

METHODS OF CALCULATION OF UNSTEADY TEMPERATURE FIELD IN THERMAL ENERGY PACKET BED STORAGE

Ermuratschii V.V., Gritsay M.A.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. In article briefly discusses the problem of calculation of the unsteady temperature field in the packed bed sensible and latent heat storages. Propose a method for calculating this field, without resorting to the solution of heat transfer differential equations. The calculation is performed for the control volumes of solids sequentially in the space- time coordinates. As boundary conditions used the results obtained in the previous space- time layer. In each control volume is modeled heating one body. Here it is assumed that the rest of the packing in this control volume are identical conditions. Problem of unsteady heat transfer body with the boundary conditions of the third kind is solved approximately. For this purpose used electro thermal models and methods of electrical engineering. The fulfillment of the first law of thermodynamics for a system heat- transfer medium - the body is provided by the iterative search of the average temperature of the heat- transfer agent. The method allows to numerically solving the problem of calculating the unsteady temperature field heat storages with variable boundary conditions. At the same body may be the correct form (sphere, cylinder, parallelepiped, etc.). It is also applicable for the approximate calculation of packed bed with irregular-shaped bodies in the form of pieces of stones, gravel, pebbles, etc. It is applicable to bodies with solid and liquid material, as well as phase-change material. On the basis of this methodology developed a computer program for calculating heat storages transient and energy characteristics and performance.

Keywords: Sensible and latent heat storages, fixed packed bed, equivalent thermal network, thermal resistances, a phase change materials.

METODA DE CALCUL A CÂMPULUI NESTAȚIONAR DE TEMPERATURI ÎN ACUMULATOARELE DE ENERGIE TERMICĂ CU STRATURI

Ermuratschii V.V., Grițai M.A.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat. În lucrare se discută pe scurt problema de calcul a câmpului nestaționar de temperaturi în acumulatele de căldură cu construcție în straturi. Se propune metoda de calcul fără utilizarea ecuațiilor diferențiale ale procesului de transfer de căldură. Calculul se efectuează pentru volume de control ale corpurilor stratificate în coordonatele spațiu-timp. Fiecare volum de control este modelat ca un singur corp. Se lansează ipoteza, că restul corpului în volumul de control se află în condiții identice. Problema de transfer de căldură în regim nestaționar cu condițiile limită de-al treilea tip este rezolvată prin obținerea unei soluții aproximată. În acest scop utilizăm modelele electrotermice și metode de inginerie electrică. Îndeplinirea primei legi a termodinamicii pentru sistemul „fluid – corp” se asigură prin căutarea cu ajutorul procedurii de multiple iterații a temperaturii medii a fluidului. Metoda propusă permite soluționarea problemei de calcul a câmpului nestaționar de temperaturi în acumulatele de căldură cu condiții la limita variabile. Totodată, corpurile pot avea forme diferite: regulată (sferă, cilindru, paralelipiped, etc) sau neregulată (pietre, etc.). Metoda poate fi utilizată pentru corpuri solide și lichide, precum și pentru materiale în starea de tranziție de fază. În baza acestei metodei este elaborată o programă de calcul al caracteristicilor tranzitorii și energetice și indicilor de performanță ale acumulatelelor.

Cuvinte-cheie: Acumulator de căldură, stratificare, circuitul termic echivalent, rezistențe termice, materiale în regim de tranziție de fază.

МЕТОД РАСЧЁТА НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В НАКОПИТЕЛЯХ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ СО СЛОЕВОЙ НАСАДКОЙ

Ермуратский В.В., Грицай М.А.

Институт энергетики АНМ

Аннотация. В статье рассмотрена задача расчёта нестационарного температурного поля в накопителях явного и скрытого тепла со слоевой насадкой. Предложена методика расчёта этого поля, не прибегая к решению дифференциальных уравнений теплопередачи. Расчёт производится для контрольных объёмов

тел последовательно в пространственно-временных координатах. В качестве краевых условий используются результаты, полученные на предыдущем пространственно-временном слое. В каждом контрольном объёме моделируется нагрев одного тела. Предполагается, что остальные тела в контрольном объёме находятся в идентичных условиях. Задача нестационарного теплообмена тела при граничных условиях третьего рода решается приближённо. Для этого используются электротепловые модели и методы электротехники. Выполнение первого закона термодинамики для системы теплоноситель – рабочее тело обеспечивается путём итерационного поиска средней температуры теплоносителя. Предложенная методика позволяет решать задачу расчёта нестационарного температурного поля аккумуляторов тепла при переменных граничных условиях. При этом тела могут быть различной формы – правильной (шар, цилиндр, параллелепипед и т.д.) или неправильной (куски камней, гравий, галька и т.д.). Методика применима для тел с твёрдым и жидким материалом, а также веществом с фазовым превращением. На базе этой методики разработана компьютерная программа расчёта переходных и энергетических характеристик и показателей накопителей.

Ключевые слова: Накопители явного и скрытого тепла, слоевая насадка, электротепловая схема замещения, тепловые сопротивления, материалы с фазовым переходом.

Условные обозначения

Величина	Условное обозначение	Единицы измерения
Температура	T	К
Тепловая ёмкость	C	Дж/К
Тепловое сопротивление	R	К/Вт
Тепловой поток	Q	Вт
Тепловая постоянная времени	τ_0	с
Коэффициент теплоотдачи	α	Вт/Км ²
Интервал времени	$\Delta \tau$	с

1. Введение

Известен довольно распространённый вид накопителя тепловой энергии со слоевой насадкой, в котором теплоизолированный канал заполнен рабочими телами, аккумулирующими явное или скрытое тепло [1,2]. В аккумуляторах явного тепла вещество может быть твёрдым или жидким. При применении в качестве аккумулирующего вещества материалов с фазовым переходом первого рода происходит накопление или отдача скрытого тепла при температуре изменения фазового состояния [3]. Эффективность этого способа аккумулирования тепла обусловлена тем, что для этих веществ значение энтальпии фазового перехода значительно выше теплосодержания за счет теплоемкости. Тела могут иметь правильную форму в виде шаров, цилиндров, параллелепипедов и т.д., а также неправильную форму в виде кусков камней, гальки, металлической стружки и т.д. Тела правильной формы могут быть заполнены жидким веществом, аккумулирующим явное тепло, например водой. В этом случае используются тонкостенные сосуды, например, в виде ёмкостей из полимерных материалов (Рис.1). При аккумулировании скрытого тепла тела обычно представляют собой капсулы шарообразной или цилиндрической формы, заполненные материалом с фазовым переходом [3]. Накопитель может иметь несколько каналов, которые работают по очереди, в соответствии с режимами генерации тепла источником и графиком нагрузки потребителя [4,5]. Таким образом, слоевая насадка имеет пористую проницаемую для теплоносителя нерегулярную структуру в случае хаотической (насыпной) насадки и регулярную структуру из тел правильной формы. Достоинством таких аккумуляторов является возможность использования воздуха в качестве теплоносителя, простота конструкции, низкая удельная стоимость, надёжность в работе и сравнительно небольшие затраты

электроэнергии на прокачку теплоносителя. По этим причинам они стали одним из распространённых видов аккумуляторов солнечных систем теплоснабжения [6].



Рис 1. Аккумулятор явного тепла с непосредственным поглощением солнечного излучения (3000 рабочих тел в виде 1,5л. пластиковых бутылок с водой).

При зарядке накопителя через слоевую насадку пропускается теплоноситель с более высокой температурой, чем материал насадки. В процессе теплообмена в насадке формируется температурное поле. Зная распределение температур по объёму аккумулятора можно определить его энергетические характеристики.

Решение задачи расчёта нестационарных температурных полей и энергетических характеристик аккумуляторов тепла необходимо также для оптимизации конструкции всей системы. Наиболее распространённые модели для расчёта нестационарных температурных полей изложены в работах [1,7]. Эти модели, которые разрабатываются с 1929г. [8], предназначены для решения задачи нестационарной теплопроводности пористой среды при граничных условиях третьего рода [9]. Аналитически или численно решаются системы уравнений в частных производных, записанных для пористой среды. Первоначально решения указанной задачи были получены для тел, имеющих малые диаметры или большие удельные коэффициенты теплопроводности, у которых критерий Био $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} < 0,1$. (здесь α – коэффициент теплопроводности, R – диаметр шара,

λ – коэффициент теплопроводности материала)

Шуман использовал двухфазную модель, в которой дифференциальные уравнения теплообмена записаны для теплоносителя и твёрдых тел [8]. Им было принят ряд допущений: отсутствие конденсации или испарения при теплообмене, потерь тепла в окружающую среду и осевой и радиальной дисперсии. В работе [10] детально обсуждаются эти допущения, и указывается, в частности, на несоответствие некоторых из них для реальных накопителей. В работе [11] предложена коррекция критерия Bi для случая сферических тел при $Bi \gg 0,1$. В работе [12] представлено определение эффективного коэффициента теплопередачи для сферических тел, плоских пластин, цилиндров с потоком теплоносителя, текущим вдоль их осей, а также накопителя с цилиндрическими каналами, по которым протекает теплоноситель. Аналогичная задача рассматривается в [13].

Для решения задач нестационарного теплообмена разработаны специальные пакеты программ - *FLUENT*, *CFX*, *STAR-CD*, *FINE (NUMECA)*, *CFD-ACE* и др. Для нашей задачи наиболее подходящим является известный пакет *TRNSYS*, однако эти пакеты не всегда доступны. Подход, основанный на использовании дифференциальных уравнений, сопряжен с определенными трудностями при его реализации. Кроме того, в инженерных задачах целью расчета обычно являются энергетические показатели (накопленная энергия, длительность зарядки и др.), которые интегрально характеризуют накопитель. При этом точное распределение температур внутри накопителя не нужно.

В связи с этим нами предлагается упрощенный метод, основанный на решении алгебраических уравнений вместо дифференциальных уравнений в частных производных. При этом тела, представляющие в тепловом отношении систему с распределенными параметрами, заменяются системой с сосредоточенными параметрами – в виде электротепловой схемы замещения. При таком подходе вместо точного распределения температуры внутри тела рассчитывается некоторая интегральная температура, которая в определенном смысле представляет среднее значение между температурами поверхности и центра тела. Подробное изложение метода расчета эквивалентных параметров электротепловой схемы приведено в работе [14].

2. Метод расчёта нестационарного температурного поля насадки аккумулятора явного тепла

Накопитель (рис.2) в осевом направлении разбивается на M контрольных объёмов, ширина которых равна характерному размеру рабочего тела. Это может быть диаметр шара или цилиндра, длина цилиндра или параллелепипеда и т.д. Считается, что в пределах контрольного объёма тела находятся в идентичных условиях. Весь интервал времени нагрева или охлаждения разбивается на N конечных отрезков продолжительностью $\Delta\tau$.

Нестационарное температурное поле в накопителях с телами, аккумулирующих явное тепло, предлагается моделировать, используя трёхэлементную электротепловую схему замещения рабочих тел (рис.3), а в накопителях скрытого тепла схему, приведенную на рис.4. Заданными величинами являются граничные условия – начальное распределение температуры тел в накопителе, временная зависимость температуры и расхода теплоносителя на его входе.

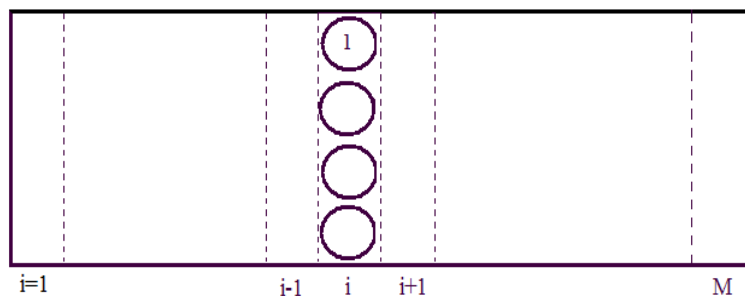


Рис.2. Схематическое изображение канала накопителя с рабочими телами правильной формы. (1-единичное рабочее тело; i - номер контрольного объёма).

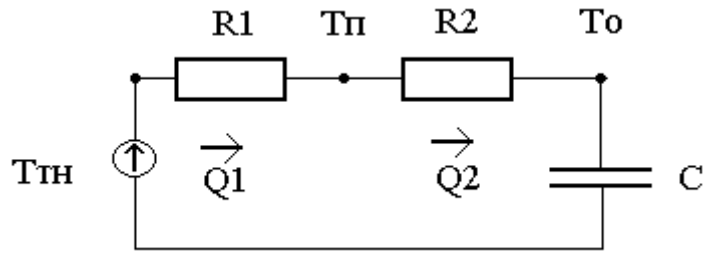


Рис. 3. Трёхэлементная электротепловая схема замещения рабочего тела накопителя явного тепла.

\dot{O}_α – температура теплоносителя; \dot{O}_f – температура поверхности рабочего тела; \dot{O}_i – среднеобъёмная температура рабочего тела; R_1 – наружное тепловое сопротивление рабочего тела; R_2 – внутреннее тепловое сопротивление рабочего тела; C – теплоёмкость рабочего тела.

Для упрощения моделирования приняты следующие допущения:

1. Тела и расход потока теплоносителя по поперечному сечению канала накопителя распределены равномерно.
2. Теплопередача излучением и теплопроводностью между телами отсутствует, т.е. передача тепла происходит только конвекцией между теплоносителем и телами.
3. Процесс зарядки и разрядки накопителя происходит без потерь тепла через его теплоизоляцию.
4. Для аппроксимации временной зависимости температуры теплоносителя используется кусочно-постоянная функция.
5. Тепловыделением при трении теплоносителя о рабочие тела пренебрегаем.

При таких допущениях расчет нагрева и охлаждения тел в контрольных объёмах можно решать как одномерную задачу. На каждом интервале $\Delta\tau$ времени зарядки или разрядки аккумулятора рассчитываются средние (на интервале) значения величин:

Q_1 –тепловой поток от теплоносителя к телу;

Q_2 –тепловой поток от поверхности тела к тепловой ёмкости C ;

$T_{\dot{A}\dot{O}}$ –температура теплоносителя на входе контрольного объёма (кроме первого объёма, для которого эта температура задана по условию решаемой задачи);

$T_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}}$ – температура теплоносителя на выходе из контрольного объёма;

$\Delta\dot{O}_i$ – изменение среднеобъёмной температуры тела \dot{O}_i на интервале $\Delta\tau$;

\dot{O}_α – средняя температура теплоносителя в контрольном объёме;

\dot{O}_f – средняя температура поверхности тела;

\dot{O}_i – средняя по объёму температура тела (потенциал ёмкостного элемента C в схеме замещения на рис. 3).

Температуры в узлах электротепловой схемы замещения тела находим в рамках итерационного процесса методом узловых потенциалов [17].

Тепловой поток Q_1 рассчитывается по формуле:

$$Q_1 = G_1 c_\alpha (T_{\dot{A}\dot{O}} - T_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}}), \quad (1)$$

где G_1 и $c_{\dot{\alpha}}$ – соответственно массовый расход теплоносителя, приходящийся на одно тело, и его удельная массовая теплоёмкость [6].

Тепловой поток Q_2 находится из решения дифференциального уравнения для цепи, показанной на рис.3. При кусочно-постоянной аппроксимации температуры теплоносителя мгновенное значение теплового потока рассчитывается по формуле:

$$Q_2 = \frac{(\dot{O}_{\dot{\alpha}} - \dot{O}_{if}) \exp(-\tau / \tau_{\dot{o}})}{(R_1 + R_2)}, \quad (2)$$

где \dot{O}_{if} - значение среднеобъёмной температуры тела в начале интервала времени $\Delta\tau$. Константа экспоненты $\tau_{\dot{o}}$ (постоянная времени цепи на рис.3) для расчёта температур тела находится по формуле:

$$\tau_{\dot{o}} = C(R_1 + R_2) \quad (3)$$

Тогда среднее на интервале $\Delta\tau$ значение теплового потока от теплоносителя к телу определяется по формуле:

$$Q_2 = \frac{\tau_{\dot{o}}(\dot{O}_{\dot{\alpha}} - \dot{O}_{if})\{1 - \exp(-\Delta\tau / \tau_{\dot{o}})\}}{\Delta\tau(R_1 + R_2)} \quad (4)$$

Из закона сохранения энергии следует равенство тепловых потоков Q_1 и Q_2 .

Таким образом, для одного и того же теплового потока мы имеем два уравнения (1) и (4) с тремя неизвестными величинами: $\dot{O}_{\dot{\alpha}}$, \dot{O}_{if} , $T_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}}$. Задача состоит в том, чтобы найти значения этих величин при условии $Q_1 = Q_2$. Для этого используется следующий подход. Закон распределения температуры теплоносителя в контрольном объёме находим, решая дифференциальное уравнение теплообмена, полагая поверхность тела изотермической, а температуру теплоносителя на входе контрольного объёма неизменной, как это делается для поверхностных теплообменников [16]. Решение этого уравнения приводит к экспоненциальному закону распределения температуры теплоносителя:

$$T_1 = T_f + (T_{\dot{A}\dot{O}} - T_f) \exp\left(-\frac{x}{\tau_{\dot{A}}}\right) \quad (5)$$

где T_1 - локальное значение температуры теплоносителя; T_f - средняя температура поверхности тела; $T_{\dot{A}\dot{O}}$ - температура теплоносителя на входе контрольного объёма.

Константа экспоненты $\tau_{\dot{A}}$ рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\dot{A}} = K_1 \frac{G_1 c_{\dot{\alpha}}}{\alpha B}, \quad (6)$$

где K_1 – корректирующий коэффициент, обеспечивающий выполнение равенства $Q_1 = Q_2$; α - расчётный коэффициент теплоотдачи тела; B – гидродинамический периметр тела, зависящий от формы и расположения тела по отношению к потоку теплоносителя [16]. Его значение при теплообмене с плоским телом равно размеру этого тела в плоскости, нормальной к потоку теплоносителя. Так, для пластины прямоугольной

формы параметр B равен ширине пластины. Для цилиндра, ось которого совпадает с потоком, этот параметр равен длине окружности поперечного сечения тела. Для цилиндра с осью нормальной к потоку теплоносителя он равен длине образующей цилиндра. Для тела в форме шара параметр B равен отношению площади поверхности шара к его диаметру. В общем случае для тел произвольной формы, его значение можно определить только приближённо, используя понятие эквивалентного диаметра тела [6].

Константа τ_A в формуле (6) находится итерационным путём, варьируя K_1 в зависимости от разности тепловых потоков Q_1 и Q_2 :

$$K_1 = K_2(Q_1 - Q_2), \quad (7)$$

где K_2 – коэффициент, который выбирается из условия устойчивости итерационного процесса. При этом очередные итерационные шаги переменные по значению и знаку определяются по результату расчёта на предыдущей итерации. Итерационный процесс заканчивается при условии достижения относительного значения разности тепловых потоков $Q_1 - Q_2$ допустимого уровня, задаваемого предварительно:

$$\Delta Q = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (8)$$

Средняя температура теплоносителя в контрольном объёме рассчитывается по формуле (9), полученной интегрированием выражения (5) в пределах от 0 до L .

$$T_{\alpha} = T_i + \frac{\tau_A}{L} (T_{A\bar{o}} - T_i) [1 - \exp(-\frac{L}{\tau_A})], \quad (9)$$

где L – определяющий размер тела, который как и гидродинамический периметр B зависит от формы, размеров и ориентации тела относительно потока теплоносителя [12,16].

Температура теплоносителя на выходе i -го контрольного объёма:

$$T_{A\bar{o}} = T_i + (T_{A\bar{o}} - T_i) \exp(-\frac{L}{\tau_A}) \quad (10)$$

Значение среднеобъёмной температуры тела определяется, исходя из экспоненциального закона изменения мгновенной температуры тела:

$$T_0 = T_{\alpha} - (T_{\alpha} - T_i) \{1 - \exp(\frac{\Delta\tau}{\tau_0})\}, \quad (11)$$

где T_i – значение среднеобъёмной температуры тела в начале k -го интервала времени.

Расчёт нагрева тел осуществляется последовательно для всех контрольных объёмов, начиная с первого ($i = 1$), расположенного на входе канала накопителя (рис.2), используя в качестве граничного условия для i -го контрольного объёма температуру теп-

лоносителя на выходе $(i-1)$ -го объёма, т.е. $\dot{Q}_{\dot{A}\dot{O}}[i] = T_{\dot{A}\dot{O}}[i-1]$. По формуле (11) рассчитывается среднеобъёмная температура тела на интервале времени $\Delta\tau$. Значения этой температуры для каждого тела на $(k-1)$ -м интервале времени служат в качестве начальных условий для расчётов на k -м интервале.

3. Метод расчёта нестационарного температурного поля насадки аккумулятора неявного тепла

В случае накопителя с рабочими телами, содержащими вещество с фазовым переходом, нами рассматривается система с подвижной границей раздела фаз с разным агрегатным состоянием вещества. Полагается, что фазовые превращения происходят при одной и той же температуре, т.е. отсутствует температурный гистерезис. Вещество помещено в ёмкости правильной формы, например, сферической, цилиндрической, прямоугольной и поверхности раздела зон с разным агрегатным состоянием вещества образуют симметричные области. Тела размещены в канале накопителя равномерно, образуя регулярную, пронизываемую среду. Также как в случае накопителя явного тепла через эту среду прокачивается теплоноситель, который подаётся с торцов канала. Для зарядки накопителя подаётся горячий теплоноситель, температура которого должна быть выше температуры фазового перехода. В противном случае будет аккумулироваться только явное тепло. При разрядке накопителя через насадку прокачивается теплоноситель с температурой более низкой, чем при фазовом переходе.

В основе расчёта нестационарного температурного поля в слоевой насадке из тел с фазовым превращением материала лежит тот же метод, что и в случае аккумулятора явного тепла. Используется пространственно - временная дискретизация и последовательное вычисление для всех контрольных объёмов, начиная с первого, теплового состояния рабочих тел. Особенностью расчёта нагрева рабочих тел с фазовым превращением вещества является то, что нужно учитывать непостоянство их внутреннего теплового сопротивления во времени [14]. Кроме того, рабочие тела аккумулируют не только энергию фазового превращения, но и явное тепло. В связи с этим используется электротепловая схема замещения, приведенная на рис.4, параметры которой зависят от теплового состояния тел, т.е. момента времени и номера контрольного объёма.

Аналогия электрической и тепловой схем замещения состоит в том, что параметрам электрической схемы (потенциалу узла U , току ветви I , электрическому сопротивлению $R_{эл}$ и электрической ёмкости $C_{эл}$) ставятся в соответствие параметры тепловой схемы (температура T , поток тепла Q , тепловое сопротивление R_T и теплоёмкость C_T). Составленная таким образом (электротепловая) схема может быть рассчитана с помощью известных методов электротехники. В частности, в предлагаемом методе используется метод узловых потенциалов.

В соответствии с электротепловой схемой замещения (рис.4) внутреннее тепловое сопротивление тел на k -ом интервале времени содержит три составляющие: $R_{(k-1)}^*$ – сопротивления зоны материала, претерпевшего фазовый переход за всё предыдущее время $\tau = \Delta\tau(k-1)$, $R_{(k)}^{**}$ – сопротивления зоны материала, находящегося в стадии фазового перехода и $R_{(k+1)}^{***}$ – теплового сопротивления зоны с другим агрегатным состоянием вещества. Для этих зон потенциалы в узлах схемы: T^* – среднеобъёмная температура области рабочего тела, в которой произошло фазовое превращение; T^{**} – темпера-

тура фазового перехода вещества рабочего тела; T^{***} – среднеобъёмная температура зоны тела, в которой будет происходить фазовое превращение в момент времени τ .

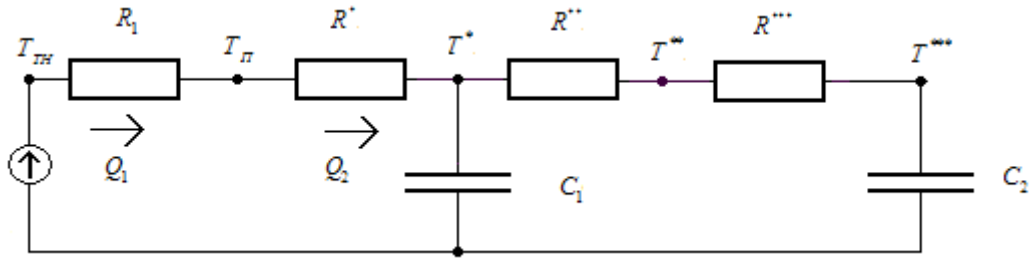


Рис.4. Электротепловая схема замещения рабочего тела с фазовым переходом вещества.

Для упрощения выражений для расчётов весь процесс нестационарного теплообмена тел рассматривается с помощью модели, приведенной на рис.3 (этапы с одинаковым агрегатным состоянием вещества), и модели, приведенной на рис.4. Временные границы перехода из этапа в этап определяются по температурам в узлах электротепловой схемы и размерам вышеуказанных зон. Таким образом, для первого и третьего этапов применяется методика расчёта нестационарного теплообмена, рассмотренная выше для тел, аккумулирующих явное тепло, поскольку вещество на этих этапах не претерпевает фазового перехода.

Здесь также, как и в случае накопления явного тепла, необходимо, чтобы выполнялось равенство $Q_1 = Q_2$ (рис.4). Для этого в рамках итерационного направленного поиска осуществляется расчёт температур в узлах электротепловой схемы, значений тепловых сопротивлений зон, постоянной времени τ_A , коэффициента K_1 по вышеприведенным формулам.

Поскольку температура фазового перехода вещества тела T^{**} известна, тепловой поток Q_2 , используя закон Ома для участка цепи, рассчитываем по формуле:

$$Q_2 = \frac{(T_{\delta i} - T^{**})}{(R_1 + R^* + R^{**})} \quad (12)$$

Для расчёта $R^{**}_{(k)}$ определяется энергия теплообмена $\dot{A}_{\delta i}$, которая равна энергии, необходимой для фазового превращения вещества $\dot{A}_{\delta i}$:

$$(13)$$

$$\dot{A}_{\delta i} = \dot{A}_{\delta i} = \Delta \tau Q_2$$

По этой энергии и удельной энергии фазового перехода рассчитывается объём вещества, претерпевшего фазовый переход, а по нему геометрический размер зоны этого вещества. Зная размеры и теплофизические параметры этих зон, рассчитываются их тепловые сопротивления [16]. Так, например, для тела цилиндрической формы, пренебрегая теплообменом по торцам цилиндра, и шарообразной формы, полагая, что соблюдается симметрия зон с разным агрегатным сопротивлением, для теплового сопротивления этих зон применяем формулы, приведенные в работе [16]:

$$R_{\dot{o}}^{**} = \frac{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}{2\pi h\lambda} \quad (14)$$

$$R_{\emptyset}^{**} = \frac{1}{2\pi\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right), \quad (15)$$

где d_1 и d_2 – соответственно наружный и внутренний радиус зоны; λ – удельная теплопроводность материала зоны.

Расчёт, как и в случае накопителя явного тепла, осуществляется последовательно для всех контрольных объёмов $i = 1, 2, \dots, M$ и интервалов времени $k = 1, 2, \dots, N$, применяя вышеописанный итерационный процесс. Рассчитываются значения тепловых потоков, энергии переданной от теплоносителя к телу, массы и объёма вещества, претерпевшего фазовый переход, а также тепловые сопротивления для зон вещества с разным агрегатным состоянием. Тела, расположенные в разных контрольных объёмах, находятся в разных тепловых состояниях, для них используются модели и теплофизические параметры, соответствующие вышеуказанным трём этапам, с характерными агрегатными состояниями вещества. Среднее на интервале Δt внутреннее тепловое сопротивление зоны R^{**} , в которой происходит фазовое превращение вещества, находится при итерационном поиске постоянной экспоненты τ_A . Итерации заканчиваются при выполнении условия (9). Значение сопротивления R^* (рис.4) определяется в результате расчёта на предыдущем интервале времени, используя теплофизические параметры материала, соответствующие его агрегатному состоянию.

Несколько замечаний относительно выбора значения временного интервала Δt для аккумулятора явного тепла. В основе предложенного метода расчёта лежит использование электротепловой схемы замещения, параметры которой находятся из условия регулярности теплового режима тела [14]. Поэтому должно выполняться условие $\Delta t \geq \tau_{ED}$. Упомянутое в начале статьи условие $Bi < 0,1$ обеспечивает практическое отсутствие иррегулярного режима, однако по условиям задач оно может не выполняться. Другим условием может быть отношение разности между температурами в центре тела и теплоносителя к разности температур на его поверхности и теплоносителем [9]. Однако для определения продолжительности иррегулярного теплового режима по этому условию требуется находить точное решение для вышеуказанных разностей температур, изменяя временной интервал. Это приводит к большим затратам времени на расчёты, но не устраняет проблемы определения верхнего предела для бесконечного ряда точного решения [14]. Мы предлагаем более простой и быстрый путь для определения продолжительности τ_{ED} . Продолжительность иррегулярного теплового режима в первом приближении для тел правильной формы можно определить по формуле:

$$\tau_{ED} = 3\tau_2, \quad (17)$$

где τ_2 – постоянная экспоненты второго члена бесконечного ряда для точного решения задачи нестационарного теплообмена с граничными условиями третьего рода [9].

Зная τ_{ED} , можно определить продолжительность иррегулярного теплового режима и минимально допустимую длительность временного интервала $\Delta\tau$. Максимальное значение $\Delta\tau$ мы рекомендуем ограничить трёхкратным значением полной тепловой постоянной времени тела, определяемой по формуле (3).

В случае накопителей с фазовым переходом граничные значения интервала $\Delta\tau$ в первом приближении могут быть приняты по вышеуказанным критериям.

4. Заключение

Предложенный метод позволяет производить расчёт нестационарного температурного поля в накопителях со слоевой насадкой, как при постоянных, так и при переменных параметрах теплоносителя. Тела насадки могут быть с твёрдым или жидким аккумулирующим веществом, а также материалов с фазовым переходом. Использование сравнительно больших шагов для дискретизации по времени и пространству позволяет моделировать большие интервалы времени работы.

Данный метод расчёта нестационарного температурного поля положен в основу специальной программы, в которой рассчитываются энергетические характеристики накопителей. Программа позволяет моделировать многократные циклические процессы зарядки и разрядки накопителей при произвольных краевых условиях

5. Пример расчёта

В качестве примера на рис.5 и 6 приведены результаты сопоставления расчётов по разработанной методике и экспериментальных данных, приведенных в работах [18] и [19]. На этих рисунках сплошными линиями показаны экспериментальные данные, а точками расчётные.

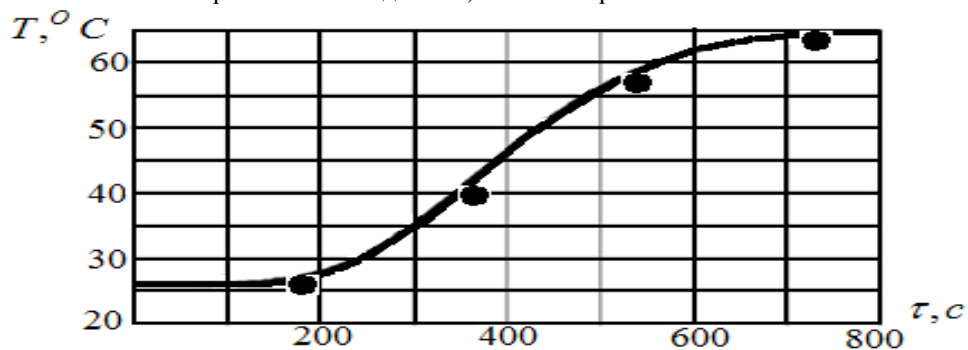


Рис. 5. Переходная характеристика аккумулятора тепла со стальными шариками, имеющими диаметр 5,56мм [18].

На рис.6 приведено распределение температуры по длине канала аккумулятора тепла с каменной насадкой из гальки, имеющей $\lambda = 0,5 \text{ Вт/(мК)}$, $c_p = 920 \text{ Дж/(кг К)}$ и коэффициент тепловой диффузии $a = 3,4 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ при удельном расходе воздуха через поперечное сечение аккумулятора $G = 0,123 \text{ кг/(с м}^2\text{)}$. Из этих рисунков видно, что расчётные значения, полученные по разработанной нами методике, достаточно точно соответствуют экспериментальным данным.

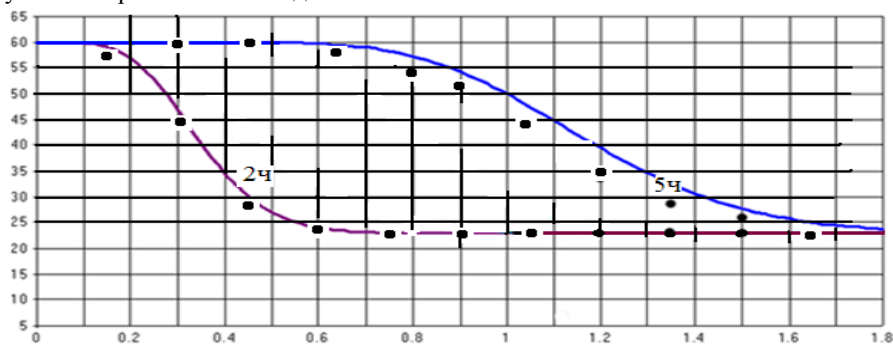


Рис.6. Распределение температуры воздуха по длине канала аккумулятора с воздушным теплоносителем при его зарядке для двух моментов времени (2 и 5 часов) [19].

Литература

- [1] Dincer I. and Rosen M. Thermal Energy Storage: Systems and Applications. West Sussex, England : John Willey & Sons. 2002.
- [2] Levenberg V. D. Akumulirovanie tepla / Levenberg V. D., Tkach M. P., Golstrem V. A. — K. : Tehnika, 1991. (in Russian)
- [3] Dutil Y., Rousse D., Salah N., Lassue S. and Zalewski L. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), 112–130.
- [4] Ermuratschii Vl., Ermuratski Vas. Acumulatorul de caldura sau frig. Inregistrarea modelului de utilitate MD №191 12 2008.08.31.
- [5] Ermuratschii Vl., Ermuratski Vas. Colector-acumulator de caldura/frig natural. Brevet de invenție MD4066 C1 2010.08.31.
- [6] Duffie J. and Beckman W. Solar Engineering of Solar Processes. -3rd.ed. J.Wiley and Sons. 2006, pp.908.
- [7] Singh R., Saini R. and Saini J. Models for predicting Thermal Performance of Packed Bed Energy Storage System for Air Heaters – A Review. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, 2009, 2, 47- 53/.
- [8] Schumann, T.E.W., 1929. Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism. *Journal of the Franklin Institute* 208 (3), 405–416.
- [9] Lykov A.V. Teoria teploprovodnosti. M. Vysshiaia scola. 1967. 599c. (in Russian)
- [10] Hughes, P.J., Klein, S.A., Close, D.J., 1976. Packed bed thermal storage models for solar air heating and cooling systems. *ASME Journal of Heat Transfer* 98 (2), 336–338.
- [11] Jeffreson, C.P., 1972. Prediction of breakthrough curves in packed beds: 1. Applicability of single parameter models. *American Institute of Chemical Engineers* 18 (2), 409–416.
- [12] Isachenko V.P., Osipova V.A. i Sukomel A.S. Teploperedacha. M. Energoizdat. 1981.417c. (in Russian)
- [13] Xu B., Li P. and Chan L. Extending the validity of lumped capacitance method for large Biot number in thermal storage application. 2012. *Solar Energy* V.86 pp.1709–1724.
- [14] Ermuratsky V.V., Gritsay M.A. Raschet vnutrennego teplovogo soprotivlenia rabochih tel akkumuleatorov iavnogo i skrytogo tepla. *Problemele energeticii regionale*, Nr.3(23) 2013, p. 98-106. (in Russian)
- [15] Cortes C., Campo A., Arauzo I. Reflections on lumped models of unsteady heat conduction in simple bodies. *International Journal of Thermal Sciences* 42 (2003), 921–930.
- [16] Leca A., Mladin E-C., Stan M. Transfer de căldură și masă – o abordare inginerască. Ed. Tehnică. București. 1998. 783p.
- [17] Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V. i Strahov S.V. Osnovy teorii tsepey. M-L. Energhia. 1965. 444c. (in Russian)
- [18] Saez A. and McCoy B. Dynamic response of a packed bed thermal storage system - a model for air heating. *Sol.Energy* 1982.29(3), 201-206.
- [19] Sullivan H., Hollands K. and Shewen E. Thermal destratification in rock beds. Technical note. *Sol.Energy* 1984.33(2), 227-229.



Сведения об авторах

Ермуратский Владимир Васильевич, Институт энергетики Академии Наук Молдовы, главный научный сотрудник, доктор технических наук. Область научных интере-

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 1(24) 2014
SURSE REGENERABILE DE ENERGIE

сов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, энергетическая эффективность, тепло-энергетика, теплотехника. E-mail: ermuratskie@gmail.com



Грицай Михаил Андреевич, Институт энергетики Академии Наук Молдовы, ведущий научный сотрудник, к.т.н., Область научных интересов: математическое моделирование электрических сетей и систем. E-mail: mgrine@ie.asm.md