

**СТРОИТЕЛЬСТВО, ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ТРАНСПОРТ**

УДК 621.472

**Богачев Владислав Владимирович, Буслов Сергей Валерьевич****ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ СОЛЯНЫХ ПРУДОВ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ**

*В статье описан принцип работы соляного солнечного пруда и характеристики климата в г. Ставрополе. Рассмотрена возможность применения таких прудов для производства тепловой и электрической энергии в Ставропольском крае.*

*Ключевые слова: солнечный соляной пруд, градиент температуры, солнечная энергия, теплообменник, климат.*

**Bogachev Vladislav Vladimirovich, Buslov Sergey Valer'evich  
PROSPECTS OF SOLAR SALT PONDS APPLICATION FOR PRODUCTION OF HEAT  
AND ELECTRICITY IN THE STAVROPOL REGION**

*The principle of solar salt ponds functioning and characteristics of climate in Stavropol is described. Possibility of such ponds application for the production of heat and electricity in the Stavropol region is considered.*

*Key words: solar salt pond, temperature gradient, solar energy, heat exchanger, climate.*

Аккумуляция и преобразование солнечной энергии с применением солнечных прудов (СП) занимает все более заметное место в ряду современных технологий использования возобновляемых источников энергии. Принцип действия СП, подробно описанный в [1], основан на аккумуляции низкопотенциальной теплоты в придонной области гидроизолированного резервуара глубиной 2–3 м, заполненного рассолом с градиентом концентрации соли по глубине пруда. Градиент концентрации обеспечивает подавление свободной конвекции наиболее нагретых слоев жидкости от дна СП к поверхности. Энергетические показатели СП зависят от таких факторов, как суммарная энергия солнечной радиации, условия теплообмена с нижележащей толщей грунта, конструктивное решение СП. Высокая теплоаккумулирующая способность большой массы рассола обуславливает независимость рабочих параметров СП от суточных и даже недельных колебаний уровня солнечной радиации и температуры наружного воздуха. При благоприятных условиях размещения и оптимальной конфигурации СП температура рассола в придонной области пруда может достигать 80–90 °С, а результирующий КПД преобразования солнечной энергии в тепловую – 20–25 %.

В настоящее время в мире действует около 40 СП различного назначения. Существующие в настоящее время технологии позволяют преобразовывать низкопотенциальную теплоту СП в электроэнергию с использованием энергоустановок на органических низкокипящих теплоносителях. Самая крупная солнечнопрудная электростанция (СПЭС) такого типа мощностью 5 МВт на базе СП площадью 0,25 км<sup>2</sup> была сооружена в Израиле в 1984 г. Национальные программы сооружения СПЭС, реализующие аналогичные технологии, разработаны и осуществляются в США, Австралии и в некоторых других странах.

Низкопотенциальная теплота СП используется также на нужды горячего водоснабжения, для отопления теплиц, жилых домов, плавательных бассейнов, сельскохозяйственных сушилок и пр.

Еще одно важное направление применения СП – опреснение воды. В Италии с 1986 г. успешно эксплуатируется коммерческий СП площадью 20 тыс. м<sup>2</sup>, обеспечивающий производство пресной воды в объеме 120 т/сут. Расходы на строительство этого СП удалось компенсировать менее чем за 5 лет. Частная швейцарская компания «Atlantis Energy» реализовала ряд проектов солнечнопрудных опреснителей морской воды в арабских странах.

О высокой эффективности коммерческого применения солнечных прудов для получения глауберовой и других солей свидетельствует опыт аргентинских частных компаний, развернувших промышленное производство солей с использованием солнечнопрудной технологии. Аналогичные работы начаты в Мексике.

В последние годы наметилась тенденция к организации многоцелевого использования СП. Так, в США СП площадью 3,5 тыс. м<sup>2</sup>, сооруженный в г. Эль-Пасо и предназначенный изначально для обеспечения низкопотенциальным теплом пищевого комбината, впоследствии был снабжен энергоустановкой мощностью 100 кВт и установкой для опреснения подземных рассолов.

В нашей стране опыт разработки СП имеют Институт высоких температур (ИВТАН), Теплоэлектропроект и некоторые другие исследовательские организации.

Возможны два альтернативных варианта использования СП:

1) получение теплоносителя с повышенной температурой, максимально близкой к требуемой по условиям теплоснабжения потребителей;

2) применение СП как источника низкопотенциальной теплоты для теплового насоса. В этом случае температуру рассола в СП в течение года целесообразно поддерживать на уровне, соответствующем диапазону рабочих температур теплового насоса, т.е. в интервале 10–40 °С.

Рассмотрим, что такое солнечный соляной пруд и каковы его характеристики.

Пруд собирает солнечную энергию, а горячий рассол из нижней конвективной зоны пруда подается в теплообменник-испаритель – аналог котла на обычной ТЭС, где нагревается фреон. В турбине фреон передает мощность электрогенератору, затем конденсируется, отдавая сбросную теплоту циркуляционной воде, и насосом закачивается в испаритель. Это обычный цикл Ренкина всех низкотемпературных энергетических установок: геотермальных, океанских, утилизационных на влажном паре.

Солнечный соляной пруд (рис. 1) [2] – это неглубокий (2–4 м) бассейн с крутым рассолом в нижней его части, у которого в нижнем придонном слое температура под действием солнечной радиации достигает 100 °С и даже выше.

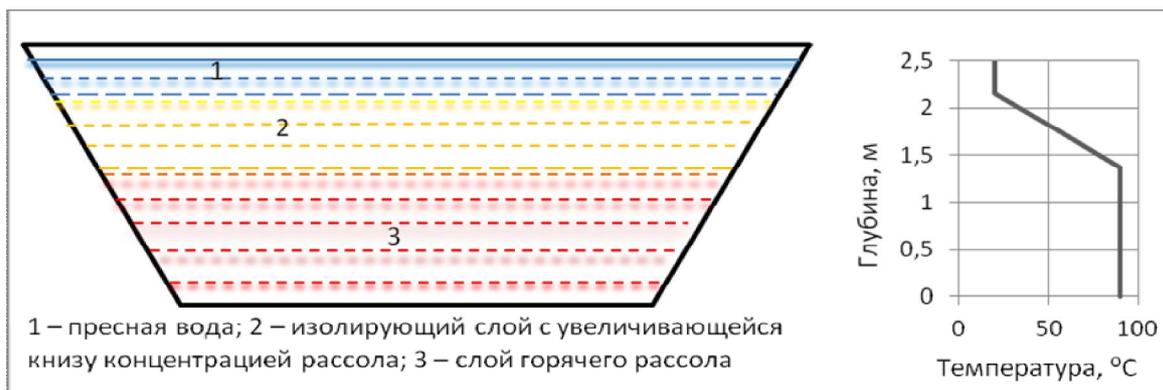


Рис. 1. Схема солнечного соляного пруда и изменение температуры жидкости по глубине пруда

Физической основой возможности получения таких высоких температур вблизи дна пруда (рис. 1) является подавление гравитационной конвекции – всплытия нагретой Солнцем вблизи дна жидкости вверх под действием архимедовой силы, если плотность жидкости падает с ростом температуры. Чистая и слабосоленая (в том числе морская) вода подчиняется этому закону: по мере нагрева из-за термического расширения плотность уменьшается и нагретая вода всплывает вверх, отдавая тепло воздуху, а её место замещает холодная. Устанавливается непрерывный процесс конвекции с переносом теплоты от нагретого солнцем дна вверх и отдача ее воздуху. Именно поэтому вода в море не нагревается выше 25–30 °С.

В солнечном пруду такой конвекции нет, потому что у крутосоленого рассола большой плотности, находящегося у дна, по мере нагрева плотность повышается из-за роста растворимости соли в воде и этот эффект пересиливает действие расширения жидкости. Соль в горячей воде растворяется быстрее, чем в холодной, в основном благодаря диффузии. Следовательно, при нагреве придонного слоя кристаллы соли быстрее переходят в рассол, увеличивая его плотность.

Механизм отдачи тепла от нагреваемого дна и придонного слоя – это только теплопроводность через грунт вниз, через боковые откосы и слой неподвижной воды вверх. Основную часть энергии в солнечном спектре несут коротковолновые, видимые и ультрафиолетовые лучи, которые слабо поглощаются в толще воды и достигают дна. Итак, в таком пруду часть солнечного излучения инфракрасного спектра полностью поглощается верхним слоем пресной воды, часть коротковолнового начнет поглощаться более низкими слоями воды, а не поглощенная часть излучения, прошедшего сквозь воду, – темным дном. Энергия, отраженная от дна, частично поглотится водой на обратном пути.

Теплопроводность существенно слабее конвекции, так что вблизи дна рассол будет нагреваться до упомянутых величин. Имеются сведения о получении температуры 102 и 109 °С и расчетные предположения о возможности достичь 150 °С в насыщенных рассолах. Разумеется, эти температуры зависят от географической широты, прозрачности атмосферы, пресной воды, изолирующего слоя и рассола пруда, теплоизоляции дна и боковых стенок наличия концентраторов (отражателей солнечного излучения в акваторию пруда) и ветра.

Верхний слой пруда состоит из пресной воды, с толщиной обычно 0,1–0,3 м, где подавить перемешивание жидкости не удастся. Сказывается действие ветра, неравномерного загрязнения поверхности и других причин. Этот слой называется верхней конвективной зоной, и его толщина должна быть как можно меньше и чище, и поверхность без ряби, чтобы снизить потери излучения, входящего в воду. То солнечное излучение, что поглотилось в верхней конвективной зоне, – потери энергии, ибо она легко уносится с поверхности ветром и за счет испарения воды.

Ниже находится градиентный слой (изолирующий слой с увеличивающейся книзу концентрацией рассола), именно здесь создается «термоклин» и «галоклин» – резко неравномерное распределение и температуры, и солёности при полном отсутствии перемешивания, если пруд работает устойчиво. От толщины этого слоя (не конвективной зоны) сильно зависят все характеристики пруда. Термическое сопротивление изолирующего слоя воды составляет примерно  $1,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , в то время как сопротивление современного типичного плоского пластинчатого солнечного приемника –  $0,4 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . В ранее построенных зданиях средней полосы России сопротивление теплопередаче стен составляет  $0,9\text{--}1,1 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , окон –  $0,39\text{--}0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , покрытий – около  $1,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Принятые новые нормативные требования увеличили требуемые значения сопротивления теплопередаче: для стен – до  $3,0\text{--}3,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , для окон – до  $0,55\text{--}0,60 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , для покрытий – до  $4,5\text{--}5,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . А самое существенное в этой «конструкции» пруда то, что термическое сопротивление градиентного слоя в 1000 раз выше сопротивления пресной воды при наличии свободной конвекции ( $0,0018 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ).

Наконец, в придонном слое находится зона накопления энергии, состоящая из слоя горячего рассола, или конвективная зона, где допустимо перемешивание. Её толщина также влияет на показатели пруда, в основном на его тепловую инерцию.

Полезной энергией пруда является теплота, аккумулированная в этом слое. Её можно использовать как для целей теплоснабжения, так и для выработки электроэнергии путем пропускания рассола из этой зоны через какие-либо теплообменники.

Для солнечных соляных прудов в настоящее время используют отходы соляных производств, содержащие большую долю хлорида магния и натрия. А чтобы предотвратить утечки поверхность дна покрывают пластмассовой пленкой или слоем фурановой смолы. Иногда достаточно того, что дно «убивается» водонепроницаемой глиной.

Существенным преимуществом солнечных соляных прудов является то, что наряду с прямым солнечным излучением они воспринимают (аккумулируют) рассеянное излучение, отраженное от облаков, предметов и т. п.

Солнечный соляной пруд представляет собой одновременно коллектор и аккумулятор теплоты, причем по сравнению с обычными коллекторами и аккумуляторами он является более дешевой системой.

Принципиальная схема получения тепловой энергии с использованием СП показана на рис. 2. В придонной зоне СП (1) размещается теплообменник (2), по которому циркулирует теплоноситель. Он получает тепло от нагретого рассола и передает его потребителям. Для поддержания градиента концентрации рассола по глубине используется пруд-испаритель (3), из которого рассол высокой концентрации возвращается в нижнюю часть пруда.

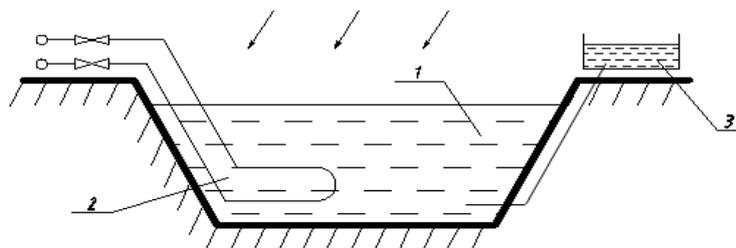


Рис. 2. Принципиальная схема получения тепловой энергии

Принципиальная схема получения электрической энергии с использованием СП показана на рис. 3. Энергетическая установка включает пруд-накопитель, насосное оборудование, теплообменник, паротурбинную установку.

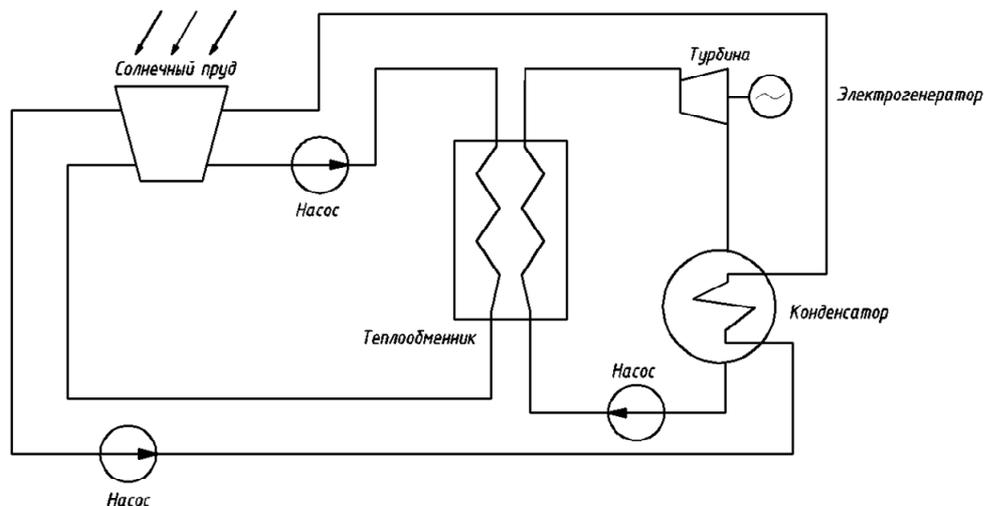


Рис. 3. Принципиальная схема установки по производству электрической энергии

Рассмотрим некоторые характеристики климатических условий в г. Ставрополе.

Ставрополь – южный город России. Положение на  $45^\circ$  северной широты – это главный фактор, определяющий климатические особенности, в первую очередь количество солнечного тепла, которое зависит от продолжительности светлого времени суток, от высоты солнца над горизонтом.

В день летнего солнцестояния (22 июня) высота солнца над горизонтом достигает в полдень  $68^\circ 30'$  что выше, чем в это же время на северном тропике, а в декабре –  $22^\circ 30'$ .

Число часов возможного солнечного сияния в год равняется 2187. Но в разные месяцы отношение фактического сияния к возможному составляет от 30 % до 72 %. Это обеспечивает большой приток солнечного тепла. Суммарная солнечная радиация за год в г. Ставрополе равняется  $121,3 \text{ ккал/см}^2$ , 45 % солнечного тепла поступает летом, максимум приходится на июль. Весной инсоляция выше, чем осенью:  $35,3$  и  $23,9 \text{ ккал/см}^2$ . Это больше на  $11,4 \text{ ккал/см}^2$ .

Наибольшая сумма радиации приходится на лето –  $50,7 \text{ ккал/см}^2$ . Однако на нагревание подстилающей поверхности оказывает влияние экспозиция склонов и их крутизна.

Большая часть солнечного тепла отражается от подстилающей поверхности и излучается в космическое пространство. Эффективное излучение за год составляет  $46,8 \text{ ккал/см}^2$ , максимум ( $4,7 \text{ ккал/см}^2$ ) наступает в августе, когда наблюдается меньшая облачность. Поглощенная радиация за год равняется  $89,7 \text{ ккал/см}^2$  и только  $42,9 \text{ ккал/см}^2$  составляют радиационный баланс. Из них  $25,8 \text{ ккал/см}^2$  затрачивается на испарение, а  $17,1 \text{ ккал/см}^2$  идет на нагрев почвы и воздуха.

Продолжительность дня весной достигает 12 часов.

Длина дня летом достигает 14 часов. Приток солнечного тепла увеличивается. Температура воздуха превышает  $+15^\circ$ . Лето продолжается 120 дней, из них 61 день температура воздуха превышает  $+20^\circ$ . Абсолютный максимум достигает  $+37^\circ$ .

Осенью длина дня уменьшается с 14 до 12 часов. Осенний тип циркуляции атмосферы устанавливается в начале октября и идет «в обратном направлении» по сравнению с весной. Приток солнечной радиации уменьшается, прекращается трансформация воздушных масс, вторгаются арктические воздушные массы, увеличивается циклоническая деятельность. Осенью средние суточные температуры воздуха устанавливаются ниже  $+10^\circ$ . Осень длилнее весны, ее продолжительность около 80 дней.

Зима в Ставрополе умеренно-мягкая. Продолжительность дня менее 10 часов. В циркуляции атмосферы зимой наблюдаются пульсации волн холода и тепла с нередким переходом температуры воздуха через  $0^\circ$ , морозные погоды бывают с ветром. Распространены температурные инверсии и связанные с ними туманы, морозящие осадки, изморозь и гололед. Зимой средние температуры воздуха  $-4,9^\circ$ , абсолютный минимум  $-36^\circ$ . Первые морозы отмечаются уже в середине октября, последние – в конце апреля. Зимний период длится 95–110 дней. Он начинается и заканчивается с момента перехода средней суточной температуры воздуха через  $0^\circ$ . Часто зимой резко изменяются температуры воздуха от  $+5^\circ$  до  $-20^\circ$ . Не все зимы одинаковы, бывают очень холодные и снежные, а бывают теплые и малоснежные.

Среднегодовое количество осадков – 663 мм, в теплый период выпадает 471 мм, в холодный – 192 мм. Максимум приходится на июнь (192 мм), а минимум – на февраль (28 мм). Летом дожди имеют ливневый характер, сопровождаются грозами, иногда градом; 600 мм влаги испаряется.

Снежный покров невысок – 15–20 см. Снег появляется в среднем 21 ноября, а сходит – 28 марта. Устойчивый снежный, по многолетним данным, покров держится с 17 декабря по 13 марта. Но случаются годы без устойчивого снежного покрова. Снег эпизодически выпадает и вскоре стаивает.

Годовой ход температуры соответствует континентальному типу: с минимумом в январе и максимумом в июле месяце. Амплитуда средних суточных температур воздуха составляет 25°, абсолютных температур – 75°. 272 дня температуры воздуха в Ставрополе выше 0°, 222 дня – выше 5°, 179 дней – выше 10°, 129 дней выше 15° и 61 день – выше 20°; 93 дня температуры ниже 0°.

Учитывая все вышесказанное логично утверждать, что применение солнечных прудов для получения тепловой и электрической энергии на территории Ставропольского края возможно и целесообразно.

Для практической реализации поставленной задачи на кафедре теплоснабжения и экспертизы недвижимости Северо-Кавказского федерального университета разработан проект экспериментального стенда. По своим габаритам (5 м × 3 м × 3 м) он аналогичен экспериментальному солнечному пруду, созданному в Бет-ха-Араве (Израиль) на берегу Мертвого моря. В качестве пруда-накопителя предлагается использовать наземный бассейн, стены и днище которого выполнены из обладающего малым коэффициентом теплопроводности пенополистирола. На стенде предусмотрена возможность измерения градиентов температур и концентрации соли в растворе, а также количество тепла, воспринятого теплообменником в бассейне и отданного отопительным приборам. Проект получил одобрение в Министерстве энергетики, промышленности и связи Ставропольского края. Результаты экспериментов, проведение которых планируется в 2013–2014 годах, лягут в основу практической реализации преобразования солнечной энергии в тепловую и электрическую с помощью солнечных соляных прудов.

#### Литература

1. Трушин С. Г., Зенкова И. А. О проблемах создания электростанций на базе солнечных прудов // Энергетическое строительство 1990. № 1. С. 19–22.
2. Осадчий Г. Б. Солнечная энергоустановка для горной местности // Промышленная энергетика. 1998. № 1.
3. Осадчий Г. Б. Солнечная энергия, её производные и технологии их использования (Введение в энергетику ВИЭ). Омск: ИПК Макшеевой Е. А., 2010. 572 с.
4. Попель О. С., Сони́на Н. М., Яскин Л. А., Зенкова И. А. Перспективы строительства опытно-промышленного солнечного пруда в Крыму.

УДК 620.9

**Гейбатов Руслан Аликович, Стоянов Николай Иванович,  
Гейвандов Иоганн Арестогесович**

## МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В МАССИВЕ ГРУНТА ВОКРУГ ПЕТРОТЕРМАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

*В статье показано применение метода конечных разностей для решения дифференциальных уравнений; суть метода сводится к замене непрерывной области совокупностью изолированных точек. Тепловые потоки в грунте можно разделить на вертикальные и радиальные, в связи с этим предлагаются две соответствующие расчетные схемы с соответствующими уравнениями.*

*Ключевые слова: дифференциальное уравнение, тепловой поток, распределение температур, метод конечных разностей, конечно-разностная схема.*

**Geybatov Ruslan Alikovich, Stoyanov Nikolay Ivanovich, Geyvandov Johann Arestogesovich  
THE METHOD OF DIFFERENTIAL EQUATIONS SOLVING DESCRIBING HEAT FLOW  
RATES AND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SOIL AROUND A PETRO-THERMAL WELL**

*The finite-difference method was used for differential equation solving. Heat flows can be divided into vertical and radial-type, thereby two relevant design diagrams with equations are suggested.*

*Key words: differential equation, heat flow, temperature distribution, finite-difference method, finite-difference scheme.*

Расширение математического образования резко увеличило возможности построения и исследования математических моделей. Все чаще результаты расчетов позволяют обнаруживать и предсказывать ранее никогда не наблюдавшиеся явления, это дает основания говорить о математи-