

Солнечный соляной пруд — базовый элемент индивидуальных солнечных установок

Осадчий Г.Б., инженер

Бытует мнение, что в России солнечного излучения недостаточно, и использовать его нецелесообразно. Однако детальные исследования специалистов Института высоких температур РАН (в том числе с использованием спутниковых данных NASA) показали, что более 60 % территории России, включая многие северные районы, характеризуются существенными среднегодовым поступлением солнечной энергии 3,5 – 4,5 кВт·ч/м² день.

Наиболее «солнечными» являются регионы Дальнего Востока, кроме Камчатки, и юг Сибири (от 4,5 до 5,0 кВт·ч/м² день). А большая часть Сибири, включая Якутию, (до 62 – 65° северной широты) по среднегодовому поступлению солнечной радиации относятся к той же зоне, что и районы Северного Кавказа и Сочи (4,0 – 4,5 кВт·ч/м² день)

В целом, технический потенциал солнечной энергии в России примерно в два раза превышает сегодняшнее, суммарное энергопотребление по стране.

При рассмотрении технического потенциала использования солнечной энергии на юге Западной Сибири в конце XX века исходили из тех технологических решений, которые применялись на 35 – 40 широтах территории СССР. Где отличительным признаком был и остается более продолжительный (по количеству дней) период повышенной инсоляции, при практически одинаковых значениях в летние месяцы. Однако, в настоящее время, на базе солнечных соляных прудов, для 50 – 60° северной широты разработаны новые технологии. Эти технологии, используют не одну только солнечную энергии, но и её производные (в частности неиспользованную теплоту термодинамического цикла), что позволяет вырабатывать энергию круглый год или запасать, например, посредством биогаза, вырабатываемого для зимнего периода летом с использованием солнечной энергии. Да и сам солнечный соляной пруд зимой можно использовать как источник (аккумулятор) низкопотенциальной теплоты для повышения температуры пара хладагента теплового насоса непосредственно перед компрессором.

Что такое солнечный соляной пруд и его характеристики.

Солнечный соляной пруд (рисунок 1) [1] — 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.

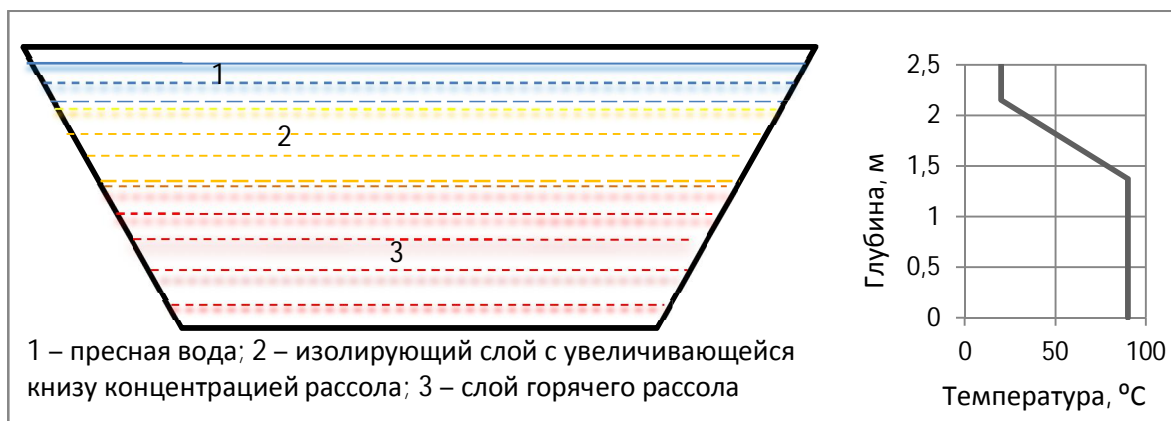


Рисунок 1 – Схема солнечного соляного пруда и изменение температуры жидкости по глубине пруда

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.

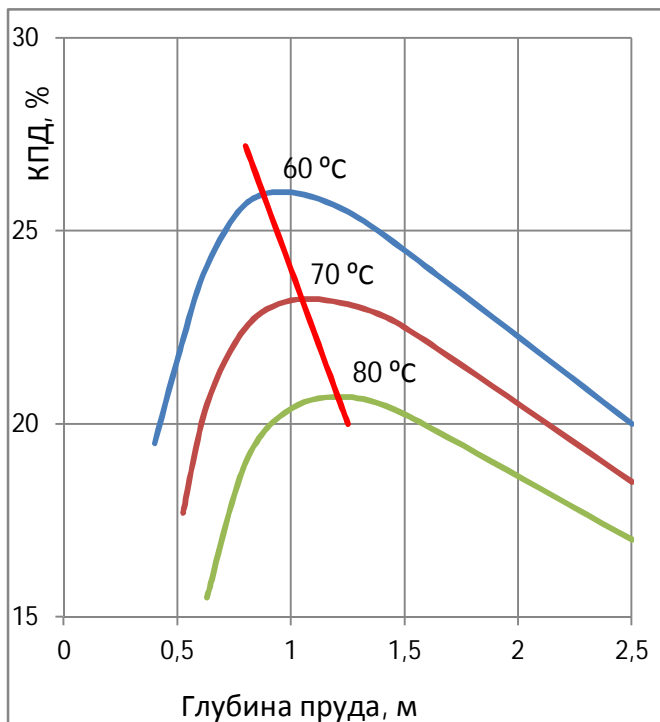
Механизм отдачи тепла от нагреваемого дна и придонного слоя — это только теплопроводность через грунт вниз, через боковые откосы и слой неподвижной воды вверх. Основную часть энергии в солнечном спектре несут коротковолновые — видимые — и ультрафиолетовые лучи, которые слабо поглощаются в толще воды и достигают дна. Итак, в таком пруду часть солнечного излучения — инфракрасного спектра полностью поглощается верхним слоем пресной воды, 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 солености 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 $1,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{Вт}^{-1}$, в то время как сопротивление современного типичного плоского пластинчатого солнечного приемника $0,4 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{Вт}^{-1}$. В ранее построенных зданиях средней полосы России сопротивление теплопередаче стен составляет $0,9 - 1,1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{Вт}^{-1}$,



окон — $0,39 - 0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{Вт}^{-1}$, покрытий — около $1,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Принятые новые нормативные требования увеличили требуемые значения сопротивления теплопередаче: для стен до $3,0 - 3,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{Вт}^{-1}$, для окон — до $0,55 - 0,60 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{Вт}^{-1}$, для покрытий — до $4,5 - 5,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{Вт}^{-1}$. А самое существенное в этой «конструкции» пруда, это то, что термическое сопротивление градиентного слоя в **1000 раз** выше сопротивления пресной воды при наличии свободной конвекции ($0,0018 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{Вт}^{-1}$).

Рисунок 2 – Зависимость КПД солнечного соляного пруда, не имеющего теплоизоляции дна и боковых стенок, от температуры рассола (°C) и глубины не конвективной зоны [Янтовский].

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. На рисунке 2 показана величина КПД пруда — отношение отводимой теплоты к падающей на поверхность солнечной энергии [2].

Для солнечных соляных прудов в настоящее время используют отходы соляных производств, содержащие большую долю хлорида магния, не пригодную для питания. 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 коллектора и аккумуляторами он является более дешевой системой

Исследовательские работы по изучению солнечных соляных прудов начались с середины 50-х годов XX века в Чили и Израиле, затем в США, Индии, Саудовской Аравии, Австралии, Египте.

В странах расположенных в низких широтах применяются СЭС, использующие теплоту, аккумулированную и сконцентрированную в солнечном соляном пруде.

Данные о фактическом состоянии дел в данном секторе солнечной энергетики автору недоступны, но о нем можно судить по известным ему сведениям из литературы.

По состоянию на 80-е годы наибольший по площади пруд создан в Израиле вблизи Мертвого моря. Его площадь 250 тыс. м². На нем построена и испытана паротурбинная фреоновая энергетическая установка мощностью 5 МВт. Там же создан экспериментальный солнечный пруд с насыщенным раствором 95 % хлорида магния и 5 % хлорида кальция площадью 4 × 4,5 м, глубиной 0,9 м. Летом 1984 г. получена температура 98 °С. Утверждается, что пруд такого типа может давать температуру в интервале 120 – 150 °С. В 1978 г. с пруда площадью 7500 м² получена электрическая мощность 150 кВт.

В Австралии возле Мельбурна (38 ° южной широты) построены два пруда глубиной 3 м, площадью по 1000 м² на грунте из водонепроницаемой глины. Один из прудов оставлен без теплоизоляции, другой имеет изоляцию из пенополистирола с пленкой из бутинола. Рассол представляет отходы от опреснения морской воды — смесь хлоридов магния и натрия.

Приведем результаты испытаний упомянутой выше энергетической установки с паровой фреоновой турбиной, созданной вблизи Мертвого моря. Пруд собирает солнечную энергию на площади $0,25 \text{ км}^2$, 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 закаивается в испаритель. Это обычный цикл Ренкина всех низкотемпературных энергетических установок — геотермальных, океанских, утилизационных на влажном паре.

При испытаниях такой установки мощностью 5 МВт в реальных условиях работы солнечного пруда получены следующие результаты:

Температура рассола, °С	85	Расход рассола, м ³ /с	3,66
Температура охлаждающей воды, °С	28	Расход охлаждающей воды, м ³ /с	3,66
Температура фреона перед турбиной, °С	75	Давление перед турбиной, атм.	8,2
Температура конденсации, °С	34	Тепловая мощность испарителя, МВт	60
Тепловая мощность конденсатора, МВт	55	КПД турбинной ступени, %	93
Мощность генератора, МВт	5,07	Общий КПД, %	7,12–
Мощность насоса для фреона, кВт	350	Мощность насоса рассола, кВт	370
Мощность водяного насоса, кВт	320	Мощность прочих устройств, кВт	30

Расчетные значения:

КПД цикла Карно

$$41/348 = 0,17$$

Эксергетический КПД

$$0,0712/0,117 = 0,60$$

Эти испытания показали, что солнечный соляной пруд действительно может стать одним из лучших устройств энергетики ВИЭ. Удельная электрическая мощность, полученная с 1 м^2 поверхности пруда составила **20 Вт**. Среднегодовой коэффициент использования установленной мощности (Киум) 73 – 90 %. Удельные капитальные затраты на создание энергогенерирующей установки составили 4500 \$/кВт, что в среднем в 2 раза выше чем соответствующие показатели по ТЭС на органическом топливе.

В те же годы в СССР рассматривалось проектирование подобной энергетической установки на заливе Сиваш, т. к. хозяйственной деятельности в заливе нет из-за значительного засоления. А циркуляционная вода в изобилии имеется вблизи — в Феодосийском заливе. Оценка масштаба максимальной летней мощности, при допущениях:

Температура рассола, °С	100	Температура воды, °С	8
Температура кипения, °С	94	Температура конденсации, °С	16
КПД цикла Карно	$94 - 16/94 + 273 = 0,21$	Эксергетический КПД	0,5
Общий КПД	0,117	Средняя летняя инсоляция, Вт/м ²	250
КПД пруда	0,3	Плотность потока теплоты, Вт/м ²	75

$$\text{Удельная электрическая мощность, Вт/м}^2 \quad 75 \cdot 0,117 = 8$$

Максимальную мощность получаем, принимая возможность использования 50 % площади залива Сиваш. Полная площадь 2560 км^2 ,

следовательно, возможная площадь пруда 1250 км^2 и максимальная электрическая мощность 10 ГВт .

Для справки: площадь водохранилища Красноярской ГЭС — 2000 км^2 , при мощности ГЭС в 6 ГВт , а значит удельная электрическая мощность равна всего 3 Вт/м^2 . За год на ГЭС вырабатывается около $20 \text{ млрд кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии, следовательно, среднегодовой Киум составляет около 38% .

При реализации проекта в заливе Сиваш, возможно, наращивать мощность постепенно, начиная с небольших южных участков залива.

Сопоставление цифр с полученными при испытании энергоустановки вблизи Мертвого моря показывает, что эти оценки реалистичны, а принятый эксергетический КПД $0,5$ существенно ниже, чем достигнутый в эксперименте — $0,6$. Сезонность выдачи электроэнергии в летне-осеннее полугодие не лишает этот проект интереса, поскольку ГЭС фактически также сезонны — летом, осенью и зимой воды гораздо меньше, чем весной.

Если для приближенной оценки принять, что летняя выработка в заливе компенсирует зимнее потребление электроэнергии по расходу топлива, в итоге окажется, что все теплоснабжение региона осуществлено без затрат топлива — только за счет солнечной энергии.

Наличие действующих тепловых электростанций, которые должны работать только в базовом постоянном режиме, не противоречит применению рассматриваемой схемы, поскольку и прямой и обратный циклы весьма маневренны. Температура их невысока, и отсутствуют массивные детали, требующие длительного прогрева.

Площадка возле Сиваша представлялась наилучшей для реализации, в первую очередь для решения задач энергоснабжения Крыма.

С экологической точки зрения проект представлял одним из наилучших способов энергоснабжения, ибо полностью исключает горение органического топлива летом, снижает его до минимума зимой. Проект свободен от риска аварий, поскольку температура и давление рабочего тела не превышают $100 \text{ }^\circ\text{C}$ и 30 кгс/см^2 .

Как показали подобные расчеты шведских и финских авторов, солнечный пруд с ТН способен эффективно аккумулировать и выдавать тепло при минимальной температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ даже на 60 -й параллели при замерзании его поверхности зимой (или покрытии её слоем полистирола).

В отличие от обычной солнечной электростанции с гелиостатами, где концентрация энергии достигается оптическими методами, солнечный пруд обеспечивает гидродинамическую концентрацию энергии. При средней плотности притока солнечной теплоты в отводимый нагретый рассол 75 Вт/м^2 плотность потока используемой энтальпии (произведение плотности рассола — 1500 кг/м^3 , его скорость в трубе 1 м/с , теплоемкости — $2,3 \text{ кДж/кг}\cdot\text{}^\circ\text{C}$ и перепада температуры $10 \text{ }^\circ\text{C}$) составляет $3,5 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$. Отсюда

видно, что гидродинамическая концентрация повышает плотность потока энергии более чем на пять порядков, т. е. **в сотни тысяч раз**.

Способность к совершению работы характеризуется не потоком энергии, а потоком эксергии и поэтому следует обратить внимание на концентрацию эксергии солнечным прудом.

Плотность потока эксергии солнечного излучения не намного ниже плотности энергии (примерно вдвое), так что его можно оценить средней величиной $\delta_0 = 100 \text{ Вт/м}^2$. Это подводимая к пруду эксергия. Отводимой является эксергия горячего рассола, оцениваемая только по его температуре, т. е. термическая, а не химическая эксергия. При температуре горячего рассола 100°C и температуре холодного источника 10°C имеем

$$\delta_3 = 3,5 \cdot 10^7 \cdot (100 - 10) / (100 + 273) = 0,93 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2.$$

Отношение плотностей потоков подводимой и отводимой эксергии

$$\lambda = \delta_3 / \delta_0 = 10^7 / 10^2 = 10^5.$$

Иными словами, при отводе горячего рассола мы получаем гидродинамическую **концентрацию потока эксергии в сто тысяч раз**. Плотность потока эксергии в горячем рассоле много выше, чем при передаче энергии от горячих газов в хвостовых частях котельного агрегата, и выше, чем в океанских тепловых электростанциях. Поэтому солнечный пруд и представляется эффективным ВИЭ благодаря высокой концентрации эксергии и ему уделяется так много внимание Е. И. Янтовским.

Критическим сечением для потока энергии остаются теплообменники, в которых удельный тепловой поток составляет около 10^4 Вт/м^2 .

Удельная масса крупных теплообменников вода — фреон составляет 45 кг/м^2 для высокого давления и 20 кг/м^2 — для низкого. Следовательно, для КПД = 0,1 их масса на 1 кВт электрической мощности составит $(45 + 20) / (0,1 \cdot 10) = 65 \text{ кг/кВт}$. Масса компрессоров, турбины, насосов, паропроводов относительно невелика, и в сумме можно принять удельную массу оборудования

$$m = M / N_e = 100 \text{ кг/кВт} = 0,1 \text{ кг/Вт}.$$

Для оценки срока энергетической окупаемости ($t_{\text{ок}}$) приравняем количество сэкономленного за счет работы солнечной электростанции топлива $(N_e / \eta) t_{\text{ок}}$ и затраты топлива на создание оборудования массой M : $M \cdot \Delta$. Здесь η — КПД замещающей ТЭС, Δ — удельная энергоёмкость оборудования (для стали 80 МДж/кг). Отсюда $t_{\text{ок}} = \eta \cdot m \cdot \Delta = 0,4 \cdot 0,1 \cdot 80 \cdot 10^6 = 3,2 \cdot 10^6 \text{ с} \approx 0,1 \text{ года}$. Срок этот существенно меньше срока службы, следовательно возместит затраты энергии на её оборудование; но затраты энергии на трубопроводы могут быть очень велики, поэтому отдается предпочтение керамическим трубам, обычно применяемым в системах орошения.

Следует отметить, что во многих проектах рекомендуется применять не фреон, а изобутан — легкодоступную фракцию нефти или природного

газа. Тогда возможно использование контактного теплообменника, в котором струи горячего рассола непосредственно контактируют с жидким изобутаном и испаряют его.

В сравнении с обычными ТЭС по металлоемкости оборудования прудовая солнечная электростанция проигрывает немного, ибо удельная масса пылеугольных энергетических котлов составляет 30 кг/кВт. Если же учесть все затраты металла, а значит, и энергии на топливный цикл и транспорт топлива, то преимущество прудовой электростанции по этому критерию налицо.

Интересные данные по естественным Антарктическим солнечным соляным озерам, которые могут лечь в основу разработки технологии вывода (прогрева) солнечного пруда после зимней «спячки» в России.

По результатам исследований новозеландских ученых К. Уэллмана и А. Уилсона озеро Ванда (Антарктида) прогревается за счет лучистой энергии Солнца до самого дна на глубину 70 м через прозрачный лед толщиной 4 м. Температура воды у дна составляет 27 °С или на 47 °С больше среднегодовой температуры воздуха. Объяснить то, что называют феноменом Антарктиды, можно так. Известно, что коротковолновая солнечная радиация сравнительно хорошо проходит через атмосферу, содержащую водяные пары. Достигнув земной поверхности, она преобразуется в длинноволновую, которая на обратном пути уже поглощается, хотя и не полностью атмосферой. Атмосфера служит как бы ловушкой для солнечной энергии. Это явление хорошо известно под названием парникового эффекта. Благодаря ему фактическая средняя температура поверхности Земли на 18 °С выше, чем она была бы без атмосферы.

А теперь посмотрим, что происходит с солнечной энергией на озере Ванда. На поверхности озера снега нет из-за сильного ветра и высокого испарения. Коротковолновая солнечная радиация поэтому практически беспрепятственно проникает через очень прозрачный лед и воду и нагревает дно почти так же как и окружающее озеро скалы. От дна отражается уже длинноволновая радиация, которая почти вся поглощается водой, нагревая её. А поскольку озеро не вскрывается ото льда, то ветер не перемешивает воду. Не перемешивается она и под влиянием тепловой конвекции, т.к. нагретая у дна вода очень соленая и оказывается все же тяжелее верхней холодной, но пресной воды.

На примере озер Антарктиды подтверждается колоссальная роль вынужденной конвекции в энерго- и массообмене. Действительно, в районах сезонного промерзания верхних слоев горных пород в неглубоких поверхностных водоемах не наблюдается подобной стратификации ни в температуре, ни в химическом составе воды. Её нет потому, что в периоды отсутствия ледяного покрова вся вода перемешивается конвективным путем под влиянием ветра. При наличии круглый год ледяного покрова условий

для вынужденной конвекции нет. Перемешивание происходит только под влиянием свободной (тепловой) конвекции, **но лишь на первых порах**, пока из-за расслоения вод по минерализации (гравитационного, например) вода нижних слоев не окажется настолько тяжелой, что не сможет подниматься вверх даже при нагревании на десятки градусов выше, чем верхние пресные слои воды. Примечательно, что несмотря на колоссальные градиенты концентрации и температуры, возникающие в таких условиях, роль молекулярной и тепловой диффузии вместе взятых остается настолько ничтожной, что они не могут привести к миграции химических ингредиентов из донных слоев воды в верхние и к выравниванию минерализации в толще озерной воды [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки/Н.В. Харченко М.: Энергоатомиздат, 1991. 208 с.
2. Янтовский Е.И. Потоки энергии и эксергии / Е.И. Янтовский М.: Наука, 1988. 144 с.
3. Фролов Н.М. Основы гидрогеотермии / Н.М. Фролов. М.: Недра, 1991. 335 с.

Автор: Осадчий Геннадий Борисович, инженер, автор 140 изобретений СССР.

Тел дом. (3812) 60-50-84, моб. 8(962)0434819

E-mail: genboosad@mail.ru

Для писем: 644053, Омск-53, ул. Магистральная, 60, кв.17.