

С. П. Высоцкий, д-р техн. наук¹, Н. В. Цветкова²

1 – ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, 2 – Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

ОПРЕСНЕНИЕ ВОДЫ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ОСМОСА

Система опреснения воды методом обратного осмоса требует непрерывной подачи энергии, что достигается с помощью применения фотоэлектрических преобразователей. Однако данный метод носит прерывистый характер. Потребление энергии установкой обратного осмоса зависит от расхода чистой воды (пермиата) и давления в системе, которые необходимо настраивать в соответствии с максимальной мощностью, обеспечиваемой фотоэлектрическими матрицами. Предлагаются новые параметры настройки системы обратного осмоса путем изменения положения клапана на стороне рассола.

Ключевые слова: система обратного осмоса, максимальная мощность, опреснение воды, возобновляемая энергия, фотоэлектрическая батарея

Введение

Дефицит пресной воды вызывает необходимость исследований и разработок в области опреснения морской и солоноватой воды на основе возобновляемых источников энергии [1]. Для корректной работы опреснительной установки обратного осмоса (ОО) необходимо поддержание соответствующих заданных значений работы оборудования, а также необходимо найти такой режим его работы, при котором обеспечивается снижение энергопотребления опреснительной установки ОО при изменчивости минерализации питательной воды и входной мощности фотоэлектрического преобразователя.

Фотоэлектрический обратный осмос (ФОО) считается одним из наиболее перспективных методов обессоливания воды с использованием возобновляемых источников энергии. В процессе обработки воды методом ОО исходная вода под давлением протекает через мембрану, в результате чего происходит отделение растворенного вещества от солевого раствора. Для повышения эффективности использования системы фотоэлектрического обратного осмоса применяются различные алгоритмы.

На сегодняшний день проявляется интерес к интеграции в процесс обратного осмоса фотоэлектрических преобразователей, что позволит минимизировать воздействие на окружающую среду, повысить эффективность процесса, а также снизит удельное энергопотребление.

Цель исследования: оптимизация системы управления установкой обратного осмоса с использованием в качестве источника питания фотоэлектрического преобразователя.

Изложение основного материала

Система обратного осмоса с использованием источника питания в виде фотоэлектрического преобразователя состоит из блока генерации энергии и блока опреснения. Фотоэлектрический блок состоит из панелей, на которых при воздействии солнечного излучения вырабатывается электрический ток. Система опреснения методом ОО состоит из насоса высокого давления, мембранного блока и клапана регулирования давления на стороне рассола (ретентата). Раствор под давлением подается на мембрану, где происходит разделение потока на чистую воду (пермиат) и ретентат. Клапан на стороне ретентата используется для регулирования количества сбрасываемого ретентата и для управления давлением в контуре ретентата. На рисунке 1 представлена схема обратного осмоса с применением фотоэлектрических

преобразователей. Электрическая энергия, производимая фотоэлектрической панелью, является функцией инсоляции и температуры модуля.

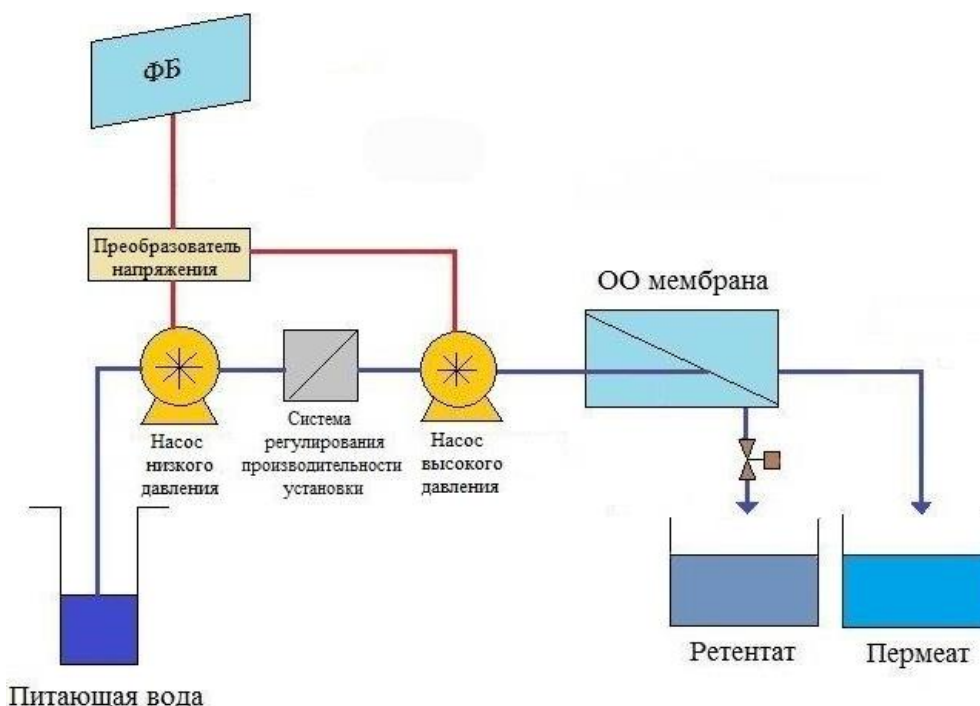


Рисунок 1 – Компоненты обратноосмотической системы обессоливания воды с использованием источника питания – фотоэлектрического преобразователя

Предполагается, что система обратного осмоса с использованием источника питания в виде фотоэлектрического преобразователя работает непосредственно от панели фотоэлектрических батарей (ФБ), а скорость потока ретентата контролируется клапаном. Система обратноосмотического обессоливания воды представлена на рисунке 2, где P_0 , Q_0 и C_0 , входное давление, расход и концентрация соли. Давление позволяет увеличить скорость потока пермиата, проходящего через мембрану. Повышение давления на стороне ретентата обозначается P_p , расход и концентрация ретентата – Q_p и C_p , расход пермиата Q_n и его концентрация C_n . Осмотическое давление является функцией температуры и концентрации соли в исходной воде [2, 3].

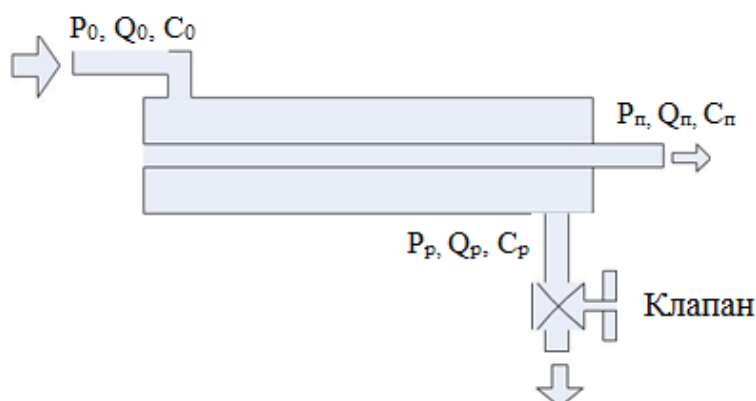


Рисунок 2 – Система обратноосмотического обессоливания воды

Рассмотрим изменение давления и расхода ретентата за счет изменения положений клапана:

Изменение давления в сосуде высокого давления, обратноосмотическом элементе, имеет следующий вид:

$$P_p = P_0 - D_{P_m}, \quad (1)$$

где D_{P_m} – падение давления вдоль мембраны.

Расход ретентата определяется как:

$$Q_p = K_v \varphi \cdot \sqrt{(P_p - P_{атм})}, \quad (2)$$

где φ – степень открытия клапана по шкале от 0 до 1;

K_v – коэффициент расхода ретентата через регулирующий клапан;

$P_{атм}$ – атмосферное давление.

Рассмотрим уравнения процессов в обратноосмотическом модуле:

Массовый баланс расходов воды через мембраны определяется по выражению:

$$r_0 Q_0 = r_p Q_p + r_{п} Q_{п}. \quad (3)$$

Пренебрегая изменением плотности воды, упрощаем уравнение (3):

$$Q_0 = Q_p + Q_{п}. \quad (4)$$

Уравнение солевого баланса имеет вид:

$$Q_0 C_0 = Q_p C_p + Q_{п} C_{п}. \quad (5)$$

Из (4) и (5)

$$Q_{п} = Q_p \frac{C_p - C_0}{C_0 - C_{п}}. \quad (6)$$

Мембранная водопроницаемость:

$$Q_{п} = (\Delta P - \Delta p) K_v A_m, \quad (7)$$

где

$$\Delta P = 0,5 \cdot (P_0 + P_p) - P_{п},$$

$$\Delta \pi = 0,5 \cdot (\pi_0 + \pi_p) - \pi_{п} = 0,5 \cdot (\alpha C_0 + \alpha C_p) - \alpha C_{п}$$

и

$$\alpha = 75,85 \cdot \left(\frac{N}{300} \right), \text{ Па} \cdot \text{кг/мг}.$$

Подставляя (6) в (7), получаем:

$$C_p = \frac{(C_0 - C_{п}) K_v A_m \left[\Delta P - \frac{\alpha}{2} (C_0 - 2C_{п}) \right] + Q_p C_0}{\left[Q_p + (C_0 - C_{п}) K_v A_m \frac{\alpha}{2} \right]}. \quad (8)$$

Проницаемость мембраны определяется как:

$$Q_{п} C_{п} = (\bar{C} - C_{п}) K_v A_m, \quad (9)$$

где A_m – площадь мембраны,

$$\bar{C} = \frac{Q_0 C_0 + Q_{п} C_{п}}{Q_0 + C_0}. \quad (10)$$

Тогда из (5) запишем (10) как:

$$\bar{C} = \frac{2Q_p C_p + Q_n C_n}{Q_n + 2Q_p}. \quad (11)$$

Уравнение (9) запишем в виде:

$$f(C_n) = Q_n C_n - [\bar{C} - C_n] K_v A_m = 0. \quad (12)$$

Уравнение (12) решим для C_n с использованием метода деления пополам в интервале $[0; 0,95 C_0]$, где Q_n заменено уравнением (6), а C_p – уравнением (8). Далее, C_p находим из (8), Q_n из (5) и Q_0 из (3).

Уравнение для двигателя привода насоса имеет следующий вид:

$$M_k = \frac{I - I_{m0}}{K_t}, \quad (13)$$

где M_k – крутящий момент, Н/м;

I – ток трения;

I_{m0} – ток двигателя;

K_t – постоянная крутящего момента, А/Н·м.

Угловая скорость двигателя представлена следующим образом:

$$\omega = (V - R_{m0}) K_m, \quad (14)$$

где ω – угловая скорость;

V – напряжение двигателя,

R_{m0} – сопротивление двигателя, Ом;

K_m – постоянная скорости двигателя, об/об.

Основные показатели работы насоса подачи обессоливаемой воды имеют следующие значения:

$$Q_0 = \frac{\omega D}{2\pi}, \quad (15)$$

где D – рабочий объем насоса за оборот.

Гидравлическое давление на входе воды в обратноосмотическую установку в Па можно найти, используя следующее отношение:

$$P_0 = \frac{\eta 2\pi N}{D} + P_m, \quad (16)$$

где η – КПД насоса.

Рассмотрим модель работы фотоэлектрической батареи в соответствии с [4]:

$$I = I_c - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s}{\alpha V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (17)$$

где I – ток элемента, А;

I_c – ток, генерируемый в результате солнечной инсоляции, А;

I_0 – ток насыщения, А;

V – напряжение элемента, В;

R_s – внутреннее сопротивление источника преобразования светового потока, Ом;

α – коэффициент качества преобразования;

R_{sh} – сопротивление шунта, Ом;

V_t – тепловое напряжение, которое определяется следующим образом:

$$V_t = \frac{N_s k T}{q}, \quad (18)$$

где N_s – количество элементов, соединенных последовательно;

k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T – температура окружающей среды, К;

q – электронный заряд ($1,6 \cdot 10^{-19}$ С);

Приведенные выше соотношения представляют собой набор нелинейных уравнений, которые решаются в MATLAB. В данном случае использован новый подход к определению максимальной мощности фотоэлектрического преобразователя путем изменения положения регулирующего клапана. Уравнение (12) показывает, что открытие клапана вызывает изменение объемного расхода рассола. Кроме того, объемы и массы должны быть сбалансированы – это оказывает непосредственное влияние на поток питательной воды, который связан с производительностью насоса (17). Также производительность насоса зависит от угловой скорости двигателя (17), которая связана с входным напряжением и током, поступающим от фотоэлектрического преобразователя (16). Поскольку открытие клапана зависит от напряжения и тока фотоэлектрического преобразователя, изменение положения клапана также влияет на входную мощность, поступающую на двигатель [5, 6].

Вышеперечисленные уравнения запрограммированы в MATLAB для моделирования системы. Температура питающей воды – 27 °С, солесодержание – 5000 ppm, другие параметры фотоэлектрической батареи, двигателя и насоса: $\alpha V_t = 1,5$ В, $I_0 = 2,5 \cdot 10^{-6}$ А, $R_s = 1,911 \cdot 10^{-5}$ Ω, $R_{sh} = 1296$ Ω, $K_t = 6,252$ (А/Нм), $K_m = 5,5$ (rev/Vs), $I_{m0} = 0,65$ А, $R_{m0} = 0,1546$ Ω, $D = 2,6 \cdot 10^{-6}$ м³/rev, $K_p = 2,0 \cdot 10^{-8}$, $P_{atm} = 101$ кПа, $K_s = 1,9481 \cdot 10^{-8}$ (м³/м²сек).

На рисунке 3 показаны результаты регулирования, при изменении положения клапана от 10 % до 80 %. Изменение положения клапана рассола влияет на нагрузку насоса двигателя. На рисунке 3 показана кривая фотоэлектрического преобразователя и кривые нагрузки для двух разных положений клапана ($U = 0,1$ (10 % открыто) и $U = 0,8$ (80 % открыто)). Когда клапан закрывается, давление в системе возрастает, и линия нагрузки становится круче, демонстрируя большее потребление энергии от фотоэлектрического преобразователя. Если линия нагрузки проходит через точку максимальной мощности на кривой, то максимальная мощность извлекается из массива фотоэлектрических элементов, и эту точку можно отследить, изменив степень открытия клапана. Работа системы моделировалась в режиме времени с 6:00 до 18:00, ток и напряжение измерялись каждые 15 минут, при этом контролировалось изменение мощности.

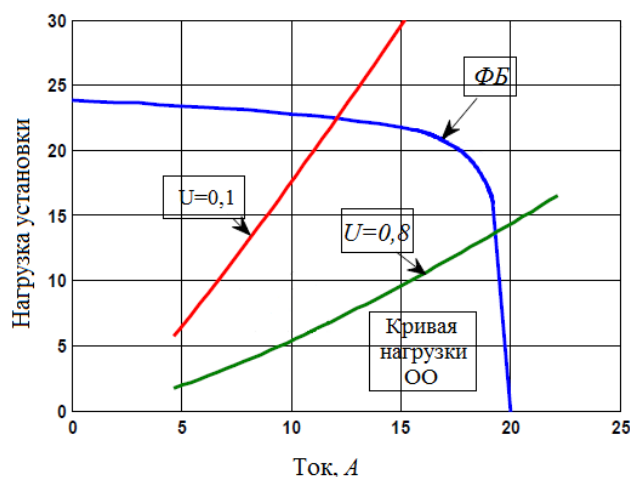


Рисунок 3 – Кривая нагрузки для разных положений клапана

На рисунке 4 показана мощность, доставляемая фотоэлектрическим устройством, по сравнению с потребляемой мощностью. При малой мощности клапан не будет работать, пока давление в мембране не превысит осмотическое. На рисунках 5 (а) и (б) показано давление подачи и расход пермеата. Общий расход воды составил около 324 дм³/сут.

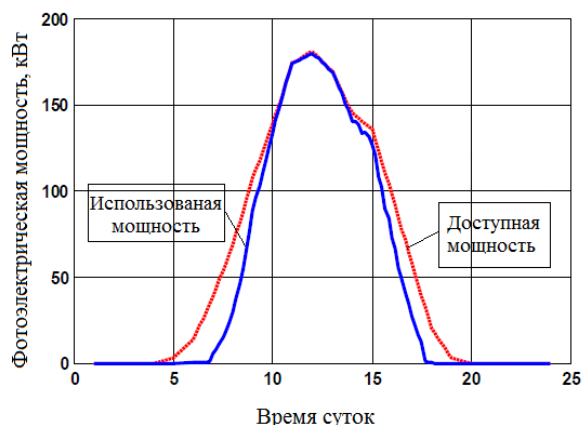


Рисунок 4 – Мощность, доставляемая фотоэлектрическим устройством

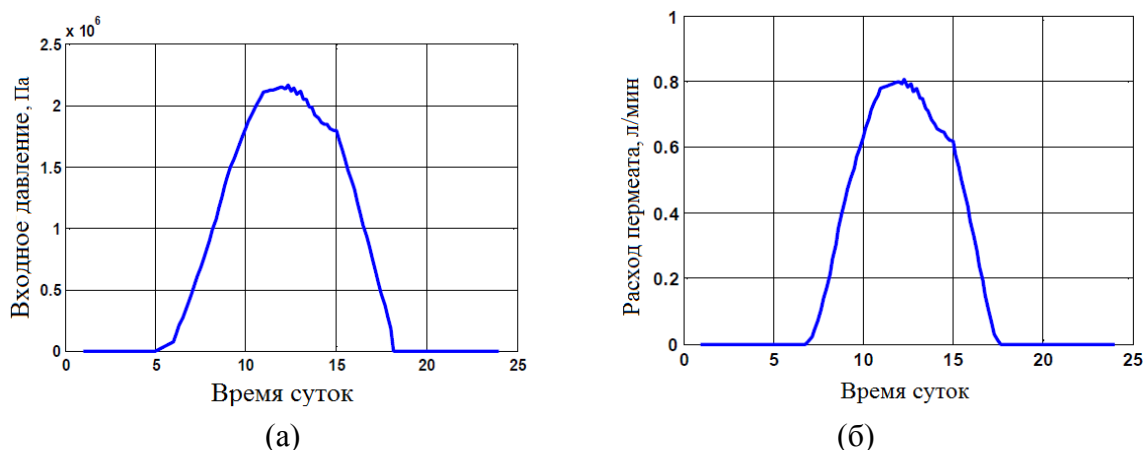


Рисунок 5 – (а) – изменение давления подачи (Па), (б) – расход пермеата в дм³/мин

Производительность предлагаемой системы можно сравнить с системой обратного осмоса с питанием от аккумуляторных батарей, в которых солнечная энергия используется для их подзарядки в течение дня. В рассмотренной системе установка обратного осмоса работает непосредственно от аккумулятора при постоянном напряжении 24 В (± 2 В). В этом случае клапан ретентата удерживается в фиксированном положении (0,5) при КПД системы ОО 97 %, а КПД батареи предполагается равным 85 %. Общая энергия, которая подводится к аккумуляторной батарее, рассчитывается следующим образом:

$$\text{Общая энергия излучения } E_s = 6,76 \text{ кВтч/м}^2.$$

$$\text{Энергия, получаемая от фотоэлектрической батареи} = E_s \cdot S \cdot \eta_f \text{ (площадь панели)} \cdot (\text{эффективность панели}) = (6,76) \cdot (1,25) \cdot (0,16) = 1,352 \text{ кВтч}.$$

Во время работы ОО при постоянном напряжении 24 В ток батареи составляет около 17 А, а расход пермеата – 1,727 дм³/мин. Общее количество опресненной воды зависит от эффективности батареи. Например, при КПД батареи 0,85, общее время работы составит около 169 минут, а общее количество произведенного пермеата $Q_{\text{общ}} = 292$ дм³/сут, что меньше объема воды, производимой предлагаемой системой без батареи. Фактически, чтобы производить одинаковое количество воды в день, эффективность батареи должна составлять не менее 94 %.

Выводы

Дефицит пресной воды в некоторых регионах и их удаленность от традиционных источников энергоснабжения вызывает необходимость использования систем очистки воды в установках обратного осмоса с их питанием от фотоэлектрических преобразователей.

Рассмотрены параметры регулирования производительности обратноосмотической установки за счет изменения положения клапана на потоке ретентата. Определен вклад отдельных элементов системы «фотоэлектрический преобразователь – обратноосмотический элемент» в основные показатели работы оборудования: производительность установки по пермиату, вольт-амперные характеристики фотоэлектрического преобразователя и аккумулятора электрической энергии. Нелинейный характер системы регулирования по положению клапана на потоке ретентата и ответных реакций фотоэлектрического преобразователя показывает, что для устойчивой работы установки также требуется применение аккумулирования энергии. Приведены расчеты показателей работы системы в зависимости от времени суток. Показано что максимальная производительность обратноосмотической установки при ее питании от фотоэлектрических преобразователей имеет место в промежуток времени с 6:00 до 18:00.

Список литературы

1. Minimizing Energy Consumption in Reverse Osmosis Membrane Desalination Using Optimization-based Control / A. R. Bartmana [et al.] // Journal of Process Control. – 2010. – 20 (10). – P. 1261 – 1269.
2. Al-Karaghoul, A. Renewable Energy Technical and Economic Assessment of Photovoltaic-driven Desalination Systems / A. Al-Karaghoul, D. Renne and L. L. Kazmerski. – 2010. – Vol. 35.
3. Buros, O. K. The ABCs of Desalting / O. K. Buros. – International Desalination Association. – Topsfield, Massachusetts, USA, 2000.
4. Thomson, A. M. Reverse-osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics without Batteries : A Doctoral Thesis / A. M. Thomson. – Loughborough University, 2003. – P. 41.
5. Control Method of A Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant without Batteries Based on Maximum Power Point Tracking / P. C. M de Capvalho [et al.] // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. – Latin America, 2004.
6. Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays. – Solmetric Corporation. – March. – 2011.

С. П. Высоцкий¹, Н. В. Цветкова²

1 – ГОУВПО Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,

г. Макеевка, 2 – Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

Опреснение воды методом обратного осмоса

Дефицит пресной воды в некоторых регионах и их удаленность от традиционных источников энергоснабжения вызывает необходимость использования систем очистки воды в установках обратного осмоса с их питанием от фотоэлектрических преобразователей. При этом возникают задачи выбора необходимой мощности фотоэлектрических преобразователей и емкости аккумуляторных батарей. Необходимость установки последних обусловлена отсутствием электрической энергии в ночное время, а также изменением величины инсоляции при изменении погодных условий.

Рассмотрены параметры регулирования производительности обратноосмотической установки за счет изменения положения клапана на потоки ретентата. Определен вклад отдельных элементов системы «фотоэлектрический преобразователь – обратноосмотический элемент» в основные показатели работы оборудования: производительность установки по пермиату, вольт-амперные характеристики фотоэлектрического преобразователя и аккумулятора электрической энергии. Нелинейный характер системы регулирования по положению клапана на потоке ретентата и ответных реакций фотоэлектрического преобразователя показывает, что для устойчивой работы также требуется применение аккумулирования энергии. Приведены расчеты показателей работы системы в зависимости от времени суток. Показано что максимальная производительность обратноосмотической установки при ее питании от фотоэлектрических преобразователей имеет место в промежуток времени с 6:00 до 18:00.

СИСТЕМА ОБРАТНОГО ОСМОСА, МАКСИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ, ОПРЕСНЕНИЕ ВОДЫ, ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГИЯ, ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ БАТАРЕЯ

S. P. Vysotskiy¹, N. V. Tsvetkova²

1 – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka,

2 – Automobile and Highway Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka

Water Desalination by Reverse Osmosis Method

Sweet water shortage in some regions and their remoteness from traditional sources of energy supply causes the necessity to use water cleaning system in reverse osmosis plants with the power from photoelectric converters. This raises the problem of selecting the necessary power of photoelectric converters and capacity of storage battery. The need to install the latter is caused by the lack of electrical energy at night, as well as by change in insolation value when weather conditions change.

Parameters of performance regulation of the reverse osmosis plant by changing the position of the valve on the retentate flows are considered. The contribution of individual elements of the «photoelectric converter – reverse osmosis element» system to the main indicators of the equipment operation: permeate plant capacity, volt-ampere characteristics of the photoelectric converter and energy storage device is determined. Nonlinear nature of the valve control system on the retentate system and photoelectric converter response shows that steady operation also requires the use of electric power storage. Calculations of system performance indicators depending on the time of the day are given. It is shown that maximum performance of the reverse osmosis plant powered by photoelectric converters takes place in the period from 6:00 to 18:00.

REVERSE OSMOSIS SYSTEM, MAXIMAL POWER OF WATER DESALINATION, RENEWABLE ENERGY, PHOTOVOLTAIC ARRAY

Сведения об авторах:

С. П. Высоцкий

SPIN-код: 7497-0100
Scopus Author ID: 7004891012
ORCID ID: 0000-0002-2988-7245
Телефон: +38 (071) 391-35-97
Эл. почта: sp.vysotsky@gmail.com

Н. В. Цветкова

Телефон: +38 (071) 443-42-70
Эл. почта: zvetko96@mail.ru

Статья поступила 08.04.2019

© С. П. Высоцкий, Н. В. Цветкова, 2019

Рецензент: М. В. Коновальчик, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»