

УДК 621.472.001.57

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОСИФОННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ И ВЕРТИКАЛЬНЫМИ БАКАМИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

М.М. ДАВЫДОВ,
Б.И. КАЗАНДЖАН

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Работа посвящена теоретическому исследованию эффективности солнечного водонагревателя с естественной циркуляцией теплоносителя в зависимости от геометрических характеристик бака аккумулятора. Рассматриваются вертикальная и горизонтальная компоновки цилиндрического бака с различными диаметрами и высотами. Анализ эффективности проведен с помощью трехмерной и одномерной математических моделей.

Ключевые слова: солнечный коллектор, термосифон, естественная конвекция, стратификация, тепловой аккумулятор.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировой практике широко используются солнечные системы теплоснабжения, в которых циркуляция жидкости между коллектором, воспринимающим солнечную энергию, и баком-аккумулятором (БА) осуществляется за счет гравитационного эффекта. Жидкость, нагретая в солнечном коллекторе и имеющая меньшую плотность, поднимается вверх и поступает в верхнюю часть БА, а жидкость из нижней части БА, имеющая меньшую температуру и соответственно большую плотность, самотеком поступает на вход в солнечный коллектор. Такие термосифонные системы используются как в небольших односемейных домах, так и в больших зданиях, где отдельные блоки «солнечный коллектор - БА» работают параллельно с разводкой горячей воды по квартирам. Эффективность работы блока «солнечный коллектор - БА» зависит от средней температуры жидкости в коллекторе и разности температур в верхней и нижней части БА. Чем меньше температура, поступающая из нижней части БА на вход в коллектор, тем меньше средняя температура в коллекторе и тем меньше тепловые потери коллектора в окружающую среду, а значит

THEORETICAL INVESTIGATION OF EFFICIENCY CHARACTERISTICS OF NATURAL CIRCULATION DOMESTIC SOLAR WATER HEATERS WITH VARIOUS STORAGE TANKS

M.M. DAVYDOV, B.I. KAZANDZHAN

The article is dedicated to theoretical study of efficiency characteristics of domestic solar water heater with natural circulation loop. Vertical and horizontal tanks of various geometry are investigated. Efficiency analysis is made with three dimensional and one dimensional mathematical models for storage tank.

KEYWORDS: domestic solar collector, thermosyphon system, natural convection, thermal stratification, storage tank.

выше его к.п.д. Таким образом, при конструировании системы солнечного теплоснабжения необходимо оптимизировать соотношение размеров и конфигурации БА таким образом, чтобы температурная стратификация в БА была как можно большей.

На рис. 1 показаны примеры различных компоновок блока «солнечный коллектор - БА», применяемых разными фирмами в настоящее время. На представленных примерах видно, что соотношение размеров БА и их положение друг относительно друга сильно отличаются, что должно приводить к различной скорости циркуляции жидкости и влиять на температурную стратификацию.

Настоящая работа посвящена математическому моделированию процессов происходящих в системе коллектор - БА и выявлению факторов, позволяющих оптимизировать соотношение геометрических размеров БА и его положения относительно солнечного коллектора.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ В БА

В настоящей работе рассмотрены два типа БА: вертикальный и горизонтальный, схематично показанные



РИС. 1.

Примеры компоновки солнечных водонагревателей с естественной циркуляцией теплоносителя

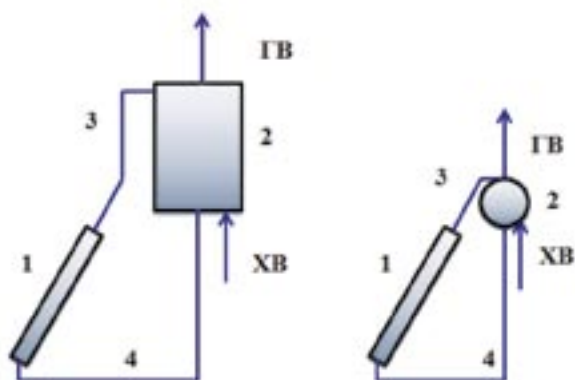


РИС. 2.

Различные компоновки термосифонного солнечного водонагревателя. Слева – вертикальный бак, справа – горизонтальный бак. 1 – коллектор, 2 – бак-аккумулятор, 3 – подъемный трубопровод, 4 – опускной трубопровод, ХВ/ГВ – холодная/горячая вода

на рис. 2. При анализе варьировались длина бака и его диаметр, а также расстояние между выходом жидкости из коллектора и ее входом в верхнюю часть БА.

Рассмотрим развитие стратификации в бак-аккумуляторе с изначально равномерным распределением температуры по объему. Вода, нагретая в солнечном коллекторе, поступает в бак-аккумулятор, где температура по всему объему имеет меньшее значение, а плотность соответственно больше, чем у поступающей воды. В результате более нагретая вода остается в верхней части бака, а менее нагретая – в нижней. В реальности происходят несколько попутных явлений, негативно влияющих на стратификацию:

1. Обмен энергией более нагретой жидкости с менее нагретой в баке посредством теплопроводности;
2. Теплообмен жидкости в баке со стенками бака, в результате чего пристеночный слой жидкости охлаждается и опускается вниз;
3. Перемешивание теплоносителя за счет вынужденной конвекции при водоразборе (отвод теплоносителя из верхней части бака и поступление холодной воды в его нижнюю часть);

4. Перемешивание теплоносителя, обусловленное наличием свободноконвективной циркуляции в контуре.

ИНСТРУМЕНТЫ АНАЛИЗА

Для исследования использована одномерная математическая модель стратифицированного бака-аккумулятора, реализованная в программном комплексе TRNSYS и стандартная библиотека элементов:

Туре45а – для моделирования термосифонного потока теплоносителя, Туре60 – для моделирования стратифицированного бака-аккумулятора, Туре24 – вспомогательные интеграторы для вычисления средних показателей эффективности.

В данной модели объем воды в баке разбит на N слоев с полным перемешиванием теплоносителя в каждом слое (т.е. при $N=1$ вода в баке полностью перемешана).

Баланс энергии для i -ого слоя бака можно записать в следующем виде:

$$\rho C_p A \delta y \frac{\delta T}{\delta \tau} = -m C_{pt} \delta y \frac{\delta T}{\delta y} + \lambda A \delta y \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} - U_{\text{loss}} P \delta y (T - T_a) + Q_t \quad (1)$$

В левой части уравнения – изменение энергии в объеме слоя бака, в правой части первый член описывает ввод тепла за счет циркуляции, второй – теплопроводность, третий – тепловые потери с боковой поверхности слоя. Величину A , являющуюся площадью боковой поверхности элемента бака, можно ввести как функцию от координаты, таким образом моделируя и горизонтальные баки-аккумуляторы. Уравнение (1) можно решить, если задать граничные условия на нулевом и N -ом слое бака аккумулятора. При $y=0$ граничные условия записываются в следующем виде:

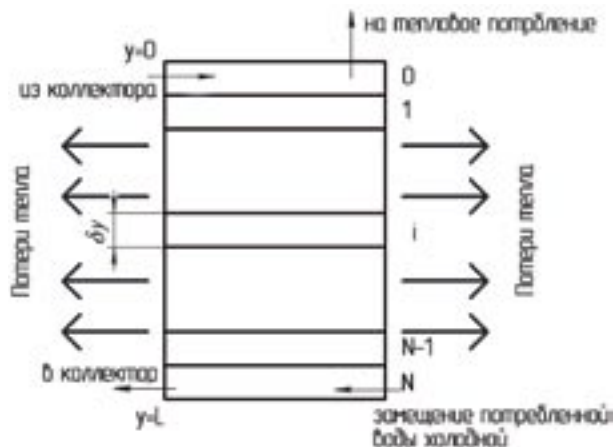


РИС. 3.

Конфигурация бака для моделирования

$$\rho C_p A \delta y \frac{\delta T}{\delta \tau} = \frac{m C_p}{\beta_1} (T_c - T) + \lambda A \frac{\delta T}{\delta y} - U_{\text{loss}} A (T - T_a) - \frac{m_{\text{Load}} C_p}{\beta_2} (T - T_{i+1}) \quad (2)$$

При $y=L$ вид уравнения следующий:

$$\rho C_p A \delta y \frac{\delta T}{\delta \tau} = \frac{m C_p}{\beta_3} (T - T_N) + \lambda A \frac{\delta T}{\delta y} - U_{\text{loss}} A (T - T_a) - \frac{m_{\text{Load}} C_p}{\beta_2} (T_{XB} - T) \quad (3)$$

где ρ – плотность, A – площадь поперечного сечения, δy – толщина единичных слоев, на которые разбивается бак, λ – теплопроводность жидкости, UL – общий коэффициент потерь от бака аккумулятора, T – температура слоя, T_a – температура окружающей среды, m – расход теплоносителя в контуре, обусловленный свободной циркуляцией, mL – расход теплоносителя к потребителю, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – константы смешения, P – периметр сечения бака, Q_i – мощность внутренних источников энергии [2].

Рассмотрим характеристики нескольких различных компоновок баков аккумуляторов в сочетании с различной геометрией самих баков. Для примера взяты баки одинакового объема (200 литров) с различными размерами диаметра и высоты:

1. Диаметр 0,41 м, высота 1,5 метра;
2. Диаметр 0,5 м, высота 1 метр;
3. Диаметр 0,6 м, высота 0,7 метра;
4. Диаметр 0,7 м, высота 0,5 метра.

Высота расположения нижнего уровня бака относительно верхней отметки коллектора неизменна для всех вариантов и составляла 300 мм. Подвод теплоносителя из коллектора осуществляется на расстоянии 50 мм от верхней границы бака аккумулятора. Значения солнечной радиации, а также температуры наружного воздуха взяты из библиотеки метеоусловий программы TRNSYS для города Москва в период с марта по сентябрь [1]. Прочие параметры системы: диаметры подводящих и отводящих труб – 25 мм, теплотери от труб отсутствуют, количество каналов для теплоносителя в коллекторе – 10 шт., их диаметр 10 мм, произведение $\tau\alpha$ – 0,8. Коэффициент потерь тепла бака аккумулятора – 5 Вт/м²×К. Площадь спаренных коллекторов – 4 м². В баках смонтированы электрические нагреватели, расположенные в 200 мм от верхней границы бака, мощность нагревателей 5000 Вт. Термостат, управляющий нагревателем, расположен на одинаковой с ним высоте и срабатывает при температуре бака менее 55°С. Нагреватель играет роль дублирующего источника теплоты.

Для анализа эффективности той или иной сборки воспользуемся коэффициентом, определяющим долю

энергии солнца в покрытии общей потребляемой тепловой нагрузки, иными словами – коэффициент замещения. Вычисляется коэффициент с использованием встроенной в TRNSYS методики. Результаты моделирования для всех компоновок приведены на рис. 4.

Они наглядно демонстрируют зависимость коэффициента замещения не только от ориентации в пространстве, но и от диаметра и высоты бака. Интересный эффект заключается в том, что значения коэффициента замещения вертикального бака при компоновке 4 фактически равняются таковому для бака горизонтальной компоновки 1. Причину этих изменений рассмотрим путем подробного анализа процессов в баке-аккумуляторе при помощи трехмерного моделирования в комплексе ANSYS Workbench. Рассмотрим бак с геометрическими параметрами 1. Обратимся к результатам моделирования, предоставленным на рис. 5 и 6.

График разницы средних температур верхних и нижних слоев во времени для баков разных компоновок (для одного дня работы), очевидно, показывает преимущества вертикальной компоновки. Однако чем именно обусловлена увеличенная на 5° разница температур? Для ответа на этот вопрос необходимо рассмотреть подробно структуру течений в баках, для чего обратимся к рис. 6, на котором предоставлены поля скоростей для бака аккумулятора двух компоновок через 4 часа работы установки. На обоих изображениях отчетливо виден ламинарный вихрь в верхней части бака, где осуществляется подвод теплоносителя из коллектора. Этот вихрь обеспечивает перемешивание теплоносителя в верхних слоях бака, при этом высота зоны возникающих рециркуляционных движений приблизительно одинакова для обеих компоновок. Поле скоростей вертикально ориентированного бака отчетливо демонстрирует три основных зоны течения – зона перемешивания у входного и выходного па-

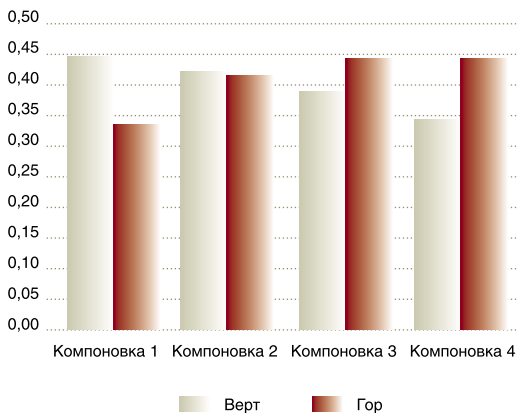


РИС. 4.

Коэффициент замещения тепловой нагрузки

трубка, разделенные зоной равномерного движения теплоносителя, а так же зоны пристеночного движения жидкости, охлаждаемой за счет тепловых потерь от поверхности бака. При визуализации течения в горизонтальном баке-аккумуляторе такие зоны выделить нельзя, так как течение не структурированное, осуществляется более интенсивное перемешивание, что и обуславливает более интенсивный обмен теплом между слоями, приводящий к ухудшению стратификации. Зоны перемешивания у входного и выходного патрубков сливаются в одну ввиду малой высоты бака.

Визуализация линий тока теплоносителя на рис. 7 показывает как именно теплоноситель движется и какова траектория нескольких единичных объемов теплоносителя, вошедших в бак через входной патрубок.

При рассмотрении структуры течения можно отметить, что в баке вертикальной компоновки поток быстро разбивается о стенку бака, разворачивается в сторону входного патрубка и там замыкает циркуляционную петлю. В баке горизонтальной компоновки поток не претерпевает столь же эффективного гашения кинетической энергии, что приводит к вовлечению в движение большего количества теплоносителя (за счет сил вязкостного трения и увеличенной площади контакта движущегося слоя с неподвижным).

Рассмотрим теперь баки компоновки 4 и проанализируем ключевые моменты движения потока (рис. 8).

Как видно, за счет уменьшенной высоты бака по отношению к компоновке 1 вертикального бака, зоны перемешивания сближены между собой, однако между ними в обоих случаях просматривается зона устойчивого движения теплоносителя. Линии тока теплоносителей, приведенные на рис. 9, в обоих случаях



РИС. 5.

График разности температур между верхним и нижним слоями бака

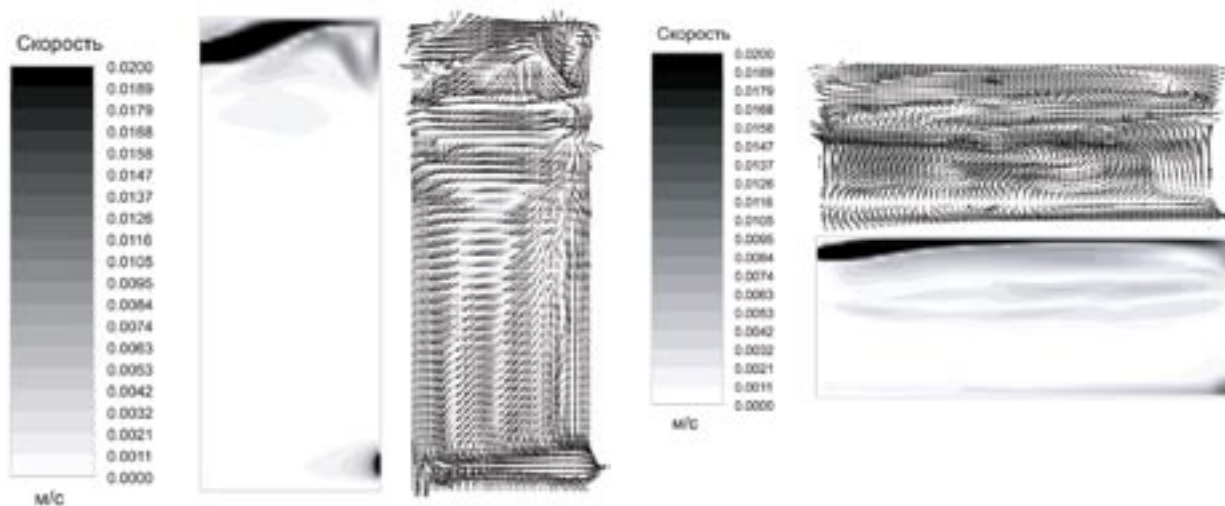


Рис. 6.

Поле скоростей горизонтально (справа) и вертикально (слева) ориентированного бака компоновки 1 через 4 ч. работы установки



Рис. 7.

Линии тока теплоносителя. Справа – вертикально ориентированный бак, слева – горизонтально

упорядочены, зоны рециркуляции затрагивают только верхнюю половину бака. Однако, коэффициент замещения установки с вертикальным баком ниже такового для горизонтального.

Объяснить это можно следующим образом:

- во-первых, разница в абсолютной высоте баков компоновки номер 4 составляет 200 мм, а в горизонтальном баке нижняя и верхняя зоны перемешивания стоят дальше друг от друга, что обеспечивает большую стратификацию;
- поперечное сечение горизонтально ориентированного бака меньше вертикального во всех плоскостях, что обеспечивает меньшую поверхность контакта нагретого теплоносителя с холодным и способствует меньшим потерям энергии за счет теплопроводности;

– объем теплоносителя в горизонтальном баке до границы термостатического элемента, включающего нагревательный элемент, меньше, что обеспечивает более быстрый прогрев этого объема до необходимой температуры и менее частое включение нагревателя.

Последнее явление хорошо видно на графике температуры верхнего слоя во времени (рис. 10). В баке горизонтальной компоновки верхний слой прогревается быстрее и имеет более высокую температуру.

Теперь сравним горизонтальный бак компоновки 4 и вертикальный компоновки 1, имеющие практически аналогичные показатели коэффициента замещения, более подробно. Для анализа процесса стратификации проведем моделирование в условиях отсутствия водозабора и с отключенным нагревателем. На рис. 11, 12

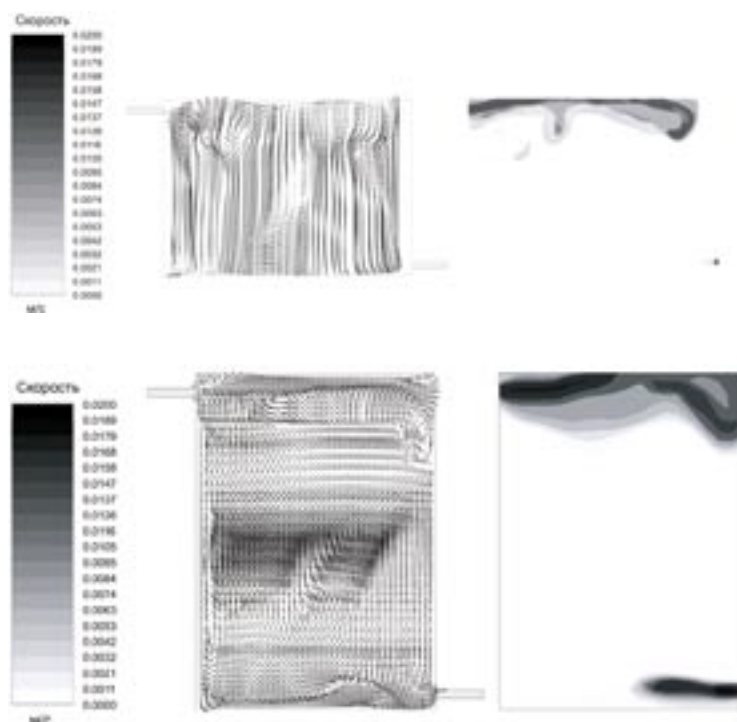


Рис. 8.

Поле скоростей баков компоновки 4 через 4 ч. работы установки

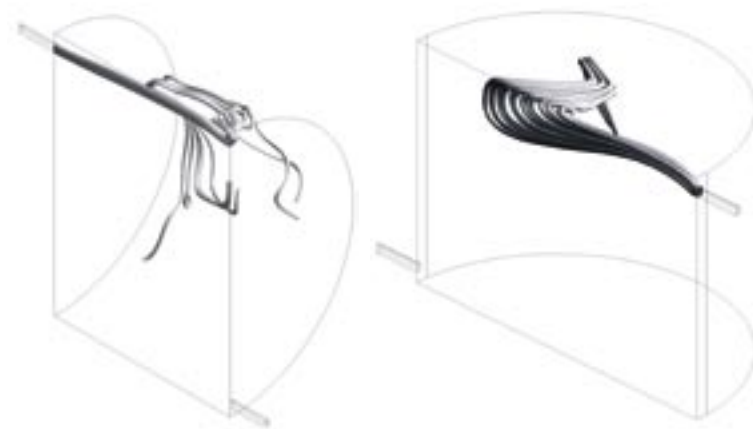


Рис. 9.

Линии тока для баков компоновки 4. Справа – вертикально ориентированный бак, слева – горизонтально

указаны расход теплоносителя ввиду свободноконвективного движения теплоносителя и изменение температуры верхнего и нижнего слоев (T_1 и T_2 соответственно). Согласно приведенным на рисунках данным, скорость циркуляции и разница температур данных компоновок практически идентичны. Это показывает, что параметры свободноконвективного контура и, как следствие, коэффициента замещения солнечного водонагревателя с естественной циркуляцией теплоносителя зависят не столько от ориентации бака, сколько от его геометрических характеристик.

Помимо исследования влияния геометрии бака на коэффициент замещения, важно выявить зависимость этого коэффициента от высоты расположения бака над верхней отметкой коллектора. Ранее положение бака над коллектором было зафиксировано на высоте 300 мм, являющейся оптимальной высотой, исходя из необходимых условий для развития устойчивого свободноконвективного движения теплоносителя без опрокидывания циркуляции в ночное время ввиду теплопотерь от коллектора.

При использовании обратного клапана опасность возникновения обратной циркуляции отпадает. Это позволит эксплуатировать установки с баком, расположенным ниже рекомендуемых 300 мм над уровнем коллектора. С помощью одномерной модели проанализируем влияние высоты расположения бака на коэффициент замещения. Для каждой из компоновок будем изменять высоту расположения бака с начальной (300 мм от нижней отметки бака до верха коллектора) с шагом 200 мм до момента, пока верх бака не сравняется с верхом коллектора. Результаты моделирования приведены на рис. 13 и 14.

В случае вертикальной компоновки снижение высоты бака приводит к незначительному увеличению коэффициента замещения, при этом максимум наблюдается когда верх бака относительно верха коллектора находится на высоте, приблизительно равной половине высоты бака. Это происходит за счет снижения скорости циркуляции в контуре и, как следствие, снижения влияния негативных факторов разрушения стратификации, связанных с перемешиванием теплоносителя. Дальнейшее снижение высоты бака приводит к понижению скорости циркуляции вплоть до практически ее полной остановки. Энергия, поглощенная коллектором, попадает в бак в основном за счет теплопроводности теплоносителя. При этом коллектор имеет очень высокую температуру (при больших тепловых потоках до 100°C), что существенно увеличивает теплопотери и создает риск вскипания теплоносителя в контуре. Поэтому при расположении

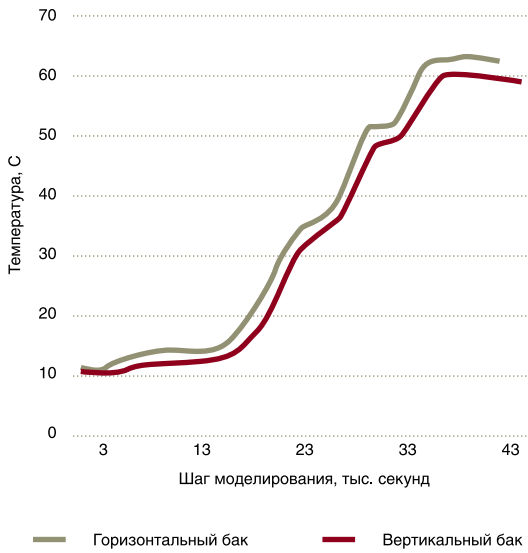


Рис. 10. Температура верхних слоев баков компоновки

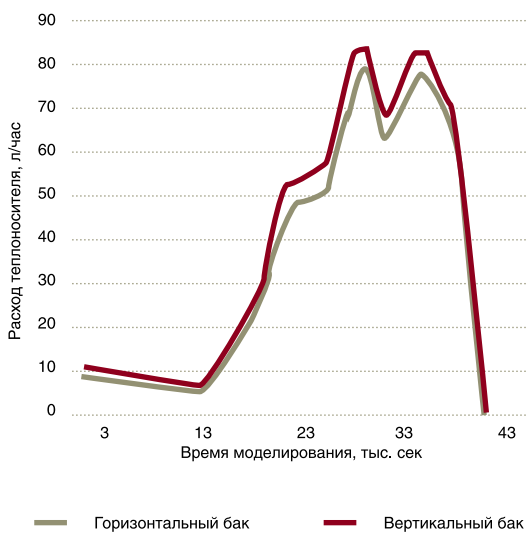


Рис. 11. Расход теплоносителя в контуре

бака на одном уровне с коллектором коэффициент замещения очень мал, ввиду чего такая компоновка нецелесообразна.

Для бака горизонтальной компоновки наблюдается сходное поведение коэффициента замещения – незначительный рост при снижении высоты расположения за счет уменьшения скорости и сильное его падение при расположении бака вровень с коллектором. Однако за счет меньших скоростей циркуляции в установках с горизонтально ориентированным баком снижение бака приводит к очень незначительному росту коэффициента замещения.

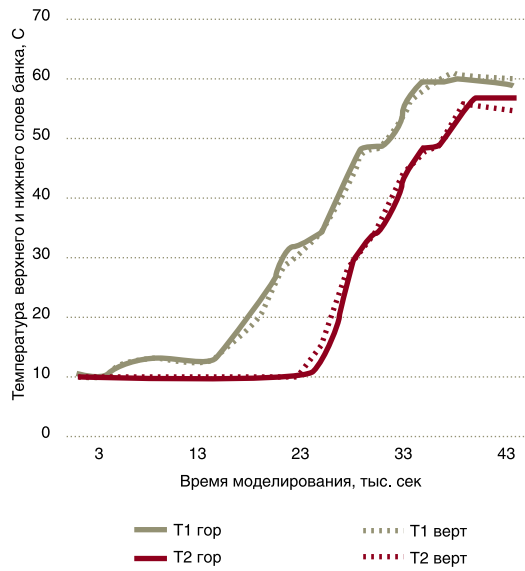


Рис. 12. Температура верхнего и нижнего слоев бака

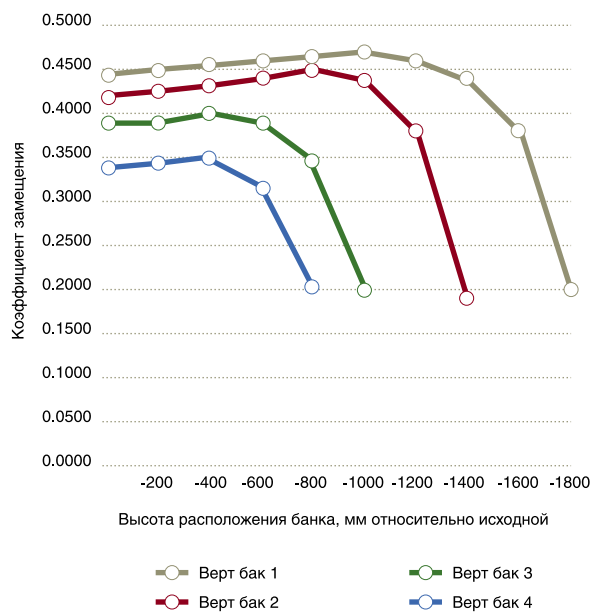


Рис. 13. Коэффициент замещения для вертикального бака при различных компоновках и высотах расположения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем теоретического анализа установлено, что эффективность солнечного водоподогревателя (оцениваемая по коэффициенту замещения тепловой нагрузки) зависит в большей степени от геометрических характеристик бака, нежели чем от его ориентации в пространстве. Получено теоретическое подтверждение того, что бак горизонтальной ориентации может обладать эффективностью, сопоставимой с баком вер-

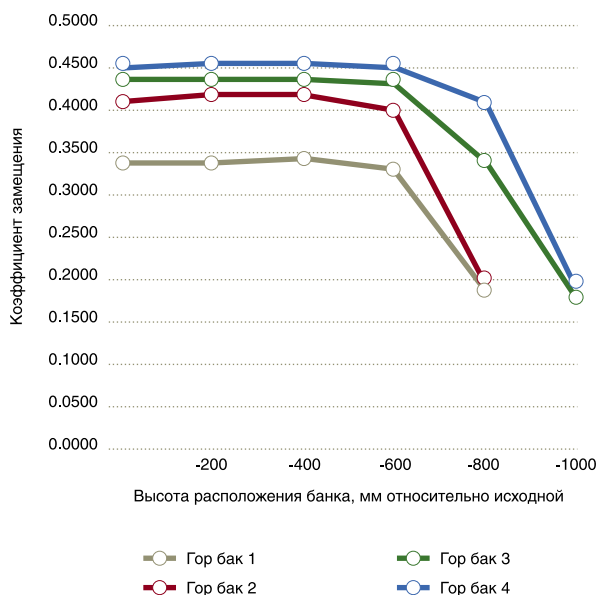


Рис. 14.

Коэффициент замещения для вертикального бака при различных компоновках и высотах расположения

тикальной компоновки. Исходя из проведенного исследования, можно выделить два основных критерия, которые оказывают влияние на развитие стратификации в баке:

1. Поперечное сечение бака. Действуют два противоположно направленных фактора – увеличение поперечного сечения снижает скорость теплоносителя

в баке, но и увеличивает поверхность, через которую передается тепло от более нагретых слоев теплоносителя к менее нагретым.

2. Высота бака. Также демонстрирует необходимость оптимизации: слишком большая высота бака обеспечит очень высокую скорость циркуляции (согласно теоретическим и практическим данным, увеличение высоты ввода теплоносителя в коллектор на 200 мм увеличивает скорость циркуляции на 4–5 литров в час), малая высота обеспечивает сливание верхней и нижней зон возмущений, обусловленных наличием ввода и вывода теплоносителя в коллектор, что приводит к разрушению стратификации.

Согласно результатам моделирования получена зависимость коэффициента замещения от высоты расположения бака аккумулятора, согласно которой для вертикальных баков максимум коэффициента замещения наблюдается при расположении верхней отметки бака выше верхней границы коллектора на половину высоты бака.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПОПЕЛЬ О.С. Эффективность применения солнечных водонагревателей в климатических условиях средней полосы России // Энергосбережение. 2001. №. 1.
2. YOUNG M.F., BERGJUM J.B. Performance Characteristics of a Thermosyphon Solar Domestic Hot Water System // Journal of Solar Energy Engineering. Vol. 103. P. 193–200.

Давыдов Марк Михайлович,
магистр техники и технологии Московского энергетического института
☎ тел.: +7 (915) 453-78-46
e-mail: davydovmm@gmail.com

Казанджан Борис Иванович,
д.т.н., профессор Московского энергетического института
☎ тел.: +7 (903) 206-24-95, +7 (495) 362-77-60,
e-mail: alten-1@rambler.ru

☎ 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17