

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

С.Е. Фрид, В.И. Артемов, М.А. Колобаев

*В результате численного моделирования солнечной водонагревательной установки (СВУ) аккумуляционного типа получена картина течения воды в баке-аккумуляторе СВУ. С учетом характера течения воды в баке построена упрощенная модель СВУ и предложена методика её тепловых испытаний.*

*Ключевые слова: солнечный водонагреватель, система солнечного теплоснабжения, солнечная водонагревательная установка аккумуляционного типа, тепловые испытания, СВУ.*

Одним из путей снижения стоимости солнечных коллекторов и солнечных водонагревательных установок (СВУ) в целом является замена традиционных материалов в них на полимерные материалы и композиты с соответствующим изменением конструкции установки, учитывающим специфику этих материалов. Ещё одна возможность снижения стоимости СВУ – совмещение функций солнечного коллектора и бака-аккумулятора в одном устройстве – установке аккумуляционного типа, в которой поглощающая панель является одной из стенок бака-аккумулятора. Причинами непопулярности таких установок в настоящее время являются их низкая технологичность (при изготовлении из традиционных материалов) и высокая стоимость при потенциально более простой конструкции.

Применение пластмасс и композиционных материалов позволяет упростить конструкцию аккумуляционной СВУ и снизить её стоимость путём замены сварки, пайки, механической обработки и сборки сложной конструкции формованием крупных деталей из полимерного композита и их склейкой.

В настоящей работе рассматривается типичная СВУ аккумуляционного типа (рисунок 1) с близкой к плоской поглощающей панелью из металлической фольги с селективным покрытием (или окрашенного специальным покрытием композита).

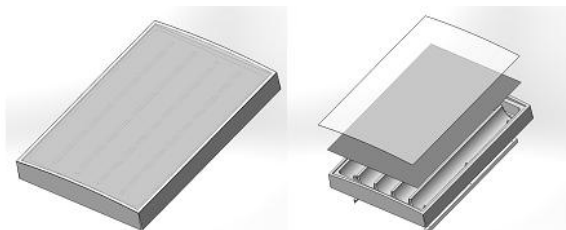


Рисунок 1 – Солнечная водонагревательная установка аккумуляционного типа

Остекление выполнено из тонкого листа поликарбоната, изогнутого для жесткости по дуге большого радиуса. Плоская форма бака установки определила выбор геометрии численной модели [1].

В рамках модели СВУ представляет собой плоскую полость, заполненную водой. Одна из поверхностей полости – поглощающая панель, остальные покрыты идеальной теплоизоляцией. Баланс тепловой энергии воды в установке определяется подводом тепла за счет поглощения солнечного излучения и отводом тепла за счет теплообмена с окружающим воздухом и прокачки воды через бак [2]. В нижнюю часть бака поступает вода с расходом  $G_0$  и температурой  $T_0$ , из верхней части бака отбирается вода с тем же расходом. Расход  $G_0$  обычно близок к емкости бака/сутки, а температура  $T_0$  – к температуре окружающего воздуха. При построении численной модели бака учитывались следующие физические процессы:

1. Естественная конвекция в баке из-за влияния сил плавучести и вынужденная конвекция, связанная с отбором воды из бака.
2. Тепловыделение при поглощении солнечного излучения и тепловые потери от поглощающей панели к окружающему воздуху.
3. Турбулентный перенос импульса и энергии в баке.

Для моделирования использовалась двумерная нестационарная система уравнений гидродинамики и уравнение энергии [3], в уравнениях движения которой при наличии силы тяжести появляются источники, связанные с силой плавучести. Задача решалась в приближении Буссинеска (при постоянном значении коэффициента термического расширения  $\beta = -(1/\rho)(\partial\rho/\partial T)_p$  (где  $\rho$  – плотность воды,  $T$  – ее температура,  $p$  – давление) и постоянных остальных теплофизических свойствах). В начальный момент времени все

температуры считались равными температуре окружающего воздуха, а скорость воды – равной нулю. Граничные условия для теплоносителя при моделировании стенок бака достаточно просты: компоненты скорости на границе стенка-теплоноситель равны нулю, и на этой границе выполняются условия сопряженного теплообмена. Тепловой поток через тыльную и боковые стенки бака считался нулевым, потери от поглощающей панели к окружающему воздуху рассчитывались по эмпирической формуле [2] для однослойного остекления со степенью черноты 0,88, неселективной поглощающей панели со степенью черноты 0,9, и коэффициентом теплоотдачи от стекла в окружающий воздух, рассчитываемым по формуле Мак-Адамса [2]. На входном патрубке задавались параметры подаваемой воды. Дневной расход воды варьировался в некоторых пределах, его распределение в течение суток предполагалось трехпиковым (утро, день, вечер) и бралось по [4] для категории «жилые дома», входная температура составляла 10 °С.

Для моделирования турбулентного переноса в задачах, в которых основополагающим фактором являются силы плавучести, правильнее всего использовать прямое численное моделирование (DNS-подход), а не двухпараметрические модели, тем более, что еще в 70-х годах XX в. В.И. Полежаевым было показано [5], что в отличие от гидродинамической турбулентности (для развития которой нужны трехмерные взаимодействия пульсаций трех компонент скорости с пульсациями давления), развитие турбулентности, связанной с массовыми силами, может носить двумерный характер.

Поскольку для замыкания математической постановки задачи необходимо задать величины источников членов и граничные условия для всех переменных на всех границах расчетной области, перед проведением расчетов была выполнена оценка источников и сформулированы граничные условия. Прежде всего, это касалось солнечного излучения и температуры окружающего воздуха.

СВУ аккумуляционного типа рассчитывается на подогрев воды в летнее время в средней полосе России (50...60° с.ш.), и моделирование проводилось именно для этих условий. Установка считалась ориентированной на юг. Поглощенный поток солнечного излучения получался умножением падающего на поверхность остекления потока солнечного излучения на эффективную поглощающую способность поглощающей панели ( $\tau\alpha$ ). Зависимость последней от угла паде-

ния излучения была взята по [2] для однослойного остекления. Для нахождения падающего потока интенсивность заатмосферного солнечного излучения умножалась на коэффициент пропускания атмосферы и косинус угла падения излучения на поглощающую панель  $\theta$ . Интенсивность заатмосферного солнечного излучения в течение года изменяется слабо ( $1367 \text{ Вт/м}^2 \pm 3\%$ )

При моделировании в первую очередь интерес представляет работа установки в ясные дни. Коэффициент пропускания атмосферы для прямого солнечного излучения при ясном небе оценивался по эмпирическим формулам, приведенным в [2] (высота местности над уровнем моря для средней полосы России оценивалась в ~0,2 км, поправочные коэффициенты, учитывающие тип климата принимались для умеренного климата летом). При определении часового угла, входящего в выражение для косинуса угла падения солнечного излучения на приемную поверхность СВУ и зенитного угла использовалось солнечное время, отличающееся от местного в летнее время на -0,5 ч (разность оценивалась для Москвы). Другая составляющая солнечного излучения – излучение, рассеянное атмосферой и отраженное от земной поверхности. Для его расчета по эмпирической формуле [2] оценивался коэффициент прозрачности атмосферы для рассеянного излучения при ясном небе. Поток суммарного солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность в ясный летний день, определялся в рамках модели Хэя-Дэвиса. Угол наклона поглощающей панели к горизонту варьировался в диапазоне 40...60°.

Рассчитанные потоки солнечного излучения, поглощенного панелью СВУ для летних месяцев и угла наклона поглощающей панели 40° представлены на рисунке 2. Для угла наклона панели 60° суммарный суточный приход солнечного излучения отличается всего на 2 %, поэтому зависимость поглощенной солнечной энергии считалась одинаковой для всех углов от 40° до 60° и определялась в соответствии со средней кривой рисунка 2.

Необходимо было также задать суточный график температуры окружающего воздуха. По данным [6] средняя суточная амплитуда температуры воздуха над сушей в средней полосе России составляет 13...15°. Максимум температуры в течение суток приходится примерно на 15 ч. Среднесуточная температура для средней полосы России в течение летнего времени была вычислена с использованием среднемесячных температур

из метеорологической базы NASA SSE [7] и составила 17 °С.

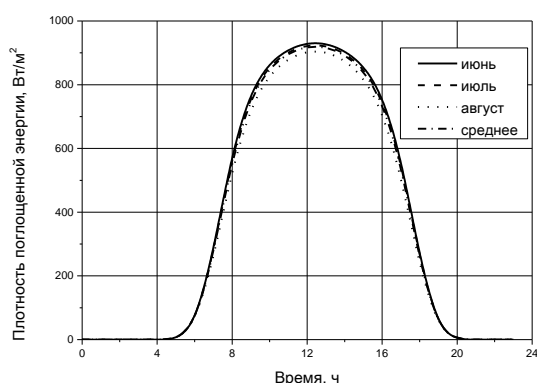


Рисунок 2 – Плотность поглощенного потока солнечной энергии для поверхности, установленной под углом наклона 40° к горизонту в ясные дни летних месяцев

Дискретизация задачи выполнялась методом контрольного объема [8] с помощью предназначенного для моделирования одно-, двух- и трехмерных течений однофазной многокомпонентной сплошной среды в областях сложной геометрической формы пакета прикладных программ Ames, разработанного на кафедре Инженерной теплофизики МЭИ (ТУ) [9].

В целях верификации двумерной математической модели для одного из вариантов геометрии бака-аккумулятора было выполнено моделирование работы СВУ без нагрузки в течение 8 ч с использованием двумерной и трехмерной моделей бака-аккумулятора.

Полученная картина температурных полей в двумерном и трехмерном вариантах качественно похожа, однако значения температур несколько отличаются (рисунок 3). Если для среднемассовой температуры воды в баке и температуры в нижней его части отличие составляет 1...2 °С, то в верхней части бака в трехмерном варианте температура воды на 7...9 °С ниже, чем в двумерном. Возможным объяснением этого факта может быть то, что в трехмерной задаче не учитывалось поглощение солнечного излучения клеевыми швами на поглощающей панели.

Для получения долговременных характеристик установки необходимо моделирование ее работы в течение длительного периода (лето, полгода, год), что при использовании численной модели требует слишком большого времени. Этим обуславливается необходимость разработки упрощенной математической модели СВУ.

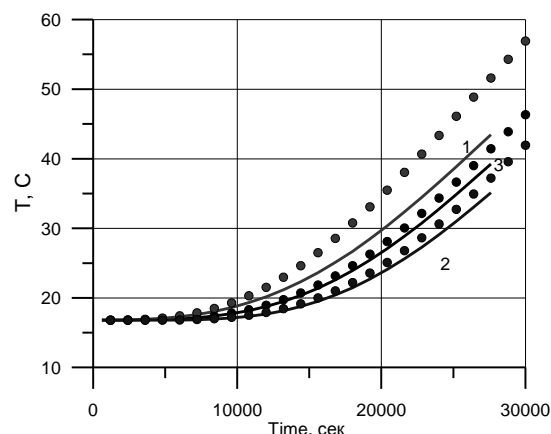


Рисунок 3 – Температура в верхней (1), нижней (2) частях бака и среднемассовая температура воды в баке (3) в зависимости от времени.

Линии – трехмерная модель, точки – двумерная модель

Для расчета параметров стратифицированных баков-аккумуляторов, как правило, используется зонная модель с небольшим (3...5) числом зон [2, 10]. Поскольку в установках аккумуляционного типа происходит нагрев солнечным теплом стенки бака, в нем, в принципе, возможно конвективное перемешивание, и применимость зонной модели требует обоснования. Характер течения воды в баке, отмеченный в [11] и подтвержденный нашими расчетами, позволяет обосновать применимость зонной модели к СВУ аккумуляционного типа и построить на ее основе упрощенную модель такой установки. В процессе нагрева воды в баке в нем развивается естественная конвекция. Со временем в баке возникает вертикальная стратификация температуры, а движение воды происходит в узкой области вблизи поглощающей панели. При смене знака эффективного потока тепла (когда потери в окружающий воздух превышают подвод тепла) направление движения воды меняет свой знак – вода начинает двигаться сверху вниз, но также в узкой области вблизи поглощающей панели. Профили продольной составляющей скорости в средней части бака в различные моменты времени приведены на рисунке 4. Если пристенное течение восходящее, в остальной части сечения установки вода с небольшой скоростью опускается как единое целое, если нисходящее – поднимается. Поперечные перетоки воды между областями отсутствуют.

Полученная картина течения позволяет построить расчетную схему СВУ аккумуляционного типа, приведенную на рисунке 5. Вода

в баке установки ведет себя так, как если бы в бак была вставлена перегородка, разделяющая его на области солнечного коллектора (пристенное течение) и бака-аккумулятора (остальное пространство). Первая из них описывается как плоский солнечный коллектор, вторая – с помощью зонной модели.

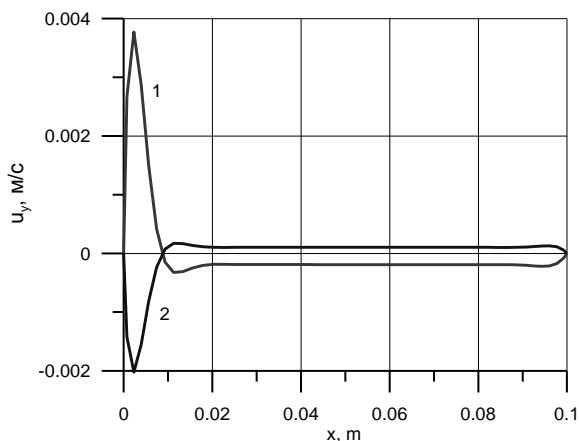


Рисунок 4 – Профиль продольной компоненты скорости для двух моментов времени третьего дня работы СВУ в среднем по высоте сечения установки:  
1 – 28000 с (7,8 ч), 2 – 62000 с (17,2 ч)

Вблизи поглощающей панели образуется тепловой пограничный слой, в котором происходит изменение температуры жидкости. Вне его температура жидкости практически постоянна. Поскольку число Прандтля для воды больше единицы, гидродинамический пограничный слой толще теплового, и поверхность, разделяющую бак СВУ на зоны солнечного коллектора и бака-аккумулятора (по границе гидродинамического пограничного слоя) можно считать адиабатной, т.е. горизонтальный переток тепла из зоны коллектора в зону бака-аккумулятора отсутствует.

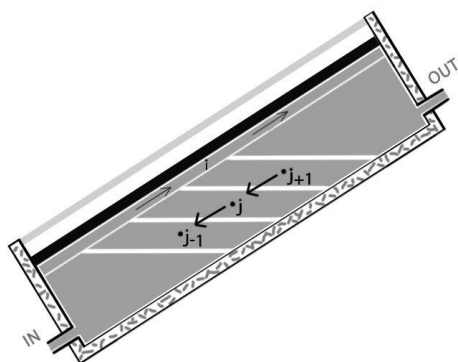


Рисунок 5 – Расчетная схема упрощенной модели СВУ аккумуляционного типа

Расход нагреваемой в СВУ воды невелик, поэтому бак можно считать идеально стратифицированным, предполагая, что поступающая из области солнечного коллектора нагретая воды попадает в зону бака с соответствующей температурой. Область коллектора описывается уравнением [2]:

$$Q_u = A_c F_R [S(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)],$$

где  $A_c$  – площадь приемной поверхности СВУ,  $S$  – плотность потока солнечного излучения, приходящего на приемную поверхность СВУ,  $F_R$  – коэффициент отвода тепла от коллектора [2],  $U_L$  – коэффициент тепловых потерь СВУ,  $T_a$  – температура окружающего воздуха.

С помощью этого уравнения выработка энергии ( $Q_u$ ) вычисляется как функция входной температуры жидкости ( $T_i$ ), которая равна температуре в нижней секции бака. Вода из области солнечного коллектора поступает в область бака, температура которой наиболее близка к ее температуре. Бак разбивается на  $N$  зон  $j = 1 \dots N$ , тепловой баланс которых описывается системой уравнений зонной модели, тепловые потери в ней не учитываются:

$$C_j \frac{dT_j}{dt} = G(T_i - T_j) + F_c Q_u,$$

где  $T_j$  – температура воды в зоне,  $C_j$  – ее теплосодержание,  $F_c$  – управляющая функция, равная единице, когда температура на выходе из «коллектора» наиболее близка к температуре в зоне. Значение индекса  $i$  зависит от направления движения воды в баке: если оно восходящее (ночью или когда расход в нагрузку выше расхода в «коллекторе»), то  $i = j - 1$ , если нисходящее,  $- i = j + 1$ .

Для оценки производительности солнечной водонагревательной установки в реальных климатических условиях необходимо знание её параметров. Таковыми являются параметры математической модели СВУ. В тепловых испытаниях установки, направленных на экспериментальное определение параметров модели, решается обратная задача, т.е. задача определения параметров СВУ по ее производительности в условиях эксперимента.

Несмотря на существование множества математических моделей элементов солнечных энергоустановок и развитость аппарата моделирования, вопрос об испытаниях СВУ остается открытым. Стандарт ISO 9459, регламентирующий процесс испытаний, состоит из нескольких частей, описывающих различные, не связанные между собой, методы определения производительности установок.

Единый набор параметров теплотехнического совершенства и единая общепринятая методика их экспериментального определения отсутствуют.

Параметрами приведённой выше упрощённой модели, прежде всего, являются эффективная масса  $M$  (или теплоемкость) бака-аккумулятора и площадь приёмной поверхности (характерной площадью, по-видимому, целесообразно считать апертурную). Своё значение для такой установки сохраняют и параметры теплотехнического совершенства солнечного коллектора: оптический КПД  $F_R(\tau\alpha)$  и эффективный коэффициент потерь установки  $F_R U_L$ . Параметры  $M$ ,  $F_R(\tau\alpha)$  и  $F_R U_L$  в эксперименте можно определить следующим образом.

Записав уравнение теплового баланса области бака-аккумулятора в виде

$$M \frac{dT_S}{dt} = Q_u - Gc_p(T_o - T_i),$$

где  $T_i$  и  $T_o$  – температуры воды на входе в бак и выходе из него,  $T_S$  – средняя температура воды в баке,  $G$  – её расход,  $c_p$  – удельная теплоемкость, подставив в него уравнение для  $Q_u$  в предположении, что расход достаточно большой, чтобы подаваемая в бак вода попадала на вход области солнечного коллектора, и считая, что  $F_R$  не зависит от режима работы СВУ (обычно он близок к единице и зависит от режимных параметров слабо), проинтегрируем результат за период времени  $\Delta t$  (считая  $G$  и  $T_i$  постоянными во времени и интегрируя температуру бака от начальной температуры окружающего воздуха  $T_a^0$ ) и получим

$$\frac{M}{\Delta t \cdot A_c} (T_{S1} - T_a^0) = F_R(\tau\alpha) \langle S \rangle - F_R U_L (T_i - T_a) - \frac{Gc_p}{A_c} (\langle T_o \rangle - T_i)$$

где  $T_{S1}$  – температура воды в баке в конце периода интегрирования, а ломанными скобками обозначены средние величины.

Полученное уравнение является линейным относительно коэффициентов  $M$ ,  $F_R(\tau\alpha)$  и  $F_R U_L$ , что позволяет предложить алгоритм идентификации параметров математической модели по результатам тепловых испытаний установки: проведя несколько экспериментов в различные дни в течение нескольких часов с нагревом воды в СВУ от температуры окружающего воздуха, достаточно большим постоянным расходом воды через установку, чтобы считать температуру воды на входе в «коллектор» равной постоянной во время эксперимента входной температуре холодной

воды, получаем систему уравнений, решая которую методом наименьших квадратов, можно определить значения параметров СВУ  $M$ ,  $F_R(\tau\alpha)$  и  $F_R U_L$ .

Таким образом, результаты численного моделирования СВУ аккумуляционного типа позволили получить картину течения воды в её баке-аккумуляторе, построить упрощённую модель СВУ и предложить методику тепловых испытаний установки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-08-0080413).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ощепков, М. Ю. Термическая стратификация в баках-аккумуляторах солнечных водонагревателей аккумуляционного типа / М. Ю. Ощепков, С. Е. Фрид // Гелиотехника. – 2015. – № 1. – С. 83–92.
2. Даффи, Дж. Основы солнечной теплоэнергетики. Пер. с англ. / Дж. Даффи, У. Бекман. – Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2013. – 888 с.
3. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1970. – 904 с.
4. Медиоланская, М. М. Проектирование водопроводных сетей / М. М. Медиоланская, Е. А. Мезенева, С. В. Колобова. – Вологда : ВТУ, 1999. – 150 с.
5. Пасконов, В. М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. И. Полежаев, П. А. Чудов. – М. : Наука, 1984. – 288 с.
6. Погосян, Х. Атмосфера Земли / Х. Погосян, З. Туркетти. – М. : Просвещение, 1970. – 318 с.
7. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set // URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (дата обращения 12.05.15).
8. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
9. Артемов, В. И. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена в элементах теплотехнического и энергетического оборудования / В. И. Артемов, Г. Г. Яньков, В. Е. Карпов, М. Е. Макаров // Теплоэнергетика. – 2000. – № 7. С. 52–59.
10. Директор, Л. Б. Динамическая модель накопителя тепловой энергии / Л. Б. Директор, И. Л. Майков, О. А. Иванин // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 3. – С. 113–118.
11. Junaidi, H. A. Study of stratification in a (ICSSWH) Integrated Collector Storage Solar Water Heater / H. A. Junaidi, D. Henderson, T. Muneer, T. Grassie, J. Currie // 9th AIAA-ASME Joint Conference, 2006.

**Фрид С.Е.**, к.т.н., зав. лабораторией ОИВТ РАН, [s\\_frid@oivtran.ru](mailto:s_frid@oivtran.ru).

**Артемов В.И.**, к.ф.-м.н., в.н.с. МЭИ (ТУ), [artemov@itf.mpei.ac.ru](mailto:artemov@itf.mpei.ac.ru).

**Колобаев М.А.**, ст. инж. ОИВТ РАН, [mmg91@rambler.ru](mailto:mmg91@rambler.ru).