

Сагала Т.А., Кологривов М.М.

Одесская государственная академия холода, г. Одесса

Влияние температуры стенки полувагона и наличия зоны протаивания в материале на процесс размораживания сыпучего груза

Рассмотрена проблема достоверности расчётов "пленочного" размораживания мерзлых сыпучих грузов в железнодорожных полувагонах по известным математическим моделям. Представлены результаты экспериментальных исследований по изучению изменения температуры стенки полувагона (поверхности материала). С учётом результатов экспериментальных исследований рекомендовано введение поправочного коэффициента в наиболее адекватную математическую модель для определения толщины талой зоны размораживаемого материала. Это позволило существенно повысить достоверность результатов расчётов в начальный период размораживания сыпучего груза.

Влажные сыпучие грузы (уголь, песок, железорудный концентрат и др.) поставляются на многие промышленные предприятия и порты Украины в основном в открытых железнодорожных полувагонах. При отрицательных температурах наружного воздуха груз часто приходит мерзлым. Из-за невозможности дальнейшей выгрузки требуется его тепловая обработка – размораживание [1]. Задача «пленочного» размораживания сыпучих грузов имеет большое практическое значение. Под «пленочным» размораживанием следует понимать восстановление сыпучести груза на глубину до 100 мм, а не всего массива груза (рис. 1). Продолжительность «пленочного» размораживания обычно составляет несколько десятков минут, в связи с этим следует подробно рассмотреть температурное поле груза в начальный период процесса.

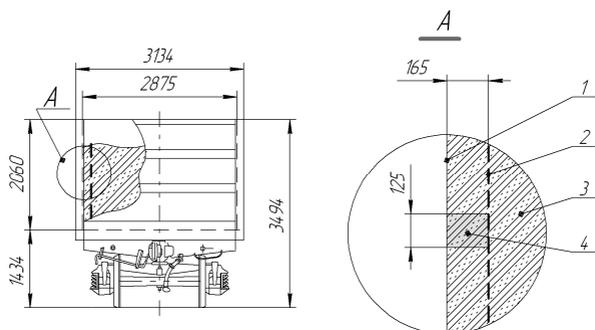


Рис. 1. Полувагон грузовой с сыпучим грузом: 1 – стенка полувагона, 2 – граница «пленочного» размораживания, 3 – сыпучий груз, 4 – экспериментально исследуемый образец груза

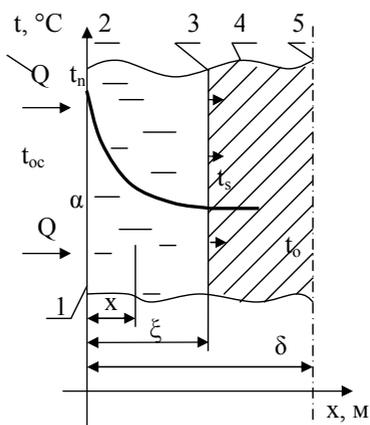


Рис. 2. Общая схема распределения температуры в разрезе размораживаемого массива: 1 – поверхность массива, 2 – талая зона, 3 – граница раздела мерзлой и талой зон, 4 – мерзлая зона, 5 – центр массива, Q – подводимая теплота.

Размораживание сыпучих материалов, в отличие от размораживания однородных материалов, это процесс нестационарной теплопроводности с изменением агрегатного состояния *одного* из компонентов материала (фазовый переход лед – вода). Известно несколько математических моделей [2] и одна инженерная методика [3], с помощью которых описывается процесс размораживания сыпучих материалов. Последний заключается в определении глубины талой зоны материала в зависимости от продолжительности процесса и от исходных характеристик материала (теплофизических свойств, начальной температуры материала, температуры обогревающей среды и др.). В литературе эта задача первоначально была известна как задача Стефана.

В работе Лыкова А.В. [4] на базе балансовых уравнений представлено решение задачи Стефана. В этой модели нестационарного процесса размораживания дисперсных материалов на поверхности массива устанавливается некоторая температура t_n , которая выше температуры таяния льда t_s (рис. 2).

В результате образуется талый слой ξ . На границе происходит переход компонента сыпучего материала из одного состояния в другое (лед-вода), при этом поглощается теплота фазового перехода γ . Принято допущение, что t_s есть величина постоянная. В размораживаемом материале имеется две зоны – мерзлая с температурой t_1 и талая с температурой t_2 . Изменение температуры в этих зонах описывается уравнениями теплопроводности:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где t_1 , t_2 – температура мерзлой и талой зон, соответственно, °С; a_1 , a_2 – коэффициент температуропроводности мерзлой и талой зон, соответственно, м²/с; x – текущая координата, м; τ – продолжительность процесса, с.

На границе раздела фаз:

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} - \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} = \gamma w \rho_1 \frac{d\xi}{dt}, \quad (2)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициент теплопроводности мерзлой и талой зон, соответственно, Вт/(м·°С); w – влажность материала, кг влаги /кг сухого материала; ρ_1 – плотность мерзлого материала, кг/м³; ξ – толщина талой зоны, м.

Полученное решение имеет вид (решение Стефана):

$$t_1 = t_n - (t_n - t_s) \frac{\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}}}{\operatorname{erfc} \frac{\beta}{2\sqrt{a_1}}}; \quad t_2 = t_{oc} + (t_s - t_{oc}) \frac{\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_2\tau}}}{\operatorname{erf} \frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}}, \quad (3)$$

где t_{oc}, t_s, t_n – температуры обогревающей среды, таяния льда, поверхности материала (стенки полувагона), °С; $\operatorname{erf}(z)$ – функция ошибок Гаусса; β – коэффициент пропорциональности, определяемый из уравнения (4).

Функция $\operatorname{erf}(z)$ определяется выражением, в котором интеграл решается разложением в ряд, например:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(z - \frac{z^3}{3} + \frac{1}{2!} \cdot \frac{z^5}{5} - \frac{1}{3!} \cdot \frac{z^7}{7} \pm \dots \right).$$

Коэффициент β определяется из следующего характеристического уравнения:

$$\frac{\lambda_2(t_s - t_{oc})}{\sqrt{a_2} \operatorname{erf} \left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}} \right)} \exp \left(-\frac{\beta^2}{4a_2} \right) + \frac{\lambda_1(t_n - t_s)}{\sqrt{a_1} \operatorname{erfc} \left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_1}} \right)} \exp \left(-\frac{\beta^2}{4a_1} \right) = \frac{\gamma w \rho_1 \sqrt{\pi}}{2} \beta. \quad (4)$$

Зависимость величины талой зоны от времени по модели, описанной Лыковым А.В., имеет вид:

$$\xi = \beta \sqrt{\tau}. \quad (5)$$

Для достоверных результатов расчетов по модели необходимо знать теплофизические характеристики сыпучих материалов. Такие свойства для различных грузов и строительных материалов при положительных и отрицательных температурах были получены ранее в Якутском филиале АН СССР. Результаты исследований удельной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности многочисленных материалов представлены виде графиков, а также рекомендован аналитический вид – формулы для их расчета [5]. На рис. 3 – 5 для наглядного примера показаны графические зависимости коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости кварцевого песка в зависимости от его влажности и плотности.

Из представленных графиков видно, что изменение теплофизических свойств песка в зависимости от влажности и плотности имеет сложный характер.

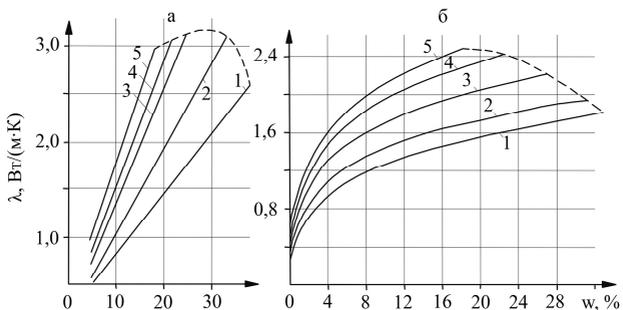


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности и плотности песка в мерзлом (а) и талом (б) состояниях:

1 – плотность 1300 кг/м³, 2 – 1400 кг/м³, 3 – 1600 кг/м³, 4 – 1700 кг/м³, 5 – 1800 кг/м³.

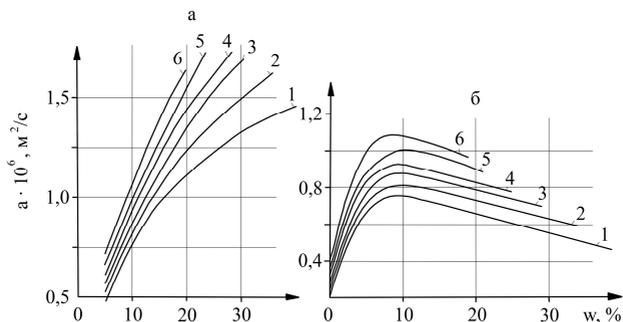


Рис. 4. Зависимость коэффициента температуропроводности от влажности и плотности песка в мерзлом (а) и талом (б) состояниях:

1 – 1300 кг/м³, 2 – 1400 кг/м³, 3 – 1500 кг/м³, 4 – 1600 кг/м³, 5 – 1700 кг/м³, 6 – 1800 кг/м³.

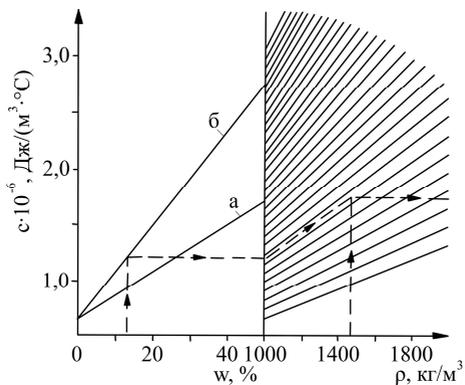


Рис. 5. Зависимость объемной теплоемкости от влажности и плотности песка в мерзлом (а) и талом (б) состояниях:

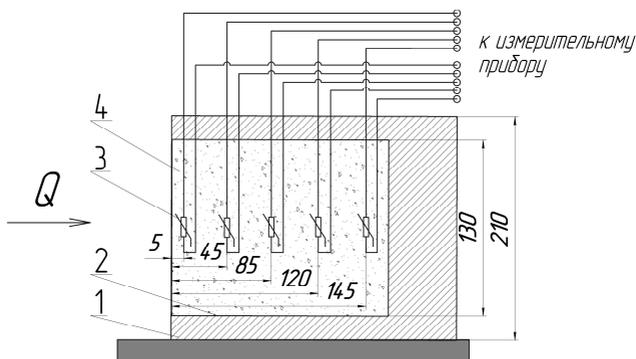


Рис. 6. Условная схема экспериментальной емкости:
 1 – изоляционный материал ($\lambda=0,029 \text{ Вт/(м·К)}$); 2 – экспериментальная емкость;
 3 – терморезисторы сопротивления с отрицательным температурным коэффициентом; 4 – насыпной материал (кварцевый песок)

Помимо математической модели процесса размораживания дисперсных материалов, описанной Лыковым А.В. нами были проанализированы другие аналогичные модели и инженерная методика по определению глубины талой зоны. Полученные результаты расчетов по разным методикам дали несопоставимо большое расхождение по времени размораживания материала при одних и тех же исходных условиях. Это привело нас к дополнительному экспериментальному исследованию процесса размораживания мерзлого сыпучего материала. В соответствии с описанной физической моделью процесса размораживания сыпучего груза в полувагоне (рис. 1) была создана экспериментальная установка для определения температурных полей материала, а также толщины талой зоны в зависимости от времени размораживания. Основу экспериментальной установки составляет экспериментальная емкость (рис. 6).

В качестве исследуемого материала был взят кварцевый песок. Размер твердой фракции песка составляет 0.2-0.5 мм, плотность 2200 кг/м^3 . Насыпная плотность влажного песка лежит в диапазоне $1450 - 1550 \text{ кг/м}^3$. Расчетная порозность материала составляет $0.38 - 0.42$.

Проведены измерения температурных полей мерзлого песка при размораживании в широких диапазонах его исходного влагосодержания ($0 - 0.2 \text{ кг влаги / кг сухого материала}$), и его исходной температуры ($(-14^\circ\text{C} - (-22^\circ\text{C}))$). Погрешность измерений составляет не более 5 %.

В результате исследований получены температурные поля талой и мерзлой зон материала, а также зависимость величины талой зоны от времени процесса размораживания.

На рис. 7 представлено сопоставление данных по толщине талой зоны полученных экспериментально и рассчитанных по математической модели [4] для

случая размораживания кварцевого песка влажностью 10 %, с начальной температурой (-18 °С) при температуре обогревающей среды 30 °С.

Кривые на рис.7 характеризуют зависимость толщины талой зоны от времени процесса размораживания $\xi = f(\tau)$ сыпучего материала. Кривая 1 (рис.7) описывает зависимость $\xi = f(\tau)$ рассчитанную по модели [4] с принятыми допущениями о постоянстве температуры стенки (поверхности материала), которая равна температуре обогревающей среды $t_n = t_{oc} = \text{const}$. Нами экспериментально доказано, что температура стенки (поверхности материала) не приобретает значение температуры обогревающей среды мгновенно, а изменяется постепенно (рис.8).

Из рис.8 видно, что экспериментально полученная кривая изменения температуры поверхности стенки при размораживании влажного песка иллюстрирует линейный характер её изменения в двух временных диапазонах. Имеется перелом в области фазового перехода лед-вода при $t = 0$ °С.

Кривая 2 (рис.7) также рассчитана по модели [4], учитывая полученную экспериментально зависимость $t_n = \varphi(\tau)$ (рис.8). Учет изменения температуры поверхности t_n приближает расчетные значения толщины талой зоны ξ к опытным данным (кривая 3 рис.7). При этом продолжительность процесса размораживания до требуемого значения толщины талой зоны увеличивается практически в 2 раза.

Существенное расхождение кривых 2 и 3 (рис.7) в начальный период вызвано тем, что при сравнительно небольшой толщине талой зоны лимитирующую роль в скорости движения границы раздела играет процесс фазового перехода. Этот эффект не учитывается известной моделью. С увеличением толщины талой зоны эта роль нивелируется увеличением теплоты, расходуемой на нагрев массива растаявшего материала. Экспериментальная и расчетная кривые при этом сближаются. Известно, что задача о размораживании сформулирована как задача о сопряжении двух температурных полей при наличии особого граничного условия на движущейся границе раздела (поглощение теплоты фазового перехода) (рис.2). Анализ экспериментальных данных по размораживанию кварцевого песка выявил следующее. Граница раздела является отдельной четко выраженной областью протаивания с переменной толщиной $\xi_0 = \psi(\tau)$ (рис. 9).

Для решения задачи мы предлагаем ввести поправочный коэффициент k в формулу (5) с целью приближения расчетных данных по толщине талой зоны к опытным. Коэффициент k характеризует замедление процесса размораживания сыпучего материала вследствие наличия зоны протаивания с постоянной температурой равной температуре фазового перехода лед-вода $t_s = 0$ °С. Возникает так называемая «нулевая завеса». Также «нулевая завеса» была отмечена при исследовании теплофизических свойств в протаивающих насыпных материалах, так как определяемый коэффициент температуропроводности при протаивании материалов стремился к нулю [5].

Определено, что значение коэффициента k (рис.10) пропорционально продолжительности процесса в степени 1/2 и для случая размораживания кварцевого песка равно:

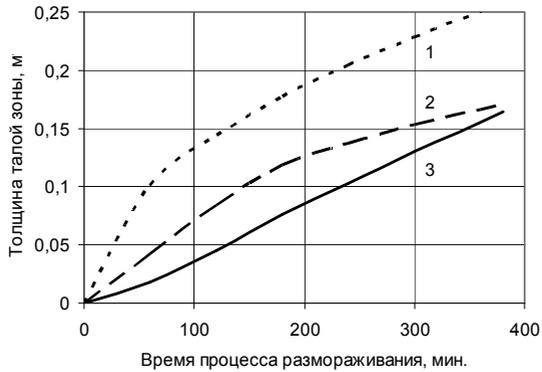


Рис. 7. Зависимость толщины талой зоны от времени процесса размораживания: 1 – расчет по модели [4], 2 – расчет по модели [4] с использованием экспериментальных данных по изменению температуры стенки (поверхности материала), 3 – экспериментальные данные

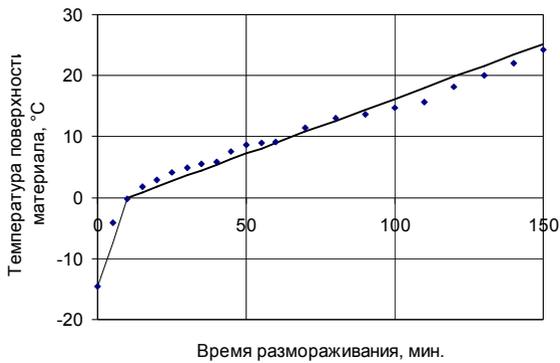


Рис. 8. Значение температуры поверхности кварцевого песка (t_n) при его размораживании в зависимости от продолжительности процесса (τ)

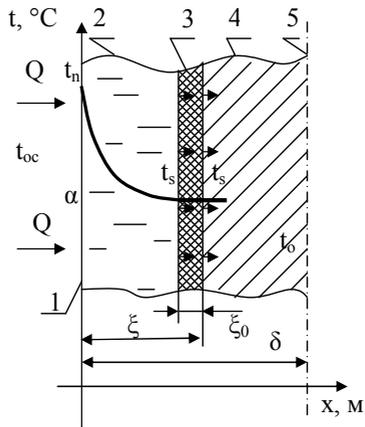


Рис. 9. Реальная физическая модель процесса размораживания сыпучих материалов

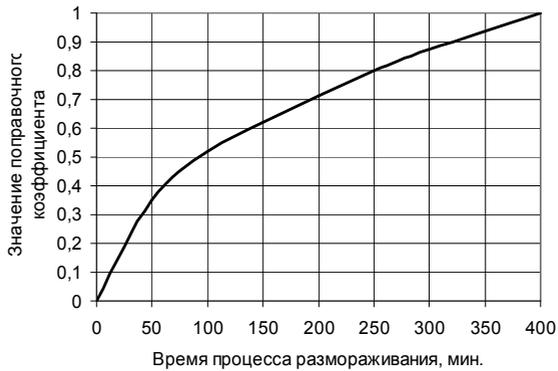


Рис. 10. Значение поправочного коэффициента (k) в зависимости от времени размораживания (τ).

$$k = 6.5 \cdot 10^{-3} \sqrt{\tau}. \quad (6)$$

Формула (5) после ввода поправочного коэффициента (6) примет вид:

$$\xi = 6.5 \cdot 10^{-3} \beta \tau. \quad (7)$$

Большинство из существующих математических моделей процесса нестационарной теплопроводности с наличием фазового перехода, а также инженерная методика по определению толщины (глубины) талой зоны, разработаны для случая сезонного оттаивания грунтов в вечной мерзлоте, продолжительностью несколько месяцев. Принятые при решении задачи допущения применительно для случая оттаивания грунтов в вечной мерзлоте со столь длительной продолжительностью процесса с достаточной для практики точностью описывают реальную картину процесса. Математические модели и инженерная методика не позволяют точно рассчитать толщину талой зоны при «пленочном» размораживании материала в течение одного часа.

С другой стороны, «пленочное» размораживание сыпучих грузов в железнодорожных полувагонах производится всего за несколько десятков минут. Достоверное аналитическое описание начального периода процесса размораживания (первые несколько десятков минут) играет важную роль. Использование в расчетах переменной во времени температуры стенки (поверхности материала) и поправочного коэффициента позволит с большей точностью определять продолжительность обогрева железнодорожных полувагонов, что характеризуется ресурсо- и энергосбережением, а также повышением экономической эффективности предприятий.

Следует отметить, что результаты экспериментальных исследований внедрены на предприятии, непосредственно занимающимся разработкой, производством систем и оборудования для обогрева железнодорожных полувагонов, научно-производственное объединение «Теплоприбор» (г. Краматорск, Донецкой области).

Литература:

1. Сагала Т.А., Кологривов М.М. Выбор энергосберегающей системы обогрева полувагонов с мерзлым грузом // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2008. – №1. – С. 33.
2. Сагала Т.А., Кологривов М.М. Применение математических моделей нестационарной теплопроводности с фазовым переходом компонента в расчетах размораживания насыпного груза // Холодильна техніка і технологія: науково-технічний журнал. – 2008. – № 4 (114). – С. 46-51.
3. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – Взамен СНиП П-18-76; введ. 01.01.90. – М.: Госстрой СССР, 1990.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
5. Иванов Н.С., Степанов А.В., Филиппов П.И. Теплофизические свойства насыпных грузов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отд-ние, 1974. – 96с.

Сагала Т.А., Кологривов М.М.

Вплив температури стінки напіввагона і наявності зони протаювання в матеріалі на процес розморожування сипучого вантажу

АНОТАЦІЯ

Розглянуто проблему достовірності розрахунків "плівкового" розморожування мерзлих сипучих вантажів в залізничних піввагонах за відомими математичними моделями. Представлені результати експериментальних досліджень зміни температури стінки піввагона (поверхні матеріалу). З урахуванням результатів експериментальних досліджень рекомендовано введення поправочного коефіцієнта в найбільш адекватну математичну модель для визначення товщини талої зони матеріалу, що розморожується. Це дозволило істотно підвищити достовірність результатів розрахунків в початковий період розморожування сипучого вантажу.

Sagala T.A., Kologrivov M.M.

The influence of the railway car wall temperature and the availability of thawing zone in the material on the process of bulk cargo thawing

SUMMARY

The problem of the calculations reliability of the "membrane" defrost frozen bulk cargo in railway cars considered by the known mathematical models. The experimental results of the changes in railway car wall temperature (surface material) are presented. The introduction of the correction coefficient in most adequate mathematical model on the determination of the melt zone thickness of the material based on the experimental research is recommended. This will significantly improve reliability of the calculation results in the initial period of bulk cargo thawing.