

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 536.421.1

Р. З. Касимов

М. Ф. Хисамутдинов, аспирант
ИжГТУ имени М. Т. КалашниковаК РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ФАЗОМЕНИЯЮЩИХ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ
В СОСТАВЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Обозначены подходы к расчету изменения фазового состояния в устройствах, содержащих легкоплавкие материалы, и определены особенности последних с позиций их использования для аккумуляции тепловой энергии.

Представлены результаты численного моделирования плавления и отвердевания парафина, используемого в качестве наполнителя в ограждающих конструкциях или теплоизоляционных системах.

Ключевые слова: теплообмен при плавлении и отвердевании, теплоаккумулирующие материалы, степень изменения фазового состояния.

Вопросам аккумуляции тепловой энергии уделяется в последнее время обширное внимание. В ряде практических ситуаций становятся необходимыми обратимые процессы, связанные с накоплением, хранением и своевременной отдачей теплоты в соответствии с особенностями технологии и нуждами потребителей. Особую роль здесь играют теплоаккумулирующие материалы (ТАМ), работающие по принципу «плавление – отвердевание». Их использование в составе теплоносителей аппаратов химических, нефтеперерабатывающих производств или ограждающих конструкций позволит повысить эффективность работы данных объектов.

Традиционно при моделировании процессов плавления (отвердевания) чистых веществ используется формулировка Стефана, характеризующаяся заданием постоянной температуры на границе фазового перехода и разными подходами к численной реализации [1]. Наиболее распространенные способы здесь связаны с выделением границы фазового перехода и использованием соотношений (в одномерном приближении):

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{a_1}{r^\gamma} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^\gamma \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), & r \in \Omega_1(\tau); \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{a_2}{r^\gamma} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^\gamma \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), & r \in \Omega_2(\tau); \end{cases} \quad (1)$$

$$\tau = 0: T_k(r) = T_0 \quad (k = 1, 2);$$

$$r = 0: \frac{\partial T_k(\tau)}{\partial r} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial T_k(\tau)}{\partial r} = \alpha'(\tau) [T_f'(\tau) - T_k(\tau)]; \quad (2)$$

$$r = R: \frac{\partial T_k(\tau)}{\partial r} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial T_k(\tau)}{\partial r} = \alpha''(\tau) [T_k(\tau) - T_f''(\tau)];$$

$$r \in S(\tau): \begin{cases} T_k = T^*, \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = Q_\Phi \bar{\rho} V_n, \end{cases} \quad (3)$$

где индекс 1 относится к параметрам исходной, а индекс 2 – к параметрам новой фазы; $\gamma = 0, 1, 2$ – соответственно для пластины, цилиндра и шара; $a_k = \lambda_k / (c_k \cdot \rho_k)$ – коэффициент температуропроводности k -й фазы; Q_Φ – теплота фазового перехода; $\bar{\rho}$ – осредненная плотность двухфазной системы; V_n – скорость движения межфазной границы по нормали n .

Конечно-разностная аппроксимация уравнений (1) и реализация условий (2) обычно затруднений не вызывает. Различное интерпретирование второго из представленных условий (3) на межфазной границе $S(\tau)$ (таблица) позволяет вычислять либо шаг по времени $\Delta\tau$, либо приращение степени фазового перехода $\Delta\eta$, представляющей собой концентрацию новой фазы в системе.

Исходя из представленных в таблице замечаний, наиболее приемлемым для компьютерного моделирования процессов изменения фазового состояния теплоаккумулирующих материалов следует считать второй подход. Здесь площади $S_{i+\frac{1}{2}}$, $S_{i-\frac{1}{2}}$ и объем W_i

отдельно взятого контрольного слоя с центром в точке i определяются из геометрических соображений. Фазовый переход считается законченным, когда концентрация η_i становится равной единице или нулю. За весь период времени фазового перехода в контрольном объеме, при $0 < \eta_i < 1$, температура T_i принимается равной T^* .

Варианты численной реализации задачи Стефана

Библиографическая ссылка	[2]–[4]	[5]–[7]
Форма условия (3)	$\Delta\tau = \frac{Q_{\Phi} \bar{\rho} \Delta r}{\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n}}$	$\Delta\eta = \frac{\Delta\tau \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} S_2 - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} S_1 \right)}{Q_{\Phi} \cdot W \cdot [(1-\eta)\rho_1 + \eta\rho_2]}$
Преимущества	Малые затраты машинного времени	Консервативность схемы, достигаемая выполнением балансовых соотношений
Недостатки	Необходимость отслеживания случая равенства тепловых потоков. Неприменимость схемы при знакопеременных нагрузках	Относительно длительное время счета
Сферы применения	Металлургические процессы. Процессы сварки	Процессы изменения фазового состояния веществ при различных (в том числе малых и знакопеременных) тепловых нагрузках

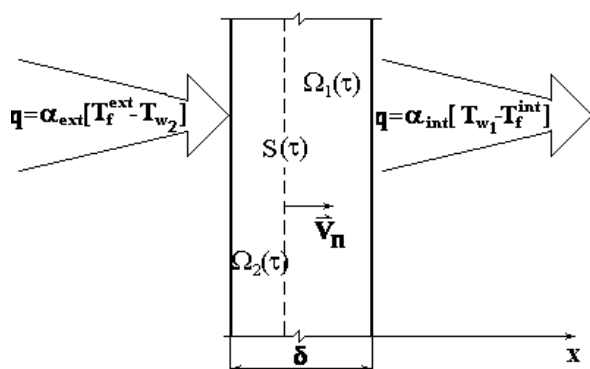


Рис. 1. Схема расчетной области

Расчеты проводились для парафина $C_{18}H_{38}$ (октодекан) с характеристиками: $T^* = 301$ К; $Q_{\Phi} = 2,44 \cdot 10^5$ Дж/кг; $c_1 = 2100$ Дж/(кг·К); $c_2 = 2160$ Дж/(кг·К); $\rho_1 = 900$ кг/м³; $\rho_2 = 780$ кг/м³; $\lambda_1 = 0,15$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = 0,1$ Вт/(м·К); $T_0 = 293$ К, применительно для теплозащитного ограждения здания или резервуара ($\gamma = 0$; $r = x$; $R = \delta$; $\alpha_{ext} = 23$ Вт/(м·К); $\alpha_{int} = 8,7$ Вт/(м·К)). Результаты расчетов представлены на рис. 2–5.

При плавлении пластины (рис. 2) с использованием условий третьего рода на границах можно выделить четыре характерных периода: инертный нагрев i -го слоя материала (область I), его плавление с одновременным накоплением значения концентрации η_i (область II), плавление последующих слоев (область III), инертный нагрев всей стенки, характеризующийся начальным всплеском и переходом в установившееся состояние (область IV).

Процесс отвердевания материала стенки (рис. 3) с постановкой на правой границе условия второго рода отличается более продолжительным изменением фазового состояния слоев (период II), расположенных вблизи нее, и достижением всей стенкой температуры возмущения T_f^{ext} .

По результатам, представленным на рис. 3, можно судить о времени полного плавления (отвердевания) стенки различной толщины. Кривая 1, построенная с использованием условий третьего рода на обеих границах, имеет существенный рост времени плавления стенки при толщине более 53 мм вследствие выравнивания температур соседних слоев. Исключить данный фактор можно, увеличив коэффициент теплоотдачи α_{ext} (кривая 2) или использовать условия второго рода на противоположной границе (кривая 3). Отвердевание материала стенки (кривая 4) характеризуется значительно меньшими затратами времени при прочих равных условиях.

На рис. 5 показано изменение температуры слоев $x = 4$ мм (кривая 2) и $x = 16$ мм (кривая 3) стенки толщиной $\delta = 20$ мм при подаче на объект возмущения в виде:

$$T_f^{ext} = T^* + 20 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{86400}\right),$$

что часто соответствует суточным колебаниям температуры наружного воздуха в осенне-весенний период. Обозначенные области на графике соответствуют: I – плавлению материала; II – нагреву и последующему охлаждению; III – отвердеванию; IV – охлаждению и последующему нагреву. Отмечается, что слои материала, расположенные на удалении от наружной поверхности и в меньшей степени подверженные воздействию, имеют, соответственно, меньшую амплитуду и повышенную тепловую инерцию.

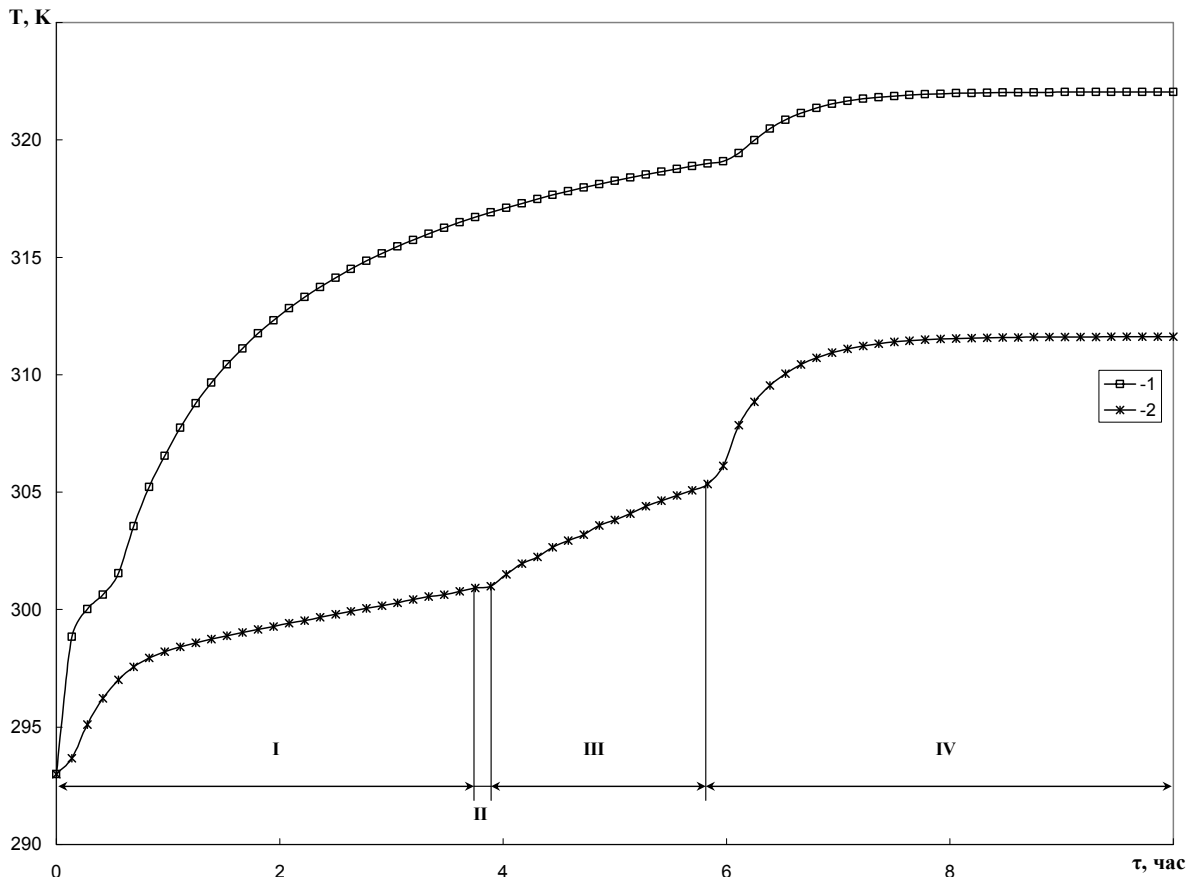


Рис. 2. Изменение температуры слоев стенки $\delta = 20$ мм, расположенных на расстоянии $x = 4$ мм (кривая 1) и $x = 16$ мм (кривая 2), при ее плавлении

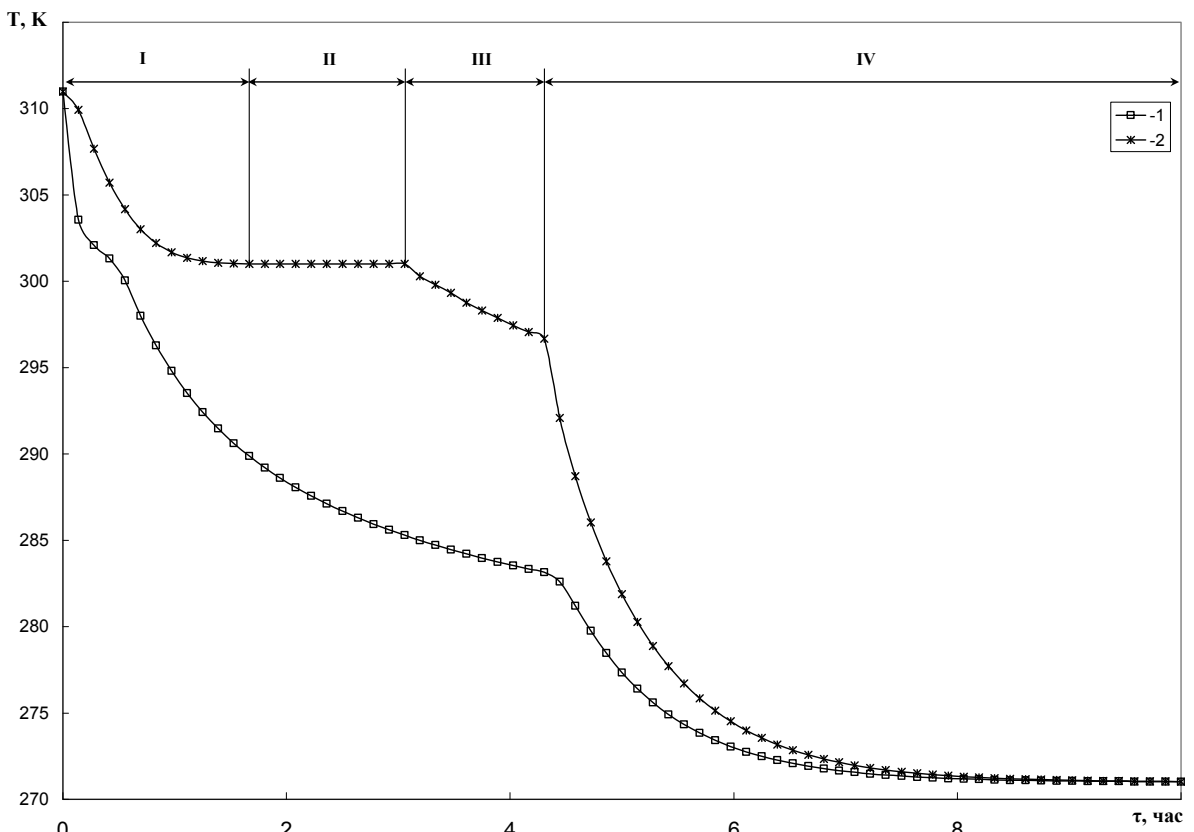


Рис. 3. Изменение температуры слоев стенки $\delta = 20$ мм, расположенных на расстоянии $x = 4$ мм (кривая 1) и $x = 16$ мм (кривая 2), при ее отвердевании

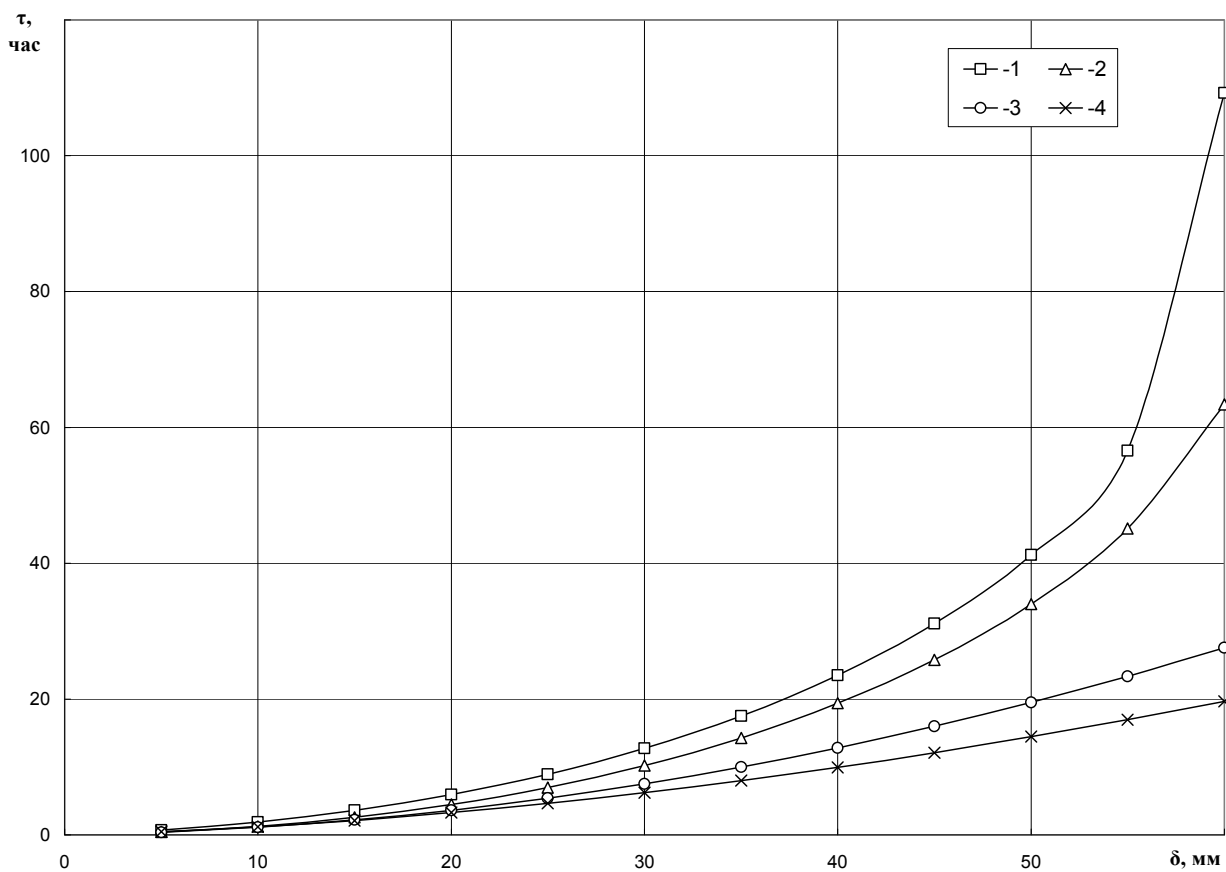


Рис. 4. Время полного плавления (кривые 1–3) и отвердевания (кривая 4) стенки в зависимости от ее толщины

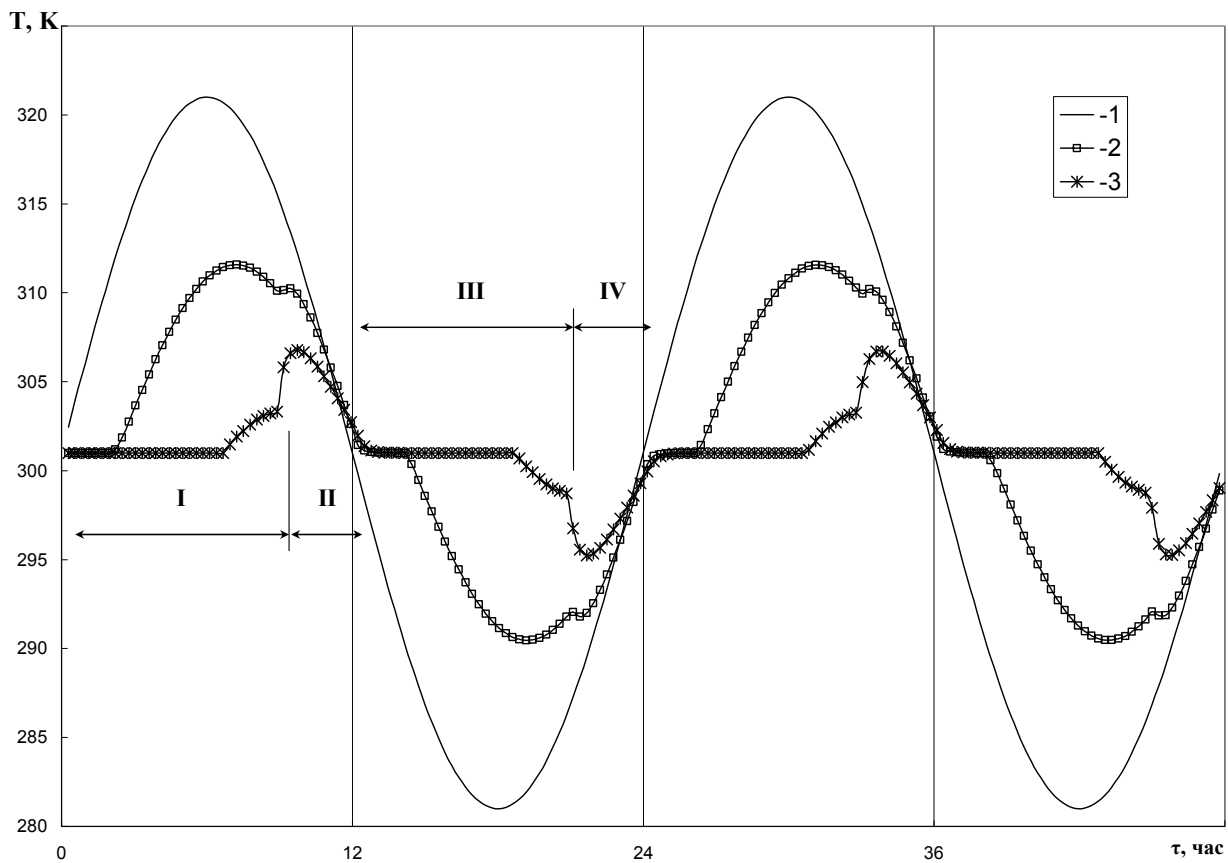


Рис. 5. Изменение температуры слоев при периодическом внешнем воздействии

Библиографические ссылки

1. Самарский А. А., Вабищев П. Н. Вычислительная передача. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
2. Там же.
3. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности: Учебное пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
4. Бородин А. И. Моделирование теплопереноса в однородной среде при наличии фазового перехода // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85 ; № 2. – С. 407–412.
5. Диденко В. Н., Касимов Р. З., Попов Д. Н. Моделирование фазовых переходов в капсулированных теплоакку-

мулирующих материалах // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1 (21). – С. 13–17.

6. Диденко В. Н., Касимов Р. З., Попов Д. Н. Методика расчета процессов плавления и отвердевания теплоаккумулирующих материалов в мелкодисперсных капсулах // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88 ; № 1. – С. 20–24.

7. Попов Д. Н., Диденко В. Н., Касимов Р. З. Методика численного моделирования фазовых переходов теплоаккумулирующих материалов, заключенных в двумерный объем // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 1. – С. 26–30.

Kasimov R. Z., Post-graduate, Kalashnikov ISTU

Khisamutdinov M. F., Post-graduate, Kalashnikov ISTU

To calculation of parameters for functioning of phase changing heat accumulating materials in the structure of heat protected constructions

The article deals with approaches for calculating the variation of phase condition in devices which contain fusible materials. The particular qualities of fusible materials are determined with regard to their application for accumulation of thermal energy. The results of numerical modeling of paraffin melting and solidification used as a filler in enclosing constructions and thermal insulation systems are represented.

Keywords: heat exchange in melting and solidification, heat accumulating materials, degree of phase state variation.

Получено: 8.12.15