

**РАСЧЁТ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА С ФАЗОВЫМ  
ПЕРЕХОДОМ «ТВЁРДОЕ ТЕЛО – ЖИДКОСТЬ»**

*Аннотация. Проведено исследование низкотемпературного трубчато-ребристого теплового аккумулятора фазового перехода «твёрдое тело – жидкость». Составлена математическая модель для расчёта основных геометрических, динамических и теплофизических параметров аккумулирующего модуля. В модели использовался приближённый квазистационарный метод расчёта скорости движения границы раздела фаз. Особенностью модели является учёт конвективной составляющей в жидкой фазе теплоаккумулирующего материала. Численное решение позволило выявить постоянство скорости движения границы раздела фаз на режиме зарядки. Определено время зарядки аккумулятора при выбранном суточном потреблении тепла.*

Проведено исследование трубчато-ребристого теплоаккумулирующего модуля «твёрдое тело – жидкость» на режиме зарядки. Математическая модель базируется на инженерных методах, характерных для расчёта рекуперативных теплообменных аппаратов. Определена скорость перемещения границы раздела фаз, что позволило найти полное время зарядки теплоаккумулятора. Определены динамические и геометрические характеристики накопителя тепла.

**Ключевые слова:** фазовый переход «твёрдое тело – жидкость», теплоаккумулятор, теплоаккумулирующий материал, теплоноситель, численные исследования.

**Вступление.** Проблема аккумулирования тепла стоит особенно остро при использовании энергетических установок на основе возобновляемых источников энергии, при реализации различных энергосберегающих мероприятий, в частности, в металлургической, в химической и других отраслях промышленности. Неравномерный характер поступления тепловой энергии от первичного источника и несоответствие между периодом поступления и использования тепла приво-

дит к необходимости вводить в энергетические контуры теплоаккумулирующие системы, среди которых наиболее эффективными считаются фазопереходные модули «твёрдое тело – жидкость». Такие системы достаточно надёжны и обладают значительным ресурсом работы, что связано с обратимостью процесса «плавления – затвердевания», низкой химической активностью используемых материалов, стабильным температурным уровнем, способным обеспечить множество периодов заряда и разряда аккумулятора. Теплоаккумуляторы фазового перехода «твёрдое тело – жидкость» обладают достаточно большой энергетической ёмкостью и относительно малыми размерами по сравнению с теплоёмкостными водяными или грунтовыми накопителями тепла. Что же касается более высокотехнологичных накопителей (водородных и пр.), то их разработка находится на начальных этапах и говорить об их массовом использовании пока преждевременно.

Расчёт энергетических систем, в которых осуществляется фазовый переход «твёрдое тело – жидкость» связан со значительными трудностями. Такие задачи по определению нестационарны, в них присутствуют нелинейные граничные условия, связанные как с внешним теплообменом, так и с наличием движущейся границы раздела фаз, в бесконечно малой области которой происходит выделение или поглощение скрытой теплоты. Дополнительные сложности при расчёте теплообменного оборудования с использованием теплоты фазового перехода связаны с сопряжённым характером теплообмена и цикличностью поступления теплоты от первичного источника. Такие задачи практически невозможно решить с использованием стандартных пакетов программ, а численное моделирование на основе полной системы Навье – Стокса достаточно затратно, как в интеллектуальном, так и в ресурсном аспекте [1]. Кроме того, численное решение подобных задач сложно применить в инженерной практике, особенно на этапе проектирования энергосистем, когда за короткий промежуток времени необходимо рассмотреть множество возможных конструкторских решений. Поэтому крайне важно иметь достаточно простой инструментарий для проведения инженерных расчётов, созданию которого и посвящена данная работа.

**Постановка задачи.** Модуль теплового аккумулятора с фазовым переходом, как правило, представляет собой трубчато – ребристый теплообменник, обеспечивающий сравнительно равномерный

прогрев теплоаккумулирующего материала (ТАМа) при невысоких температурных напорах. Такие напоры характерны для накопителей тепла, что работают в энергетическом контуре «солнечный коллектор – теплоаккумулятор – система отопления или горячего водоснабжения». На примере этого контура удобно проводить расчёт и анализ работы трубчато-ребристого теплоаккумулятора, причём результаты проведенных исследований впоследствии можно легко трансформировать на другие типы энергосистем.

Теплоаккумулирующий модуль начинает работать на режиме зарядки, только если температура на выходе из гелиоколлектора становится выше температуры фазового перехода ТАМа. В этом случае теплоноситель поступает в теплообменник и отдавать теплоту ТАМу через стенки трубок и рёбра. Граница раздела фаз в ТАМе начинает перемещаться и её положение можно определить лишь в процессе расчёта. Известно крайне мало точных решений подобных задач, класс которых носит название задачи Стефана. Причём во всех известных решениях предполагается, что передача теплоты, как в твёрдой, так и в жидкой фазах осуществляется теплопроводностью [2]. Однако, экспериментальные данные указывают на то, что существенное влияние на теплообмен в жидкой фазе ТАМа оказывает конвективная составляющая, учёт которой необходимо производить в процессе расчёта [3].

Квазистационарная математическая модель тепломассопереноса в элементе трубчато-ребристого фазопереходного аккумулятора теплоты на режиме зарядки состоит из уравнения баланса теплоты

$$-GC_P d\vartheta_{TH} = \rho_{TAM} L \cdot 4l \cdot h \frac{d\delta_{TAM}}{d\tau}, \quad (1)$$

и уравнения теплопередачи

$$-GC_P \frac{d\vartheta_{TH}}{dx} = K\vartheta_{TH} \cdot 4l. \quad (2)$$

В этих уравнениях в качестве избыточной температуры выступает  $\vartheta_{TH} = T_{TH} - T_{\Phi}$ ;  $G$  и  $C_P$  – расход теплоносителя и его теплоёмкость;  $\rho_{TAM}$  и  $L$  – плотность и скрытая теплота фазового перехода ТАМа;  $l$ ,  $h$  и  $\delta_{TAM}$  – расстояние между каналами в теплоаккумуляторе, высота накопителя и толщина жидкой фазы соответственно.

Система уравнений (1) – (2) должна быть дополнена граничными и начальными условиями, которые в нашем случае имеют вид

$$\text{при } \tau = 0 \quad \delta_{TAM} = \delta_{TAMH}, \quad x = 0 \quad \vartheta_{TH} = \delta_{THH}. \quad (3)$$

Решая дифференциального уравнения (2) при заданных граничных условиях и подставляя полученный результат в уравнение (1), получим

$$-GC_p \vartheta_{TH1} (1 - e^{-\frac{KF}{GC_p}}) = \rho_{TAM} L \cdot 4l \cdot h \cdot \varepsilon_{Cp} \frac{d\delta_{TAM}}{d\tau}, \quad (4)$$

где  $F$  – это площадь поверхности ребёр, приходящаяся на один канал.

Величина  $\varepsilon_{Cp}$  учитывает расход теплоты на подогрев, образовавшийся в процессе зарядки, жидкой фазы. Проведённые оценочные расчёты показывают, что при зарядке теплоаккумулятора от ГК данная величина находится в пределах 1,01–1,03 и ею можно пренебрегать в дальнейшем.

В уравнении (4) неизвестной остаётся величина коэффициента теплопередачи, которая на режиме зарядки принимает значение

$$K = \frac{1}{\frac{F}{\alpha_{TH} \pi dh} + \frac{1}{\alpha_{ЭКВ} \xi}}, \quad (5)$$

Значение среднего коэффициента теплоотдачи между теплоносителем и стенкой канала  $\alpha_{TH}$  находим из критериального уравнения М.А. Михеева в предположении, что в канале организован ламинарный режим течения теплоносителя, а эквивалентный коэффициент теплоотдачи от ребер к поверхности раздела фаз  $\alpha_{ЭКВ}$  из соображений ключевого влияния на теплообмен конвективной составляющей в жидкой фазе. Коэффициент  $\xi$  в уравнении (5) характеризует неравномерность распределения температуры по длине ребра. В [2] приведено аналитическое решение характера изменения температуры по ребру при отсутствии теплоотдачи с торцов. Используя это решения, и, переходя к среднеинтегральному значению избыточной температу-

ры, получаем  $\xi = \frac{1}{1 + \frac{2}{3}(ml)^2}$ , где  $m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{ЭКВ}}{\lambda_p \cdot \delta_p}}$ .

В замкнутом объёме жидкой фазы развивается свободная конвекция, учёт которой связан со значительными вычислительными трудностями. Объём жидкой фазы изменяется неравномерно, поэтому для инженерных расчётов достаточно рассмотреть некоторую среднюю прослойку с жидкой фазой, причём с условием, что поверхность фазового перехода при своём перемещении будет все время оставаться параллельной поверхности ребёр. Тогда учёт свободной конвекции можно проводить аналогично процессу теплопроводности с использованием специально безразмерного коэффициента  $\varepsilon_K = f(Cr \cdot Pr)$ , который находится из критериального уравнения [4]. Для нашего случая выражение для эквивалентного коэффициента теплоотдачи будет иметь вид

$$\alpha_{ЭKB} = 0,18 \lambda_{\Phi} \left( \frac{g \cdot \beta_{\Phi}}{\nu_{\Phi}^2} Pr_{\Phi} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{\nu_{TH}}{\delta_{TAM}} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

Подставляя значение  $\alpha_{ЭKB}$ ,  $\xi$  и  $F$  в выражение (5) при двух продольных рёбрах на стенках канала, получим значение коэффициента теплопередачи на режиме зарядки в виде

$$K = \frac{1}{\frac{l}{\pi \lambda_{TH}} + \frac{1}{\alpha_{ЭKB}} + \frac{4}{3} \frac{l^2}{\lambda_p \delta_p}}. \quad (7)$$

После подстановки (7) в (4), получаем дифференциальное уравнение для определения скорости движения границы раздела фаз при зарядке аккумулятора.

**Метод решения и анализ полученных результатов.** Полученное дифференциальное уравнение (4) с начальными условиями (3) решить аналитически не представляется возможным. Среди численных методов решений обыкновенных дифференциальных уравнений наибольшим порядком точности обладает метод Рунге – Кутта, который и был положен в основу численного алгоритма.

Отдельно при проведении исследования рассматривался вопрос определения расхода теплоносителя в теплоаккумулирующем модуле. Он решался в предположении, что модуль входит в систему горячего водоснабжения, заряжается от ГК и при отсутствии солнечной радиации обеспечивает систему теплом в течении нескольких суток. Сначала теплоноситель поступает в теплообменник модуля, охлаждается там до температуры, близкой к температуре фазового перехода, а по-

том, направляется в бак – аккумулятор, где охлаждаться до температуры  $t_c$ . Расход теплоносителя можно рассчитать, используя значения этой температуры

$$G = \frac{K_{ГК} \cdot F_{ГК}}{C_p \ln \frac{t_M - t_{БА}}{t_M - t_{ВКЛ}}}, \quad (8)$$

где  $K_{ГК}$  и  $F_{ГК}$  – коэффициент тепловых потерь гелиоколлектора и его площадь,  $t_{ВКЛ}$  – температура теплоносителя при включении ГК, а  $t_M$  – максимальная температура в ГК при отсутствии расхода, зависящая от совершенства ГК, интенсивности солнечной радиации и прочих метеоусловий [5].

Циркуляция теплоносителя в контуре начинается по достижению определённой температуры  $t_{ВКЛ}$ , что позволяет определить время работы гелиоколлектора, которое в июне месяце на широте Днепропетровска не превосходит 6 часов.

Поставляя полученные значения расхода в уравнение (4) и учитывая максимальное время работы системы, получаем суточную зависимость толщины расплавленной фазы в теплоаккумулирующем модуле. Эта зависимость представлена на рис.1.

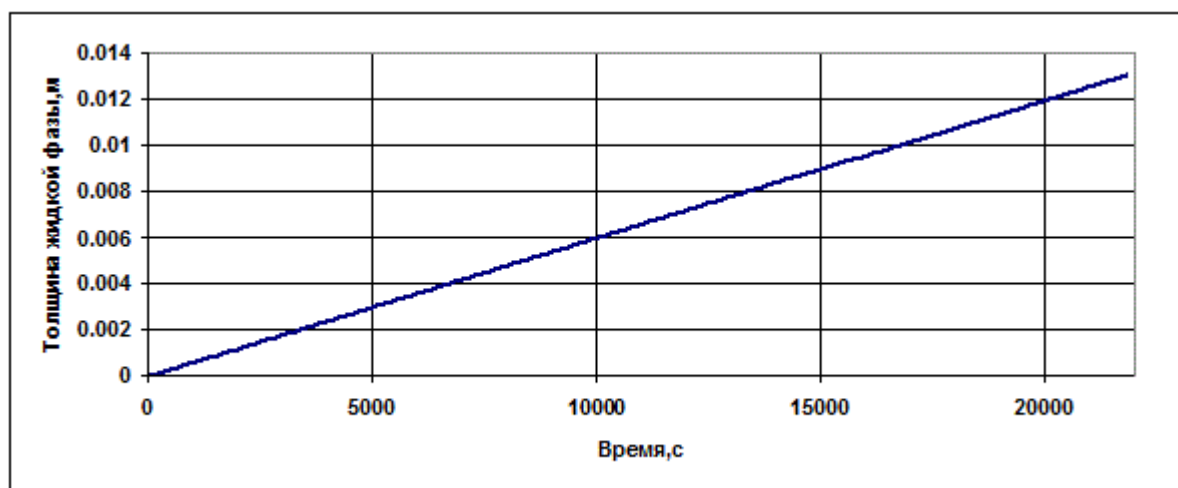


Рисунок 1 - Суточное изменение толщины жидкой фазы ТАМа

Анализ графика показывает линейную зависимость изменения толщины расплавленной фазы от времени. Очевидно, это связано со слабым влиянием на процесс эквивалентного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{ЭКВ}$ , в выражение для которого величина  $\delta_{ТАМ}$  входит в степе-

ни 0,25. Таким образом, можно утверждать, что на режиме зарядке скорость перемещения границы раздела фаз остается постоянной и равной  $3,1 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$ .

Следует отметить, что исследования проводились для теплоаккумулятора, заправленного очищенным парафином, а в качестве теплоносителя выступал антифриз. Геометрические параметры модуля вычислялись из соображений обеспечения горячей водой предполагаемого потребителя из расчёта 300 кг/сутки. Длина каналов с теплоносителем выбиралась равной 1м, количество трубок в каждом теплопроводящем ряду 10 и таких рядов тоже 10. При такой геометрии полная зарядка аккумулятора произойдёт через 8,4 суток.

**Выводы.** Исследование трубчато-ребристого теплоаккумулятора фазового перехода «твёрдое тело – жидкость» базировались на созданной квазистационарной математической модели, в которой учитывался конвективный теплоперенос в жидкой фазе ТАМа. Проведенные на основе созданного алгоритма численные исследования показали постоянство скорости движения границы раздела фаз на режиме разрядке, определено также среднее значение этой скорости. Это позволило вычислить полное время зарядки накопителя тепла при выбранных геометрических и динамических параметрах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кныш Л.И. Оптимизация геометрических и динамических характеристик теплоаккумулирующего модуля / Л.И. Кныш, А.А. Рядно. // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т.25, №6 – С. 9 –15.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967.– с. 600.
3. Ho C. –J. Heat Transfer During Melting from an Isothermal Vertical Wall / C. – J. Ho, R. Viskonta // J. Heat Transfer. – 1984, V. 106. – P. 12 – 19.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия. – 1977. – с. 345.
5. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир,1977. – с. 420.