

УДК 36.65.68

С. П. Высоцкий, д-р техн. наук, Д. В. Мачикина

ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
г. Макеевка

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ОПРЕСНИТЕЛЕЙ СОЛЕННЫХ ВОД

Рассмотрен способ опреснения воды повышенной минерализации с применением двухскатных солнечных опреснителей в системах централизованного и децентрализованного водоснабжения. Обоснована целесообразность применения предложенного метода опреснения воды для решения проблемы дефицита пресной воды надлежащего качества в ДНР, ЛНР и Республике Крым.

Ключевые слова: энергия, солнечный испаритель, высокоминерализованная вода, опреснение, эффективность, гелиоустановка

Введение

Вода является удивительным веществом. Она способна растворять в той или иной мере почти все материалы. С этим связано ее использование во многих химических технологиях и теплоэнергетических процессах. Особым свойством воды является ее высокая теплоемкость, в несколько раз превышающая теплоемкость многих химических веществ. Это обуславливает функционирование так называемых тепловых машин нагрева, без которых невозможно существование современной цивилизации.

Вода является очень важным элементом в повседневной жизни. Она используется для приготовления пищи и питьевых целей. Нехватка воды питьевого качества является хронической, острой и распространенной проблемой во многих регионах Северной Африки, Ближнего Востока, Центральной и Южной Азии [1]. В настоящее время эта проблема является актуальной и для таких регионов, как Донецкая и Луганская Народные Республики и Республика Крым. Опреснение минерализованных вод в этих регионах является существенной альтернативой получения пресной воды. Несмотря на существующие достижения в области эффективности процессов получения пресной воды (например, в области обратного осмоса) опреснение минерализованных вод по-прежнему является значительным потребителем энергии [2].

Практический интерес представляет использование солнечной радиации для опреснения вод повышенной минерализации [3].

В страдающих от дефицита пресной воды многих регионах ДНР, ЛНР и Республики Крым проблема обеспечения населения пресной водой может быть решена за счет опреснения воды повышенной минерализации, которая на этих территориях имеется в избытке.

На современных станциях водоподготовки удаление загрязнений из воды ограничивается тремя-четырьмя уровнями очистки. При этом показатель минерализации воды практически не изменяется.

Для опреснения воды предложено много технологий, большая часть которых является дорогостоящими и энергоемкими. Учитывая сложную экономическую ситуацию в ДНР, ЛНР и Республике Крым целесообразно рассмотреть более приемлемые, с точки зрения экономики и экологии, варианты приготовления пресной воды. В качестве источника исходной воды могут быть использованы шахтные воды или морская вода [4], а в качестве источника энергии – солнечная радиация.

Цель работы

Оценка возможности и целесообразности использования для деминерализации солоноватых вод относительно простых солнечных дистилляционных установок.

Основная часть

Процесс подготовки питьевой воды, которая будет соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям, для нужд населения является очень трудоемким. На большинстве станций водоподготовки вода, прежде чем поступить к потребителю, проходит несколько этапов очистки, среди которых можно выделить и фильтрацию. Области применения различных технологий фильтрации представлены на рисунке 1.

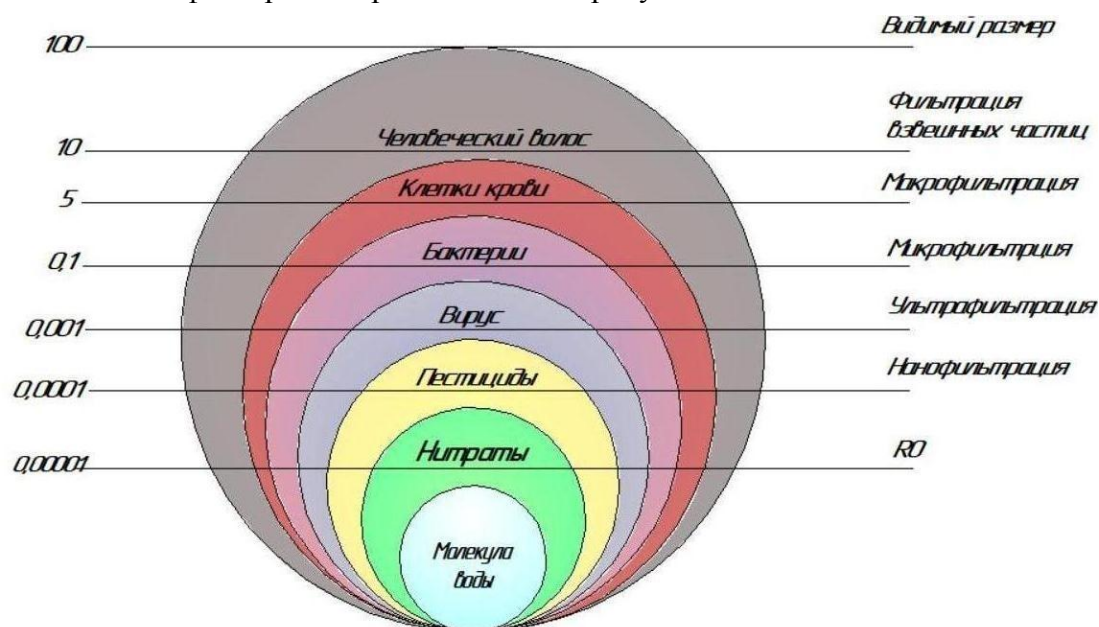


Рисунок 1 – Области применения технологий фильтрации

При приготовлении пресной воды, используемой для питьевых целей и приготовления пищи, следует исходить из принципа разумной достаточности. Для указанных целей требуется примерно 3,5 л воды на одного человека в сутки [1]. Задача приготовления необходимого количества пресной воды может быть решена с применением относительно простых солнечных испарителей. Для санитарно-бытовых нужд может быть использована вода повышенной минерализации.

Рассмотрим некоторые показатели уровней солнечной радиации в ДНР, ЛНР и Республике Крым. В среднем за год солнце светит 5–7 часов в сутки. Весной и осенью продолжительность сияния солнца составляет 170–270 часов в месяц (50–65 % возможного).

Уровень радиации в Республике Крым 118–119,3 ккал/см², 125–127 ккал/см² представляет собой значительную величину.

На период «провала» графика солнечного сияния в зимние месяцы придется запасаться водой, накопленной за счет солнечной радиации в весенние, летние и осенние месяцы.

Количество энергии, поступающей на поверхность Земли, по городам Симферополь, Донецк и Луганск (в кВт·ч/м²день) по месяцам года указано в таблице 1.

Таблица 1 – Уровень солнечной радиации (кВт·ч/м²день) в г. Симферополе, г. Донецке и г. Луганске в зависимости от месяца

Город	Месяц											
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Симферополь	1,27	2,06	3,05	4,30	5,49	5,84	6,20	5,45	3,06	2,60	2,50	2,07
Донецк	1,21	1,70	2,94	4,04	5,48	5,55	5,66	5,19	3,67	2,24	1,23	0,96
Луганск	1,23	2,06	3,25	4,05	5,46	5,57	5,65	4,99	3,62	2,23	1,70	0,93

Минимальный расход энергии, необходимый для обеспечения обессоливания воды повышенной минерализации, измеряется по формуле

$$W = \frac{G_i \cdot \rho_\mu \cdot V_1 \cdot A \cdot R \cdot T}{(V_1 \cdot V_2) \cdot V_m \cdot \rho_0} \ln \left(\frac{\delta_{\rho_\mu} \cdot V_1 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c} \right) + \rho_0 V_2}{\delta_{\rho_\mu} \cdot V_1 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c} \right) + \rho_0 V_1} \right), \quad (1)$$

где W – расход энергии, кВт·ч/м³ (для получения обессоленной воды);

G_i – содержание солей в исходной воде, ‰;

ρ_μ – плотность исходной минерализованной воды, кг/м³;

V_1 – начальный объем воды, м³;

A – коэффициент давления насыщенных паров воды – $5,37 \cdot 10^{-4}$ (‰⁻¹);

R – универсальная газовая постоянная – 8,314 Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура, К;

V_2 – конечный объем воды (рассола), м³;

V_m – молярный объем воды, 0,018 л/моль;

ρ_0 – плотность чистой (обессоленной) воды, кг/м³;

ρ_c – усредненная плотность исходной, минерализованной воды, кг/м³.

Поток солнечной радиации при облучении поверхности повышает ее температуру в соответствии с законом Стефана-Больцмана для серого тела:

$$j = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где j – радиационный поток энергии, Вт/м²;

ε – излучательная способность в долях;

σ – константа Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴;

T – абсолютная температура, К.

В течение последнего столетия технологии опреснения воды использовались на наземных заводах и кораблях для обеспечения людей пресной водой. Современные технологии воды представлены на рисунке 2.

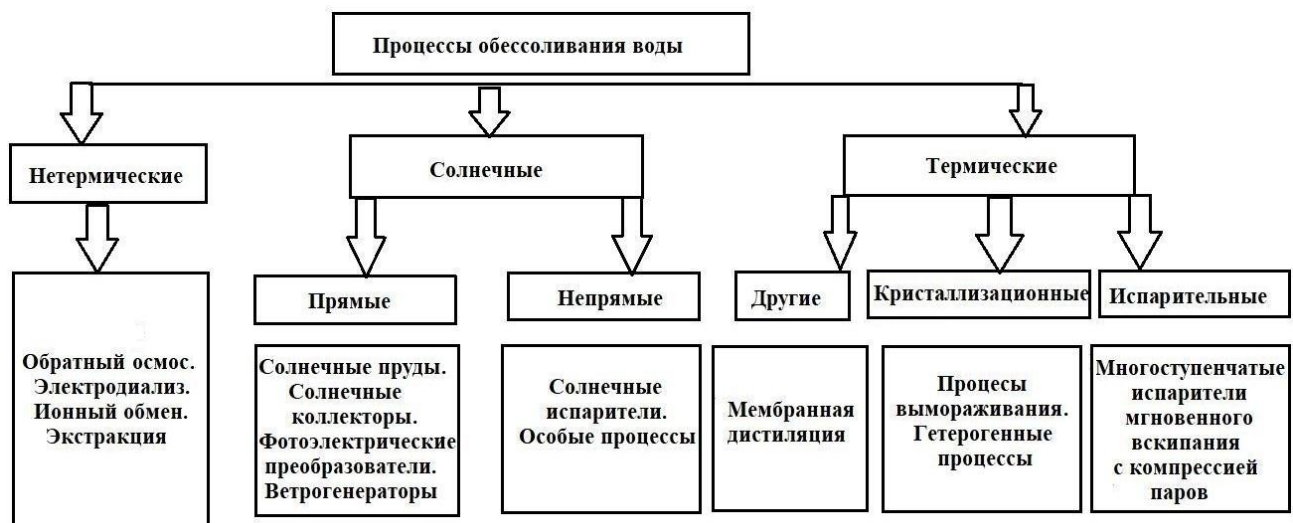


Рисунок 2 – Категории процессов опреснения воды

Стандартные способы опреснения воды, такие как мгновенное вскипание, мультиэффект, компрессия пара и обратный осмос целесообразны только для установок производительностью 100–500 00 м³ пресной воды в день [3, 4]. Применение этих технологий экономически невыгодно для производства небольшого количества пресной воды, а также их эксплуатация существенно осложнена на островах и в отдаленных районах по причине наличия ограничений в техническом обслуживании и энергоснабжении. Кроме того, использование традиционных источников энергии для управления этими технологиями оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, опреснение с применением в качестве источника энергии солнечной радиации является не только логичным, но и в целом абсолютно необходимым.

Использование солнечной энергии в установках для дистилляции воды имеет долгую историю. Эта технология хорошо усовершенствована и испытана в полевых условиях во всем мире. Главное преимущество гелиоустановок – простота конструкции и использование простого местного материала, а главный недостаток – низкая эффективность.

Солнечные неподвижные установки используются для воспроизведения гидрологического цикла в гораздо меньших масштабах за счет прямого использования солнечного света. Конструкция и принцип действия солнечного опреснителя по-прежнему прост. Солнечная энергия поступает в устройство через наклонную прозрачную стеклянную или пластиковую панель и нагревает бассейн с соленой водой. Дно бассейна обычно черного цвета для более эффективного поглощения солнечной энергии. Нагретая вода испаряется, а затем конденсируется на более холодных стеклянных полях. Затем конденсированные капли стекают по панелям и собираются для использования. Как правило, эффективность солнечных неподвижных элементов обычно составляет 50 %, а это означает, что они используют менее 50 % падающего солнечного излучения.

Базовая конструкция солнечного аппарата, который похож на теплицу, показана на рисунке 3.

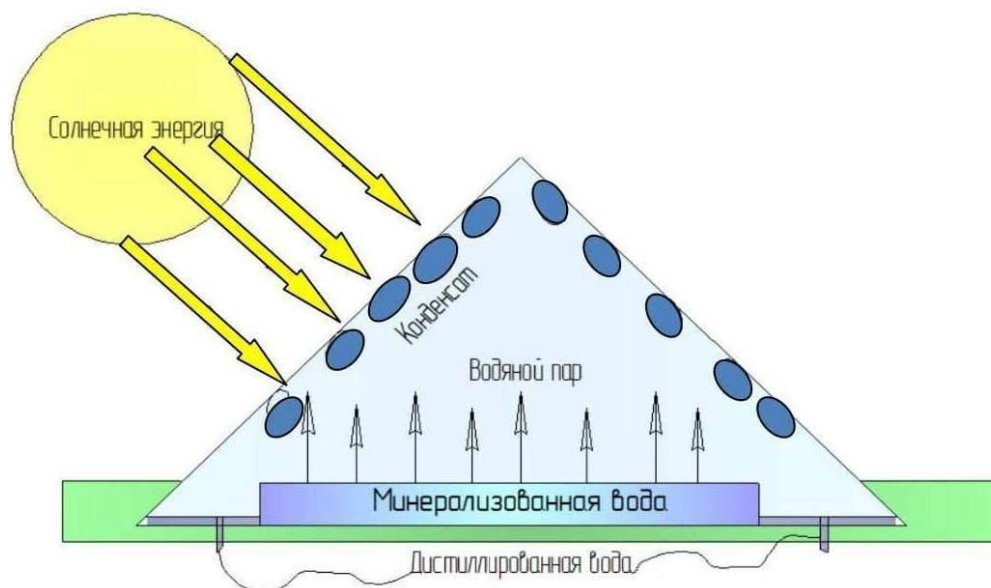


Рисунок 3 – Механизм теплопередачи солнечного дистиллятора

Солнечные дистилляторы были изучены для производства опресненной воды с использованием солнечной энергии. Многие исследователи изучали влияние различных факторов окружающей среды (поступление солнечной энергии, температура окружающей среды, глубина воды и скорость ветра) на эффективность работы солнечной опреснительной установки. В большинстве случаев, даже в оптимизированных условиях эксплуатации, заявленная эффективность солнечной батареи с одним бассейном все еще находилась в диапазоне

30–45 % с получением пресной воды менее 5 л/м^2 . Такой низкий КПД объясняется главным образом полной потерей скрытой теплоты конденсации водяного пара на стеклянной крышке солнечного опреснителя. Результаты исследований [1, 3, 5] показали, что средняя производительность по дистилляту в дневное время составляет около 4 л/м^3 с КПД системы 38 % в солнечный полдень.

Среднесуточная выработка солнечной установки, основанная на данных исследований за 8 дней в июле 2004 г., составила $1,7 \text{ л/сут}$ для площади бассейна $0,54 \text{ м}^2$. КПД дистиллятора был рассчитан как 30,65 % с максимальной производительностью $0,339 \text{ л/ч}$ за 1300 ч его работы.

Принципиальная схема проектируемого одинарного бассейнового солнечного аппарата представлена на рисунке 4.

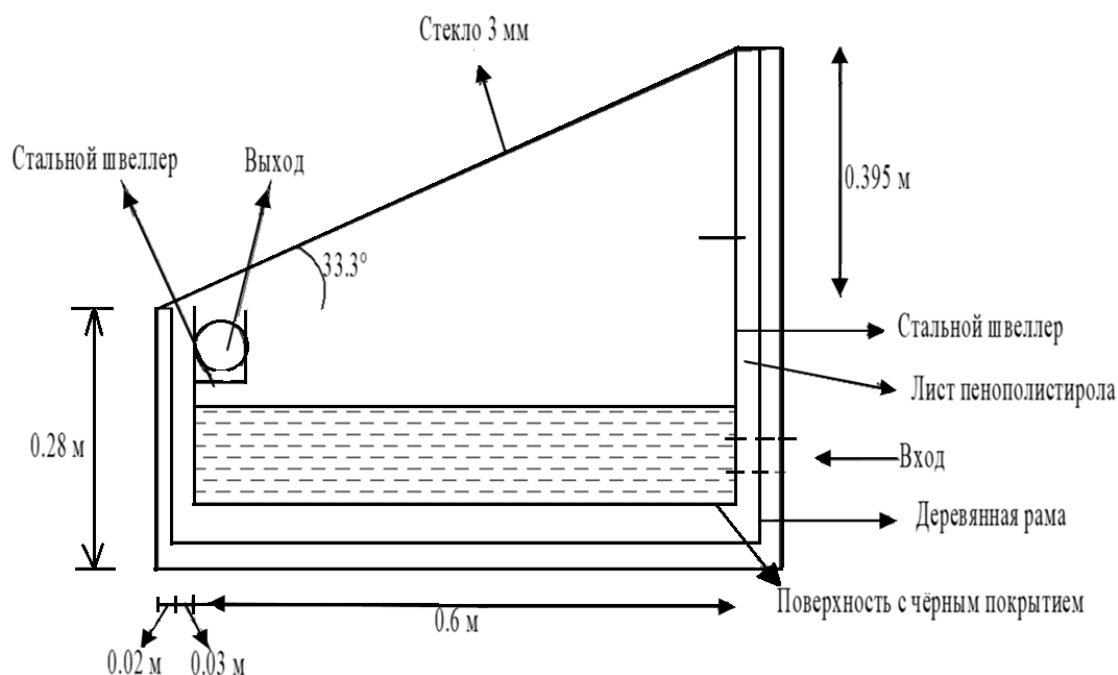


Рисунок 4 – Принципиальная схема проектируемого одинарного бассейна солнечного аппарата

Гелиоустановки имеют низкую производительность из-за потери тепла конденсации в окружающую среду через стеклянную крышку. Эта проблема была решена путем использования этого тепла для нагрева рассола в мультиэффективных преобразовательных аппаратах. Однако не было сделано никаких работ по использованию тепла рассеиваемого из нижней части перегонного куба, за исключением изоляции нижней части, которая не предотвращает рассеивание тепла. Другой метод, который может быть использован для повышения производительности солнечных преобразовательных станций – это использование систем хранения либо явного, либо скрытого тепла.

Одноступенчатый солнечный дистиллятор бассейнового типа и обычный коллектор с плоской пластиной в работе были соединены вместе, чтобы изучить влияние увеличения мощности на дистиллятор в местных условиях. Входной патрубок был соединен с пластинчато-ребристым коллектором местного производства так, что его выходное отверстие соединялось с емкостью для питания дистиллятора вместо общего накопительного резервуара. Максимальная суточная выработка солнечной энергии составляла около $1,4 \text{ л/м}^3$, а его эффективность составляла около 30 % при соответствующей средней солнечной инсоляции 28 МДж/день . Качество конденсатной воды было проанализировано и установлено, что она сопоставима со стандартами качества воды, а также с дождевой и минеральной водой. Установлено влияние соединения плоского солнечного коллектора на производительность сол-

нечных перегородок. Было установлено, что соединение солнечного коллектора с дистиллятором увеличило производительность на 36 %. Принципиальная схема, показывающая расположение используемой солнечной неподвижной системы, представлена на рисунке 5.

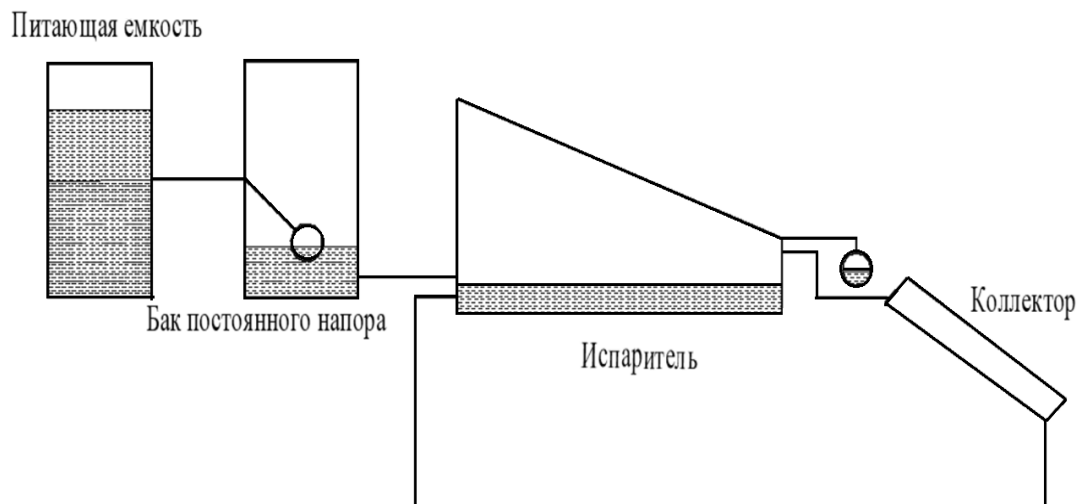


Рисунок 5 – Принципиальная схема, показывающая расположение систем испарителя

Для испарения всего 1 кг воды при температуре 30 °С требуется около 2400 кДж. Если в этом процессе используется солнечная энергия, требуется большая площадь коллектора и, соответственно, требуются большие затраты на установку. Чтобы такая идея была экономически жизнеспособной, необходимо использовать энергосберегающую технологию опреснения. Повышение энергоэффективности возможно за счет восстановления энтальпии испарения в многослойной конструкции. Основное преимущество системы, состоит в том, что она проста в использовании и позволяет исключить такие устройства, как насосы и электронные устройства управления. Принципиальная схема солнечной опреснительной установки представлена на рисунке 6.

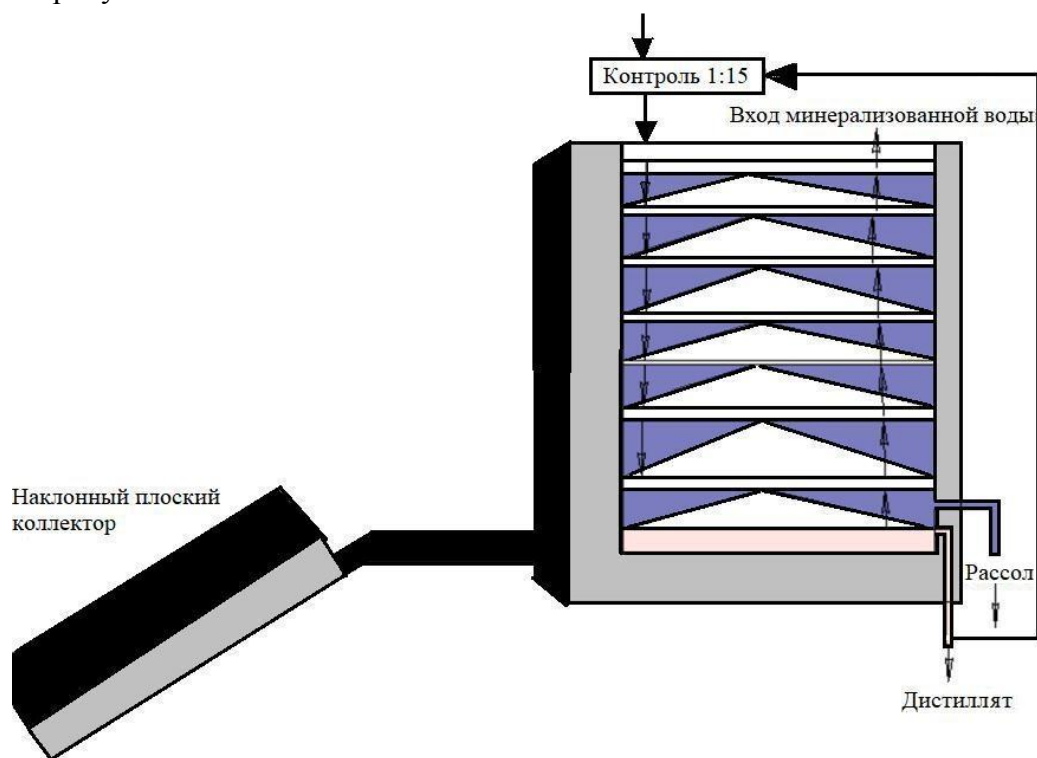


Рисунок 6 – Схема солнечной многослойной опреснительной установки

Самый низкий уровень установки служит первым уровнем опреснительной башни и резервуаром для опресненной воды. Тепло от плоского пластинчатого коллектора поступает в нижний резервуар. Конденсат проходит непосредственно через коллекторы, выступая в качестве теплоносителя. Поскольку коллекторы расположены перед конденсационной установкой, циркуляция через солнечный коллектор осуществляется за счет нормальной тепловой конвекции. Каждый из двух коллекторов площадью 2 м^2 имеет собственную систему циркуляции. Сравнение габаритных размеров тепличного котла с опреснительной установкой с плоским коллектором и параболическим отражателем представлено на рисунке 7.



Рисунок 7 – Размещение тепличного котла с опреснительными установками с плоским коллектором и параболическим отражателем

На основании проведенного анализа можно сказать, что использование скрытой теплоты конденсации для нагрева более холодного слоя минерализованной воды повысит производительность системы. Солнечный водонагреватель с вакуумной трубкой и тепловыми трубками, подключенный к испарительной конденсационной камере, предлагается в качестве новой конструкции солнечной опреснительной системы. Испарительная конденсационная камера представляет собой многофункциональную дистилляционную установку, которая имеет четыре слоя испарения и четыре поверхности конденсации. Горячая вода из накопительного бака солнечного водонагревателя подается в нижний бассейн испарительно-конденсационной камеры, а минерализованная вода, подлежащая дистилляции, подается в верхний испарительный слой камеры. Вода, испаряющаяся из нижнего испарительного слоя в боксе, конденсируется на наклонной конденсационной поверхности и одновременно нагревает соленую воду во втором испарительном слое. Этот процесс повторяется между различными слоями испарения и конденсации в боксе. Таким образом, основная идея этого солнечного аппарата заключается в том, что водяной пар в любом испарительном слое нагревает следующий, и в то же время конденсируется на наклонной поверхности в канале для конденсата. Данная система представлена на рисунке 8.

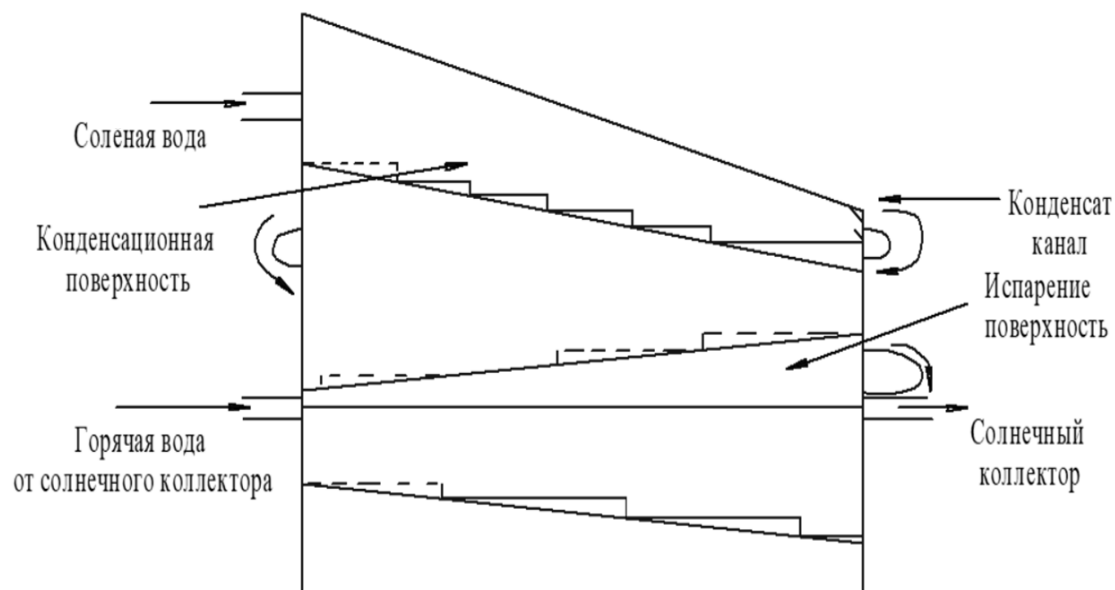


Рисунок 8 – Схема предлагаемого испарительного конденсационного бокса

Заключение

Использование солнечной радиации позволяет решить проблему обеспечения населения пресной водой в первую очередь для питьевого водоснабжения и приготовления пищи. Для водоснабжения в отдельных регионах целесообразно разделение систем децентрализованного питьевого водоснабжения и централизованного санитарно-технического. В качестве исходной воды для опреснения можно использовать: в ДНР и ЛНР – шахтную воду, в Республике Крым – морскую. Решить основную проблему систем солнечных опреснителей, а именно их низкий КПД, можно путем применения двускатных дистилляционных гелиоустановок. Для повышения производительности испарительно-конденсационной установки целесообразно увеличить количество слоев испарения и конденсации паров.

Список литературы

1. Ali, M. Seawater Desalination Using Solar Energy Sources / M. Ali. – Текст : электронный // ResearchGate : [сайт]. – 2020. – June. – URL: https://www.researchgate.net/publication/341901546_Seawater_desalination_using_solar_energy_sources.
2. Высоцкий, С. П. Использование шахтных вод для питьевого водоснабжения и в производственных циклах промышленных предприятий / С. П. Высоцкий, С. Е. Гулько // Вісті Донецького гірничого інституту. Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю. – 2013. – Ч. 1, № 2(33). – С. 200–208.
3. Stroud, M. Solar Desalination in the Southwest United States: A Thermoeconomic Analysis Utilizing the Sun to Desalt Water in High Irradiance Regions / M. Stroud // University of Arizona. – 2012. – 102 p.
4. Высоцкий, С. П. Использование шахтных вод в качестве резервного источника водоснабжения / С. П. Высоцкий, С. Е. Гулько // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – 2014. – № 1(33). – С. 82–98.
5. Chandler, David L. Simple, Solar-Powered Water Desalination / David L. Chandler. – Текст : электронный // MIT News : [веб-сайт]. – 2020. – February 6. – URL: <https://news.mit.edu/2020/passive-solar-powered-water-desalination-0207>.

С. П. Высоцкий, Д. В. Мачикина
ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка
Анализ применения солнечных опреснителей соленых вод

В данной статье рассмотрен и обоснован метод приготовления пресной воды с использованием солнечных опреснителей. Постоянный рост численности народонаселения мира и, как следствие, рост потребления природных ресурсов и ухудшение экологической обстановки вынуждает искать альтернативные источники жизненно необходимого для каждого жителя ресурса – пресной воды. На сегодняшний день наиболее остро проблема дефицита питьевой воды стоит в ДНР, ЛНР и Республике Крым.

Для решения проблемы деминерализации воды на протяжении многих лет было предложено множество вариантов, однако большая часть стандартных методов опреснения воды (мгновенное вскипание, мультиэффект, компрессия пара и обратный осмос) очень дороги для вышеуказанных регионов ввиду сложной экономической ситуации. Также, для обеспечения жизнедеятельности классических установок опреснения воды, необходимо значительное количество электроэнергии, что негативно сказывается на экологической обстановке ДНР, ЛНР и Республики Крым. С учетом вышеизложенного, для рассматриваемых регионов, логично предложить альтернативные, самое главное, дешевые установки для опреснения воды. К таким установкам можно отнести гелиоопреснители. Использование солнечной радиации для деминерализации вод позволит решить проблему дефицита пресной воды и снизит техногенную нагрузку на окружающую среду ввиду отсутствия необходимости использования ресурсоемких источников энергии.

ЭНЕРГИЯ, СОЛНЕЧНЫЙ ИСПАРИТЕЛЬ, ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННАЯ ВОДА, ОПРЕСНЕНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ГЕЛИОУСТАНОВКА

S. P. Vysotskiy, D. V. Machikina
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka
Analysis of the Solar Salt Water Distiller Application

This article discusses and substantiates the method for preparing fresh water using solar distillers. The constant growth of the world's population and, as a consequence, the growth of the natural resources consumption and the deterioration of the ecological situation forces us to look for alternative sources of the vital resource for every inhabitant – fresh water. Today, the most acute problem of drinking water shortage is in the DPR, LPR and Crimea.

To solve the problem of water demineralization, many options have been proposed over the years, however, most of the standard water desalination methods (instant boiling, multi-effect, steam compression and reverse osmosis) are very expensive for the above regions due to the difficult economic situation. Also, to ensure the life of the classic water desalination plants, a significant amount of electricity is needed, which negatively affects the environmental situation of the DPR, LPR and Crimea. In view of the above, for the regions under consideration, it is logical to propose the alternative, and most importantly, cheap water desalination plants. Such installations include solar water distiller. The use of solar radiation for water demineralization will solve the problem of the fresh water shortage and will reduce the technogenic load on the environment in the absence of the need to use resource-intensive energy sources.

ENERGY, SOLAR EVAPORATOR, HIGHLY MINERALIZED WATER, DESALINATION, EFFICIENCY, SOLAR PLANTS

Сведения об авторах:

С. П. Высоцкий

SPIN-код: 7497-0100
 Scopus Author ID: 7004891012
 ORCID ID: 0000-00002-2988-7245
 Телефон: +38 (071) 391-35-97
 Эл. почта: sp.vysotsky@gmail.com

Д. В. Мачикина

Телефон: +38 (071) 352-83-27
 Эл. почта: d.machikina@mail.ru

Статья поступила 16.11.2020

© С. П. Высоцкий, Д. В. Мачикина, 2020

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