

Автореферат
с 13

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На правах рукопису

Сагала Тетяна Анатоліївна



УДК 536.421; 62-69

**ТЕПЛООБМІН ПРИ РОЗМОРОЖУВАННІ
НАСИПНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.14.06 - Технічна теплофізика та
промислова теплоенергетика

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук

Одеса – 2013

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана на кафедрі теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
КОЛОГРИВОВ Михайло Михайлович,
Одеська національна академія харчових технологій, доцент кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ДЕНИСОВА Алла Євсївна,
Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій

доктор технічних наук, доцент
РЕДЬКО Андрій Олександрович,
Харківський національний університет будівництва та архітектури, професор кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів

Захист відбудеться "09" грудня 2013 р. о 12 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 при Одеській національній академії харчових технологій за адресою: 65082, м. Одеса, вул. Дворянська, 1/3, ауд. 108.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій.

Відомо, що
Потайки
Розв'язок 2.
С) = n(O₂) × V × m = 825 × 22,4 × 2
Відомо, що
Потайки
Розв'язок 2.
С) = n(O₂) × V × m = 825 × 22,4 × 2

Мілованов В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

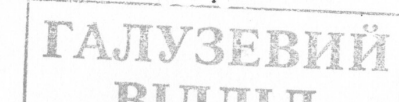
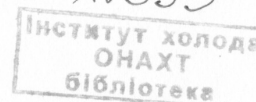
Актуальність теми. Рішення проблеми розморожування мерзлих насипних матеріалів у залізничних піввагонах стало сьогодні проблемою глобального характеру.

В портах і на підприємствах України перевантажується велика кількість насипних вантажів, таких як вугілля, руда, залізорудний концентрат, пісок, щебінь та інші. Транспортування здійснюється переважно залізничними вагонами відкритого типу (піввагонами). У зимовий час при температурі навколишнього середовища нижче нуля існує ймовірність змерзання вологого насипного матеріалу. Наприклад, через порти України експортуються мільйони тонн на рік кузбасівського вугілля і залізняка російського виробництва. У холодний період року вантаж часто приходить мерзлим. Перевантажувати матеріали в такому стані ні грейферами, ні вагоноперекидачами роторного типу не уявляється можливим. Прості вагонів через складність вивантаження ведуть до прямої втрати у вигляді штрафів, що може позначитися на собівартості продукції. Прості виробничого обладнання через затримку подачі сировини призводять до значного зниження ККД технологічного обладнання, що впливає на економічні показники підприємства в цілому. Для скорочення часу перевантажувальних робіт потрібна попередня обробка насипного мерзлого вантажу з метою переведення його в сипучий стан. Найчастіше використовують теплову обробку. Розморожування проводиться в спеціально обладнаних приміщеннях, так званих гаражах-розморожувачах або тепляках. Незважаючи на безліч існуючих систем опалення таких гаражів, які розрізняються як тепловою, так і економічною ефективністю, особливо гострим є питання енергозберігаючого способу обігріву піввагонів у зимовий час.

Актуальна проблема для металургійної, хімічної, скловарної і багатьох інших галузей промислового комплексу України. Вперше технологічні рішення проблеми розморожування зустрічаються на початку двадцятого століття. І сьогодні на багатьох підприємствах реалізуються технології розморожування, розроблені в середині двадцятого століття, тому витрати енергоресурсів і тривалість процесу у декілька разів перевищують необхідні значення. Рішення задачі ефективного та енергозберігаючого розморожування мерзлих насипних вантажів у піввагонах є актуальним в Україні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з Постановою Верховної Ради України № 75/94-ВР від 01.07.1994 р.; Законом України «Про енергозбереження»; Постановою Кабінету Міністрів України № 256-р від 31.03.1999 р. «Про використання паливно-енергетичних ресурсів і скорочення технологічних витрат теплової енергії»; Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 145-р від 15.03.2006 р. «Енергетична стратегія України на період до 2030 року».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності систем розморожування мерзлих насипних матеріалів в залізничних піввагонах.



Об'єктом досліджень є системи розморожування вологих насипних матеріалів в залізничних піввагонах.

Предметом досліджень є процес розморожування вологих насипних матеріалів при різних параметрах (початкова температура насипного матеріалу, вологовміст насипного матеріалу).

Досягнення поставленої мети зумовило формулювання та вирішення таких наукових задач дослідження:

1. Уточнення математичної моделі процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом для випадку «плівкового» розморожування насипних мерзлих матеріалів за результатами:

- проведених експериментальних досліджень динаміки формування температурних полів насипного матеріалу при розморожуванні;
- проведеного теоретичного і чисельного аналізу математичних моделей процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом.

2. Вдосконалення методу обігріву піввагонів з мерзлим матеріалом на основі проведення аналізу діючих систем обігріву піввагонів з мерзлим насипним вантажем і розробка ефективної системи обігріву.

Методи дослідження. Рішення задач даної роботи проводилось шляхом теоретичного та експериментального дослідження в лабораторних умовах. Обґрунтованість, достовірність наукових результатів та висновків підтверджується використанням апробованих і загальноприйнятих методів дослідження та якісним і кількісним збігом розрахункових та експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше експериментально досліджена динаміка формування талого шару насипного матеріалу при розморожуванні.

Виявлено нове фізичне уявлення процесу розморожування. Насипний матеріал, що розморожується, має три чітко виражені зони по глибині: талу з температурою вище температури фазового переходу; протавання з постійною температурою, рівною температурі фазового переходу; мерзлу з температурою нижче температури фазового переходу; і дві рухомі межі розділу даних зон з різними швидкостями їх руху.

2. Вперше експериментально здійснено оцінку впливу початкових параметрів (вологовмісту і початкової температури) мерзлого насипного матеріалу на час його розморожування.

Вологовміст має визначальний вплив на швидкість руху межі фазового переходу (межі танення), ніж початкова температура матеріалу. При збільшенні масового вологовмісту насипного матеріалу (кварцового піску) від 5 до 20 % час розморожування збільшується до 5 разів при рівній початковій температурі. При зниженні початкової температури матеріалу (кварцового піску) від $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ час розморожування збільшується не більше, ніж в 1,1 рази при рівному вологовмісту.

При значеннях коефіцієнта тепловіддачі понад $30\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ вплив інтенсивності зовнішнього теплообміну на час відтавання матеріалу несуттєвий

(збільшення коефіцієнта тепловіддачі від 30 до $100\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ зменшує час розморожування в 1,05 рази).

3. На основі теоретичного та експериментального аналізу процесу розморожування уточнена математична модель процесу теплопровідності з фазовим переходом для випадку «плівкового» розморожування насипних матеріалів, враховуючи нове фізичне уявлення процесу розморожування.

4. Вперше на підставі аналізу існуючих методів обігріву піввагонів з мерзлим насипним вантажем сформульовані практичні рекомендації щодо конструктивного оформлення систем обігріву мерзлих насипних вантажів у залізничних піввагонах і по енергозберігаючій технології розморожування, а також розроблена ефективна система обігріву залізничних піввагонів з мерзлим насипним вантажем, що забезпечує скорочення витрат енергоресурсів на 30 - 50 %.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці науково обґрунтованої технології процесу розморожування, яка є базою для проектування процесів і систем обігріву мерзлих насипних вантажів і дозволяє ефективно вирішувати задачі енергозбереження на промислових підприємствах. Розроблені рекомендації з проектування систем обігріву і технології розморожування насипних вантажів у піввагонах використовуються при проектуванні систем обігріву піввагонів підприємством ЗАТ «Теплоприбор», м. Краматорськ Донецької області.

Особистий внесок здобувача полягає у створенні експериментальної установки, розробці методики проведення експерименту, проведенні експериментальних досліджень, узагальненні отриманих результатів. Здобувачем проведено уточнення математичної моделі нестационарного теплообміну з фазовим переходом з урахуванням нового фізичного уявлення процесу розморожування для узгодження з наявними дослідними даними, а також розроблені рекомендації до проектування промислових систем обігріву піввагонів з мерзлим насипним вантажем.

Апробація результатів дисертації проводилась на наукових конференціях, зокрема на:

- V Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (м. Одеса, 2007);
- III Міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційні технології XXI століття для кліматизації і теплостачання будівель» (м. Одеса, 2008);
- I Міжнародній науково-технічній конференції «Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації» (м. Миколаїв, 2008);
- IX Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і аспірантів «Еколого-енергетичні проблеми XXI століття» (м. Одеса, 2009);
- VI Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (м. Одеса, 2009);
- XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (м. Одеса, 2011);
- XII Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» (м. Одеса, 2012);

- 69 Науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу академії (м. Одеса, 2012);

- Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених і студентів «Стан, досягнення та перспективи холодильної техніки і технології» (м. Одеса, 2013).

Публікації. Основний зміст і результати дисертаційної роботи опубліковані в 12 роботах.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 141 сторінці машинописного тексту і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, містить 45 рисунків. Бібліографічний список складається з 105 найменувань робіт вітчизняних та зарубіжних авторів.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність тематики досліджень, а також сформульовані мета і задачі досліджень, наукова новизна, практичне значення одержаних результатів, викладені основні результати, які виносяться на захист.

Перший розділ присвячений огляду відомих матеріалів по проблемі відновлення сипучості мерзлих насипних матеріалів у залізничних піввагонах, а також огляду сучасного стану теорії теплопровідності.

Проведені опис і порівняння механічного та теплового способів відновлення сипучості мерзлих насипних матеріалів. Механічний спосіб полягає в механічному дробленні мерзлого вантажу за допомогою спеціальних вібраційних пристроїв. Тепловий спосіб полягає в розморожуванні матеріалів у спеціально обладнаних приміщеннях, система опалення яких конструюється в залежності від обраного методу обігріву. У роботі розглядається відновлення сипучості матеріалу на глибину не більше 100 мм від стінок піввагона, в даному випадку механічний спосіб неприйнятний. Найбільш перспективним представляється тепловий.

Відзначено, що існує велика кількість методів обігріву і систем розморожування насипних матеріалів, що змерзлися у залізничних піввагонах. Вони дозволяють швидко нагрівати поверхню стінок, дна піввагона, а також поверхню вантажу до будь-якої заданої температури. Але у всіх випадках відсутні наукові рекомендації з проектування систем зовнішнього обігріву та технології процесу «плівкового» розморожування, які можна розробити лише після детального дослідження поля температур в мерзлом матеріалі при його розморожуванні.

Описані математичні моделі процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом засновані на розв'язанні задачі Стефана. Описана інженерна методика розрахунку товщини відтавання і промерзання ґрунту, яка використовується в будівництві в районах з вічною мерзлотою, але вона заснована на емпіричних формулах і не має наукових висновків. Для визначення точного часу процесу розморожування необхідно мати достовірну математичну модель процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом, що дозволить не тільки прискорити тривалість вивантаження матеріалу з піввагонів в зимовий період, але і

скоротити витрати енергоресурсів, тим самим підвищуючи економічний показник виробництва в цілому.

Другий розділ присвячений експериментальному дослідженню процесу теплообміну при розморожуванні насипних матеріалів. Метою експериментальних досліджень розморожування насипного матеріалу є визначення температурних полів насипного матеріалу при розморожуванні; визначення залежності товщини талого шару насипного матеріалу від тривалості процесу.

«Плівкове» розморожування насипних вантажів має велике практичне значення. Під «плівковим» розморожуванням слід розуміти відновлення сипучості вантажу на глибину до 100 мм, а не всього масиву матеріалу (рис. 1).

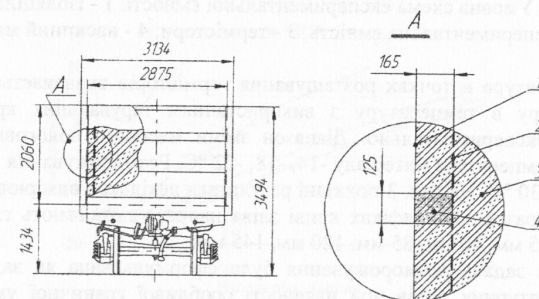


Рис. 1. Піввагон вантажний з насипним матеріалом: 1 - стінка піввагона, 2 - межа «плівкового» розморожування, 3 - насипний вантаж, 4 - експериментально досліджуваний зразок матеріалу

Розміри вантажу в піввагоні мають такі значення: довжина 12,1 м, ширина 2,9 м, висота до 2,0 м. Товщина талої зони, необхідна при «плівковому» розморожуванні, на порядок менше габаритних розмірів вантажу, це дає можливість в експериментальних і теоретичних дослідженнях розглядати насипний матеріал як напівобмежений масив.

Для проведення експериментальних досліджень був сконструйований експериментальний стенд, основу якого складає металева ємність 2 висотою 165 мм з насипним матеріалом 4 (рис. 2). Ємність покрита ізоляційним матеріалом - пінополістиролом 1 з коефіцієнтом теплопровідності 0,036 Вт/(м·К). В середині ємності, по осі, розташовано п'ять терморезисторів опору 3 типу КМТ-17А: термістор № 1 знаходиться на глибині 5 мм від поверхні досліджуваного матеріалу, № 2 - 40 мм, № 3 - 85 мм, № 4 - 120 мм, № 5 - 145 мм.

В якості дослідного зразка взятий кварцовий пісок. Проведені вимірювання температурного поля матеріалу при його розморожуванні з використанням методики, розробленої здобувачем. Показання термісторів опору знімаються за допомогою приладу електровимірювання через задані проміжки часу.

8

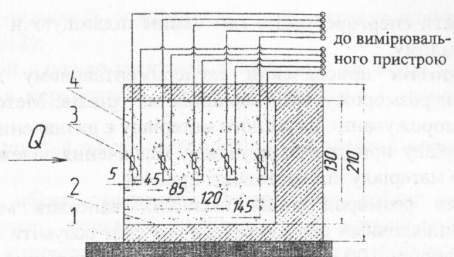


Рис. 2. Умовна схема експериментальної ємності: 1 - ізоляційний матеріал; 2 - експериментальна ємність, 3 - термістори; 4 - насипний матеріал

Температура в точках розташування термісторів визначається переведенням значень опору в температуру з використанням тарувальних кривих, так само отриманих експериментально. Діапазон зміни масового вологовмісту 0 - 20 %. Початкова температура матеріалу -14, -18, -22 °С. Розморожування проводилось при температурі 30 °С. На рис. 3 показані результати декількох вимірювань температури по глибині зразка. На графіках криві зліва направо позначають глибину закладки термісторів: 5 мм, 40 мм, 85 мм, 120 мм, 145 мм.

Раніше задача розморожування була сформульована як задача сполучення двох температурних полів при наявності особливої граничної умови на рухомій *ідеально тонкій межі розділу* (поглинання теплоти фазового переходу) (рис. 4, а). Внаслідок аналізу експериментальних даних щодо розморожування вологого кварцового піску виявлено наступне. Мерзла і тала зони матеріалу розділені самостійною чітко вираженою зоною, так званою зоною протавання (рис. 4, б).

Іншими словами, в матеріалі, що розморожується, є три зони. Перша зона - тала, в межах якої відбувається прогрів матеріалу від температури фазового переходу t_s до температури поверхні матеріалу t_n . Друга зона - зона протавання з постійною температурою, рівною температурі фазового переходу (лід - вода) t_s . Третя зона - мерзла, в якій відбувається нагрів матеріалу від початкової температури t_0 до температури фазового переходу t_s . Нагрівання сухого матеріалу не має чітко виражених зон.

Зона протавання має постійну температуру t_s і змінну товщину $\xi_s = \psi(\tau)$, так як швидкість руху двох її меж розрізняється $v_1 > v_2$ (рис. 5).

З рис. 6 видно, що при малій товщині шару насипного матеріалу і маленькому вологовмісті (до 5 %) зміна температурного поля вологого матеріалу ідентична зміні температурного поля сухого матеріалу ($w = 0\%$), тобто розморожування матеріал не потребує.

9

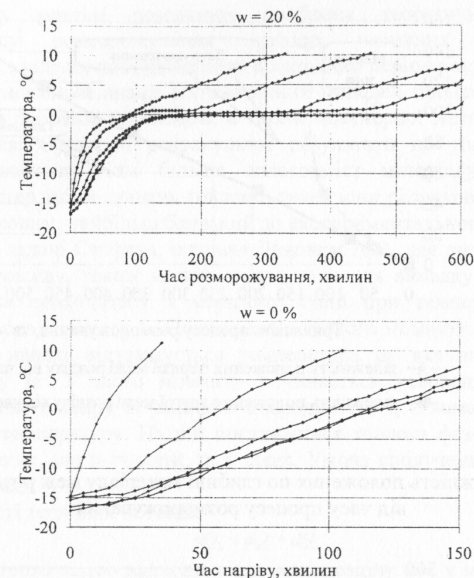


Рис. 3. Температурні поля насипного матеріалу (пісок вологовмістом 20 % і сухий пісок) при його розморожуванні і нагріванні, отримані експериментально

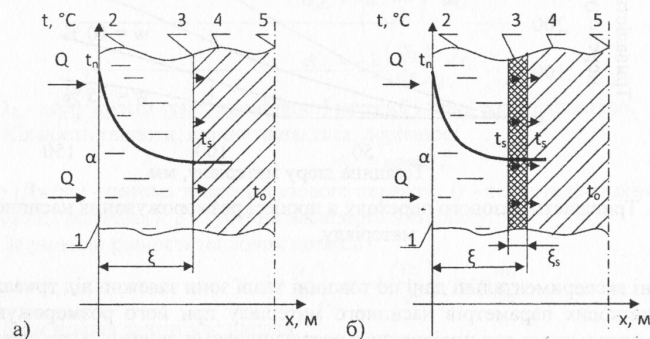


Рис. 4. Загальна схема розподілу температури в розрізі масиву, що розморожується: 1 - поверхня масиву, 2 - тала зона, 3 - межа розділу, 4 - мерзла зона, 5 - центр масиву, Q - теплота, що підводиться, α - коефіцієнт тепловіддачі від навколишнього середовища до поверхні матеріалу

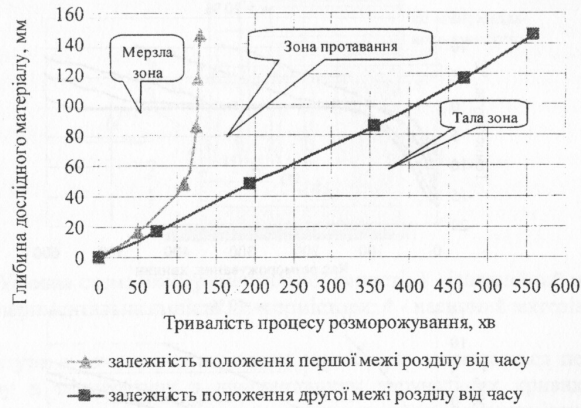


Рис. 5. Залежність положення по глибині матеріалу меж розділу зон залежно від часу процесу розморожування

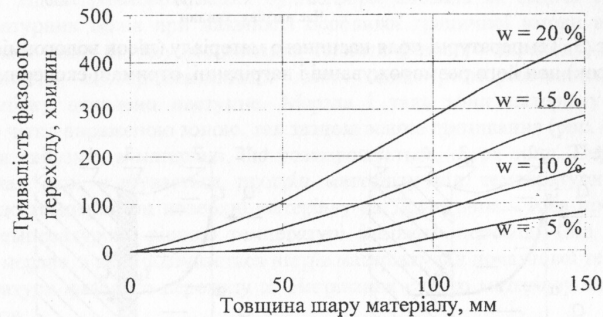


Рис. 6. Тривалість фазового переходу в процесі розморожування насипного матеріалу

Отримані експериментальні дані по товщині талої зони залежно від тривалості процесу і початкових параметрів насипного матеріалу при його розморожуванні використані в подальшому для порівняння з розрахунковими даними, а так само для уточнення математичної моделі процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом для випадку «плівкового» розморожування насипних матеріалів.

В третьому розділі розглянута проблема теоретичного визначення достовірного часу розморожування мерзлих насипних матеріалів, які переантажуються з залізничних піввагонах в холодний період року.

Проведено чисельний аналіз математичних моделей процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом, а також інженерної методики визначення глибини відтавання. Отримані розрахункові результати по тривалості процесу достатньо розрізняються. Чим більше вологовміст матеріалу, тим сильніше розбіжність. Характер зміни значень товщини талої зони розрахований за моделлю, описаною А.В. Ликовим, найбільш близький до експериментального (рис. 7).

Розв'язання задачі Стефана, описане Ликовим А.В. для випадку затвердіння напівобмеженого масиву, також можна застосувати для випадку розморожування (рис. 4, а). Масив знаходиться в мерзлому стані при температурі t_0 , нижче температури фазового переходу t_s . Починаючи з деякого моменту, на його поверхні встановлюється і надалі підтримується температура t_n , яка вище температури фазового переходу t_s . З цього моменту починається утворення талої зони. Внутрішня межа цього шару із змінною координатою ξ є межею розділу фаз і зберігає незмінну температуру. На ній поглинається теплота фазового переходу r . Зроблено припущення, що $t_0 = \text{const}$, $t_n = \text{const}$. Умова сполучення температурних полів $t_1 = t_2 = t_s = \text{const}$.

Умова рівності теплових потоків:

$$dQ_2 = dQ_1 + dQ_s,$$

де dQ_1 - кількість теплоти, що надходить від межі розділу фаз у мерзлу зону, dQ_2 - кількість теплоти, що підводиться до межі розділу теплопровідністю талої зони, dQ_s - теплота фазового переходу, що поглинається на межі розділу.

Відповідно до закону Фур'є для 1 м^2 поверхні:

$$dQ_1 = -\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial x} \right)_{+\xi} d\tau,$$

$$dQ_2 = -\lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial x} \right)_{-\xi} d\tau,$$

де λ_1, λ_2 - коефіцієнти теплопровідності мерзлої і талої зон, відповідно.

Кількість теплоти, що поглинається, дорівнює:

$$dQ_s = r\rho w d\xi,$$

де $r\rho w$ [Дж/кг] - питома теплота фазового переходу (r - теплота плавлення льоду, w - вологовміст матеріалу; ρ - густина насипного матеріалу).

За умовою рівності теплових потоків

$$-\lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial x} \right)_{-\xi} = -\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial x} \right)_{+\xi} + r\rho \frac{d\xi}{d\tau}.$$

Розв'язання задачі має вигляд

$$\frac{\lambda_2(t_n - t_s)}{\sqrt{a_2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}} \right)} \exp \left(-\frac{\beta^2}{4a_2} \right) + \frac{\lambda_1(t_s - t_0)}{\sqrt{a_1} \operatorname{erfc} \left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_1}} \right)} \exp \left(-\frac{\beta^2}{4a_1} \right) = \frac{r\rho w \sqrt{\pi}}{2} \beta;$$

$$\xi = \beta \sqrt{\tau}, \quad (1)$$

де a_1, a_2 - коефіцієнти теплопровідності мерзлої і талої зон, відповідно; β - корінь рівняння.

Функція $\text{erf}(z)$ називається функцією помилок Гауса:

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz.$$

Даний інтеграл розв'язується розкладанням в ряд, наприклад:

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

Далі буде розглядатися тільки зазначена математична модель процесу.

На рис. 7 показані криві зміни товщини талої зони залежно від тривалості процесу, отримані розрахунковим методом за вищеприведеною моделлю процесу та експериментально.

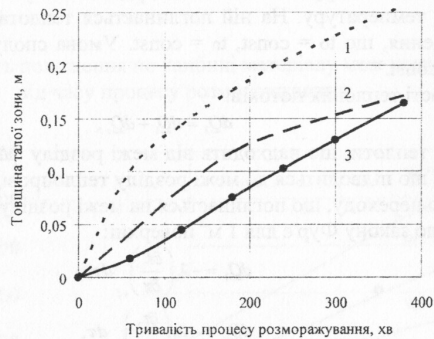


Рис. 7. Залежність товщини талої зони від часу процесу розморожування: 1 - розрахунок за моделлю А.В. Ликова, 2 - розрахунок за моделлю з використанням експериментальних даних по зміні температури стінки (поверхні матеріалу), 3 - експериментальні дані

Крива 1 (рис. 7) описує залежність $\xi = f(\tau)$, розраховану по моделі з прийнятими припущеннями про постійність значення температури стінки (поверхні матеріалу), яка дорівнює температурі обігрівачого середовища $t_n = t_{oc} = \text{const}$. Експериментально доведено, що температура стінки (поверхні матеріалу) не набуває значення температури обігрівачого середовища миттєво, а змінюється поступово (рис. 8).

Крива 2 (рис. 7) також розрахована за моделлю, враховуючи отриману експериментально залежність $t_n = \varphi(\tau)$ (рис. 8). Використання змінної в часі температури поверхні t_n наближає розрахункові значення товщини талої зони ξ до дослідних даних (рис. 7, крива 3). Розбіжність кривих 2 і 3 (рис. 7) в початковий

період викликана тим, що при порівнянні невеликій товщині талої зони лімітуючу роль у швидкості руху межі розділу відіграє процес фазового переходу та наявність зони протавання в матеріалі.

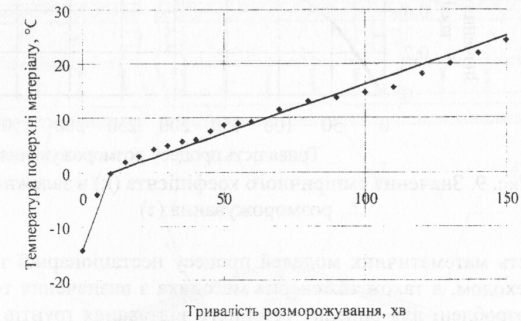


Рис. 8. Характер зміни температури поверхні кварцового піску (t_n) при його розморожуванні в залежності від тривалості процесу (τ)

Цей ефект не враховується відомою моделлю. З іншого боку, результати не достатньо наближаються до реальних значень. Доцільно уточнення математичної моделі для наближення її чисельних рішень до даних експериментальних досліджень з урахуванням змінної температури поверхні насипного матеріалу та наявності чітко вираженої зони протавання.

Для вирішення завдання автором роботи запропоновано ввести емпіричний коефіцієнт k у формулу (1). Коефіцієнт k характеризує уповільнення процесу розморожування сипучого матеріалу внаслідок змінного значення температури стінки піввагона $t_n = \varphi(\tau)$ (рис.8), а також наявності зони протавання з постійною температурою, рівною температурі фазового переходу лід-вода $t_s = 0^\circ\text{C}$ (рис. 4, б).

Визначається емпіричний коефіцієнт k для різних значень часу розморожування і вологовмісту матеріалу за формулою:

$$k = 1 - \frac{\xi_v - \xi_d}{\xi_v}, \quad (2)$$

де ξ_v, ξ_d - дослідне і розрахункове значення товщини талої зони для заданого часу.

Визначено, що значення коефіцієнта k (рис. 9) пропорційно тривалості процесу в степені 1/2 і для випадку розморожування кварцового піску дорівнює:

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

Формула визначення товщини талого шару після введення емпіричного коефіцієнта (1) набуває вигляду:

$$\xi = 6.5 \cdot 10^{-3} \beta \tau. \quad (4)$$



Рис. 9. Значення емпіричного коефіцієнта (k) в залежності від часу розморожування (τ)

Більшість математичних моделей процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом, а також інженерна методика з визначення товщини (глибини) талої зони розроблені для випадку сезонного відтавання ґрунтів у вічній мерзлоті тривалістю кілька місяців. Прийняті при розв'язанні даної задачі припущення не заважають з достатньою для практики точністю описати реальну картину процесу. Але математичні моделі та інженерна методика не дозволяють точно розрахувати товщину талої зони при «пливковому» розморожуванні матеріалу протягом нетривалого процесу.

Достовірний математичний опис початкового періоду процесу розморожування (перші кілька десятків хвилин) грає важливу роль. Використання для розрахунків уточненої моделі процесу дозволяє точно визначити тривалість обігріву залізничних піввагонів, що характеризується енергозбереженням, а також підвищенням економічної ефективності підприємства в цілому.

В **четвертому розділі** запропоновано схему нової комбінованої системи обігріву, яка має ряд істотних переваг перед діючими системами для аналогічної мети (рис. 10).

Підведення тепла безпосередньо до поверхні у верхній частині вантажу, що розморожується у піввагоні, здійснюється за допомогою темного інфрачервоного випромінювача. Він створює значно більшу густину теплового потоку, ніж конвективний обігрівач, і не впливає на температуру вузлів ходової частини.

З бокових і торцевих сторін піввагон обдувається газовою сумішшю з фіксованою температурою 30 - 60 °С, що виключає неприпустимо високий нагрів вузлів ходової частини. Для обдування використовується рециркуляційне повітря, яке забирається з приміщення тепляка і підігрівається до 30 - 60 °С підмішуванням продуктів згорання від роботи інфрачервоного випромінювача. Такий конвективний обдув є енергозберігаючим.

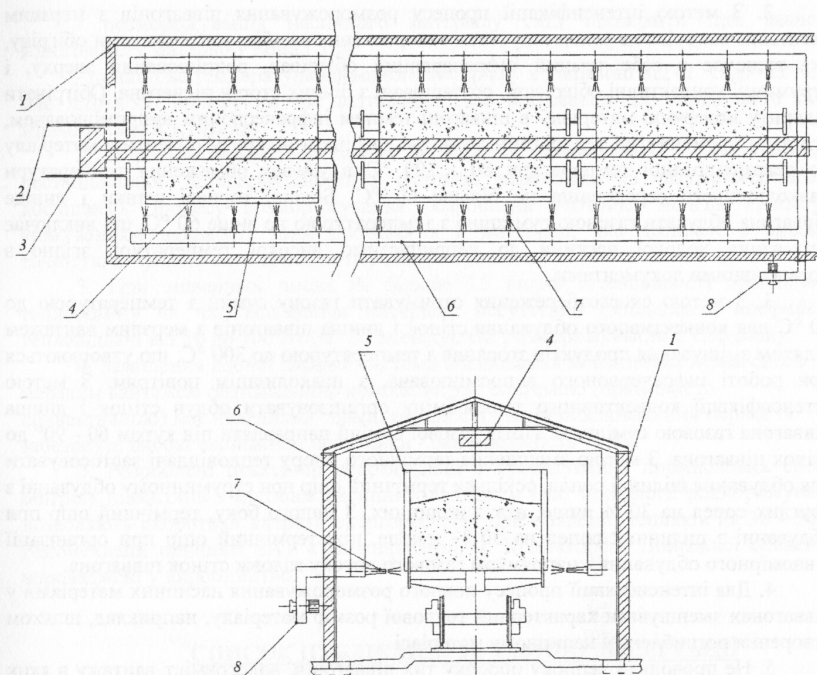


Рис. 10. Схема розміщення системи інфрачервоного і конвективного обігріву при комбінованому методі: 1 - зовнішні огороження; 2 - залізнична колія; 3 - палинковий блок інфрачервоного випромінювача; 4 - темний інфрачервоний випромінювач; 5 - піввагон з мерзлим насипним матеріалом; 6 - повітропровід; 7 - соплو конвективного обігріву; 8 - вентилятор.

Запропонована система є малоінерційною, що дозволяє здійснювати її періодичну роботу з метою енергозбереження і скорочує втрату енергоресурсів на початку і в кінці процесу розморожування.

Розроблені наступні практичні рекомендації з проектування систем зовнішнього обігріву піввагонів з мерзлим насипним вантажем і з технології розморожування:

1. Здійснювати попередню оцінку тривалості розморожування насипного матеріалу за запропонованою уточненою математичною моделлю процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом.

2. З метою інтенсифікації процесу розморожування піввагонів з мерзлим насипним матеріалом рекомендується використання комбінованої системи обігріву, яка включає в себе темний інфрачервоний обігрівач, розташований зверху, і струминні конвективні обігрівачі, розташовані з бічних сторін піввагона. Обігрівачі відкриті поверхню матеріалу в піввагоні темним інфрачервоним випромінювачем, оскільки променистий теплообмін дозволяє нагрівати відкриті поверхню матеріалу до рекомендованої температури 80 - 100 °С в умовах обмеження температури навколишнього середовища не більше 60 °С. Бокові, торцеві стінки і днище піввагона обдувати газовою сумішшю з температурою не вище 60 °С, що виключає нагрівання ходової частини до неприпустимо високої температури згідно з нормативними документами.

3. З метою енергозбереження отримувати газову суміш з температурою до 60 °С для конвективного обдування стінок і днища піввагонів з мерзлим вантажем шляхом змішування продуктів згорання з температурою до 300 °С, що утворюються при роботі інфрачервоного випромінювача, з навколишнім повітрям. З метою інтенсифікації конвективного теплообміну організувати обдув стінок і днища піввагона газовою сумішшю. Потік газової суміші направляти під кутом 60 - 90° до стінок піввагона. З метою зменшення термічного опору тепловіддачі застосовувати для обдування щілинні сопла, оскільки термічний опір при струминному обдуванні з круглих сопел на 30 % вище, ніж з щілинних. З іншого боку, термічний опір при обдуванні з щілинних сопел на 50 % менше, ніж термічний опір при організації рівномірного обдування з напрямком газового потоку вздовж стінок піввагона.

4. Для інтенсифікації процесу повного розморожування насипних матеріалів у піввагонах зменшувати характерний теплової розмір матеріалу, наприклад, шляхом створення поглиблень у насипному матеріалі.

5. Не проводити теплову обробку тих піввагонів, вологовміст вантажу в яких не перевищує 5 %.

6. Для ефективного розвантаження піввагонів з мерзлим насипним матеріалом забезпечити мінімальну товщину талого шару матеріалу 100 мм, що відповідає часу розморожування при максимальному вологовмісті до 20 % не більше 2 годин. При цьому значення початкової температури матеріалу не враховується.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

Проведені роботи по експериментальному і теоретичному дослідженню теплообміну при розморожуванні насипних матеріалів в залізничних піввагонах.

1. Отримані дослідні дані щодо зміни температурних полів кварцового піску різного вологовмісту, що розморожується, від різних початкових температур дозволили зробити наступні висновки.

- найбільший вплив на швидкість руху межі розділу фаз (межі відтавання) має вологовміст матеріалу. При збільшенні вологовмісту від 5 до 20 % час відтавання збільшується до 5 разів.

- розморожування насипного матеріалу слід проводити при значенні вологовмісту матеріалу понад 5 %.

- початкова температура насипного матеріалу в діапазоні від -2 °С до -22 °С не має істотного впливу на час відтавання (час відтавання для кварцового піску збільшується в 1,1 разів).

2. За результатами теоретичних досліджень математичних моделей процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом та експериментальних досліджень процесу розморожування розроблена уточнена модель процесу з урахуванням наявності зони протавання в матеріалі, яка дозволяє з високою точністю розраховувати тривалість розморожування.

3. При значеннях числа Ві більше 15 вплив інтенсивності зовнішнього теплообміну на час відтавання матеріалу несуттєвий (збільшення коефіцієнта тепловіддачі від 30 до 100 Вт/(м²·К) зменшує час розморожування в 1,05 рази).

4. Заміщення діючої парової системи опалювання залізничних піввагонів з мерзлим вантажем оптимальною комбінованою системою (променисто-конвективною) має невеликий термін окупності - один опалювальний період та забезпечує високі економічні показники - рентабельність 70 %.

5. Розроблені практичні рекомендації з проектування промислових систем обігріву піввагонів з мерзлим насипним вантажем і по технології розморожування дозволяють скоротити витрати енергоресурсів при опаленні тепляків на 30 - 50 %. Рекомендації прийняті ЗАТ «Теплоприбор», м. Краматорськ Донецької області та впроваджені у виробництво.

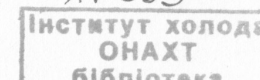
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кологривов М.М. Особенности исследования нестационарного теплообмена при размораживании насыпных грузов [Текст] / М.М. Кологривов, Т.А. Сагала // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: зб. наукових праць міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: Вид-во ОДАХ, 2007. – С. 69 - 70. *Особистий внесок автора: теоретичне порівняння процесів нестационарної теплопровідності з фазовим переходом та нестационарної теплопровідності без фазового переходу.*

2. Сагала Т.А. Аналитическое описание нестационарной теплопроводности с наличием фазового перехода для расчета времени размораживания насыпных материалов [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 1 (117). – С. 41 - 46. *Особистий внесок автора: розробка методики уточнення існуючої математичної моделі нестационарної теплопровідності з фазовим переходом для наближення її розрахункових результатів до реальної картини процесу.*

3. Сагала Т.А. Влияние температуры стенки полувагона и наличия зоны протавания в материале на процесс размораживания сыпучего груза [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // Физика аэродисперсных систем: Межведомственный научный сборник. – Одесса: Изд-во ОНУ им. Мечникова И.И., 2011. – Выпуск 48. –

xv 993



С. 28 – 36. *Особистий внесок автора: узагальнення отриманих експериментальних даних по динаміці температурних полів насипного матеріалу при розморожуванні в залежності від тривалості процесу.*

4. Сагала Т.А. Выбор энергосберегающей системы обогрева полувагонов с мерзлым грузом [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2008. – № 1. – С. 33 - 41. *Особистий внесок автора: проведення чисельного аналізу величин зовнішніх і внутрішніх термічних опорів при розморожуванні насипного матеріалу в залізничних піввагонах.*

5. Сагала Т.А. Изменение температуры стенки полувагона при размораживании сыпучих грузов [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // Актуальні проблеми енергетики і екології: зб. наукових праць міжнародної науково-технічної конф. – Одеса: Вид-во ОДАХ, 2011. – С. 80 – 82. *Особистий внесок автора: експериментальні дослідження зміни температури поверхні насипного матеріалу при розморожуванні в залежності від тривалості процесу.*

6. Сагала Т.А. Основное направление исследований для разработок эффективного метода размораживания полувагонов с мерзлым грузом [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування і рефрижерації: матеріали міжнародної науково-технічної конференції. В 2-х ч. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2008. – С. 165 - 167. *Особистий внесок автора: теоретичний аналіз ефективності роботи існуючих систем обігріву піввагонів з мерзлим насипним матеріалом.*

7. Сагала Т.А. Особенности «пленочного» размораживания насыпных грузов [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології»: зб. наукових праць міжнародної науково-технічної конф. – Одеса: Вид-во ОНАХТ, 2013. – С. 27 - 28. *Особистий внесок автора: огляд особливостей процесу нестационарної теплопровідності при розморожуванні насипних матеріалів (наявність фазового переходу, наявність границі фазового переходу, що рухається, стрибкоподібна зміна властивостей на цій границі).*

8. Сагала Т.А. Примененние математических моделей нестационарной теплопроводности с фазовым переходом компонента в расчетах размораживания насыпного груза [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // Холодильная техника и технология. – 2008. – № 4 (114). – С. 46 - 51. *Особистий внесок автора: чисельний аналіз відомих математичних моделей процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом та їх порівняння.*

9. Сагала Т.А. Результаты экспериментального исследования нестационарного теплообмена при размораживании насыпных материалов [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: зб. наукових праць міжнародної науково-технічної конф. – Одеса: Вид-во ОДАХ, 2009. – С. 161 - 163. *Особистий внесок автора: конструювання експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень по визначенню динаміки формування температурних полів при розморожуванні насипного матеріалу (піску) при різних значеннях його вологовмісту.*

10. Сагала Т.А. Физическая модель процесса размораживания зернистых материалов [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // Еколого-енергетичні проблеми сучасності:

зб. наукових праць всеукраїнської науково-технічної конф. – Одеса: Вид-во ОДАХ, 2012. – С. 74 – 75. *Особистий внесок автора: виявлення нового фізичного уявлення процесу розморожування насипних матеріалів на підставі проведених експериментальних досліджень.*

11. Сагала Т.А. Эффективность конвективного обогрева железнодорожных вагонов с мерзлым грузом [Текст] / Т.А. Сагала, М.М. Кологривов // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 3 (119). – С. 56 - 61. *Особистий внесок автора: чисельний аналіз ефективності різних способів конвективного обдуву піввагонів, розробка дослідної комбінованої (променисто-конвективної) системи обігріву піввагонів з мерзлим насипним матеріалом.*

12. Шкурдода Т.А. Результаты исследования нестационарного теплообмена при размораживании полувагонов с влажным мерзлым песком [Текст] / Т.А. Шкурдода, М.М. Кологривов // Еколого-енергетичні проблеми початку ХХІ століття: зб. наукових праць міжвузівської студентської науково-технічної конференції. – Одеса: Вид-во ОДАХ, 2003. – С. 35 - 37. *Особистий внесок автора: чисельний аналіз впливу визначальних параметрів (температури навколишнього середовища, форми й розмірів вантажу, коефіцієнтів теплоїддачі від середовища до насипного матеріалу) на час розморожування матеріалу.*

АНОТАЦІЯ

Сагала Т.А. Теплообмін при розморожуванні насипних матеріалів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук за фахом 05.14.06 – Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика. - Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2013.

Дисертаційна робота присвячена експериментальному і аналітичному дослідженню теплообміну при розморожуванні вологих насипних матеріалів, що змерзлися в залізничних піввагонах.

Проведений огляд відомих матеріалів з проблеми відновлення сипучості мерзлих насипних вантажів у залізничних піввагонах. Описані та порівняні механічний і тепловий способи відновлення сипучості мерзлих насипних матеріалів в залізничних піввагонах. Проведений огляд сучасного стану теорії теплопровідності неоднорідних структур.

Проведені експериментальні дослідження динаміки формування талого шару для випадку «плівкового» розморожування насипних матеріалів. Отримані дослідні дані по температурних полях при розморожуванні насипного матеріалу (кварцового піску) різного вологовмісту.

Розглянуто проблему теоретичного визначення достовірного часу розморожування мерзлих насипних матеріалів, які перевантажуються з залізничних піввагонів в холодний період року. Проведено чисельний аналіз математичних

моделей процесу нестационарної теплопровідності з фазовим переходом, а також інженерної методики визначення глибини відтавання.

Уточнена математична модель нестационарного теплообміну з фазовим переходом з урахуванням нового фізичного уявлення процесу для узгодження з дослідними даними.

Розроблені практичні рекомендації по проектуванню промислових систем обігріву піввагонів з мерзлим насипним вантажем і по технології розморожування. Запропоновано схему нової комбінованої системи обігріву, яка має ряд істотних переваг перед відомими системами для аналогічної мети.

Ключові слова: час розморожування, нестационарна теплопровідність, фазовий перехід, насипний матеріал, променистий обігрів, конвективний обігрів.

АННОТАЦИЯ

Сагала Т.А. Теплообмен при размораживании насыпных материалов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2013.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию теплообмена при размораживании насыпных материалов в железнодорожных полувагонах.

Проведен обзор известных материалов по проблеме восстановления сыпучести мерзлых насыпных грузов в железнодорожных полувагонах. Описаны и сравнены механический и тепловой способы восстановления сыпучести мерзлых насыпных материалов. Обосновано применение наиболее перспективного способа.

Проведен обзор современного состояния теории теплопроводности неоднородных структур. Описаны математические модели процесса нестационарной теплопроводности с фазовым переходом, основанные на решении задачи Стефана. Описана инженерная методика расчета глубины оттаивания и промерзания грунтов, которая используется в строительстве в районах с вечной мерзлотой. Сделаны выводы о возможности применения данных моделей в расчетах толщины талой зоны при «пеночном» размораживании насыпных грузов в железнодорожных полувагонах.

Описан экспериментальный стенд для измерения поля температур опытного образца влажного мерзлого насыпного материала при его размораживании. Разработана методика проведения экспериментальных исследований. Проведены экспериментальные исследования динамики формирования талого слоя для случая «пеночного» размораживания насыпных материалов. Получены опытные данные по температурным полям при размораживании насыпного материала (кварцевого песка) различного влагосодержания. Выявлено новое физическое представление

процесса размораживания насыпного материала с фазовым переходом одного из компонентов.

Рассмотрена проблема теоретического определения достоверного времени размораживания мерзлых насыпных материалов в железнодорожных полувагонах в холодный период года. Проведен численный анализ математических моделей процесса нестационарной теплопроводности с фазовым переходом, а также инженерной методики определения глубины оттаивания. Выделена математическая модель процесса, результаты расчетов которой наиболее близки к опытным данным по продолжительности процесса оттаивания насыпного материала. Уточнена математическая модель нестационарной теплопроводности с фазовым переходом с учетом нового физического представления процесса для согласования с экспериментальными данными путем введения эмпирического коэффициента. Использование для расчетов уточненной модели процесса позволит с большей точностью определять продолжительность обогрева железнодорожных полувагонов, что характеризуется ресурсо- и энергосбережением, а также повышением экономической эффективности предприятия в целом.

Проведен анализ внешнего лучистого и конвективного теплообмена при размораживании мерзлых насыпных грузов в железнодорожных полувагонах. Отмечено, что процесс размораживания ограничивается внутренним термическим сопротивлением материала, поэтому организация слишком интенсивного внешнего теплообмена не ускоряет процесс размораживания, а увеличивает потери теплоты в окружающую среду. Для эффективной разгрузки полувагонов с мерзлым насыпным материалом и для интенсификации процесса размораживания разработаны практические рекомендации по проектированию промышленных систем обогрева полувагонов с мерзлым насыпным грузом и по технологии размораживания. Предложена система новой комбинированной (лучисто-конвективной) системы обогрева, которая включает в себя темный инфракрасный излучатель и струйные конвективные обогреватели. Предложенная схема имеет ряд существенных преимуществ перед известными системами для аналогичной цели.

Ключевые слова: время размораживания, нестационарная теплопроводность, фазовый переход, насыпной материал, лучистый обогрев, конвективный обогрев.

SUMMARY

Sagala T.A. The Heat Exchange at Defrosting of Bulk Cargoes. – Manuscript.

Thesis for candidate degree of Technical Sciences according major 05.14.06 – Technical Thermal Physics and Industrial Heat and Power Engineering. – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2013.

The thesis is about following scientific problem experimental and theoretical research heat transfer for defrosting of bulk cargoes in railway gondola cars.

The literature review for friability recovery of frozen bulk cargoes in railway gondola cars is performed. The mechanical and heat recovery friability methods of frozen

bulk cargoes in railway gondola cars are described and compared. The modern theory of heat conduction for heterogeneous structures is reviewed.

Experimental study for formation dynamics of melting layer for "membranous" defrost of the bulk cargoes case is conducted. The experimental data according temperature fields for bulk cargo defrosting (high-silica sand) with different moisture content are obtained.

The reliable defrost time theoretical determination problem for frozen bulk cargoes in railway gondola cars for cold season is considered. The numerical analysis of common mathematical models for non-stationary heat conduction processes with a phase transition and engineering methods for melt depth determination are conducted.

The mathematical model for non-stationary heat conduction with a phase transition is refined. This model takes into account new physical process representation for experimental data matching by empirical coefficient incorporation.

The practice recommendations for industrial heating systems design of railcars with the frozen cargoes and on defrosting technology are developed. The system of the novel combined (radiant-convective) is proposed. This system has dark infrared and jet-stream heaters. System has several significant advantages front common systems for a similar purpose.

Keywords: defrosting time, non-stationary heat conduction, phase transition, bulk cargo, radiant heating, convective heating.

Підписано до друку 30.10.2013 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times. Друк різнографічний.
Зам. № 32. Тираж 100 прим.

Надруковано ТОВ "Зовнішпрекламсервіс"
65011, м.Одеса, вул. Успенська, 40.
тел. 37-70-76, 777-70-76