

РАСЧЁТ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ТЕЛ АККУМУЛЯТОРОВ ЯВНОГО И СКРЫТОГО ТЕПЛА

Ермуратский В.В. , Грицай М.А.
Институт энергетики АНМ

Аннотация. Рассмотрена задача вычисления значений внутреннего теплового сопротивления рабочих тел, применяемых в аккумуляторах явного и скрытого тепла. Предложена методика расчёта этого сопротивления для тел с твёрдым, жидким материалом и веществом с фазовым превращением. Базируясь на теории регулярного теплового режима, получены формулы для расчёта внутреннего теплового сопротивления твёрдых тел, имеющих форму шара, цилиндра и параллелепипеда. Для тел с жидким веществом это сопротивление находится с учётом стенки сосуда и сопротивления пограничного слоя при естественной конвекции жидкости. В случае веществ с фазовым переходом тепловые сопротивления зон с разным агрегатным состоянием определяются раздельно. Электротепловая модель содержит четыре тепловых сопротивления, две ёмкости и один источник напряжения. К внутренним тепловым сопротивлениям тел отнесено сопротивление стенки сосуда и сопротивлений зон, в которых произошло, происходит и будет происходить фазовое превращение. Внутреннее тепловое сопротивление твёрдых тел может считаться постоянным параметром. У тел с жидкостью и фазовым переходом вещества внутренние тепловые сопротивления зависят от теплового состояния тел. Поэтому значения этих величин должны определяться при расчёте процессов нагрева или охлаждения тел.

Ключевые слова: Электротепловая модель, внутреннее тепловое сопротивление, аккумуляторы явного и скрытого тепла, вещества с фазовым переходом.

CALCULUL REZISTENȚEI TERMICE INTERNE A CORPULUI DE LUCRU AL ACUMULATOARELOR DE CĂLDURĂ SENSIBILĂ ȘI LATENTĂ

Ermuratschii V.V., Grițai M.A.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat. În lucrare se examinează problema determinării valorilor rezistenței interne termice a corpurilor de lucru ale acumulatorilor de căldură sensibilă și latentă. Este propusă metoda de calcul al acestei rezistențe pentru corpurile din material solid, lichid, și substanțe cu tranziție de fază. Pe baza teoriei regimului termic regulat, s-au obținut formule de calcul al rezistenței termice interne a solidelor în formă de sferă, cilindru și paralelipiped. Pentru corpurile cu substanță lichidă această rezistență se determină ținând cont de pereții vaselor și rezistența stratului de hotar și convecția naturală a lichidului. În cazul substanțelor cu tranziție de fază se propune determinarea aparte a rezistențelor termice a zonelor cu diferite stări de agregare. Modelul electrotermic conține patru rezistențe de căldură, capacitatea de căldură și o singură sursă de tensiune. La rezistența termică internă a corpurilor se referă rezistența pereților containerului și rezistența de zone în care a fost este, și va fi tranziție de fază. Rezistența termică internă a solidelor poate fi considerată ca un parametru constant. În corpurile cu lichide rezistența termică internă de material depinde de starea lor termică. Prin urmare, aceste valori ar trebui să fie stabilite în procesele de calcul de încălzire sau de răcire.

Cuvinte-cheie: Modelul electrotermic, rezistența termică internă, acumulatori de căldură sensibilă și latentă, substanțe cu tranziție de fază.

CALCULATION OF INTERNAL THERMAL RESISTANCE OF WORKING BODIES OF PACKEDBED SENSIBLE AND LATENT HEAT STORAGEES

Ermuratschii V.V., Gritsay M.A.

Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The paper considers the problem of calculating values of the internal thermal resistance of a packed bed sensible and latent heat storagees working bodies. The methodic calculation of this resistance for bodies with solid, liquid substance and phase-change materials is offered. Being based on the theory of a regular thermal

mode, formulas for calculation of internal thermal resistance of the bodies having the form of a sphere, the cylinder and a parallelepiped are obtained. For bodies with liquid substance this resistance is in view of a wall of vessels and resistance of a boundary layer at natural convection of liquids. In the case of substances with a phase transition heat resistance zones with different states of aggregation shall be determined separately. Electro-thermal model contains of the four thermal resistances, two heat capacity and single voltage source. Internal thermal resistance of solids can be considered as a constant parameter. For bodies of liquid and phase change material internal thermal resistance depends on their thermal state. Therefore, these values should be determined in the calculation processes of their heating or cooling.

Key words: Electro-thermal model, sensible and latent heat storages, internal thermal resistance, phase change materials.

1. Введение

Аккумуляторы явного и скрытого тепла широко применяются в различных энергетических устройствах [1,2]. Одним из распространенных видов таких устройств, применяемых, например, в системах солнечного теплоснабжения, является аккумулятор со слоевой насадкой [3]. Накопление тепловой энергии происходит в материале большого количества сравнительно небольших тел, размещённых в теплоизолированном корпусе. В аккумуляторах могут быть использованы тела, с твёрдым или жидким веществом, а также материалы с фазовым переходом. Эти тела образуют проницаемую для теплоносителя пористую среду, имеющую регулярный характер в случае тел правильной формы (шары, цилиндры, параллелепипеды и т.д.). Через эту среду при зарядке аккумулятора прокачивается горячий жидкий или газообразный теплоноситель, который нагревает эти тела, обеспечивая повышение их внутренней энергии. Для разрядки аккумулятора и передачи тепла в нагрузку через насадку прокачивается холодный теплоноситель, который нагревшись, отдаёт затем тепло в нагрузку. Таким образом, аккумулятор является промежуточным звеном между источником тепла и нагрузкой, и служит для преодоления несоответствия во времени и пространстве между процессами генерации и потребления тепла.

При исследованиях и проектировании аккумулятора тепла, например, для устройств солнечной энергетики, основной задачей является расчёт нестационарного теплообмена между теплоносителем и аккумулялирующей средой. Решение этой задачи необходимо для оптимизации конструкции аккумулятора тепла и параметров режимов его зарядки и разрядки. Моделирование тепловых процессов в проницаемой пористой среде таких устройств осложнено произвольными и изменяющимися во времени начальными и граничными условиями.

Для решения задачи нестационарного теплообмена тел обычно интегрируются уравнения в частных производных при соответствующих начальных и граничных условиях [4,5]. Для аккумуляторов тепла используются граничные условия третьего рода, когда теплообмен со средой подчиняется закону Ньютона, а теплопроводность тела описывается законом Фурье:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = - \frac{\alpha(T_n - T_{TH})}{\lambda}, \quad (1)$$

где α - коэффициент теплоотдачи; λ - коэффициент теплопроводности; T_n - температура поверхности тела; T_{TH} - температура теплоносителя; n - внешняя нормаль к поверхности тела. Для тел простой формы решение линейной задачи нестационарного теплообмена при охлаждении изотропного тела обычно представляют в форме бесконечного ряда [4,5,6]:

$$\mathcal{G} = \sum_0^{\infty} A_k U_k \exp(-m_k t), \quad (2)$$

где \mathcal{G} - пространственно-временная безразмерная избыточная температура тела; A_k - тепловые амплитуды, зависящие от начального распределения температур в теле; U_k - собственные функции, которые зависят только от координат; m_k - коэффициенты, не зависящие ни от координат, ни от времени; t - размерное время. Эта модель точно описывает нестационарное температурное поле тела как системы с распределёнными параметрами.

Однако при моделировании длительных тепловых процессов такой подход неудобен из-за значительных затрат времени. Оно также сопряжено с математическими трудностями при определении верхней границы ряда (2) а также корней характеристического уравнения в форме тригонометрических функций или функций Бесселя, зависящих от нескольких параметров. Поэтому, в условиях отсутствия стандартного программного обеспечения и слабой освещённостью данного вопроса в теплотехнической литературе, применение точных решений на практике затруднено. Кроме того, возникает проблема решения задач нестационарного теплообмена тел с жидкой аккумулирующей средой или при использовании веществ с фазовым переходом. Для решения подобных задач более эффективным представляется известный подход, использующий электротепловую схему замещения объекта для анализа тепловых процессов (в солнечных коллекторах, зданиях, электронных устройствах и т.д.) [3,7,12,13]. В работе [8] предложен новый, более простой и достаточно эффективный метод расчёта нестационарных температурных полей в неоднородных средах с использованием цепочечной электротепловой схемы. Расчёт нестационарного температурного поля осуществляется численно с использованием метода узловых потенциалов, применяемого в электротехнике [9].

Таким образом, рабочее тело аккумуляторов тепла, являющееся в тепловом отношении системой с распределёнными параметрами, предлагается представлять простейшей моделью с сосредоточенными параметрами. Такой подход был применён ранее для более сложных анизотропных тел с внутренними источниками тепла – электрических конденсаторов [10]. Основная проблема, которая возникает при этом – это определение параметров электротепловой схемы замещения тел, при которых обеспечивается адекватное моделирование переходных тепловых процессов в телах. Поскольку рабочие тела являются интегрирующими элементами, нас не интересует точное пространственное распределение мгновенных значений температур в телах и теплоносителе, и расчёт осуществляется для средних по поверхности и объёму температур и на интервалах временной дискретизации [4,16].

2. Расчёт параметров электротепловой схемы замещения тел, аккумулирующих явное тепло

Для моделирования динамики средних температур рабочих тел, аккумулирующих явное тепло, достаточно использовать простейшую трехэлементную схему, состоящую из двух последовательно соединённых сопротивлений R_1 и R_2 и одной ёмкости C (рис.1). Параметрами электротепловой схемы замещения тела являются значения наружного теплового сопротивления R_1 (°C/Вт); – внутреннего теплового сопротивления R_2 (°C/Вт) и C – тепловой ёмкости (Дж/°C).

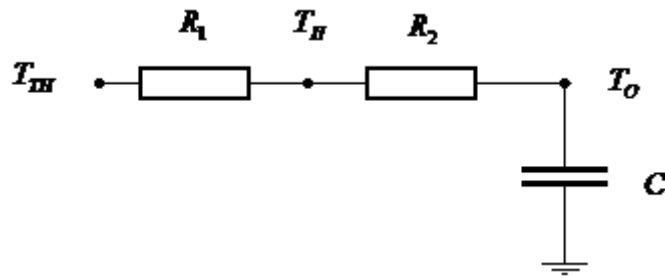


Рис.1. Простейшая электротепловая схема замещения рабочего тела.

T_{TH} - температура теплоносителя; T_{II} - средняя температура поверхности тела;

T_O - среднеобъемная температура тела

Параметры эквивалентной электротепловой схемы замещения рабочего тела определяются следующим образом. Наружное тепловое сопротивление R_1 рассчитывается по известной формуле [6]:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha F}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности единичного тела.

Теплоёмкость единичного тела определяется по формуле:

$$C = m_1 c_y, \quad (4)$$

где m_1 – масса тела; c_y – удельная теплоемкость материала тела.

Основную трудность представляет определение внутреннего теплового сопротивления тела R_2 . Предлагаемая нами методика его определения основана на использовании теории регулярного теплового режима [4,5]. Согласно этой теории при ступенчатом скачке температуры окружающей среды изменение во времени температуры в любой точке тела, спустя некоторый иррегулярный интервал, происходит по экспоненциальному закону с одним постоянным темпом. Значение этого темпа определяется по формуле:

$$m = \frac{\alpha F}{C} \Psi, \quad (5)$$

где Ψ – коэффициент неравномерности температурного поля в теле. В регулярном тепловом режиме этот коэффициент постоянен и равен отношению разностей между средними температурами по поверхности (T_{II}) и по объёму (T_O) и теплоносителя:

$$\Psi = \frac{T_{II} - T_{TH}}{T_O - T_{TH}}, \quad (6)$$

где T_{TH} - температура теплоносителя.

Предельные значения коэффициента Ψ , согласно работе [5], лежат в диапазоне 0 (при $\alpha \rightarrow \infty$) и 1 (при $\alpha \rightarrow 0$).

Предельное значение темпа охлаждения или нагрева имеет место при $\alpha \rightarrow \infty$. Этот случай в соответствии с формулой (3) соответствует нулевому значению наружного теплового сопротивления в электротепловой схеме замещения рабочего тела (рис.1). Значение m_∞ определяется по формуле, следующей из третьей теоремы Кондратьева, согласно которой предельное значение темпа охлаждения тела и температуропроводность материала пропорциональны [5]:

$$m_\infty = \frac{a}{K_f}, \quad (7)$$

где K_f – коэффициент формы единичного тела, a – коэффициент температуропроводности или тепловой диффузии вещества тела и определяется по известной формуле [4,6]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_y}, \quad (8)$$

где λ , ρ – соответственно удельная теплопроводность и плотность вещества тела.

Электротепловым аналогом для постоянной времени цепи, показанной на рис.1, является тепловая постоянная времени тела, которая рассчитывается по формуле:

$$\tau_T = C(R_1 + R_2) \quad (9)$$

С такой постоянной по экспоненциальному закону изменяется во времени температурное поле тела в регулярном тепловом режиме. Исходя из формулы (9) можно выделить две составляющие тепловой постоянной времени тела, обусловленные его наружным и внутренним тепловыми сопротивлениями. «Внутренняя» составляющая является величиной, обратной предельному темпу охлаждения или нагрева m_∞ тела в регулярном тепловом режиме, т.е.:

$$\tau_{T2} = CR_2 = \frac{1}{m_\infty} \quad (10)$$

Из (7), (8) и (10) следует, что внутреннее тепловое сопротивление тел можно рассчитывать по формуле:

$$R_2 = \frac{K_f}{Va\rho c_y} \quad (11)$$

где V – объем тела. В табл.1 приведены формулы расчёта коэффициента формы K_f .

Таблица 1

Формулы для расчёта коэффициента формы тел правильной формы

Форма тела	Шар	Цилиндр	Параллелепипед
Коэффициент K_f	$\left(\frac{R}{\pi}\right)^2$	$\left[\left(\frac{2,4}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{h}\right)^2\right]^{-1}$	$\left[\left(\frac{\pi}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L_3}\right)^2\right]^{-1}$

Для тел с жидким аккумулирующим тепло материалом внутреннее тепловое сопротивление состоит из сопротивления стенок сосуда и сопротивления теплопередачи от его внутренней стенки к жидкости. Первая компонента, пренебрегая кривизной стенок, определяется по известной формуле [6]:

$$R_{CT} = \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT} F_{CT}}, \quad (12)$$

где δ_{CT} , λ_{CT} , F_{CT} - соответственно толщина, удельный коэффициент теплопроводности материала, площадь стенки сосуда.

Сопротивление теплоотдачи от стенки сосуда к жидкости определяется в режиме свободной конвекции в сосуде [6,7,13]. При этом, учитывая, что толщина пограничного слоя существенно меньше размеров сосуда, нами предлагается использовать формулы для расчёта коэффициента теплоотдачи как для случая неограниченного пространства [6,7,12,13]. В качестве температурного напора, по которому определяется закон внутреннего теплообмена, принята разность температур между стенкой сосуда и среднеобъёмной температурой жидкости. Если абсолютное значение этой разности удовлетворяет условию (13), то теплообмен подчиняется зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора в степени 1/4:

$$\left| (T_{CT} - T_{ж}) \right| \leq \left(\frac{840}{L_{оп}} \right)^3, \quad (13)$$

где T_{CT} – температура стенки; $T_{ж}$ – среднеобъёмная температура жидкости; $L_{оп}$ – определяющий размер сосуда. В противном случае имеет место теплообмен по зависимости степени 1/3 температурного напора. Так, в случае степенной зависимости в 1/4 для вертикально ориентированной поверхности или цилиндра высотой $L_{оп}$ конвективный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле [12]:

$$\alpha_K = 0,25 A \frac{(T_{CT} - T_{ж})^{0,25}}{L_{оп}}, \quad (14)$$

где A – коэффициент, учитывающий все теплофизические параметры жидкости. Значение коэффициента A для воды, которая наиболее приемлема в качестве аккумулирующего вещества, в первом приближении вычисляется по формуле [12]:

$$A = 80 + 1,63 T_{ж}, \quad (15)$$

где $T_{ж}$ - температура воды.

Тогда внутреннее тепловое сопротивление сосудов с водой можно рассчитывать по формуле:

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_K F} + R_{CT}, \quad (16)$$

где F – площадь поверхности стенки сосуда; R_{CT} - тепловое сопротивление стенки сосуда, которое рассчитывается по формуле (10). При малой разности температур ($T_{CT} - T_{ж}$) теплопередача происходит, в основном, путём чистой теплопроводности и внутреннее сопротивление тела определяется так же, как для твёрдых тел. Границы между этими случаями определяются по значению числа Рэлея [13].

Таким образом, при жидком аккумулирующем веществе внутреннее тепловое сопротивление рабочего тела зависит от температурного напора и средней температуры жидкости, т.е. является переменным параметром, зависящим от теплового состояния тела. Это учитывается при моделировании температурного поля аккумуляторов тепла [14].

3. Методика расчёта параметров электротепловой схемы замещения тел, аккумулирующих неясное тепло

В случае тел, содержащих вещество с фазовым переходом, обычно рассматривается двухслойная система с подвижной границей раздела фаз с разным агрегатным состоянием вещества и отсутствием гистерезиса в точке фазового перехода [15]. Граница между зонами перемещается во времени и пространстве. Расположение и форма этих зон зависит от режима работы и формы сосуда. Так, при нагреве тела зона жидкого вещества располагается у поверхности сосуда, а при охлаждении – наоборот. Когда всё вещество тела находится в одном агрегатном состоянии (жидком или твёрдом), к ним применима электротепловая схема замещения, приведенная на Рис.1. Для расчёта внутреннего теплового сопротивления тел используются формулы (11) и (16), в которых учитывается сопротивление стенки сосуда. В промежуточных состояниях вещества тела электротепловая схема замещения рабочего тела становится более сложной (Рис.2).

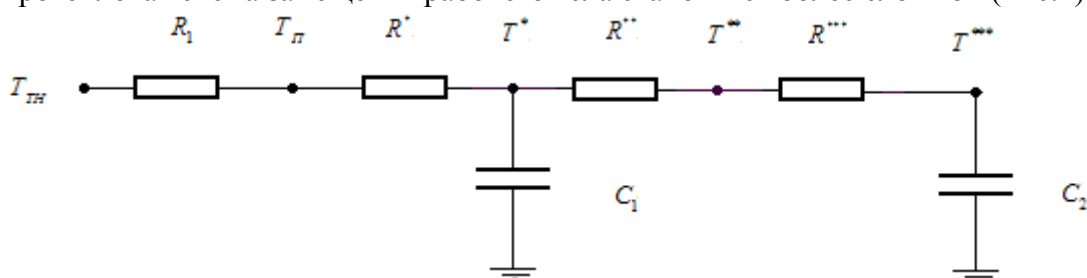


Рис.2. Электротепловая схема замещения рабочего тела с фазовым переходом вещества

На рис.2 показаны следующие величины: T_{th} – температура теплоносителя; T_n – температура поверхности рабочего тела; T^* – среднеобъёмная температура зоны, в которой произошло фазовое превращение; T^{**} – температура фазового перехода вещества рабочего тела; $T^{***} \Delta \tau$ – среднеобъёмная температура зоны тела, в которой будет проис-

ходить фазовое превращение; R_1 – наружное тепловое сопротивление тела; R^* – тепловое сопротивление контейнера и зоны тела, в которой произошло фазовое превращение; R^{**} – тепловое сопротивление зоны тела, в которой происходит фазовое превращение; R^{***} – тепловое сопротивление зоны тела, в которой будет происходить фазовое превращение; C_1 – тепловая ёмкость вещества, завершившего фазовый переход; C_2 – тепловая ёмкость вещества зоны, в которой будет происходить фазовый переход.

Наружное тепловое сопротивление и теплоёмкости C_1 и C_2 таких тел рассчитывается таким же образом как в случае тел, аккумулирующих явное тепло, учитывая при этом зависимость теплофизических параметров материала от температуры.

Тепловое сопротивление зон с разным агрегатным состоянием определяется по формуле для теплопередачи через слои вещества [15]:

$$R_2 = \frac{\delta_c}{\lambda_c F_c}, \quad (17)$$

где δ_c ; F_c ; λ_c - соответственно толщина, площадь и удельная теплопроводность вещества зоны. Поскольку при нагреве или охлаждении рабочих тел изменяются значения δ_c и F_c , внутренние тепловые сопротивления зон не являются константами и определяются по формуле (17) в процессе расчета температурного поля в аккумуляторе тепла.

Для расчёта сопротивления зоны материала, находящегося в стадии фазового перехода предварительно определяется энергия теплообмена:

$$E_{To} = Q_1 \Delta \tau, \quad (18)$$

где Q_1 - мощность теплообмена тела с теплоносителем; $\Delta \tau$ - интервал времени нагрева.

По этой энергии и удельной энергии фазового перехода находится объём вещества, претерпевающего фазовый переход, а по нему геометрический размер зоны этого вещества. Зная размеры этих зон можно рассчитать их тепловые сопротивления. Так, например, для тела цилиндрической формы с диаметром d и длиной h и тела шарообразной формы для теплового сопротивления этих зон, применяем формулы, приведенные в работе [13] для стенок цилиндрической и шарообразной формы:

$$R_u = \frac{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}{2\pi h \lambda} \quad (19)$$

$$R_{uu} = \frac{1}{2\pi \lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right), \quad (20)$$

где d_1 и d_2 – соответственно наружный и внутренний радиус зоны; λ – удельная теплопроводность материала данной зоны. При этом предполагается, что соблюдается симметрия зон с разным агрегатным состоянием, а теплообменом по торцам цилиндра пренебрегаем. Для учёта влияния конвекции в зоне с жидким состоянием вещества

можно применить такой же подход, как в случае воды с соответствующей коррекцией теплофизических параметров. Формулы (19) и (20) следует рассматривать как первое приближение, поскольку в реальных условиях границы зон с разным агрегатным состоянием имеют более сложную форму из-за их асимметричности.

Сравнение результатов расчета по трехэлементной электротепловой схеме (Рис.1) и точного метода [4] для тела шарообразной формы с твёрдым веществом показало удовлетворительную для инженерных расчётов точность: погрешность по данной методике не превышает 10% . Это видно на примере данных для тела сферической формы (Табл.2). При этом наибольшая погрешность наблюдается для температуры поверхности тел при временах, меньших продолжительности иррегулярного теплового режима.

Таблица 2

Относительная ошибка упрощённого расчёта среднеобъёмной температуры

Критерий $Bi = \frac{\alpha D}{2\lambda}$	Число Фурье $ Fo = \frac{4at}{D^2}$				
	0,01	0,1	1	10	100
0,1	0,008	0,0048	0,0019	0	0
1	0,022	0,0062	0,0083	0	0
10	0,058	0,018	0,0097	0	0
100	0,083	0,018	0,011	0	0

Выводы.

Предложен простой метод расчёта внутреннего теплового сопротивления тел правильной формы основанный на использовании теории регулярного теплового режима.

Твёрдые тела, аккумулирующие явное тепло, имеют внутреннее тепловое сопротивление, являющееся постоянным параметром, зависящим от его формы, размеров и вида материала.

У тел с жидким аккумулирующим веществом внутреннее тепловое сопротивление зависит от температурного напора между стенкой и основной массой жидкости.

Для тел с фазовой трансформацией вещества тепловые сопротивления разных зон также зависят от их теплового состояния и геометрии зон. По этой причине значения внутренних тепловых сопротивлений тел с жидкостью или фазовым переходом необходимо вычислять в процессе расчета всего интервала их нагрева или охлаждения.

Литература

- [1] Бекман Г. и Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. Перевод с английского под ред. Д.т.н. проф.Бродянского В.М. М. Мир. 1987.- 271с.
- [2] Dincer I. and Rosen M. Thermal Energy Storage: Systems and Applications. West Sussex, England : John Willey & Sons. 2002.
- [3] Duffie J. and Beckman W. Solar Engineering of Solar Processes. -3rd.ed. J.Wiley and Sons. 2006, pp.908.
- [4] Лыков А.В. Теория теплопроводности. М. Высшая школа. 1967. 599с.
- [5] Конратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. Гостехиздат. 1954.361 с.
- [6] Исаченко В.П., Осипова В.А. и Сукомел А.С. Теплопередача. М. Энергоиздат. 1981.417с.
- [7] Thermal Modeling Handbook. K&K Associates. USA. 2003. 29p.
- [8] Ермуратский В., Грицай М., Шаповалов В. Метод расчёта нестационарных температурных полей в неоднородных средах. Математическое моделиро-

- вание в образовании, науке и производстве. Материалы IV Международной научно-практической конференции 5-9 июня 2005г. Тирасполь, 2005.
- [9] Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. и Страхов С.В. Основы теории цепей. М-Л. Энергия. 1965. 444 с.
- [10] Справочник по электрическим конденсаторам. Общие сведения, выбор и применение. Под общ. Ред. К.т.н. Ермуратского В.В. Кишинёв. Штиинца. 1982. 310 с.
- [11] Кришер О. Научные основы техники сушки. Изд-во иностр. Лит, 1961. 246 с.
- [12] Дульнев Г.Н. и Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л. Энергия. 1968.-359 с.
- [13] Leca A., Mladin E-C., Stan M. Transfer de căldură și masă – o abordare ingineerească. Ed. Tehnică. București. 1998. 783p.
- [14] Ермуратский В.В. и Грицай М.А. Методика расчёта нестационарного температурного поля в накопителях тепловой энергии со слоевой насадкой. Проблемы региональной энергетики. 2013 №3.
- [15] Dutil Y., Rouse D., Salah N., Lassue S., Zalewski L. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 112–130.
- [16] Whitaker S. The method of volume averaging. 1998. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 219 p.

Сведения об авторах



Ермуратский Владимир Васильевич, Институт энергетики Академии Наук Молдовы, главный научный сотрудник, доктор технических наук. Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, энергетическая эффективность, теплоэнергетика, 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