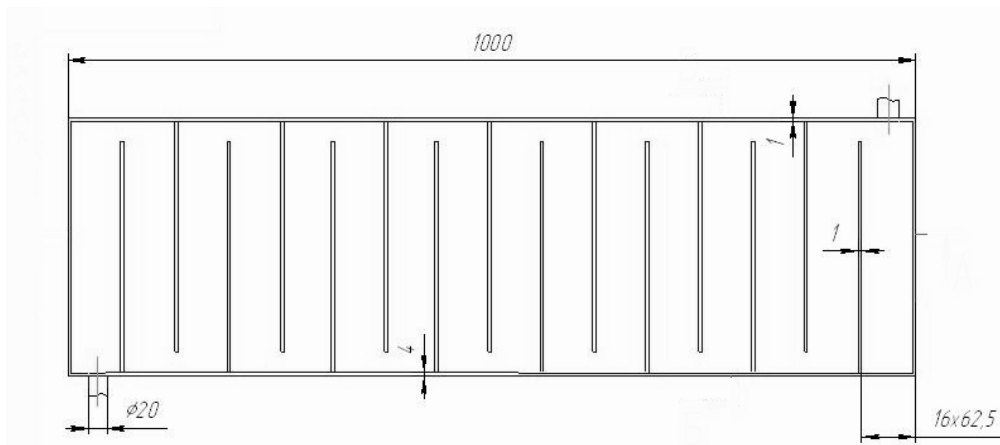


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки

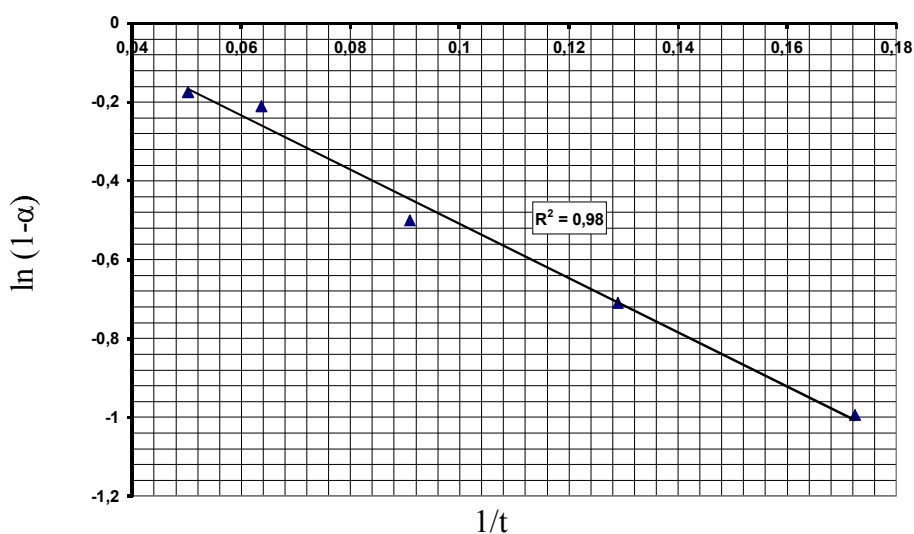


Рисунок 6 – Зависимость степени упаривания от толщины слоя воды

Зависимость степени упаривания от толщины слоя упаренной воды имеет следующий вид:

$$\alpha = 1 - \exp\left(0,19 - \frac{7,04}{t}\right). \quad (9)$$

Учитывая то, что время пребывания прямо пропорционально объему реактора, можно определить, что необходимый объем реактора идеального смешения будет больше объема реактора идеального вытеснения (таблица 1). Соответственно при равных объемах реактора степень превращения (упаривания) в реакторе идеального вытеснения всегда будет выше, чем в реакторе идеального смешения.

Таблица 1 – Объемы реакторов при упаривании рассолов

Реактор	Выход, x			
	0,50	0,75	0,90	0,99
Вытеснение	0,91	1,21	1,67	3,03
Смешение	1,32	2,58	6,52	65,15

Таким образом, установка упаривания стоков на основе реактора идеального вытеснения будет эффективнее, чем установка на основе идеального смешения (при одинаковых объемах, внешних размерах). Получение реактора идеального вытеснения возможно на основе реакторов идеального смешения, которые включены последовательно в каскад.

Выводы

Для исключения сбросов засоленных стоков в поверхностные водоемы после водоподготовительных установок промышленных предприятий целесообразно использовать солнечную энергию. Однако при этом необходимо обеспечить максимальное сокращение объема стоков, например, за счет включения фильтров в ионитных схемах обессоливания по принципу технологических цепочек. Увеличение степени концентрирования достигается путем секционирования бассейна упаривания стоков и приближения режима работы установки к реактору идеального вытеснения.

Список литературы

1. Баранов Д. А. Процессы и аппараты: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Д. А. Баранов, А. М. Кутепов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 304 с.
Baranov D. A. Protsessy i apparaty: uchebnik dlya stud. uchrezhd. sred. prof. obrazovaniya (Processes and devices: coursebook for educational establishments of secondary vocational training) / D. A. Baranov, A. M. Kutepov. – М.: Izdatelskiy tsentr “Akademiya”, 2004. – 304 s.
2. Бенедек П. Научные основы химической технологии / П. Бенедек, А. Ласло. – Издательство «Химия», Ленинградское отделение, 1970. – 376 с.
Benedek P. Nauchnyye osnovy khimicheskoy tekhnologii (Scientific bases of chemical technology) / P. Benedek, A. Laslo. – Izdatelstvo “Khimiya”, Leningradskoye otdeleniye, 1970. – 376 s.
3. Высоцкий С. П. Выбор путей решения проблемы сброса стоков водоподготовительных установок промышленных предприятий [Электронный ресурс]: материалы V научно-практичної конференції «Донбас-2020» «Перспективи розвитку очима молодих вчених» / С. П. Высоцкий, М. В. Коновальчик. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – 1 електрон. опт. диск (CD); 12 см. – Систем. вимоги: Pentium; 32 MB RAM; Windows 95, 98, 2000, XP; MS Word 97–2000. – С. 305–309.
Vysotskiy S. P. Vybory putey resheniya problemy sbrosa stokov vodopodgotovitelnykh ustanovok promyshlennykh predpriyatiy [Elektronnyi resurs]: materialy V naukovopraktychnoi konferentsii “Donbas-2020” “Perspektyvy rozvytku ochyma molodykh vchenykh” (The choice of the ways of problem solving of effluent discharge of water treatment systems of industrial enterprises [Electronic resource]: proceedings of V research and practice conference “Donbas-2020” “The prospects for further development as viewed by young scientists”) / S. P. Vysotskiy, M. V. Konovalchik. – Donetsk: DonNTU, 2010. – 1 elektron. opt. dysk (CD); 12 sm. – System. vymogy: Pentium; 32 MB RAM; Windows 95, 98, 2000, XP; MS Word 97–2000. – S. 305–309.
4. Висоцький С. П. Знесолення води із використанням зворотноосмотичної технології при різній конфігурації включення апаратів / С. П. Висоцький, Г. В. Фаткуліна, М. В. Коновальчик // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник. – Горлівка: АДІ ДонНТУ, 2005. – № 1. – С. 62–67.
Vysotskiy S. P. Znesolennia vody iz vykorystanniam zvorotnoosmotychnoi tekhnologii pry rizniy konfiguratsii vkluchennia aparativ (Water demineralization using the reverse osmotic technology at different switching devices arrangement) / S. P. Vysotskiy, G. V. Fatkulina, M. V. Konovalchik // Visti Avtomobilno-dorozhnyogo instytutu: naukovovyrobnichyi zbirnyk. – Gorlivka: ADI DonNTU 2005. – № 1. – S. 62–67.
5. Высоцкий С. П. Пути совершенствования технологий очистки воды: тезисы доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Перший Всеукраїнський з'їзд екологів» (Вінниця, 4–7 жовт. 2006 р.) / С. П. Высоцкий, А. В. Фаткуліна, М. В. Коновальчик. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 197.
Vysotskiy S. P. Puti sovershenstvovaniya tekhnologiy ochistki vody: tezy dopovidey Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii “Pershyi Vseukrainskyi zizd ekologiv” (Vinnytsia, 4–7 zhovt. 2006 r.) (The ways of water purification technologies improvement: reports talking points of the International research and practice conference “The First All Ukrainian conference of ecologists” (Vinnytsia, October 4–7, 2006) / S. P. Vysotskiy, A. V. Fatkulina, M. V. Konovalchik. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – S. 197.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Є. О. Воробйов, АДІ ДонНТУ.

Стаття надійшла до редакції 22.10.12

С. П. Висоцький, Ф. В. Недопекін, М. В. Коновальчик
Автомобільно-дорожній інститут ДВНЗ
«Донецький національний технічний університет», м. Горлівка

Шляхи вирішення проблеми скиду стоків водопідготовчих установок теплових електростанцій

Визначено показники використання сонячних випарників для зменшення обсягів скидів засолених стоків. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність використання апаратів ідеального витіснення для упарювання високомінералізованих стоків. Розроблено та обґрунтовано застосування випарного апарату для високомінералізованих стоків зворотноосмотичних установок. Отримано математичну залежність ступеня упарювання від товщини шару води в сонячному випарнику, режим роботи якого наближається до ідеального витіснення.

ІДЕАЛЬНЕ ВИТИСНЕННЯ, СОНЯЧНИЙ ВИПАРНИК, ЗВОРТНИЙ ОСМОС, ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНІ СТОКИ, РЕАКТОР, ІОННИЙ ОБМІН

S. P. Vysotskiy, F. V. Nedopekin, M. V. Konovalchik
Automobile Transport and Highway Engineering Institute of
Donetsk National Technical University, City of Gorlovka

The Ways of Problem Solving of Effluent Discharge of Water Treatment Equipment of Heat Power Plants

The possible way of problem solving of mineralized effluents utilization and zero discharge concept implementation (ZDL) has been suggested. The analysis of ways of salinized effluents elimination with the help of evaporator apparatus operating by means of solar energy has been done. The annual distribution of long-term values of total radiation on the territory of Ukraine has been analyzed. More favourable regions for solar evaporator use have been specified. The solar evaporator use rate for salinized effluents volume reduction has been determined. The expediency of ideal displacement apparatus use for highly mineralized effluents evaporation has been theoretically proved and experimentally confirmed. The way of use of evaporator apparatus for highly mineralized effluents of reverse osmosis plant has been developed and proved. The mathematical dependence of evaporation degree on water depth in solar evaporator operation mode of which is close to ideal displacement has been obtained. The given dependence allows to forecast the optimum ratio of efficiency and concentration (evaporation) speed of mineralized effluents.

IDEAL DISPLACEMENT, SOLAR EVAPORATOR, REVERSE OSMOSIS, HIGHLY MINERALIZED EFFLUENTS, REACTOR, ION EXCHANGE, CONCENTRATION EFFLUENTS