

2. Мхитарян Н. М. Гелиоэнергетика. Системы, технологии, применение / Н. М. Мхитарян. – К., – 2002. – 290 с.

3. Зоколей С. Солнечная энергия и строительство / С. Зоколей. – М., – 1979. – 209 с.

4. Мак-Вейг Д. Применение солнечной энергии / Д. Мак-Вейг. – М., – 1981. – 216 с.

Надійшла до редколегії 10.10.09

УДК 697.1

В. А. Габринец

Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара

СТРАТИФИКАЦИЯ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СОСУДЕ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ХРАНЕНИИ

Запропанована фізична та математична модель для розрахунку розшарування рідини у вертикальній ємності. Модель передбачає наявність стаціонарних умов, коли має місце тривале зберігання рідини при її постійній кількості. Запропановано критерій, що дозволяє оцінити вплив основних чинників на рівень термічного розшарування. Отримано аналітичне співвідношення для розрахунку вертикального профілю температур по висоті рідини, що необхідно для правильного визначення ємності рідинного теплового акумулятора сонячної енергетичної установки.

Ключові слова: стратифікація рідини, математична модель, термічне розшарування, ємність рідинного теплового акумулятора, профіль температури.

Предложена физическая и математическая модель для расчета термического расслоения жидкости в вертикальных сосудах. Модель предполагает наличие стационарных условий, когда имеет место длительное хранение жидкости при постоянном ее количестве. Предложен критерий позволяющий оценить влияние основных факторов на величину термического расслоения. Получено аналитическое соотношение для расчета вертикального профиля температур по высоте жидкости, что необходимо для правильного определения емкости жидкостного теплового аккумулятора солнечной энергетической установки.

Ключевые слова: стратификация жидкости, математическая модель, термическое расслоение, емкость жидкостного теплового аккумулятора, профиль температуры.

The physical and mathematical model for calculation of thermal stratification of a liquid in vertical vessels is offered. The model assumes presence of stationary conditions when long storage of a liquid occurs at its constant quantity. It suggested allowing to size up criterion agency of major factors on magnitude of thermal stratification. The analytical relationship for calculation vertical a profile of temperatures on liquid altitude that is necessary for correct definition of capacity of the fluid-flow heat accumulator of solar power installation is gained.

Key words: liquid stratification, mathematical model, thermal stratification, capacity of the fluid-flow heat accumulator, a temperature profile.

В различных областях техники имеет место хранение и использование различных жидкостей в вертикальных цилиндрических сосудах при наличии подвода и отвода тепла. В качестве примера можно назвать вертикальный бак для жидкого

топлива ракеты, бак для хранения различных жидкостей в химической и в топливной промышленности, жидкостной аккумулятор солнечной энергетической установки. Часто эти устройства с одной стороны подвергаются солнечному облучению, то есть имеет место подвод тепла. 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 верхней части бака, а более холодная в нижней его части. Определение профиля температур по высоте бака для теплового аккумулятора энергии является важной технической задачей.

Водяной аккумулятор энергии является важнейшей составной частью солнечной системы тепло- и водоснабжения. Он предназначен для накопления и выдачи энергии солнечного излучения в виде тепла нагретой с его помощью воды. Накопление энергии происходит в период наличия солнечного излучения, а выдача – в периоды его отсутствия [1]. Существуют суточное, недельное, сезонное аккумулярование тепла в зависимости от срока хранения. Подвод и отвод тепловой энергии к теплому 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 рис. 1.

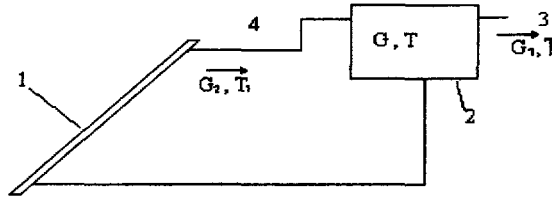


Рис.1. Схема солнечной энергетической установки для горячего тепло- и водоснабжения:
 1 – солнечный коллектор, 2 – бак-аккумулятор, 3 – магистраль отбора, 4 – магистраль подвода

Солнечная энергетическая установка может работать в различных режимах. Можно выделить два основных режима работы установки, изображенной на рисунке 1. При наличии солнечного освещения реализуется режим, при котором наряду с поступлением в бак-аккумулятор горячей воды из солнечного коллектора с расходом G_2 и температурой $T_{вх}$ имеет место одновременно так же и расход воды из бака для различных нужд потребителя. При отсутствии солнечного освещения имеет место только расход теплоносителя из бака-аккумулятора. В обоих случаях расход воды G_1 из бака и его выходная температура $T_{вых}$ должны соответствовать проектным значениям. Основными характеристиками аккумулятора являются: общая масса воды в нем G , средняя температура теплоаккумулирующей среды $T_{ср}$. При этом предполагается, что температура отбираемой воды из бака-аккумулятора $T_{вых}$ равна средней температуре воды в баке. Сама же средняя температура жидкости зависит от вертикального профиля температур по высоте бака. Значение температуры $T_{вх}$ на практике не может превышать $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, что определяется условиями теплообмена на 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, жидкость в баке подвержена температурному расслоению. Это явление называется

стратификацией. Стратификация имеет место также в баке с жидким криогенным топливом при хранении его на старте в заправленном состоянии [2].

В настоящей работе предлагается физическая и расчетная 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 или турбулентном слое возле нагретой и соответственно охлажденной стенках этого сосуда. Схема модели предложена на рис. 2. В основу физической модели положены следующие положения:

- начальное распределение температуры по всему объему жидкости является однородным;
- весь приток и отток 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 бака;
- средняя температура жидкости в пограничном слое, равна температуре стратифицированного слоя жидкости в баке для данной высоты.

Последнее предположение вытекает из следующего соотношения

$$T_{cp} = \frac{\int_0^\delta (T_{cmi} - T_x) U_x dx}{\int_0^\delta U_x dx} \quad (1)$$

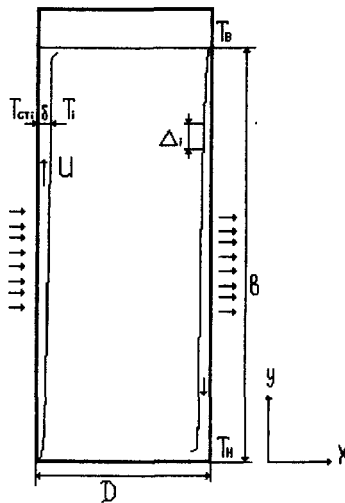


Рис.2. Расчетная схема для определения вертикального профиля температур при термическом рас- слоении жидкости

Пусть бак с одной стороны нагревается, а с другой стороны вследствие тепловых потерь охлаждается. Тогда в нем на 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

$$Q_{под} = Q_{отв}$$

Пусть все подведенное и отведенное тепло во внутреннем объеме воспринимается жидкостью, движущейся 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 . Количество тепла, которое теряется жидкостью, движущейся в пограничном слое в области отвода тепла может быть определено по соотношению

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

W – средняя скорость движения жидкости в пограничном слое; δ – толщина пограничного слоя; ρ – плотность, теплоемкость жидкости; D – диаметр бака.

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

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

α – коэффициент теплоотдачи.

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

$$T_{мин} \geq T_{ок}$$

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 $\frac{\alpha b}{\rho c \delta W}$, 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 при веден на рис. 3.

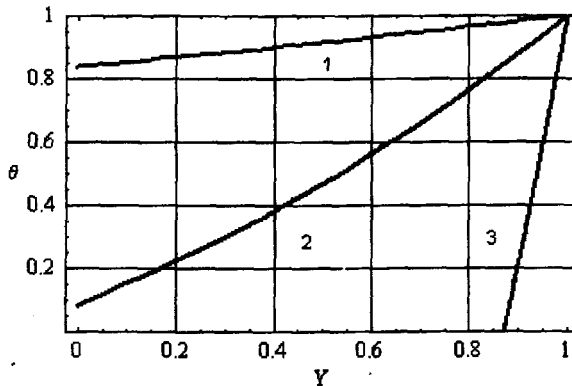


Рис.3. Зависимость безразмерной температуры θ от безразмерной высоты Y , при различных значениях комплекса K (1 – $K=0.15$; 2 – $K=0.65$, 3 – $K=1.65$)

Безразмерный комплекс $K = \frac{\alpha b}{\rho c \delta W}$ характеризует отношение интенсивностей

тепловых потоков при отводе или подводе тепла к цилиндрическому сосуду с внешней его стороны к интенсивности переноса тепла от внутренней стороны этого же сосуда. При хорошей теплоизоляции, 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). Если же имеет место интенсивный отвод тепла от внешней стороны сосуда (большое значение комплекса K) 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.

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 тепла 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 жидкости из сосуда наличие соотношения (7) позволит рассчитать характер изменения температуры во времени для заданного расхода жидкости и при заданной высоте отбора.

Библиографические ссылки

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

Надійшла до редколегії 20.10.09