

УДК [677.021:533.6]:515.780

ПРОПИТКА СУРОВЫХ ТКАНЕЙ И МЕТОДЫ ЕЕ КОНТРОЛЯ

В.Б. Кузнецов, Е.Е. Корочкина, О.В. Блинов

Ивановский государственный политехнический университет

В статье приведены результаты использования весового метода оценки степени пропитки суровых тканей при интенсифицирующем воздействии ультразвуковых колебаний различных частот. Разработана методика эксперимента и лабораторная установка, принцип работы которой заключается в использовании тензометрических весов. Установка обеспечивает достаточно широкий диапазон ультразвуковых частот. Аппаратурно-программный комплекс был использован для получения результатов по степени пропитки суровой хлопчатобумажной ткани без интенсифицирующего воздействия и с использованием ультразвуковых колебаний. Экспериментальные исследования по интенсификации процесса пропитки суровых тканей с использованием ультразвуковых колебаний были выполнены на специально сконструированной установке. Такая установка позволяла варьировать частоту и длину волны упругих колебаний за счет использования комплекса магнестрикционных преобразователей. Сформулированы выводы о влиянии ультразвуковых колебаний на процесс пропитки суровых тканей.

Ключевые слова: весовой метод, степень пропитки, суровые ткани, ультразвуковые колебания, вакуумирование, предварительное запаривание.

Процесс пропитки пористых материалов, к которым относятся и текстильные материалы, имеющих сквозные, тупиковые и квазитупиковые капилляры и поры, может быть условно разделён на две стадии [1]. Первая стадия – «быстрая», в которой заполняются сквозные капилляры и скорость заполнения поровой структуры жидкостью определяется лишь вязким сопротивлением. Вторая, «диффузионная», в которой заполняется объем порового пространства материала, оставшейся незаполненным в «быстрой» стадии. У плохо смачиваемых текстильных материалов, таких как суровые хлопчатобумажные ткани, практически отсутствует явление капиллярного впитывания. В связи с этим вопросы интенсификации процесса и контроля степени пропитки привлекают внимание исследователей.

При реализации технологических процессов обработки тканей, интенсифицируемых ультразвуковыми колебаниями, в жидкой фазе возника-

ет комплекс физических явлений – акустическая кавитация, фрактальная турбулизация, активизация массообменных диффузионно-адсорбционных процессов за счет разрушения ламинарного слоя раствора, прилегающего к поверхности текстильного материала. Одной из важнейших задач при этом является необходимость контроля влагосодержания тканей на всех этапах их обработки.

Ранее [3] была выполнена сравнительная оценка системы контроля кинетики и параметров процесса пропитки волокнистых материалов весовым и электронным методом. В результате проведенных исследований было установлено, что широко распространенный весовой метод точен, универсален и находит наибольшее практическое применение. В этой связи была разработана методика эксперимента и лабораторная установка, принцип работы которой заключается в использовании тензометрических весов. Весы в заданном интервале времени передают данные об измене-

нии веса текстильного материала в микроконтроллер, в котором осуществляется первичная обработка и накопление информации. Затем с помощью специально разработанного программного обеспечения происходит обработка накопленных результатов, которые выводятся на экран персонального компьютера в виде графических зависимостей степени пропитки ткани от времени. Предложенный аппаратурно-программный комплекс был использован для получения результатов по степени пропитки суровой хлопчатобумажной ткани без интенсифицирующего воздействия и с использованием ультразвуковых колебаний.

Экспериментальные исследования по интенсификации процесса пропитки суровых тканей, с использованием ультразвуковых колебаний, были выполнены на специально сконструированной установке, которая позволяла варьировать частоту и, соответственно, длину волны упругих колебаний за счет использования комплекса магнестрикционных преобразователей. Применение в установке излучателей с ферритовым сердечником обеспечивало высокую степень вариативности при выборе резонансной частоты, что в свою очередь позволило достичь максимального эффекта интенсификации исследуемого процесса. Все технологические процессы, реализуемые ультразвуковыми установками, основаны на использовании механических колебаний ультразвуковой частоты в диапазоне от 18 до 50 кГц. Так интенсивность ультразвука в воде на частоте 20 кГц, соответствующая порогу кавитации, составляет около $0,3 \text{ Вт/см}^2$ [4].

Принимая во внимание сказанное выше, в экспериментальной установке использовали излучатели, обес-

печивающие получение резонансных частот в диапазоне от 23 кГц до 29 кГц. Эксперимент проводился на ткани арт.7071 «Башмачная хлопчатобумажная суровая». Ткань пропитывали водой при комнатной температуре и подвергали воздействию ультразвуковых колебаний.

На рис. 1 представлены кинетические кривые зависимости степени пропитки от времени, без интенсифицирующего воздействия (а) и с использованием УЗ-колебаний с оптимальной частотой 25,3 кГц (б), выбранной в результате проведения эксперимента при температуре жидкости 20°C .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ультразвуковое воздействие с частотой 25,3 кГц оказывает значительное влияние на начальном этапе пропитки суровой ткани арт.7071. В результате комплексного воздействия кавитационных и турбулентных явлений происходит в первую очередь заполнение структуры ткани, межволоконного пространства и сквозных капилляров. Этого достаточно для того, чтобы существенно интенсифицировать такие процессы обработки суровых тканей как расшлихтовка, отварка и отбеливание при использовании соответствующих текстильных вспомогательных веществ, предназначенных для проведения каждой из этих операций.

Отмечая положительное воздействие ультразвуковых колебаний, представляется интересным их сопоставление с таким традиционным способом как повышение температуры воды, так и с наиболее эффективными – вакуумирование и предварительное запаривание [2]. На рис. 2 представлена зависимость степени пропитки от температуры пропитываемой воды.

На рис. 3 приведены кинетические зависимости степени пропитки суровой ткани при использовании предварительного запаривания текстильного материала в среде насыщенного пара (кривая 1), вакуумирования (кривая 2), а также ультразвукового воздействия (кривая 3) и без интенсификации (кривая 4).

Сопоставляя результаты, представленные на рис. 2, б и рис. 3, вид-

но, что одинаковая степень пропитки 80% достигается только при температуре воды близкой к температуре ее кипения при атмосферных условиях. При этом следует отметить, что использование высоких температур пропитки является наиболее энергозатратным процессом и, соответственно, с экономической точки зрения нецелесообразно.

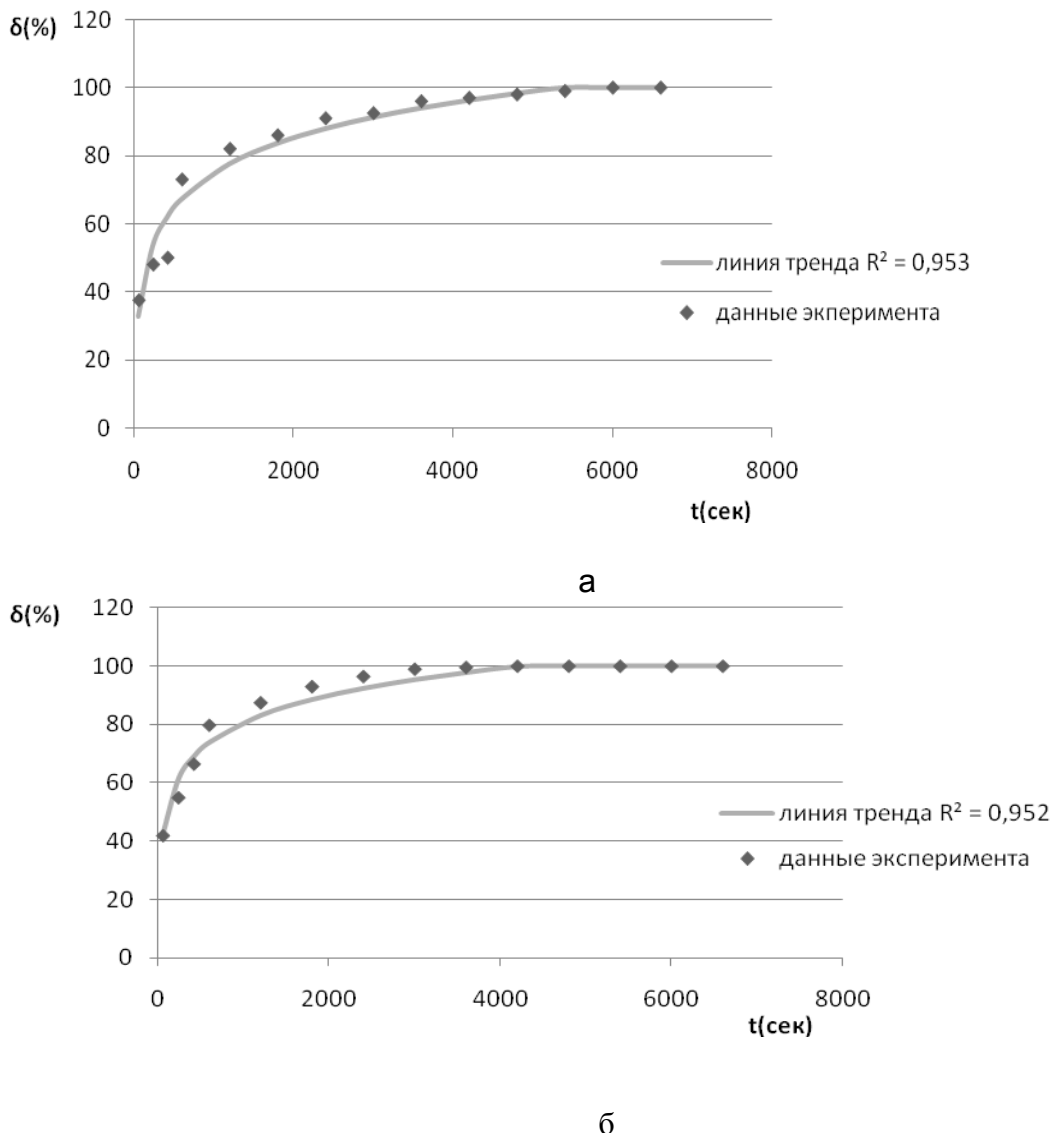


Рис. 1. Кинетика пропитки ткани арт. 7071 «Башмачная хлопчатобумажная суровая» а – без интенсифицирующего воздействия; б – с использованием УЗ-колебаний с частотой 25,3 кГц.

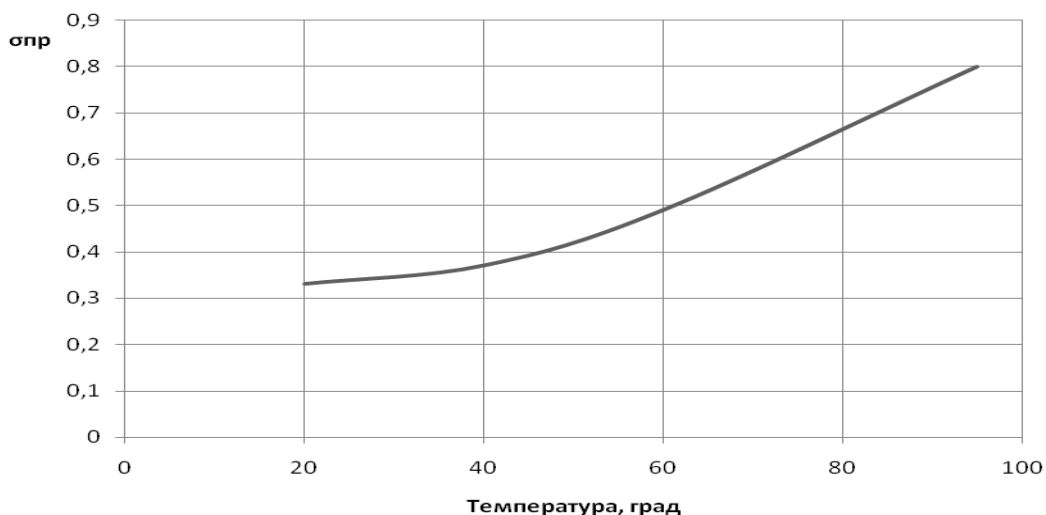


Рис. 2. Влияние температуры на степень пропитки ткани арт. 7071 «Башмачная хлопчатобумажная суровая»

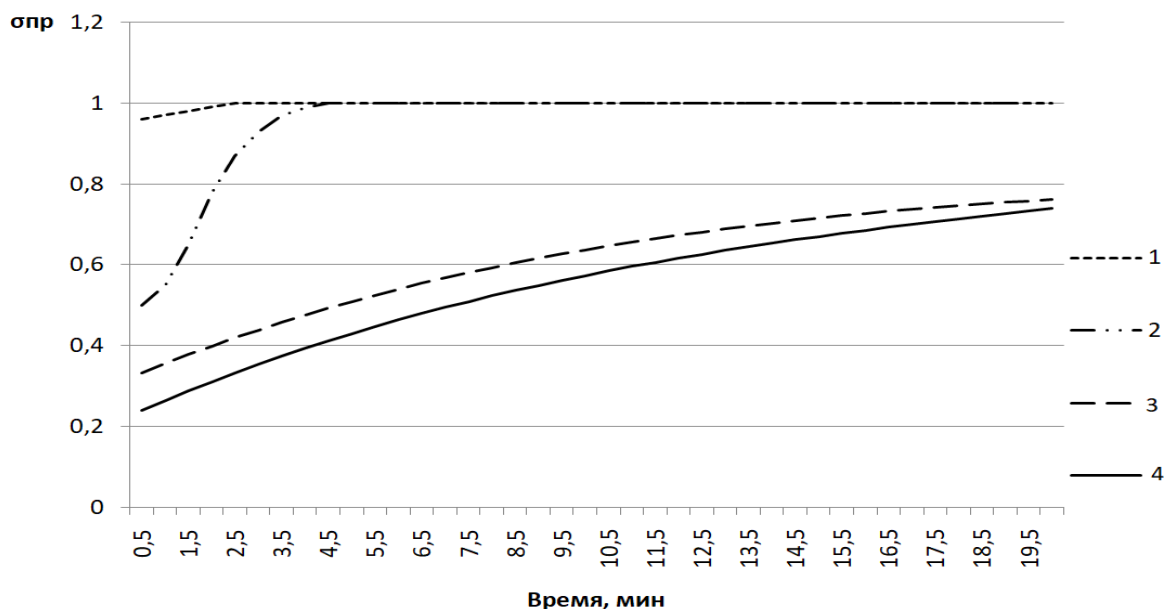


Рис. 3. Кинетика пропитки суровой ткани при различных способах интенсификации процесса
1 – предварительное запаривание; 2 – вакуумирование; 3 – УЗ-колебания с частотой 25,3 кГц; 4 – без интенсификации

В обоих случаях интенсифицирующее воздействие на степень пропитки превосходит достигаемое при использовании ультразвука, что подтверждается и результатами корреляционного анализа, выполненного на временном участке 20 мин и определении на его основе коэффициента

Пирсона. Полученные значения составили 0,374005 и 0,470906 процентов соответствия.

Необходимо отметить и тот факт, что предварительное запаривание, в среде насыщенного пара, является наиболее эффективным из всех рассматриваемых.

Кроме того, в этом случае происходит заполнение не только межволоконного пространства и сквозных капилляров, но и тупиковых и квазитупиковых капилляров. Однако оборудование для вакуумирования достаточно сложно с конструктивной точки зрения и требует значительных затрат и квалификации персонала при эксплуатации. Оборудование для предварительного запаривания в этом плане предпочтительнее как с точки зрения его изготовления, так и с точки зрения эксплуатации. Однако и оно достаточно энергозатратно. Кроме того, далеко не во всех технологических операциях обработки текстильных материалов требуется столь глубокое проникновение материальных растворов в структуру волокнистого материала. Таким примером может служить процесс подготовки текстильных материалов под печатание пигментными красителями, поскольку данный процесс основан на явлении адгезии загустителей и связующих на поверхно-

сти ткани. Таким образом, анализ различных вариантов интенсификации процесса пропитки свидетельствует о возможности использования для этих целей ультразвуковых колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов М.Н. Пропитка тканей: теория процесса, технология, оборудование. Иваново: Ивановская государственная текстильная академия. 2002. 176 с.

2. Герасимов М.Н. Применение паровой обработки текстильных материалов для повышения эффективности процессов отделки: дисс.... д-ра техн. наук: 05.19.03. Санкт-Петербург. 1991. 394 с.

3. Соловьев С.Е., Корочкина Е.Е., Константинов Е.С. Системы контроля кинетики и параметров процесса пропитки волокнистых материалов весовым электронным методом // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2013. № 2 (34). С. 119-123.

4. Шибашов А.В., Шибашова С.Ю. Изучение влияния низкочастотного ультразвукового поля на пероксидные растворы // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2012. № 2 (338). С. 73-75.

Рукопись поступила в редакцию 16.01.2018

IMPREGNATION OF SEVERE FABRICS AND METHODS OF ITS CONTROL

V. Kuznetsov, E. Korochkina, O. Blinov

In article results of use of a weight method of an estimation of degree of impregnation of severe fabrics are resulted at intensifying influence of ultrasonic fluctuations of various frequencies. The technique of experiment and the laboratory installation, which principle of work consists in use of tensometric scales is developed. The installation provides a wide enough range of ultrasonic frequencies. Hardware and software complex has been used for reception of results on degree of impregnation of a severe cotton fabric without intensifying influence and with use of ultrasonic fluctuations. Experimental researches on an intensification of process of impregnation of severe fabrics with use of ultrasonic fluctuations have been executed on specially designed installation. Such installation allowed to vary frequency and length of a wave of elastic fluctuations at the expense of use of complex of magnetostrictive converters. Conclusions about influence of ultrasonic fluctuations on process of impregnation of severe fabrics are formulated.

Key words: weight method, impregnation degree, severe fabrics, ultrasonic fluctuations, vacuuming, preliminary steaming.

References

1. Gerasimov M.N. Propitka tkanej: teoriya processa, tekhnologiya, oborudovanie. Ivanovo: Ivanovskaya gosudarstvennaya tekstil'naya akademiya. 2002. 176 s.

2. Gerasimov M.N. Primenenie parovoj obrabotki tekstil'nyh materialov dlya povysheniya ehffektivnosti processov otdelki: diss.... d-ra tekhn. nauk: 05.19.03. Sankt-Peterburg. 1991. 394 s.

3. Solov'ev S.E., Korochkina E.E., Konstantinov E.S. Sistemy kontrolya kinetiki i parametrov processa propitki voloknistyh materialov vesovym ehlektronnym metodom. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie 2013. № 2 (34). S. 119-123.

4. SHibashov A.V., SHibashova S.YU. Izuchenie vliyaniya nizkochastotnogo ul'trazvukovogo polya na peroksidnye rastvory . Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. 2012. № 2 (338). S. 73-75.

УДК 5632.711.66.067

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ОПРЕСНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТРАДИЦИОННЫХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Н.С. Орлов, С.И. Анисимов

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

Рассмотрены примеры успешного применения для опреснения морской воды обратного осмоса, многостадийной дистилляции и их совокупности. Отмечена, характерная для ряда высокоразвитых стран, тенденция запуска масштабных проектов, направленных на реализацию высокопроизводительных опреснительных заводов. Приведена структура мировой энергетики по способу генерации электроэнергии и региональные тарифы. Рассмотрены примеры государственных программ прямого финансирования разработки крупномасштабных проектов альтернативной энергетики, а также косвенного финансирования аналогичных средне- и мелкомасштабных проектов, включая энергообеспечение индивидуальных домов. Приведены метод и алгоритм технико-экономического расчета себестоимости опресненной воды на основе сопоставления капитальных, эксплуатационных и энергетических затрат на проектирование, строительство и эксплуатацию опреснительных станций обратного осмоса. Метод основан на оптимизации технологических режимов эксплуатации оборудования опреснительных станций и вариантов структурной организации мембранных ступеней опреснения.

Ключевые слова: опреснение, обратный осмос, возобновляемые энергоресурсы, зеленая энергетика, технико-экономический расчет.

В последние годы в связи с возрастанием стоимости и дефицитом энергоресурсов все более актуальными становятся вопросы оптимизации режимов эксплуатации технологического оборудования. Закрепленная ранее в мозгах разработчиков идея интенсификации процессов постепенно теряет своих апологетов, и все большее внимание обращается на «щадящие» режимы эксплуатации. Данный вопрос имеет большое значение как для энергоемких высокопроизводительных систем опреснения морских и солоноватых вод, так и для малопроизводительных систем водоподготовки при ограниченных энергоресурсах.

Методы опреснения морской воды, нашедшие широкое практическое применение. Проблема опреснения морской воды не нова, она успешно решается многими странами. По данным

Международной ассоциации по опреснению воды, в настоящее время в 120 странах действует около 17 000 заводов. Активнее всего используют этот способ получения питьевой воды страны Аравийского полуострова, прежде всего, Саудовская Аравия, ОАЭ, Кувейт, а также Испания, США и Китай [1]. В начале 2012 года китайское правительство объявило о запуске масштабного проекта, цель которого к 2015 году увеличить производительность опреснительных заводов до 2,5 миллионов м³ воды в день, была достигнута. С 2005 года в Израиле построены четыре опреснительных завода, обеспечивающие около 35% воды питьевого качества. В 2017 году, за счет введения в эксплуатацию пятого завода этот показатель превысит 40%, а к 2050 году достигнет Опреснительный завод "Сорек", расположенный в 15 километрах к югу от Тель-Авива производит около

20% воды для городского водоснабжения на основе двухступенчатого опреснения средиземноморской воды обратным осмосом и дистилляцией. Отмечается, что завод "Сорек" является крупнейшим и наиболее эффективным во всем мире. Его установки производят 624 000 кубометров пресной воды в день. Себестоимость производства - одна из самых низких в мире. Выработываемый объем воды может обеспечить потребности типичной израильской семьи в воде по цене 300–500 долларов в год. По данным компании IDE Technologies стоимость крупной станции опреснения в Ашкелоне проектной мощностью 110 млн. м³/год, составила 150 млн. долларов. К настоящему времени станция произвела около 1 млрд м³ пресной воды, производительность составляет 330 тысяч м³/сутки, себестоимость 0,5 доллара/ м³. С 2005 года в Сингапуре введен в эксплуатацию завод производительностью 136 тысяч м³/сутки, себестоимость опресненной

воды составляет 0,49 доллара/ м³. Вместе с тем калькуляция статей затрат на опреснение не приводится. Вопрос о том, какова доля затрат на амортизацию, коммунальные услуги, потребленной и сброшенной в дренаж воды и, что очень важно - энергозатрат, остается открытым. Из литературных источников известны примеры реализации в 2000-е годы в странах Аравийского полуострова - Саудовской Аравии, Объединенных Арабских Эмиратах, Кувейте, Омане, Бахрейне заводов по опреснению морской воды. Указаны производительности опреснительных заводов, но конкретные удельные энергозатраты, обозначены очень скупко - около 3,5 кВт·час/м³ [1, 3]. Из-за высокой потребности в энергии, станции опреснения морской воды особенно часто проектируются и строятся вместе с ТЭЦ [1]. Чтобы сопоставить себестоимость опресненной воды в разных странах мира, необходимо в первую очередь знать тарифы на электроэнергию, которые зависят от способа генерации и ряда других факторов.

Таблица 1

Структура мировой энергетики по способу генерации электроэнергии [4]

	Доля энергоресурсов в производстве электроэнергии в %					
	Уголь	Мазут	Газ	Гидро	Атомная	Прочие, в том числе ВЭРы
Страны ОЭСР (G20)	38,9	7,5	12,3	15,3	24,0	2,0
Страны СНГ	21,9	8,9	40,0	13,5	15,7	-
Восточная Европа (G7)	37,8	8,6	11,9	25,0	16,7	-
Зарубежная Азия	45,6	14,9	17,5	16,3	4,7	1,0
Китай	75,0	6,0	0,2	17,5	1,3	1,37
Ближний Восток	6,4	45,4	43,6	4,8	-	-
Африка	50,6	15,8	14,7	15,5	3,1	0,3
Латинская Америка	3,0	9,1	10,1	74,5	1,5	1,8

Таблица 2

Региональные тарифы на электроэнергию [4]

Страна	Тарифы на электроэнергию (центы США /кВт·час)	Страна	Тарифы на электроэнергию (центы США /кВт·час)
Соломоновы острова	95	Китай, Индия и Египет	7,5 - 10
Остров Тонга	50	Туркменистан	9
Остров Ямайка	45	Парагвай, Вьетнам и ОАЭ	8
Остров Новая Каледония	42 - 44	Лаос и Узбекистан	5
Остров Американское Самоа	41	Таджикистан и Венесуэла	3
Дания и Германия	40	Украина	2-3
Япония	32	Кувейт	1
Швейцария, Нидерланды, Испания, Финляндия и Великобритания	20 - 28	Саудовская Аравия	1,3
Израиль	18	Казахстан	3 - 11
Турция, Черногория и Болгария	16, 15 и 11	Россия	3,5 – 12,5
США	12-13	-	-

Факторы, влияющие на стоимость и методы генерации электроэнергии. В 2012 году похолодание в Европе привело к увеличению потребления электроэнергии на 20% и усилило развитие нетрадиционных способов ее генерации [5]. Например, в Португалии и на побережье Испании достигнуто 40-60% обеспечение электроэнергией за счет возобновляемых энергоресурсов. Широкое распространение для энергообеспечения индивидуальных домов, поселков, поместий и ферм получила схема - ветрогенератор + солнечные батареи. Норвегия обеспечивает 98% потребностей в электроэнергии за счет ГЭС и морских приливных электростанций. В 2014 году в Китайской народной республике было введено более 23 тысяч МВт новых мощностей, она - первая страна в мире, которая в ветроэнергетике превысила рубеж в 100 ГВт [6]. Саудовская Аравия намерена

к 2050 году отказаться от использования нефти при генерации электроэнергии и перейти на возобновляемые энергоресурсы. В 2014 году совокупные вложения разных стран в альтернативные виды энергетики оказались рекордными и составили около 310 миллиардов долларов. Отмечается «ни одно государство не будет инвестировать такие ресурсы в дело, результат которого вызывает хоть какое-то сомнение», т.е. у альтернативной энергетики большое будущее.

А как обстоит дело в нашей стране? В России рост тарифов на электроэнергию составляет примерно 20% в год, поэтому в 2013 году был введен мораторий на два года и применялись элементы государственного регулирования тарифов. Российские компании мотивируют повышение цен необходимостью модернизации действующих мощностей, систем управления и распределения из-за вы-

соких потерь в энергосетях - около 14%, по сравнению с Европой 4-9% и США 7-9%, а износ оборудования оценивают в 75-80 % [7]. В результате лоббирования в правительстве энергетическими компаниями двух направлений - выравнивание уровня внутренних цен на энергоносители – газ, нефть, электроэнергию с европейскими и выравнивание стоимости электроэнергии для предприятий и населения. Отпускная цена 1 кВт·час в пересчете на ВВП для российского потребителя превышает европейский уровень цен в (1,5-2) раза, и в 6 раз североамериканский.

В настоящее время в нашей стране на основе возобновляемых энергоресурсов производится около 0,9% электроэнергии, а вне зоны стабильного электрообеспечения проживают более 10 млн. граждан, которые вынуждены использовать бензо- и дизельгенераторы в условиях высоких цен на топливо. Казалось бы, что это один из действенных стимулов развития малой альтернативной энергетики. По-видимому, отсутствие надежно зарекомендовавших себя примеров использования возобновляемых энергоресурсов, недостаточная информированность и недоверие сдерживают развитие данного направления в нашей стране.

Например, благоприятные климатические условия в Крыму - около 300 солнечных дней в году, сравнительно высокая плотность населения и промышленных предприятий, малая протяженность электрических сетей, наличие свободных площадей для размещения солнечных батарей, особенно в центральной части полуострова, обусловили строительство «солнечных электростанций». В 1986 году в Крыму была открыта первая советская солнечная электростанция (СЭС-5), которая

строилась в качестве резервного источника электроэнергии для планируемой Крымской АЭС. В начале 90-х годов Крымская СЭС была закрыта, успев выработать порядка 2 млн. кВт·час электроэнергии. В 2010 году компания Activ Solar начала строительство нескольких СЭС на полуострове. Отмечается, что это, с одной стороны дань экологическому движению, с другой попытка отработать технологии будущего, на основе прогнозирования повышения цен на органическое топливо. Ведущие страны мира стремятся получить опыт строительства и эксплуатации СЭС. В 2012 году Совмин Крыма бесплатно выделил 538,8 гектар земли фирмам, связанным с Activ Solar, что позволило установить станции общей мощностью около 270 МВт. В Крыму Activ Solar построила 4 солнечные электростанции в Родниковом, Охотниково, Перово и Митяево. Две из них — в Охотниково /мощностью 82,65 МВт/ и Перово /105,56 МВт/, — входят в десятку крупнейших солнечных электростанций мира [8]. Традиционный недостаток солнечной энергетики - высокая цена и низкая рентабельность СЭС. Современная альтернативная энергетика экономически эффективна при цене энергоносителей свыше 100 - 110 долларов за баррель нефти. В Европе поставщики «зеленой» энергии получают дотации от правительств в рамках программы развития энергетики ЕС «20–20». Введенный на Украине в 2009 году «зеленый тариф» составлял для СЭС 0,446 Евро за кВт·час и превышал в 5 раз отпускную цену для населения [5].

В современных условиях СЭС отключены от энергосетей по причине отказа потребителей приобретать дорогую солнечную энергию. Отсутствие «зеленого тарифа» на электроэнергию привело к тому, что эксплуа-

тация Крымских СЭС стала нерентабельной. Малая альтернативная энергетика в Крыму достаточно развита. Используемая для индивидуального хозяйства энергетическая установка традиционно состоит из солнечных панелей, управляющего контроллера, аккумуляторных батарей, инвертора и счетчика электроэнергии. Для обеспечения постоянного энергоснабжения, она обычно дополняется ветрогенератором и дизельгенератором.

Одним из инициаторов генерации электроэнергии на основе возобновляемых энергоресурсов является компания Лукойл. На принадлежащих компании нефтеперегонных заводах в Болгарии и Румынии были возведены фотоэлектрические солнечные станции мощностью 1,25 МВт и 9 МВт, соответственно. Развивая новое направление – ветрогенерацию, компания Лукойл, совместно с итальянской EGR Renew, создала совместное предприятие, которое изготовило оборудование и запустило в эксплуатацию в Румынии ветроэлектростанцию Land HPwer, мощностью 84 МВт.

Отмечается, что рентабельность проектов «зеленой энергетики» до середины 2013 года составляла около 10% за счет государственной поддержки в виде сравнительно высоких тарифов на электроэнергию, а при прекращении дотаций проекты стали нерентабельными. В итоге участники совместного предприятия СП LU-KEGR Renew разделили активы и прекратили совместную деятельность. Ветроэлектростанция Land HPwer отошла в собственность Лукойла, а производство ветрогенераторов компании EGR Renew.

Из вышеприведенного следует, что технология производства современных ветрогенераторов так и не пришла в нашу страну. О том на-

сколько важно освоение такого производства, можно судить на основании следующего примера - в 2014 году правительство КНР подписало энергетический декрет, получивший название «Декрет 412». Документ ввел жесткие правила контроля качества ветротурбин, включая обязательную сертификацию всех частей турбин [9].

Анализ проблемы опреснения морской воды в нашей стране. Наиболее остро проблема дефицита пресной воды и одновременно энергоресурсов проявилась в последние годы в Крыму. Потребности Крыма в пресной воде оцениваются в 2 км³/год, они до 2013 года удовлетворялись за счет подачи 1,1 км³/год по Северо-Крымскому каналу воды из Днепра, использования 23 водохранилищ полуострова суммарным объемом примерно 0,4 км³ и общего стока рек, оцениваемого в 0,58 км³/год. Потребление воды в 2013 году составляло около 1,5 км³/год и распределялось в пропорции: 71% - на нужды сельского хозяйства, 18% - промышленности и 11% - коммунальное хозяйство. В 2014 году общее потребление воды в Крыму сократилось до 0,31 км³/год, а в 2015 до 0,25 км³/год.

Интернет и пресса приводят дискуссионные материалы о способах обеспечения полуострова пресной водой. Рассматриваются два основных направления – провести дополнительную геологоразведку гидрологии полуострова, в надежде найти достаточные запасы артезианской пресной воды, или обратиться к израильскому опыту опреснения морской воды. Как отмечалось, израильский завод в Нахаль «Сорек», является крупнейшим и наиболее эффективным во всем мире, его технология базируется на последовательном опреснении средиземно-

морской воды обратным осмосом и дистилляцией. Вместе с тем, по мнению израильских специалистов, опреснительные сооружения требуют огромных затрат электроэнергии, потребляя примерно 10% от общего производства электроэнергии в Израиле. Многоступенчатая дистилляция экономически оправдана при наличии расположенной рядом ТЭЦ за счет использования «бросового мятого пара» давлением 0,3 – 0,5 МПа, который в любом случае необходимо конденсировать для использования в замкнутом водообороте энергетического цикла.

Острота проблемы обеспечения Крыма электроэнергией была снята летом 2016 года за счет прокладки кабелей общей мощностью 800 МВт, но свободных мощностей нет. К 2018 году ожидается завершение прокладки по дну керченского пролив газопровода и запуск в эксплуатацию двух строящихся в Севастополе и Симферополе ТЭЦ, мощностью по 470 МВт. Особенно остро проявилась проблема «гарантированного обеспечения питьевых и хозяйственно-бытовых нужд» населения городов Керчи, Феодосии, Судака, Евпатории и ряда районов, возникшая из-за дефицита запасов поверхностных вод. В [10] отмечается, что «Инвесторы - голландская компания NBK Cargo Service и израильские партнеры готовы заняться строительством в Керчи завода по опреснению воды на основе обратного осмоса, производительностью 20 млн. кубометров воды ежегодно, обеспечивающего потребность города. Стоимость проекта составляет порядка 50 млн. Евро». По предварительным оценкам, чтобы обеспечить потребности прибрежной части Крыма в пресной воде, необходимо 873 миллиона долларов и в эту сумму заложены следующие статьи расходов: комплексное строи-

тельство станций опреснения, фонд заработной платы персонала, расходы на электроэнергию, система водоводных сетей и трубопроводов, модернизация системы водосбора. Отмечается, что для удовлетворения потребности в пресной воде города Евпатории с численностью населения в 117 000 затраты на опреснительную станцию на основе обратного осмоса составят около 80 млн. долларов. «Предварительные расчеты гласят, что себестоимость опресненной воды будет 24 рубля за 1 кубометр, но если объемы производства будут масштабные, то цена кубометра пресной воды составит всего 15 рублей». Как получены эти стоимостные показатели - не ясно, чтобы оценить их достоверность, необходимо выбрать аналог для сравнения.

Сопоставляя планируемые затраты на реализацию опреснительного завода в Керчи, с действующим в Ашкелоне, в приведенных величинах (млн. долларов / млн. м³ воды в год) констатируем, что российский вариант вдвое дороже. Попытаемся разобраться, чем обусловлено такое превышение - суровым российским климатом, различиями солености морской воды, или другими причинами. Средняя температура поверхностного слоя воды в восточной части Средиземного моря в феврале равна 11-15 °С и возрастает до 27-30 °С в августе, а ее солесодержание составляет около 38 гр/дм³. Аналогичные показатели воды у побережья Крыма в отмеченные периоды - температура 8-9 °С и 18-20 °С, а солесодержание 17-21 гр/дм³. Основные факторы, лимитирующие удельную производительность обратноосмотических мембран и энергозатраты на опреснение, это температура, рабочее и осмотическое давления, и гидравлическое сопротивление мембранных аппаратов. Из-

за взаимной компенсации влияния температуры и осмотического давления, обусловленного соленостью и долей отбора, на удельную производительность мембран, следует, что она будет примерно равной в рассмотренных случаях. Сопоставляя стоимость электроэнергии в Израиле и по самому жесткому тарифу для населения в Крыму - 0,18 и 0,08 доллара США /кВт·час соответственно, очевидно, что стоимость энергопотребления на опреснение в Крыму будет вдвое ниже.

Приведенная довольно скудная и противоречивая информация, касающаяся удельных затрат на опреснение морской воды, обуславливает необходимость более детального рассмотрения статей затрат на разработку опреснительных систем. Ниже иллюстрируется метод расчета себестоимости опресненной воды на основе учета затрат, связанных с разработкой и эксплуатацией обратноосмотической станции, именуемой в дальнейшем степенью обратного осмоса рис. 1.

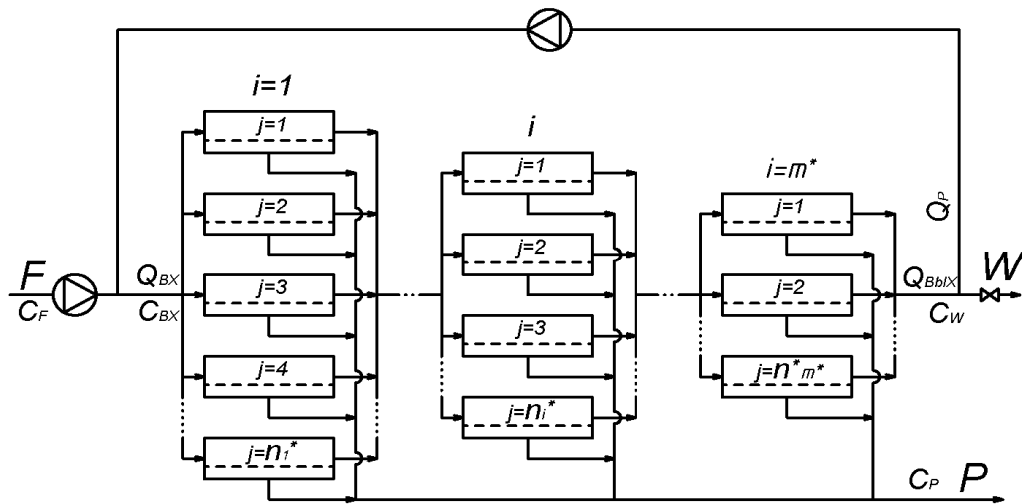


Рис. 1. Структура ступени обратного осмоса и схема потоков:

$Q_{вх}$, $Q_{вых}$, $Q_{рец}$ – потоки раствора в пределах ступени; F , W , P - потоки на входе и выходе из ступени, исходной смеси, ретанта и пермеата соответственно; C_F , C_W , C_P – концентрации исходной смеси, ретанта и пермеата соответственно; $E = Q_P / Q_{ввых}$ – кратность рециркуляции; P / F - доля отбора пермеата; $1 \leq i \leq m^*$, $1 \leq j \leq n^*$ - нижние индексы, характеризующие порядковый номер секции в ступени и аппарата в секции, соответственно (под секцией понимается произвольное число параллельно соединенных мембранных аппаратов)

При оптимизации мембранных процессов, следуя методу, изложенному в работе [11], учитываются две основные группы затрат - энергетические, а также сумма капитальных и эксплуатационных. Все эти статьи расходов в совокупности определяют затраты, K_0 (руб/час), отнесенные к

единице времени эксплуатации обратноосмотической ступени (станции):

$$K_0 = K_c \sum F_m + K_p \left[\frac{(E \Delta P + \Delta P_{mp}) W \sum F_m d_s}{4Le} + J_v \sum F_m \Delta P \right] \quad (1)$$

где K_c – стоимостной коэффициент (руб/м²·час); K_p' – тариф на электроэнергию (руб/кВт·час) отнесенный к к.п.д. насосной станции; ΣF_m – общая поверхность мембран в ступени (м²); d_3 L – эквивалентный диаметр и длина напорного канала мембранного аппарата (м); e – коэффициент, зависящий от геометрии напорного канала.

Преобразуем (1) к виду:

$$K_v = \frac{K_c}{J_v} + K_p' \left[\frac{wd_3}{LJ_v 4e} (E\Delta P + \Delta P_{mp}) + \Delta P \right]; \quad (2)$$

где $K_v = K_0 / (J_v \cdot \Sigma F_m)$ – удельные затраты на опреснение (руб/м³), рассматриваемые в качестве критерия оптимизации.

Дальнейший анализ (2) основывается на уравнениях переноса через мембрану и массоотдачи в напорном канале:

$$J_v = L_p (\Delta P - \sigma \Delta \pi); \quad (3)$$

$$\text{Exp}(J_v / \beta) = (C_3 - C_2) / (C_1 - C_2); \quad (4)$$

$$\Delta \pi = (C_3 - C_2) RTI \quad (5)$$

где J_v (м³/м²·с); и L_p (м³/м²·с·Па); – удельная производительность и коэффициент гидравлической проницаемости мембраны; $\Delta \pi$ – разность осмотических давлений в напорном и дренажном каналах (Па); σ – коэффициент отражения Ставермана; β – коэффициент массоотдачи (м/с); C_1 , C_3 и C_2 – солесодержание в объеме напорного канала, у поверхности мембраны и в пермеате соответственно (моль/м³); R – универсальная газовая постоянная (Дж/моль·К), T – абсолютная температура (К), I – осмотический коэффициент.

Для опреснения морской воды используются мембраны с

селективностью (0,995– 0,997), поэтому оправданы следующие допущения: $\sigma = 1$, $C_2 = 0$.

При этом (3), (4) и (5) сводятся к виду:

$$J_v = L_p (\Delta P - \pi); \quad (6)$$

$$\text{Exp}(J_v / \beta) = C_3 / C_1; \quad (7)$$

$$\pi = C_3 RTI; \quad (8)$$

Из критериального уравнения массоотдачи:

$$Sh = A Re^m Sc^n \quad (9)$$

где $Sh = \beta d_3 / D$, $Re = wd_3 / \nu$, $Sc = \nu / D$ – числа Шервуда, Рейнольдса и Шмидта соответственно; D – коэффициент диффузии, (м²/с); d_3 – эквивалентный диаметр, (м); A , m , n – постоянная и степенные коэффициенты; ν – кинематический коэффициент вязкости, (м²/с).

Выразим скорость течения в напорном канале:

$$w = \frac{\nu}{d_3} \left(\frac{1}{A \cdot Sc^n} \cdot \frac{J_v d_3}{\ln(C_3/C_1) D} \right)^{1/m} \quad (10)$$

Введем обозначение:

$$C' = \frac{\nu}{d_3} \left(\frac{1}{A \cdot Sc^n} \cdot \frac{d_3}{\ln(C_3/C_1) D} \right)^{1/m},$$

при этом

$$w = C' J_v^{1/m}; \quad (11)$$

Гидравлическое сопротивление напорного канала, на основании уравнения Дарси, для ламинарного

режима течения $\Delta P_{mp} = \lambda \frac{L}{d_3} \frac{\rho w^2}{2}$, где

$\lambda = \frac{A'}{Re}$ коэффициент трения, ρ – плотность (кг/м³), приводится к виду:

$$\Delta P_{mp} = \frac{A' \mu L w}{2 d_3^2} \quad (12)$$

Используя (6), (11) и (12), выразим параметры в уравнении (2) через J_V :

$$K_V = \frac{K_c}{J_V} + K'_p \left[\frac{C'd_3}{L \cdot 4e} J_V^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \left(\frac{J_V}{L_p} + \pi + \frac{A'\mu LC'}{2d_3^2} J_V^{1/m} \right) + \frac{J_V}{L_p} + \pi \right] = \tag{13}$$

$$\frac{K_c}{J_V} + K'_p \left[\frac{C'd_3}{LL_p} J_V^{1/m} + \frac{C'd_3\pi}{L} J_V^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} + \frac{(C')^2 d_3 A' \mu}{2d_3^2} J_V^{\left(\frac{2}{m}-1\right)} + \frac{J_V}{L_p} + \pi \right]$$

Завершая преобразования, в результате дифференцирования (13) получаем:

$$\frac{\partial(K_V)}{\partial J_V} = -\frac{K_c}{J_V^2} + K'_p \left[\frac{C'd_3}{mLL_p} J_V^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} + \frac{C'd_3\pi m}{(1-m)L} J_V^{\left(\frac{1}{m}-2\right)} + \frac{(C')^2 d_3 A' \mu m}{(2-m)2d_3^2} J_V^{\left(\frac{2}{m}-2\right)} + \frac{1}{L_p} \right] \tag{14}$$

Поиск $J_{V\text{ опт}}$ из (14) осуществляется традиционно, то есть при $\frac{\partial(K_V)}{\partial J_V} = 0$, затем рассчитываются следующие параметры: $\Delta P_{\text{опт}}$ из (6); $w_{\text{опт}}$ из (11), $\Delta P_{\text{тр}}$ из (12) и K_V из (2).

В приведенном методе анализа рассматривались средние, для ступени опреснения, значения рабочего давления, удельной производительности и скорости течения в напорных каналах

мембранных элементов, что связано с ростом погрешности при увеличении числа секций. Поэтому для повышения точности расчета необходимо более детально рассмотреть структуру мембранной ступени и потоки внутри нее.

С учетом детализации распределения мембранных аппаратов внутри ступени преобразуем (1) к виду (15):

$$K_0 = K_C F_m N + K'_p \left[\underbrace{\frac{((1-E)\Delta P_{\text{выхт}}^* + \Delta P_{\text{мп}}) w F_m d_3}{4Le}}_{\substack{(1-E)P_{\text{выхт}} w F_m d_3 n_m^* = WP_{\text{выхт}} \\ \text{Энергия, теряемая на выходе ретанга при дросселировании}}} + \underbrace{\left(\Delta P_{\text{выхт}}^* + \frac{\Delta P_{\text{мп}}}{2} \right) J_V F_m}_{\substack{P_{\text{ср}} \\ \text{Среднее давление в последней секции}}} \right] \underbrace{n_m^*}_{\substack{n_m^* = n_1 t^{(m^*-1)} \\ \text{Количество модулей в последней секции}}} + \tag{15}$$

$$+ \left[\underbrace{\frac{\Delta P_{\text{мп}} w F_m d_3}{4Le}}_{\substack{\text{Потери энергии на трение в предпоследней секции}}} + \underbrace{\left(\Delta P_{\text{выхт}}^* + (1 + 1/2) \Delta P_{\text{мп}} \right) J_V F_m}_{\substack{\text{Среднее давление в напорном канале предпоследней секции}}} \right] \underbrace{n_{(m^*-1)}}_{\substack{n_{(m^*-1)} = n_1 t^{(m^*-2)}}} + \dots$$

$$+ \dots + \left[\underbrace{\frac{\Delta P_{\text{мп}} w F_m d_3}{4Le} + \left(\Delta P_{\text{выхт}}^* + (m-1/2) \Delta P_{\text{мп}} \right) J_V F_m}_{\substack{\text{Мощность, потребляемая в первой секции}}} \right] n_1 + \underbrace{\left(\Delta P_{\text{вх}} - \Delta P_{\text{выхт}}^* \right) \frac{E w F_m d_3}{4Le} n_{m_i}^*}_{\substack{\text{Мощность, потребляемая циркуляционным насосом}}}$$

где N - общее число аппаратов в ступени опреснения, F_m - поверхность мембран в аппарате.

В уравнении (15) более детально отражено потребление энергии в рассмотренной ступени (рис. 1). Сгруппируем отдельные члены уравнения (15) следующим образом:

$$K_V = \frac{K_c F_m N}{P} + \frac{K'_p}{P} \left[\frac{\Delta P_{mp} w F_m d_2}{4Le} N + \Delta P_{вых} J_V F_m N + (n_1^* / 2) \Delta P_{mp} J_V F_m \cdot \sum_{i=1}^{m^*} (2i-1) t^{(m^*-i)} + \left((1-E) \Delta P_{вых} + m^* \Delta P_{mp} E \right) \frac{w F_m d_2}{4Le} n_1^* \right] = \frac{K_c F_m N}{P} + \frac{K'_p}{P} \left[N F_m \left(\Delta P_{mp} \frac{w F_m d_2}{4Le} + \Delta P_{вых} J_V \right) + (n_1^* / 2) \Delta P_{mp} J_V F_m \sum_{i=1}^{m^*} (2i-1) t^{(m^*-i)} + \left(m^* \Delta P_{mp} E + (1+E) \Delta P_{вых} \right) \frac{w F_m d_2}{4Le} n_1^* t^{(m^*-1)} \right] \quad (16)$$

Уравнение (16) в общем виде не дифференцируется, поэтому поиск минимального значения K_V , рассматриваемого в качестве критерия оптимизации по параметрам: ΔP_{ex} , E , w , m^* , n_1^* , осуществлялся численным методом, с использованием предварительно рассчитанных K_C и K_P .

Расчет стоимостных коэффициентов

1. Стоимость электроэнергии K_P в рублях за кВт·ч при традиционном способе генерации рассчитывается с учетом особенностей региона, например:

$$K_p = \frac{T \cdot K_{рег} L_{предпр} + E_{уст} K_{рег} N_{уст}}{L_{предпр}} \quad (17)$$

где T – тариф (руб./кВт·ч); $K_{рег}$ – коэффициент, учитывающий потери электрической энергии в сетях; $L_{предпр}$ – лимит, выделяемый опреснительной станции энергонадзором на год; $E_{уст}$ – стоимость 1 кВт установленной мощности; $N_{уст}$ – установленная мощность опреснительной станции, кВт.

Уравнение (17) следует рассматривать как вариант, характерный для конкретного региона, и может существенно

меняться из-за политики генерирующих и распределяющих электроэнергию организаций, а также региональных властей.

2. Расчет K_c для вновь проектируемого оборудования, зданий, сооружений и резервуаров на примере стадии обратного осмоса основывался на учете следующих статей затрат:

2.1 Стоимость $E_{осн}$ основного оборудования.

2.2 Стоимость E_1 трубопроводов и арматуры принимается за 15% от стоимости основного оборудования, т.е. $0,15E_{осн}$

2.3. Стоимость E_2 неучтенного оборудования составляет 20% от $E_{осн}$, т.е. $0,2E_{осн}$.

2.4. Транспортно-заготовительные и складские расходы E_3 - 8 – 10% от $E_{осн}$.

2.5. Затраты на монтаж, КиП и арматуру E_4 - 20% от $E_{осн}$, т.е. $0,2E_{осн}$.

2.6. Стоимость части помещения, отводимого для размещения оборудования стадии обратного осмоса, например, составляющей 20% общей площади размещения станции опреснения, т.е. коэффициент использования помещения $K_{исп.пом}=0,2$, из сэндвич-

панелей для размещения оборудования:

$$E_5 = E_{смп} + E_{матер}$$

где $E_{смп}$ – стоимость строительно-монтажных работ $E_{матер}$ материалов (на примере типового здания).

Проектный срок эксплуатации помещения - 30 лет, поэтому доля капитальных затрат на год составляет: $E_5/30$

Итого: затраты по статьям 2.1 – 2.5 составили $E_{осн} + 0,15E_{осн} + 0,2E_{осн} + 0,08E_{осн} + 0,2E_{осн} = 1,63E_{осн}$.

Эксплуатационные расходы

2.7. Амортизационные отчисления помещения составляли 12% от стоимости помещения (в том числе 2% на кап. ремонт) $\Pi = 0,12 K_{исп.пом} E_5 = 0,024 E_5$.

2.8. Накладные расходы 23% от E_5 : $= 0,23E_5 * 0,2 = 0,046 E_5$.

2.9. Заработная плата (3_1) обслуживающего опреснительную станцию персонала, из них 25% обслуживают непосредственно оборудование стадии обратного осмоса, с учетом отчислений на социальное страхование 37% от 3_1 составляет $1,37 3_1 * 0,25$

2.10 Амортизационные отчисления составляют 12% от стоимости оборудования опреснительной станции, т.е. $0,12 * 1,63E_{осн} = 0,196E_{осн}$.

2.11. Ремонт 3,8% от $1,63E_{осн}$, т.е. $0,038 * 1,63E_{осн} = 0,062E_{осн}$.

2.12. Стоимость мембранных элементов $V_{м.эл}$ с учетом кратности их замены. Из практики эксплуатации обратноосмотических систем опреснения следует, что замена всех мембранных элементов производится 1 раз в 3 года, следовательно: $V_{м.эл} = B \cdot N \cdot r$, где B – стоимость мембранного элемента, r – число элементов в одном аппарате.

Итого - эксплуатационные расходы: $E_{экспл} = 0,3425 * 3_1 + 0,258E_{осн} + V_{м.эл} + 0,07E_5$.

С учетом нормативного коэффициента эффективности, обычно принимаемого 0,15, стоимость станции, отнесенная к году ее эксплуатации, составит:

$$0,15 * 1,785E_{осн} = 0,268E_{осн}$$

Таким образом, K_c для стадии опреснения морской воды обратным осмосом выражается в виде:

$$K_c = (0,245E_{осн} + 1,263_1 + 0,196E_{осн} + 0,062E_{осн} + V_{м.эл} + 0,115E_5 + 0,006E_5) / 3_3 3_4 \Sigma F_m \quad (18),$$

где 3_3 – количество дней (суток) эксплуатации в году; 3_4 – количество часов эксплуатации станции в сутки.

Опреснительная станция традиционно состоит из узла водозабора с решетками, повысительной насосной станции, узла дозирования гипохлорита, стадий микрофльтрации с размером пор фильтрующих элементов последней 20-40 мкм, блока дозирования коагулянта, например, хлорида железа, стадии ультрафльтрации, блоков дозирования метабисульфита и антискаланта, стадии обратного осмоса и накопительных резервуаров [12]. Расчет удельных затрат на стадии ультрафльтрации аналогичен приведенному выше (см. уравнения 1-18). На остальных стадиях станции опреснения энергозатраты обусловлены расходом воды и гидравлическими сопротивлениями. При этом перечень капитальных и эксплуатационных затрат аналогичен приведенному в п. 2 и они отнесены к объему опресненной воды. Расчет себестоимости опреснения, выполнялся численно по уравнениям (6)-(10) и (14), а L_p и C_2 согласно [13].

3. Расчет K_p при генерации электроэнергии электростанцией на основе фотоэлементов и ветрогенератора.

Как отмечалось, в России более 10 млн. жителей не подключены к сети центрального электроснабжения по ряду причин: из-за высокой платы за подключение, наблюдаемой тенденции не зависеть от обслуживающих компаний, соседей и ряда других. Рассмотренные причины обуславливают актуальность автономных систем генерации электроэнергии за счет использования солнечной и ветровой энергии. Расчет требуемой мощности электростанции на основе фотоэлементов и ветрогенератора произведен по методикам [14] с учетом метеоро-

логических данных [15, 16]. Основными показателями количества доступной солнечной энергии региона является коэффициент инсоляции, характеризующий месячную сумму энергии солнечной радиации, приходящейся на пластину, направленную на юг под углом равным широте местности, а также соотношение солнечных, пасмурных и облачных дней в году. При расчете ветрогенератора основным показателем является среднемесячная скорость ветра. Распределение скорости ветра по времени описывалось зависимостью Вейбулла [17]. Принципиальная схема солнечно-ветровой опреснительной станции приведена на рисунке 2.

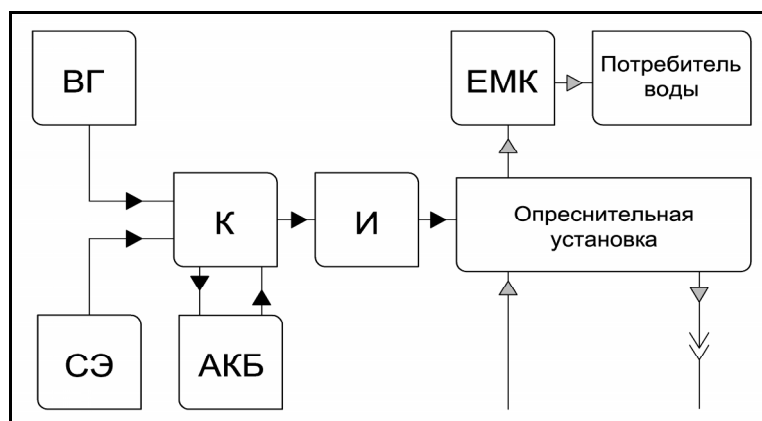


Рис. 2. Блок-схема автономного электроснабжения локальной опреснительной установки [14]

ВГ – ветрогенератор; СЭ – солнечные элементы; К – контроллер; И – инвертор напряжения; АКБ – аккумуляторная батарея; ЕМК – емкость сбора пресной воды

При благоприятных метеоусловиях опреснительная установка обеспечивается электроэнергией, вырабатываемой ветрогенератором и солнечными элементами. При этом опресненная вода накапливается в сборной емкости. Мощность СЭ и ВГ при неблагоприятных метеоусловиях, характерных для России, снижается до 5-15% от номинальной, поэтому для на-

копления энергии используются аккумуляторные батареи, которые заряжаются, когда вырабатываемой СЭ и ВГ мощности недостаточно для запуска опреснительной установки. Аккумуляторные батареи – самый дорогостоящий компонент электростанции, поэтому ограничиваем время работы опреснительной установки от аккумулятора до 2 часов. На сего-

дняшний день наиболее популярными являются свинцовые гелевые (AGM) и литиевые (LiFePO₄) аккумуляторные батареи, т.к. последние выдерживают большие токи разряда и заряда, поэтому для обеспечения равного времени автономной работы требуется меньшая их емкость. Стоимость литиевых аккумуляторных батарей, по сравнению со свинцовыми, втрое выше, при этом количество циклов заряд-разряд и срок службы существенно больше (см. таблицу 3). Расход

пресной воды на жителя загородного дома составляет около 0,2 м³/сутки, а энергопотребление на опреснение 1 м³ воды, достаточного для обеспечения суточного потребления семьи из 5 человек, составляет 2,98 кВт·час. При емкости АКБ 170 А·час напряжением 24 В, обеспечивающей 2 часа работы опреснительной установки, содержащей четыре обратноосмотических элемента Osmonics AG4040F, т.е. время, необходимое для подготовки 1 м³ пресной воды.

Таблица 3

Цены на оборудование для солнечно-ветровых электростанций в удельных величинах за 2017 год

Перечень оборудования	Удельные затраты	Срок эксплуатации, лет
Фотоэлементы 12V	150 \$/м ²	10
Контроллер заряда с частотной модуляцией	7 \$/А	15
Инвертор	350 \$/кВт	15
Аккумуляторные батареи :		
Тип AGM (12v)	3 \$/(А·час)	3
Тип LiFePO ₄ (12v)	8 \$/(А·час)	8
Ветрогенератор	1400 \$/кВт	15
Мачта, высотой 10м	500 \$/кВт	15
Монтаж и обслуживание:	0,35 от капитальных затрат	

Требуемая для зарядки АКБ номинальная мощность солнечно-ветровой электростанции, которая должна обеспечиваться солнечными батареями и ветрогенератором, должна быть не менее 1 кВт. Для обеспечения примерно равной среднемесячной выработки электроэнергии, исходя из региональных климатических особенностей (города Евпатория), мощности солнечных батарей и ветрогенератора должны составлять 0.6 кВт и 0.4 кВт, соответственно. При расчете затрат на солнечно-ветровую электростанцию мощностью 1 кВт себестоимость генерируемой ею электроэнергии составила 32,4 руб./кВт·час, т.е. многократно превы-

сила среднесуточный тариф - 3,8 руб./кВт·час в городе Евпатория. Ниже приведен расчет опреснительной станции для обеспечения населения города Евпатория, численностью около 117000, при норме потребления пресной воды 200 литров на человека в сутки, требуемая производительность составила 1000 м³/час.

Расчет габаритов оборудования опреснительной станции, вариантов структурной организации ступеней опреснения, капитальных, приведенных и энергозатрат, а также себестоимости пресной воды, производился по компьютерной программе, на основе приведенной выше методики. Среднегодовое солесодержание при-

брежной морской воды составляло 18 г/дм³, а температура принималась равной 14 °С. Используемые в расчете

цены и сроки эксплуатации основного оборудования опреснительной станции, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Цены и сроки эксплуатации основного оборудования опреснительной станции

Компонент	Характеристики	Цена	Срок экспл., лет	Кол-во, шт.
Организация узлов водозабора и сброса на 2500 м ³ /час	Расстояние до береговой линии 1800м, решетчатый фильтр 500мкм.	85 млн. руб.	10	1
Насос погружной	7 ати. 380м ³ /час 120 КВт	3 млн. руб./шт.	5	7
Модули ультрафильтрации Inge DIZZER XL0.9MB90	0,02мкм. Рабочая поверхность 90м ² Уд. произв. 80-100л/м ² час	300 тыс./шт.	10	301
Дисковые фильтры AZUD HF 412D-HF/14FX	Фильтрующие диски 20 мкм. Производительность 400м ³ /час	3 млн./шт.	10	7
Мембранный модуль	Osmonics AG8040F-400	38 тыс. руб./шт.	3	1320
Корпус аппарата	FRP 8040 1-8 300-1200 psi	32-158 руб./шт.	8	165
Насосы высокого давления Lowaga MP	Исполнение из дуплексной стали 20-100 бар.	0,2-3 млн. руб.шт.	5	5
Турбодетандер	ER PX-Q300 50 м ³ /час	24 млн. руб./шт.	15	20
Резервуар накопительный для пресной воды	Объем - 5000м ³	13 млн. руб./шт.	10	2

Результаты поиска минимальной себестоимости K_V опресненной воды с использованием тарифов на электроэнергию, обусловленных двумя способами ее генерации, а также представлением себестоимости в виде функции 4-х переменных $K_V = f(E; \Delta P_{нач}; w_i; m^*)$, т.е. рассмотрения разных вариантов структуры ступени опреснения и режимов ее эксплуатации в заданных диапазонах с определенным шагом (17):

$$\left\{ \begin{array}{l} E \in [0; 1), \text{ шаг } 0,1; \\ w_i \in [0,15; 0,45] [\text{м/с}], \text{ шаг } 0,05 [\text{м/с}]; \\ \Delta P_{нач} \in (0; 50] [\text{бар}], \text{ шаг } 1 [\text{бар}]; \\ m^* \in [1; 6], \text{ шаг } 1 \end{array} \right.$$

приведены на рис. 3 и 4.

Количество (N) мембранных аппаратов, с обратноосмотическими рулонными элементами Osmonics AG8040F-400 в ступени опреснения и

распределение их по секциям, рассчитывалось из условия равенства средней скорости w_i в каждой из секций.

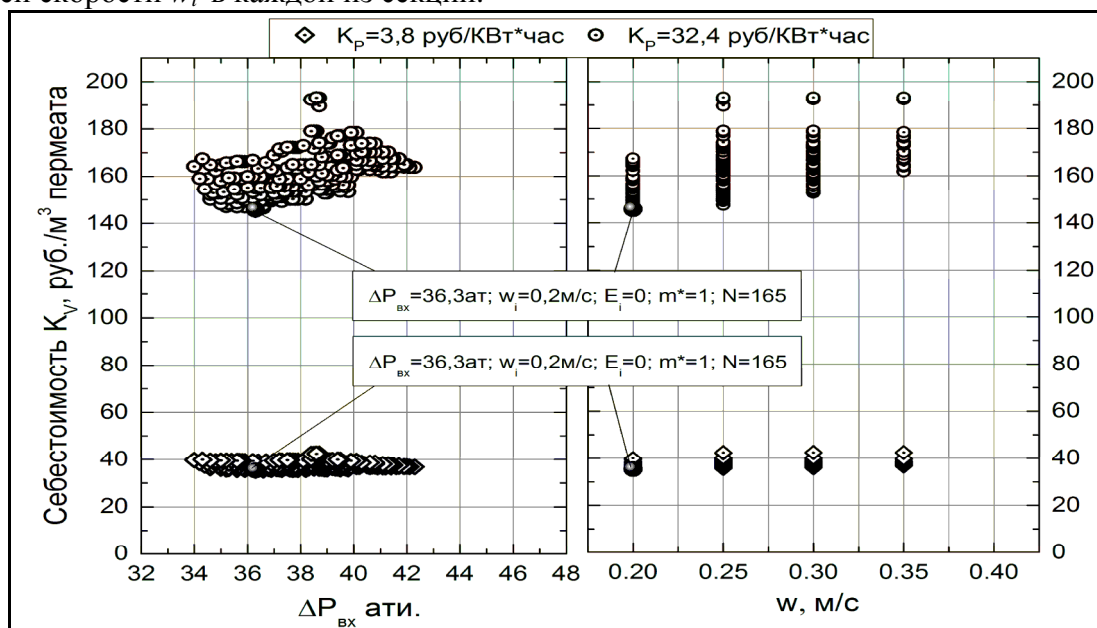


Рис. 3. Влияние рабочего давления ($\Delta P_{нач}$) и гидродинамического режима (w_i) на себестоимость опресненной воды (пермеата) при энергообеспечении за счет традиционных ($K_p=3,8$ руб./кВт х час) и возобновляемых ($K_p=32,4$ руб./кВт.час) энергоресурсов

Число обратноосмотических рулонных элементов в аппарате – 8. Доля отбора опресненной воды, $\theta=P/F=50\%$

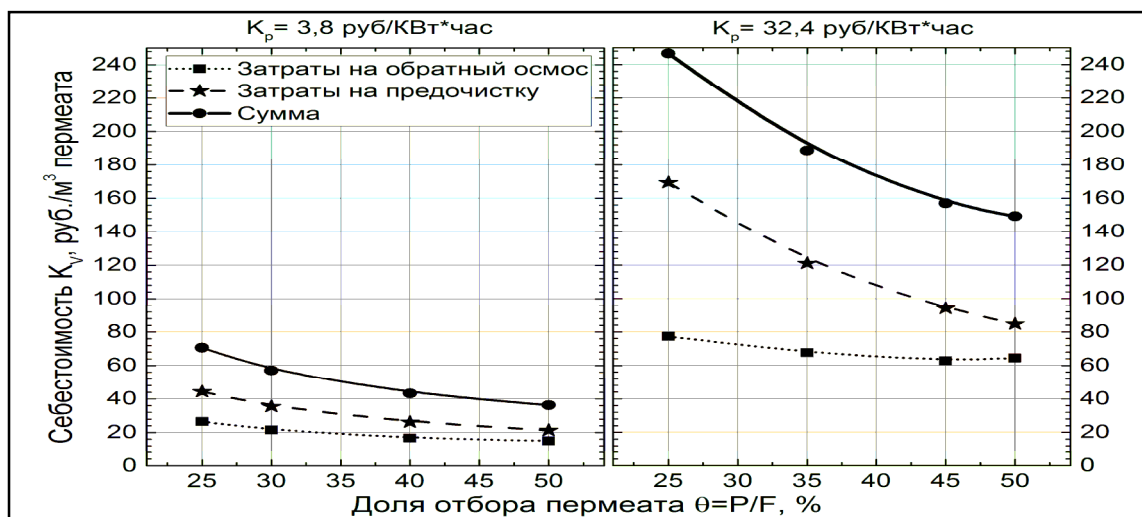


Рис. 4. Влияние доли отбора $\theta=P/F$ на себестоимость опресненной воды (пермеата) при энергообеспечении за счет традиционных и возобновляемых энергоресурсов

Число обратноосмотических рулонных элементов в аппарате – 8.

Выводы:

1. Приведен метод и алгоритм технико-экономического расчета себестоимости опресненной воды на основе сопоставления капитальных, эксплуатационных и энергетических затрат на проектирование, строительство и эксплуатацию опреснительных станций на основе обратного осмоса.

Метод основан на оптимизации технологических режимов эксплуатации оборудования опреснительных станций и вариантов структурной организации обратноосмотической ступени опреснения.

Сопоставлены себестоимости опреснения прибрежных вод: на примере технико-экономического расчета проекта опреснительной станции вблизи г. Евпатория - 38 руб./м³, а также опреснительных заводов в Ашкелоне - 0,5 \$/м³ и в Сингапуре - 0,49 \$/м³.

2. В результате выполненного расчета показано, что себестоимость опресненной воды при генерации потребляемой энергии от возобновляемых энергоресурсов вчетверо выше, по сравнению с использованием традиционных энергоресурсов. Тем не менее применение локальных опреснительных установок с устройствами генерации электроэнергии на основе возобновляемых энергоресурсов в настоящее время вполне оправдано, если сопоставить затраты на опресненную и бутилированную питьевую воду для населения регионов с дефицитом электроэнергии и пресной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ghaffour N., Missimer T.M., Amy G.L. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability // *Desalination*, No. 309, 2013. Pp. 197-207.

2. Dreizin Y., Tenne A., Hoffman D. Integrating large scale seawater desalination plants within Israel's water supply system // *Desalination*, No. 220, 2008. Pp. 132-149.

3. Hafez A., El-Manharawy S. Economics of seawater RO desalination in the Red Sea region, Egypt. Part 1. A case study // *Desalination*, No. 153, 2002. Pp. 35-347.

4. Тарифы на электроэнергию [Электронный ресурс] // EES EAEC: сайт. [2016] - URL: <http://www.eeseaec.org/contact-us/v-tarify-ceny-indikator>.

5. Electricity price by type of user [Электронный ресурс] // Eurostat: [сайт]. [2005-2016]- URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=ten00117>.

6. He Y., Xu Y., Pang Y., Wu R. A regulatory policy to promote renewable energy consumption in China: Review and future evolutionary path // *Renewable Energy*, No. 89, 2016. Pp. 695-705.

7. Воротницкий В.Э., Туркина О.В. Сравнительный анализ потерь электрической энергии в электрических сетях Российской Федерации и стран дальнего зарубежья [Электронный ресурс] // НТЦ ФСК ЕЭС [2010] - URL: http://www.ntc-power.ru/upload/presentation/Presentation_Vorotnitskiy_Turkina.pdf <http://www.transform.ru/articles/html/12reforma/ref00108.article>.

8. "АктивСолар" остановила солнечные электростанции в Крыму еще 1 апреля [Электронный ресурс] // Информационное агентство Крым информ: сайт. [2014]- URL: <http://www.c-inform.info/news/id/5600> (in press).

9. Global wind energy council. Global wind energy council // Frankfurt School UNEP Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy Finance. 2014 - URL: http://gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf.

10. Проблемы с водой в Крыму — скважины, водоводы или опреснение? [Электронный ресурс] // Перекоп.ру: сайт. [2016]- URL: <http://www.perekop.ru/water-problems-in-russian-crimea/> (in press).

11. Орлов Н.С. Методология разработки комплексных систем очистки жидких технологических сред на основе баромембранных процессов. Дисс. ..докт.

техн. наук: 05.17.18. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2000. 407 с.

12. Greenlee L.F., Lawler D.F., Freeman B.D., Marrot B., Moulin P. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges // *Water research*. No. 43. 2009. Pp. 2317–2348.

13. Анисимов С.И. Некоторые особенности переноса электролитов через обратноосмотические мембраны // *Успехи в химии и химической технологии*. Том 29. №2. 2015. С. 119-122.

14. Maleki A., Khajeh M.G., Rosen M.A. Weather forecasting for optimization of a hybrid solar-windpowered reverse osmosis water desalination system using a novel optimizer approach // *Energy*. No. 114. 2016. Pp. 1120-1134.

15. Погода в Евпатории [Электронный ресурс] // Погода и климат: сайт. [2011-2017]- URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=33929>

16. Солнечная инсоляция - справочные таблицы [Электронный ресурс] // Альтернативная энергия: сайт. [2016]- URL: <https://alternativenergy.ru/insolaciya.html#4>.

17. Рыхлов А.Б. К вопросу об аппроксимации скорости ветра на юго-востоке Европейской территории России законом распределения Вейбулла-Гудрича // *Известия Саратовского университета*. Том 10. № 2. 2010. С. 31-37.

Рукопись поступила в редакцию 05.12.2017

TECHNO-ECONOMIC SUBSTANTIATION ON THE DEVELOPMENT OF THE DESALINATION SYSTEMS BASED ON TRADITIONAL AND RENEWABLE ENERGY RESOURCES

N. Orlov, S. Anisimov

Examples of successful application for seawater desalination of reverse osmosis, multi-stage distillation and their set are considered. It is noted, characteristic for a number of the advanced countries, a tendency of start of the large-scale projects directed on realization of high-efficiency water-desalinating factories. The structure of world power on a way of generation of the electric power and regional tariffs is resulted. Examples of government programs of direct financing of development of large-scale projects of alternative power, and also indirect financing for similar medium- and small-scale projects, including power supply of individual houses are considered. The method and algorithm of technical and economic calculation of the cost price of desalinating waters on the basis of comparison of capital, operational and power expenses for designing, building and operation of water-desalinating stations of reverse osmosis are resulted. The method is based on optimization of technological modes of operation of the equipment of water-desalinating stations and variants of the structural organization of membrane desalination stages.

Key words: desalination, reverse osmosis, renewable energy, green energy, technical-economic calculation.

References

1. Ghaffour N., Missimer T.M., Amy G.L. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, No. 309, 2013. Pp. 197-207.
2. Dreizin Y., Tenne A., Hoffman D. Integrating large scale seawater desalination plants within Israel's water supply system. *Desalination*, No. 220, 2008. Pp. 132-149.
3. Hafez A., El-Manharawy S. Economics of seawater RO desalination in the Red Sea region, Egypt. Part 1. A case study. *Desalination*, No. 153, 2002. Pp. 35-347.
4. Tarifny na ehlektroehnergiyu [EHlektronnyj resurs] // EES EAEC: sajt. [2016] - URL: <http://www.eeseaec.org/contact-us/v-tarifny-ceny-indikator>.
5. Electricity price by type of user [EHlektronnyj resurs] // Eurostat: [sajt]. [2005-2016]- URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=ten00117>.
6. He Y., Xu Y., Pang Y., Wu R. A regulatory policy to promote renewable energy consumption in China: Review and future evolutionary path. *Renewable Energy*, No. 89, 2016. Pp. 695-705.
7. Vorotnickij V.EH., Turkina O.V. Sravnitel'nyj analiz poter' ehlektricheskoy ehnergii v ehlektricheskikh setyah Rossijskoj Federacii i stran dal'nego zarubezh'ya [EHlektronnyj resurs] // NTC FSK EEHS [2010] - URL: http://www.ntc-power.ru/upload/presentation/Prezentation_Vorotnitskiy_Turkina.pdf
<http://www.transform.ru/articles/html/12reforma/ref00108.article>.
8. "AktivSolar" ostanovila solnechnye ehlektrostancii v Krymu eshche 1 aprelya [EHlektronnyj resurs] // Informacionnoe agenstvo Krym inform: sajt. [2014]- URL: <http://www.c-inform.info/news/id/5600> (in press).
9. Global wind energy council. Global wind energy council // Frankfurt School UNEP Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy Finance. 2014 - URL: http://gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf.
10. Problemy s vodoy v Krymu — skvazhiny, vodovody ili opresnenie? [EHlektronnyj resurs] // Perekop.ru: sajt. [2016]- URL: <http://www.perekop.ru/water-problems-in-russian-crimea/> (in press).
11. Orlov N.S. Metodologiya razrabotki kompleksnyh sistem ochistki zhidkih tekhnologicheskikh sred na osnove baromembrannyh processov. Diss. ..dokt. tekhn. nauk: 05.17.18. M.: RHTU im. D.I. Mendeleeva, 2000. 407 s.
12. Greenlee L.F., Lawler D.F., Freeman B.D., Marrot B., Moulin P. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water research*. No. 43. 2009. Pp. 2317-2348.
13. Anisimov S.I. Nekotorye osobennosti perenosy ehlektrolitov cherez obratnoosmoticheskie membrany. *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii*. Tom 29. №2. 2015. S. 119-122.
14. Maleki A., Khajeh M.G., Rosen M.A. Weather forecasting for optimization of a hybrid solar-windpowered reverse osmosis water desalination system using a novel optimizer approach. *Energy*. No. 114. 2016. Pp. 1120-1134.
15. Pogoda v Evpatorii [EHlektronnyj resurs] // Pogoda i klimat: sajt. [2011-2017]- URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=33929>.
16. Solnechnaya insolyaciya - spravochnye tablicy [EHlektronnyj resurs] // Al'ternativnaya ehnergiya: sajt. [2016]- URL: <https://alternativenergy.ru/insolaciya.html#4>.
17. Ryhlov A.B. K voprosu ob approksimacii skorosti vetra na yugo-vostoke Evropejskoj territorii Rossii zakonom raspredeleniya Vejbullla-Gudricha. *Izvestiya Saratovskogo universiteta*. Tom 10. № 2. 2010. C. 31-37.