

УДК 662.997

Габринец В.А. – д.т.н., проф., Днепропетровский национальный университет

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ЖИДКОСТНОГО ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА ЭНЕРГИИ ПРИ НАЛИЧИИ ОТВОДА И ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ

Предложены физическая и математическая модели для расчета термического расслоения жидкости в вертикальных сосудах. Модель предполагает наличие стационарных условий, когда количество самой жидкости в сосуде не меняется. Предложен критерий, позволяющий оценить влияние основных факторов на величину термического расслоения. Получено аналитическое соотношение для расчета профиля температур по высоте жидкости, что необходимо для правильного определения емкости жидкостного теплового аккумулятора солнечной энергетической установки.

Ключевые слова: стратификация, аккумулятор энергии, коэффициент теплоотдачи, ламинарный слой.

Введение

В различных областях техники имеет место хранение и использование различных жидкостей в вертикальных цилиндрических сосудах при наличии подвода и отвода теплоты. В качестве примера можно назвать баки для хранения различных жидкостей в химической и в топливной промышленности, жидкостной аккумулятор энергии для солнечной энергетической установки. Все эти устройства, с одной стороны, подвергаются солнечному облучению, то есть имеет место подвод теплоты. С другой стороны, они конвективным образом охлаждаются за счет взаимодействия с окружающей атмосферой. При таких условиях жидкость, находящаяся в баке, подвержена термическому расслоению, при котором более нагретая жидкость собирается в верхних частях бака, а более холодная – в нижних его частях. Это явление называется стратификацией. Определение вертикального профиля температур стратифицированной жидкости по высоте сосуда является важной технической задачей. Это позволяет правильно рассчитать давление насыщенных паров жидкости в верхней части сосуда, правильно определить количество запасаемой тепловой энергии в жидкостном тепловом аккумуляторе. Водяной аккумулятор энергии является важнейшей составной частью солнечной системы тепло- и водоснабжения. Он предназначен для накопления и выдачи энергии сол-

нечного излучения в виде теплоты нагретой с его помощью воды. Накопление энергии происходит в период наличия солнечного излучения, а выдача – в периоды его отсутствия [1]. Существуют суточное, недельное, сезонное аккумулирование теплоты в зависимости от срока хранения [2]. Подвод и отвод тепловой энергии к тепловому аккумулятору осуществляется за счет циркуляции через него теплоносителя. Циркуляция может быть как естественной, так и вынужденной. Типичная схема такой установки с естественной циркуляцией теплоносителя представлена на рисунке 1.

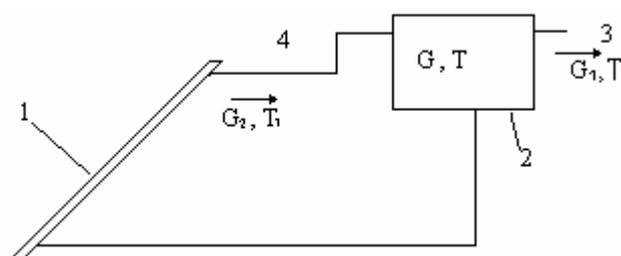


Рис. 1. Схема солнечной энергетической установки для горячего тепло- и водоснабжения:
1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор;
3 – магистраль отбора; 4 – магистраль подвода

Солнечная энергетическая установка может работать в различных режимах. При отсутствии солнечного освещения имеет место только расход теплоносителя из бака-аккумулятора. Расход воды G_1 из бака и его выходная температура $T_{\text{вых}}$ на всех режимах должны соответствовать проектным значениям. Основными характеристиками аккумулятора являются: общая масса воды в нем G , средняя температура теплоаккумулирующей среды $T_{\text{ср}}$. При расчете энергетической установки предполагается, что температура отбираемой воды из бака-аккумулятора $T_{\text{вых}}$ равна средней температуре воды в баке. Сама же средняя температура жидкости зависит от вертикального профиля температур по высоте бака. Значение температуры $T_{\text{вх}}$ на практике не может превышать $80\text{ }^\circ\text{C}$, что определяется условиями теплообмена на тепловоспринимающей поверхности плоского солнечного гелиоколлектора. Это значение температуры может быть выбрано в качестве максимальной температуры теплоносителя в солнечной гелиоустановке.

При наличии тепловых потерь, связанных с плохой теплоизоляцией или резким похолоданием, вода в баке подвержена температурному расслоению. Стратификация имеет место также в баке с жидким криогенным топливом при хранении его на старте в заправленном состоянии. Поэтому это явление исследовалось в работах [3 – 6]. Одна-

ко, не до конца определено влияние внешних условий на характер стратификации при хранении жидкости в стационарных условиях.

Методика и результаты исследований

В настоящей работе предлагается физическая и математическая модели, позволяющие определить вертикальный профиль температур по высоте замкнутого цилиндрического сосуда. В основу модели положено хорошо наблюдаемое явление конвективного подъема и опускания жидкости в ламинарном слое возле нагретой и, соответственно, охлажденной стенок этого сосуда. В физической модели используются следующие положения:

- начальное распределение температуры по всему объему жидкости является однородным;
- весь приток и отток теплоты к стенке идет на повышение теплосодержания пограничного слоя;
- весь расход жидкости через пограничный слой поступает в верхний и нижние части бака и накапливается там;
- при средней температуре жидкости в пограничном слое, большем, чем температура стратифицированного слоя, часть жидкости переходит в этот слой, ей на замену приходит из слоя равное ей количество жидкости с меньшей температурой;
- толщина пограничного слоя мала по сравнению с диаметром сосуда.
- средняя температура жидкости в пограничном слое, равна температуре стратифицированного слоя жидкости в сосуде для данной высоты.

Последнее предположение вытекает из следующего соотношения:

$$T_{\text{ср}} = \frac{\int_0^{\delta} (T_{\text{стг}} - T_x) U_x dx}{\int_0^{\delta} U_x dx}. \quad (1)$$

Пусть вертикальный сосуд с одной стороны нагревается, а с другой стороны вследствие тепловых потерь охлаждается. Тогда в нем в стационарном режиме установится такое распределение температур по вертикали, при котором количество подведенного тепла за счет солнечной радиации с одной стороны бака будет равно отведенному теплу с другой стороны. Отвод тепла осуществляется за счет конвективного охлаждения с окружающей средой, имеющей меньшую температуру. Условие теплового баланса запишется следующим образом:

$$Q_{\text{под}} = Q_{\text{отв}}.$$

Пусть все подведенное и отведенное с наружной поверхности сосуда тепло во внутреннем объеме воспринимается жидкостью, дви-

жущейся в пограничных слоях, и переносится этой жидкостью либо в верхнюю часть бака, либо в нижнюю. Разобьем всю высоту бака b по вертикали на равные промежутки с расстоянием Δy_i . Обозначим среднюю температуру жидкости в пограничном слое на соответствующем участке Δy_i через T_i . Описанная расчетная схема представлена на рис. 2.

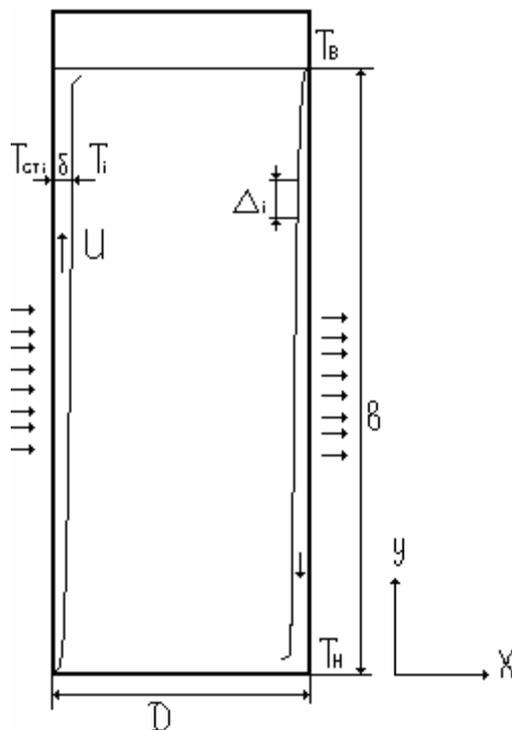


Рис. 2. Расчетная схема для определения вертикального профиля температур при термическом расслоении жидкости

Количество теплоты, которое теряется жидкостью, движущейся в пограничном слое в области отвода тепла, может быть определено по соотношению:

$$Q = \pi \frac{D}{2} W \rho C_p \delta (T_i - T_{i-1}), \quad (2)$$

где W – средняя скорость движения жидкости в пограничном слое.

Величина количества теплоты теряемого на этом участке внешней поверхностью бака может быть определено из соотношения:

$$Q = \pi \frac{D}{2} \Delta y_i \alpha (T_i - T_{ок}). \quad (3)$$

В соотношении (3) температуру внешней поверхности бака приравняли к средней температуре жидкости и пограничного слоя $T_{вн} = T_i$; $T_{ок}$ – температура окружающей среды.

Приравняв соотношения (2) и (3) получаем:

$$\pi \frac{D}{2} W \rho C_p \delta (T_i - T_{i-1}) = \pi \frac{D}{2} \Delta y_i \alpha (T_i - T_{ок}). \quad (4)$$

При наличии подвода тепла к вертикальному баку в верхней его части всегда имеет место наличие слоя жидкости с максимальной для данных условий температурой T_{max} . Температура жидкости в баке меняется от максимальной в верхней части бака до минимальной в нижней части. Значение минимальной температуры для бака аккумулятора не может быть меньше температуры окружающей среды. $T_{мин} \geq T_{окр}$.

Введем безразмерные переменные:

$$\theta = \frac{T_i - T_{ок}}{T_{max} - T_{ок}}; \quad Y = \frac{y}{b}; \quad \Delta Y_i = \frac{\Delta y_i}{b}. \quad (5)$$

Подставляя переменные (5) в соотношение (4) и переходя к пределам $\Delta \theta \rightarrow d\theta$, $\Delta Y \rightarrow dY$, получим дифференциальное уравнение, описывающее изменение вертикального профиля температур по высоте бака:

$$\frac{d\theta}{dY} = \frac{\alpha b}{\rho c \delta W} \theta. \quad (6)$$

Обозначив в уравнении (6) через K комплекс $\alpha b / (\rho c \delta W)$, получим новый вид уравнения (6):

$$\frac{d\theta}{dY} = K\theta. \quad (7)$$

Решая его при граничном условии $Y = 1, \theta = 1$, получим выражение:

$$\theta = e^{KY} - e^K + 1. \quad (8)$$

Расчет безразмерной температуры θ в зависимости от безразмерной высоты Y , проведенный по соотношению (8) при различных значениях комплекса K , приведен на рисунке 3.

Безразмерный комплекс $K = \alpha b / (\rho c \delta W)$ характеризует отношение интенсивностей тепловых потоков при отводе или подводе теплоты к цилиндрическому

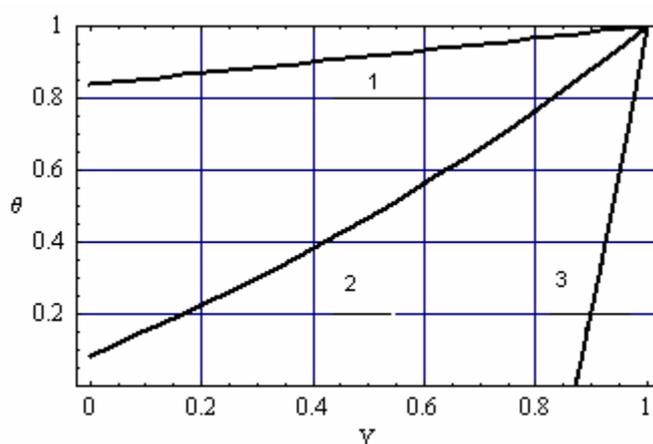


Рис. 3. Зависимость безразмерной температуры θ от безразмерной высоты Y при различных значениях комплекса K :
1 – $K = 0,15$; 2 – $K = 0,65$; 3 – $K = 1,65$

сосуду с внешней его стороны к интенсивности переноса теплоты от внутренней стороны этого же сосуда.

Выводы

При слабом внешнем теплоотводе, то есть при низком значении коэффициента α , а следовательно, и низком значении комплекса K стратификация проявляется слабо и температура жидкости по высоте бака практически не меняется (кривая 1). Это имеет место также при хорошей теплоизоляции. Если же имеет место интенсивный отвод теплоты от внешней стороны сосуда (большое значение комплекса K) значительное изменение температуры по высоте бака имеет место только в верхней части сосуда (кривая 3). Все вышесказанное относится к стационарному режиму, то есть после длительного нахождения сосуда при заданных условиях хранения. При отборе теплоты в виде жидкости наличие соотношения (7) позволит рассчитать характер изменения температуры во времени для заданного расхода жидкости и высоте отбора.

Список литературы

1. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман. – М. : Мир, 1977. – 420 с.
2. Свен Удел. Солнечная энергия и другие альтернативные источники энергии / Удел Свен. – М. : Знание, 1980. – 324 с.
3. Двигательные установки ракет на жидком топливе. – М. : Мир, 1966. – 403 с.
4. Шинкел. Стратификация при свободной конвекции в вертикальных полостях / Шинкел, Линтхорст, Хогедорн // Теплопередача. – 1983. – Vol. 21, № 2. – С. 57–64.
5. V. Kamotani. Experiment on Natural Convection Heat Transfer in Low Aspect Ratio Enclosures / V. Kamotani, L. Wang // AIAA Journal/ – 1983. – Vol. 21, № 2. – P. 290–294.
6. J. Drummond. Natural Convection in Shallow Cavity / J. Drummond, S. Korpela // J. Fluid Mech. – 1987. – Vol. 182. – P. 543–564.

Рукопись поступила 22.02.2010 г.