

**«Термофургон»**  
(шифр)

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ  
ТЕРМОФУРГОНА НА ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ВАНТАЖУ»**

**Галузь:**  
Енергетичне машинобудування

**Секція:**  
Холодильна та криогенна техніка

2020/2021

## АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Транспортування продуктів або іншого вантажу, які повинні зберігатися за певних температурних умов, призводить до ускладнення конструкції та підвищення вартості транспортних засобів. При відносно нетривалих термінах транспортування температура продукту, що перевозиться, істотно змінитися не встигає. В цьому випадку транспортні засоби не потребують додаткового оснащення, або можливий дешевший варіант термічної ізоляції, який пропонується та досліджується в роботі. Актуальність роботи визначається зниженням затрат на оснащення фургона, що відображається на вартості транспортування відповідних вантажів, вартості товару в торгових підприємствах, підвищенню конкурентних можливостей.

**Мета роботи:** дослідити тривалість терміну транспортування вантажу з дотриманням заданих температурних умов в термофургоні з запропонованою ізоляцією при різних умовах перевезення.

**Завдання роботи:**

1. Зробити експериментальну модель досліджуємого об'єкта (вантаж в фургоні з запропонованою термоізоляцією), виконати експериментальні дослідження.
2. Створити математичну модель досліджуємого об'єкта. Виконати її апробацію порівняння експериментальних та розрахункових даних.
3. Провести чисельне дослідження впливу умов перевезення на його тривалість з дотриманням температурних умов вантажу. Розробити рекомендації.

**Методика дослідження:** фізичне та математичне моделювання температурного поля вантажу в фургоні з запропонованою термоізоляцією.

**Загальна характеристика роботи:** 25 стр., 3 таблиці, 9 рисунків, 1 додаток, 10 джерел інформації.

**Ключові слова:** ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЯ, ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ, ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, ТЕРМІЧНИЙ ОПІР, ТРИВАЛІСТЬ ОХОЛОДЖЕННЯ, ТЕРМОФУРГОН, ТЕРМОІЗОЛЯЦІЯ.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Аналітичний огляд .....	5
1.1 Конструкція традиційного ізотермічного транспорту .....	5
1.2 Матеріали для теплоізоляції термофургона, їх фізичні властивості .....	10
2 Розрахункова частина .....	16
2.1 Опис моделі теплоізольованого фургона і результати експериментальних досліджень .....	16
2.2 Математична модель об'єкту .....	18
2.3 Апробація математичної моделі .....	20
2.4 Результати математичного експерименту для термофургона.....	21
Висновки .....	25
Список джерел інформації .....	26
Додаток А. Програма розрахунку.....	27

## ВСТУП

Транспортування продуктів або іншого вантажу, які повинні зберігатися за певних температурних умов, призводить до ускладнення конструкції транспортних засобів.

Якщо перевезення здійснюється за короткий проміжок часу, то температура продукту, що перевозиться, істотно змінитися не встигає. В цьому випадку, як правило, транспортні засоби не потребують додаткового оснащення. Але якщо тривалість перевезення велика, то при високих (чи низьких) температурах оточуючого середовища можливі неприпустимі зміни температури. Це, передусім, торкається перевезень швидкопсувних продуктів: фруктів та овочів, молочної та м'ясної продукції. В цьому випадку температура продукції, що перевозиться, має бути низькою для уповільнення протікання біологічних процесів з одного боку, але, з іншою, вона не повинна зменшуватися нижче 0°C для запобігання замерзанню води в продуктах.

Для деяких продуктів вимагається строго дотримувати обмежений інтервал температури. Недотримання цього може привести, у кращому разі, до погіршення якості продуктів, а в гіршому, до безповоротного їх псування.

Для виконання вимог дотримання температурного інтервалу при перевезеннях транспортний засіб повинен мати додаткове оснащення, яке потрібне як в літній період, коли температура повітря, так і в зимовий період, коли повітря має низькі (нижче 0°C) температури. У найбільш простому варіанті оснащенням є теплоізоляція в фургоні автомобіля. Такий вид оснащення подовжує тривалість перевезення без порушень температурного режиму. Складніше і дорожче оснащення складається з теплоізоляційного фургона і устаткування для підтримки температури на заданому рівні: холодильної установки і теплогенератора. І перший і, особливо, другий варіанти оснащення фургона призводять до додаткових матеріальних витрат. Особливо це відчутно, якщо автотранспорт знаходиться в оренді, а перевезення не є систематичними.

У роботі розглядається питання впливу спрощеного варіанта теплоізоляції на температурний режим вантажу, тривалість перевезення без виходу за допустимий температурний інтервал.

Актуальність роботи визначається зниженням затрат на оснащення фургона, що відображається на вартості перевезень, вартості товару в торгових підприємствах, підвищенню конкурентних можливостей. При значному об'ємі перевезень виникає можливість отримувати істотну економію.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Конструкція традиційного ізотермічного транспорту

Для перевезення деяких видів вантажу вимагаються особливі умови, зокрема - температурний режим і вологість. До таких вантажів відносяться продукти харчування, фармакологічна і інша продукція. При їх транспортуванні неможливо обійтися без вантажних автомобілів з ізотермічним фургоном.

На сьогодні найбільшого поширення набув ізотермічний фургон, виготовлений з так званих сендвіч- панелей, які з'єднуються між собою за допомогою герметика. Подібні панелі складаються з двох листів досить міцного гладкого пластика, проміжок між якими заповнений спіненим поліуретаном. І тут вже спостерігається пряма залежність ціни фургона від товщини теплоізоляції і, відповідно, величини втрат тепла.

Важливе значення має і конструкція підлоги, через яку йде більше половини теплообміну з оточуючого середовища. Тому підлога ізотермічних фургонів також робиться з панелей.

Рефрижератори бувають: а) Рамні, б) Напіврамні - рама йде не до кінця будки. в) Безрамні.

Передня стінка на більшості імпорتنих термофургонів за умовчанням адаптована під установку холодильного агрегату. Тобто, в стінці фургона встановлюються заставні деталі і робляться канали для трубок з фреоном. Тому такі фурғони можна легко дообладнувати холодильною установкою. В українських фургонах заставні елементи відсутні.

Ізотермічні фурғони можуть бути різної конструкції: одноб'ємними, мультітемпературними (з термоперегородками), багатодверними, призначеними для перевезення м'ясних туш, мати вбудовані стелажі, профілі для кріплення вантажу, бічні двері, ролети для перевезення напоїв і так далі. Існують фурғони для різної глибини заморожування. При цьому виробники стараються досить тонко варіювати межі температурних режимів, як для

фургонів, так і для холодильних установок. Наприклад, це охолодження до температури  $0^{\circ} - +5^{\circ}\text{C}$  (овочі, фрукти, квіти), легке заморожування до  $0^{\circ} - -2^{\circ}\text{C}$  і  $0^{\circ} - -4^{\circ}\text{C}$  (охоложене м'ясо і риба), а потім -  $10^{\circ} - -20^{\circ}\text{C}$ , при яких перевозяться продукти середнього заморожування (морожене м'ясо). І, нарешті, глибоке заморожування при  $-35^{\circ}\text{C}$  (пельмені, м'яке і тверде морозиво).

При цьому, називаючи цифри тепловтрат, не можна не відмітити, що для самих сендвіч-панелей і для зроблених з них фургонів вони істотно відрізняються. Так, якщо термофургон з товщиною сендвіч-панелі 30 мм, має тепловтрати близько  $0,85 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ , то теплопровідність самої плити приблизно в 17 разів нижче (близько  $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ ) [1]. Пояснюється це тим, що тепловтрати йдуть по стиках плит, по дверному отвору і, найголовніше, під час навантажувально-розвантажувальних робіт. Тому для фургонів цей показник зазвичай нормується з урахуванням середньої кількості відкриття дверей за робочий день. При цьому найпростіший тонкостінний термофургон, виготовлений з сендвіч-панелей товщиною 50 мм, розраховано на підтримку температури від  $+12^{\circ}\text{C}$  до  $-10^{\circ}\text{C}$  за наявності рефрижератора. Такі параметри має звичайний фургон для перевезення охолоджених і слабозаморожених продуктів (в т.ч. молочної продукції і ковбасних виробів) класу FNA відповідно до міжнародного стандарту АТР. Фургони бувають металеві і пластикові. Чим товщі стінки, тим термофургон краще тримає температуру, але вона важча, дорожча, має менший корисний об'єм, і, відповідно, менше вантажопідйомність.

Ізотермічні фургони без рефрижератора в розвинених країнах практично не виробляються і не експлуатуються. Проте, у нас широко поширене явище. Деякі перевізники, що працюють на внутрішніх лініях, виконують перевозки в межах України середньозаморожених продуктів в ізотермічних фургонах без рефрижератора. Звичайно, подібне можливо тільки при дотриманні цілого ряду умов: хорошої термоізоляції фургона, попереднього заморожування продукту, максимального заповнення внутрішнього простору, рейсу порівняно невеликої

тривалості (влітку - в межах 8-10 годин) і одночасного вивантаження усієї партії товару.

Наприклад, якщо у термофургона з товщиною стінки 60 мм коефіцієнт теплопередачі  $0,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$  (з урахуванням середньої кількості відкриття дверей за зміну), то для 80-100 мм –  $0,24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ , а для 120 мм –  $0,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ . Але якщо дверей фургона не відкривати, то тепловтрати буде істотно менше. Фургон класу FRC, з товщиною стінок/підлоги/стелі 80/120/100 мм, призначений для температури  $-20^\circ\text{C}$ . Вважається, що такий фургон при повному завантаженні і поломці холодильного агрегату, на  $30$ -градусній жарі за 15 годин втрачає  $2,5$ -  $3^\circ\text{C}$  [1].

До найбільш складної і дорогої конструкції відносяться фургони класу RRC, маючи більш товсті стінки і призначені для перевезення морозива, заморожених полуфабрикатів (пельмені, вареники) і так далі. Такі фургони зазвичай мають товсті стінки (100- 120 мм), 6-14 дверей, а внутрішній простір в них розділений сітчатими перегородками, запобігаючими переміщенню вантажу. Крім того, вони оснащуються звичайним холодильним агрегатом, що працює від зовнішньої електричної мережі, і ряду евтектичних плит, встановлених під стелею фургона і виконуючими функцію акумулятора холоду. Вночі такий агрегат підключається до зовнішньої електричної мережі. При роботі агрегата температура у фургоні знижується до  $-32^\circ\text{C}$  та акумулятори холода заряджаються – евтектичний розчин в них охолоджується та кристалізується. Після зарядки автомобіль завантажується і розвозить вантаж по торговельним точкам. Після денного терміну роботи (півдоби) температура в його фургоні має бути не вище  $-25^\circ\text{C}$ . Подібний підхід дозволяє зменшити витрату палива і заощадити на енергоносіях, оскільки холодильник, що працює від електромережі набагато економічніше за аналогічний агрегат з приводом від ДВС. Машини з таким оснащенням призначені для роботи в межах міста або для поїздок на невеликі відстані (невеликі терміни).

Ще один тип ізотермічного фургона призначений для перевезення м'ясних туш. Його особливістю є посилена міцність даху, оснащеного



спеціальними направляючими з крюками, на яких підвішуються м'ясні туші. У таких фургонах на дах може доводитися навантаження в 5 і більше тонн. Конструкція з несучим дахом досить складна, її вартість на 30-40% дорожче вартості звичайного теплоізолюваного типу. Тому на Україні випускаються досить дешеві замітники, що є підлоговими А-подібними стелажми для похилого перевезення туш.

Термофургон з стінками максимальної товщини дозволить мінімально використовувати холодильний агрегат, а у разі його поломки забезпечить безпроблемну доставку вантажу в цілості і неушкодженості. Але, в той же час, і коштує такий фургон дорожче, має більшу масу, менший корисний простір для вантажу. Тому вважається раціональним, щоб товщина стінок фургона відповідала температурному режиму вантажу, який планується перевозити найчастіше.

Додаткове устаткування. Не можна не відмітити, що багато виробників працюють над зменшенням тепловтрат, як під час руху, так і при навантажувально-розвантажувальних роботах. Для цього, наприклад, в дверному отворі встановлюють шторку з прозорих полівінілхлоридних пластикових смуг (також використовуються в м'ясних відділах супермаркетів). Вони перешкоджають повітрообміну фургона та зовнішньої середовища. Смугоста конструкція шторки дозволяє без перешкод виконувати навантажувально-розвантажувальні роботи з суттєво меншими тепловтратами за рахунок повітрообміну. Подібна система не лише зменшує теплообмін рефрижератора з зовнішньою середовищем, але і запобігає попаданню туди пилу і комах.

Така шторка може, як жорстко закріплюватися в задній частині фургона, так і пересуватися по штанзі в поперечному напрямі, а також разом з штангою по направляючих вздовж термофургона. У поперечному перерізі смужки такої шторки плоскі, але по краях мають трубчастий переріз, щоб запобігти порізам об краї стрічки, яка твердіє при зниженні температури.

Крім того, в рефрижераторах встановлюються і термопергородки, що дозволяють підтримувати в окремих відсіках фургона різну температуру.

Якщо весь об'єм рефрижератора заповнений однорідним вантажем, перегородки не потрібні. Але коли вантаж неоднорідний, коли загрузка машини часткова при відсутності термоперегородок холодильна установка все одно повинна працювати для охолодження до  $-18^{\circ}\text{C}$  всього об'єму фургона. При цьому витрачається зайве паливо і виробляється зайвий моторесурс холодильної установки. Тому при частковому завантаженні для економії холодильник перемикають на знижену потужність для охолодження лише окремих відсіків термофургона. Подібна економія без відповідних засобів автоматизації може призвести до неприйняттого підвищення температури вантажа. Для запобігання цьому можливе встановлення в рефрижераторах самописців - термографів, щоб завжди можна було контролювати та перевіряти температурний режим під час перевезення любого вантажу. Звичайно, таке обладнання підвищує вартість оснащення термофургона. Але при наявності термоперегородок, відділяючих охолоджуваний простір від іншої частини фургона, будуть нижчі енергетичні (а значить і грошові) розходу на підтримку необхідної температури..

При перевезенні продуктів, що вимагають різних температурних режимів також потрібна перегородка. Наприклад, використовуючи термоперегородки, можна одночасно перевозити заморожене м'ясо (рибу), молочні продукти і фрукти.

Випускаємі термоперегородки відрізняються, передусім, своєю теплопропускаючою здатністю. Від цього залежить, відповідно, їх вартість і складність установки. Системи регулювання температури треба підбирати залежно від того, на яку відстань (а вірніше, як довго) перевозитиметься вантаж.

Найпростіша перегородка - шторка використовується для перевезень охолоджуваних вантажів на невеликі відстані. Як теплоізолюючий матеріал в ній використаний наповнювач з поліефірних волокон, покритий з обох боків алюмінієвою фольгою. Така перегородка забезпечує ефективний коефіцієнт теплопередачі  $0,79 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$  [1]. Вона закріплюється усередині фургона за

допомогою штанг, що встановлюються вертикально, або горизонтально. А в транспортному положенні таку перегородку - шторку можна скрутити в невеликий рулон діаметром біля півметра.

Терморегуляція в даному випадку здійснюється природним способом. При цьому в передню частину рефрижератора завантажують продукти, що вимагають більшого охолодження, а в задню – з меншим охолодженням. Холодильна установка при цьому охолоджує тільки передню частину фургона, а перегородка дозволяє декілька годин утримувати в задній частині фургона плюсову температуру, яка вирівнюється в обох частинах фургона приблизно через 8 годин. Така перегородка порівняно недорога, але вона дозволяє підтримувати необхідний температурний режим лише при перевезенні вантажів на досить невелику відстань.

Для дальших перевезень використовуються напівжорсткі перегородки з практично такими ж тепловтратами, як у 60-міліметрової стінки рефрижератора. Коефіцієнт теплопередачі в данному випадку буде близько  $0,35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  [1]. Подібна перегородка дорожча за "шторку", і може бути як цілісною, так і складатися з двох або трьох частин, включаючи двері. Закріплюється вона за допомогою штанг і тримається за рахунок тертя гумових ущільнювачів об стінки фургона. Така перегородка може бути встановлена водієм вручну в будь-якій частині причепа. А при навантажувально - розвантажувальних роботах вона піднімається і фіксується під дахом фургона.

Аналогічна перегородка може мати жорстку конструкцію. При цьому в усьому іншому, окрім пружинних кріплень і вищої ціни, вона нічим не відрізняється від напівжорсткого аналога.

Розглянуті вище конструкції широко застосовуються для перевезень, але мають істотний недолік - високу вартість або вартість оренди.

## **1.2 Матеріали для теплоізоляції термофургона , їх фізичні властивості**

По виду сировини виділяють такі вироби різного класу якості : органічні, неорганічні і змішані.

Органічні теплоізоляційні матеріали - це пробкова кора, целюлозна вата, пінополістирол, деревесне волокно, пінопласт, паперові гранули, торф. Ці види будівельних теплоізоляційних матеріалів застосовуються виключно усередині приміщення, щоб мінімізувати високу вологість. Проте природні будівельні термоізолятори не вогнетривкі.

1. Неорганічні теплоізоляційні матеріали - гірські породи, скловолокно, піноскло, мінераловатні утеплювачі, спінений каучук, комірчасті бетони, кам'яна вата, базальтове волокно. Хороший ізолятор тепла з цієї категорії відрізняється високою мірою паропроникнення і вогнестійкості. Особливо ефективно утеплення виробом з гідрофобізуючими добавками.

2. Змішані теплоізоляційні матеріали - перліт, азбест, вермикулит і інші утеплювачі з спінених гірських порід. Відрізняються найкращою якістю, але і підвищеною вартістю. Це найдорожчі марки кращих теплоізоляційних матеріалів. Нестача грошових средств призводить до більш рідкого застосування таких утеплювачей для теплоізоляції, ніж економніших матеріалів.

Теплопровідність теплоізоляції змінюється залежно від температури в середньому за лінійним законом і приблизно може бути визначена по залежності [2]:

$$\lambda_t = \lambda_0 + at \quad (1.1)$$

де  $\lambda_0$  - коефіцієнт теплопровідності при  $0^\circ\text{C}$ ;  $t$  - температура в  $^\circ\text{C}$ ;  $a$  - константа, залежна від природи матеріалу.

Пористі пластмаси виробляють на основі, полівінілхлоридних, поліуретанових, фенольних і карбамідних смол полістиролів.

Пінопласт і пінополістирол. Підрозділяються на жорсткі та еластичні. До цих матеріалів відносяться два види виробів - термопластичні і термонепластичні утеплювачі. Перші при повторному нагріванні розм'якшуються (пінополістирол, пінополівінілхлорид), а другі - твердіють

спочатку і не розм'якшуються при повторному нагріві (пінополіуретан, органічні фенолформальдегідні смоли, кремнієві, епоксидні).

Полістирольний пінопласт (пінополістирол) є найбільш поширеним теплоізоляційним матеріалом, що складається з сферичних спекшихся між собою часток спіненого полістиролу.

Пінополістирол є твердою піною із замкнутими порами. Це жорсткий матеріал, стійкий до дії води, більшості кислот і лугів. Істотний недолік пінополістиролу - його горючість. При температурі 80°C він починає тліти. Тому його рекомендують влаштовувати в конструкціях, замкнутих з усіх боків вогнетривкими матеріалами. Він використовується як утеплювач в шаруватих панелях із залізобетону, алюмінію, азбестоцементу і пластика [2, 3].

Екструдований полістирол - найпопулярніший з пінопластів, оскільки має масу перваг:

- низька міра вологиопоглинання;
- висока міра теплоізоляції;
- морозостійкість;
- великий запас міцності;
- простота укладання;
- низька вартість.

До недоліків можна віднести горючість, не пропускання повітря і крихкість при низьких температурах (особливо при зниженні температури нижче 0°C при мокрому пінопласті).

Пінополіуретан виготовляють жорстким і еластичним. Цей виріб складається з мікрокапсул, заповнених повітрям, які утворюються в результаті взаємодії поліола і ізоціоната. Поліуретановий поропласт випускають у вигляді матів з пористого поліуретану з коефіцієнтом теплопровідності 0,04 Вт/(м К) розміром 2×1×(0,03 – 0,06) м, а також твердих і м'яких плит щільністю (30 – 150) кг/м і теплопровідністю (0,022 – 0,03) Вт/(м К). Простота виготовлення дозволяє отримувати з цього матеріалу плити не лише в заводських умовах, але

і безпосередньо на будівництвах. При спеціальних добавках пінополіуретан не підтримує горіння.

Пінополіуретан має наступні характеристики [2, 3, 4]:

- низький коефіцієнт теплопровідності: 0,019 – 0,028 Вт/(м К);
- наноситься методом розпилу, створюючи суцільне покриття без теплових містків;
- легка вага застиглої піни не чинить тиску на конструкцію;
- простота застосування без яких-небудь кріплень дає можливість провести утеплення поверхні з будь-якою конфігурацією;
- довгий термін служби, що включає стійкість до морозів і жару, будь-яких атмосферних осадків, гниення;
- безпека для людини і оточуючої середовища;
- не руйнує металеві елементи конструкції, а навпроти, створює для них антикорозійний захист.
- ідеально підходить для теплоізоляції нерівних поверхонь;
- еластичність і гнучкість;
- відсутність стиків і швів;
- захищає від температур в діапазоні від - 250°C до +180°C;
- стійкість до біологічної дії.

Пеноізол відноситься до нових високоефективних теплоізоляційних матеріалів і є застиглою піною із замкнутими порами. Залежно від введених в нього добавок він може бути жорстким і еластичним. При використанні як наповнювач тонко меленого керамзитового піску пеноізол стає важко займистим теплоізоляційним матеріалом. До температури 350°C він стійкий до дії вогню, при температурі до 500°C не виділяє токсичних речовин, окрім вуглекислого газу. Пеноізол має хорошу адгезію до поверхонь з цеглини, бетону і метала. Використовується для утеплення як різного роду житлових та промислових приміщень, так і теплоізоляції термокамер [4].

Алюмінієва фольга – один з ефективних утеплювачів. В той же час вона являється хорошою повітря- та пароізоляцією. Нині промисловість кольорової

металургії випускає фольгу завтовшки (0,005 – 0,2) мм. Алюмінієва фольга має блискучу сріблясту поверхню з великою відбивною здатністю. Велика частина потоку променистої теплоти, що падає на конструкцію, покриту фольгою, відбивається, завдяки цьому зменшуються тепловтрати через огорожуючі поверхні, підвищується теплозахист. Алюмінієва фольга для будівництва випускається в рулонах діаметром (8 – 43) см, завтовшки полотна (0,005 – 0,02) мм і шириною (10 – 460) мм [4].

Скловата або скляна вата - вид теплоізоляційного матеріалу, що набув великого поширення в будівництві, із-за таких її властивостей, як низька теплопровідність і щільність, а також невисока вартість. Скловата виходить при розплавленні оксидів  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з різними добавками. Мінеральна вата виготовляється пародутьєвим, повітрядутьєвим, газодутьєвим і відцентровим способами. Використовується кінетична енергія пари, що виходить з сопла і зустрічає на своєму шляху струмінь силікатного розплаву. Теплопровідність скловати різна і залежить від способу виготовлення виробів. Для засипки з щільністю (180-250)  $\text{кг/м}^3$  теплопровідність мінеральної вати залежно від температури, визначається по формулі [2]:

$$\lambda_t = 0,047 + 0,00058t . \quad (1.1)$$

Шлакова вата утворюється при тому, що розпиляло повітрям або парою розплавлених доменних шлаків. Утворюються довгі тонкі нитки. Теплопровідність шлакової вати при щільності 170-200  $\text{кг/м}^3$ , залежно від температури, визначається по формулі [2]:

$$\lambda_t = 0,06 + 0,000145t \quad (1.2)$$

Базальтове супертонке скловолокно БСТВ є високоефективним теплоізоляційним матеріалом, що має малу щільність (17 – 25)  $\text{кг/м}^3$  і коефіцієнтом теплопровідності (0,027 – 0,036)  $\text{Вт/(м К)}$ . З нього виготовляють мати, що мають хороший теплозахист і звукоізоляцію [2, 4].

Азбест один з найбільш високоякісних теплоізоляційних матеріалів. Його добувають з родовищ у вигляді білих тонких волокон.

Важливою властивістю цього теплоізоляційного матеріалу є велика температурна стійкість до 700°C. Щільність азбесту змінюється від 200 до 2500 кг/м<sup>3</sup> залежно від міри пресування. Самим нижчим видом азбесту з одним коротким волокном є 7-й сорт, що має наступну залежність теплопровідності від температури [2]:

$$\text{при щільності } 500 \text{ кг/м}^3 \quad \lambda_t = 0,107 + 0,00019t \quad (1.3)$$

$$\text{при щільності } 800 \text{ кг/м}^3 \quad \lambda_t = 0,14 + 0,00019t \quad (1.4)$$

Пресовані мати з мінеральної вати при щільності (200-280) кг/м<sup>3</sup> мають теплопровідність [2]:

$$\lambda_t = 0,052 + 0,00064t \quad (1.5)$$

Мінеральна пробка на бітумній основі з щільністю 270-350 кг/м<sup>3</sup> має теплопровідність залежно від температури [2]:

$$\lambda_t = 0,058 + 0,00076t \quad (1.6)$$

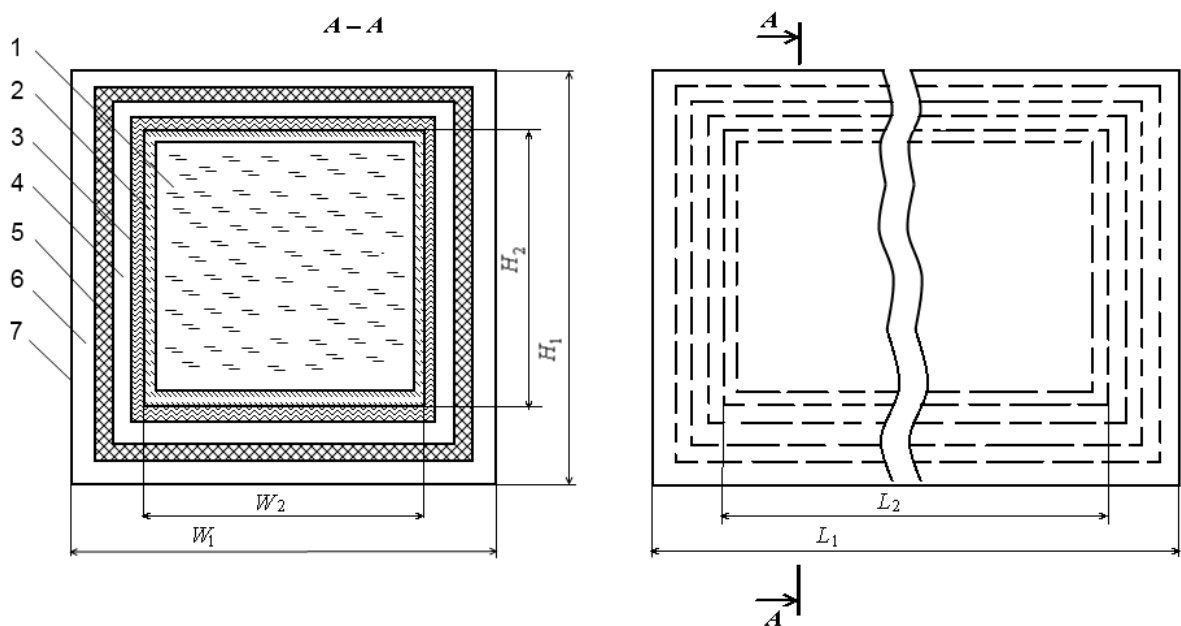
Піноскло є матеріалом, що виготовляється із скляного бою або кварцевого піску, вапняку, соди, тобто тих же матеріалів, з яких виробляють різні види стекол. Піноскло утворюється в результаті спікання порошку склобою з коксом або вапняком, які при високій температурі виділяють вуглекислий газ. Завдяки цьому в матеріалі утворюються великі пори, стінки яких містять найдрібніші замкнуті мікропори. Двоєкий характер пористості дозволяє отримати піноскло, що має залежно від щільності низький коефіцієнт теплопровідності (0,058 - 0,12) Вт/(м°К), має хороші показники водостійкості, морозостійкості, механічної міцності і не горючості. Піноскло використовують для утеплення стін, перекриттів, кровель, для ізоляції підвалів і холодильників [4, 5].



## 2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1 Опис моделі теплоізолюваного фургона і результати експериментальних досліджень

Для проведення досліджень по впливу характеристик теплоізоляції на температуру вантажу при його транспортуванні була створена модель досліджуваного об'єкту, схема якої представлена на рисунку 2.1 [6].



1 – вино; 2 – скляна пляшка; 3 – пакувальний картон;  
4, 6 – повітряні прошарки; 5 – спінена пенополіетиленова теплоізоляція; 7 – зовнішня оболонка (тент)

Рисунок 2.1 – Схема моделі

Як вантаж досліджувалося бутильоване вино в коробках, температура якого на початку процесу транспортування відповідає температурі сховища ( $10-11^{\circ}\text{C}$ ) і надалі при транспортуванні в зимовий період (негативні температури зовнішнього повітря) не повинна опускатися нижче  $2^{\circ}\text{C}$ .

Модель була скляною посудиною з розмірами  $L*W*H = 99*83*140$  мм. Наповнювачем була вода. Посудина поміщалася в картонну коробку (товщина двошарового гофрованого картону 2 мм), далі в спінену пенополіетиленову

теплоізоляцію і прогумовану зовнішню захисну оболонку. Зовнішні розміри моделі складають  $L*W*H$  116\*109\*166 мм. Між шарами з картону, спіненої пенополіетиленової ізоляції і прогумованого брезенту є повітряні проміжки товщиною приблизно 2 мм. В моделі їх наявність та розміри забезпечувалися проставками.

З описаною моделлю для апробації роботи створюваної математичної моделі охолодження вантажу уло проведено декілька експериментів для різних температурних умов зовнішнього повітря та його швидкості руху. Результати двох експериментів представлені на рисунку 2.2 [6]:

- 1) початкова температура води  $T_g=10^{\circ}\text{C}$ , температура повітря  $T_a = -22^{\circ}\text{C}$ , швидкість повітря 0 м/с (вільна конвекція);
- 2) початкова температура води  $T_g=11^{\circ}\text{C}$ , температура повітря  $T_a = -24^{\circ}\text{C}$ , швидкість повітря 15 м/с (примусова конвекція);.

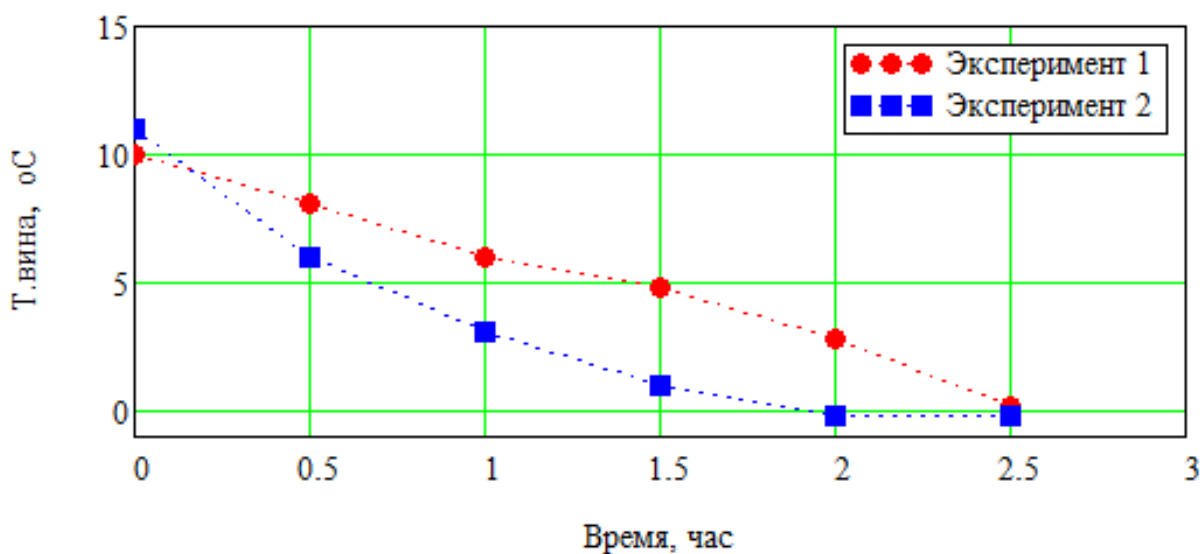


Рисунок 2.2 – Залежність зміни температури води в моделі від часу [6]

Тривалість охолодження води в посудині до  $2^{\circ}\text{C}$  склала в експерименті 1 – 2,2 години, а в експерименті 2 - 1,3 години.

## 2.2 Математична модель об'єкту

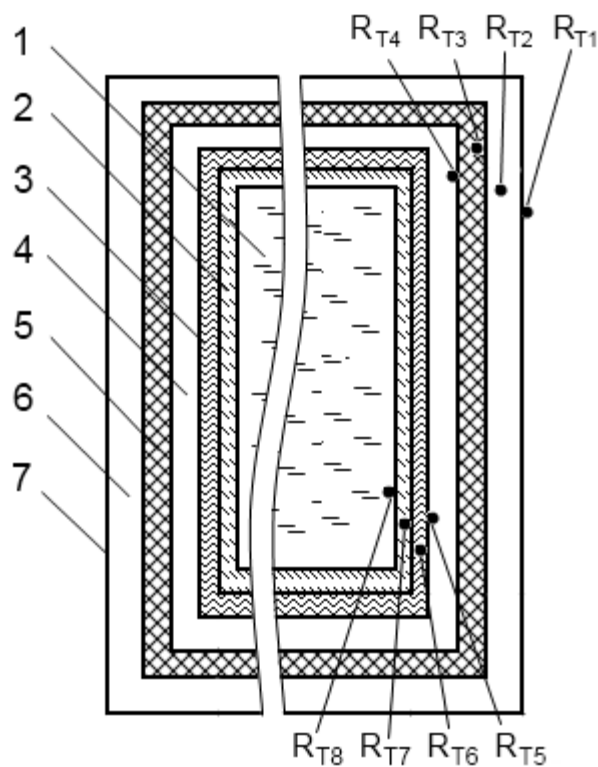
Математична модель досліджуваного об'єкту, ґрунтується на геометричних розмірах, теплофізичних властивостях матеріалів, алгебраїчних і диференціальних рівняннях термодинаміки і теплообміну.

Кількість тепла, що передається від рідини до зовнішнього повітря з температурою  $T_{oc}$  за малий інтервал часу  $d\tau$  можна виразити рівнянням

$$dQ = \frac{T_B - T_{oc}}{\sum_{i=1}^8 R_{T_i}} \cdot F \cdot d\tau, \quad (2.1)$$

де  $R_{T_i}$  – термічні опори шарів скла (2), картону (3), повітряного прошарку (4), теплоізоляції (5), повітряного прошарку (6) і тепловіддачі від поверхні тенту до зовнішнього повітря;  $F_1$  – середня площа поверхні теплопередачі.

В розглядаємій нестационарній моделі відбувається зміна температури для всіх її компонентів з урахуванням їх теплоємностей. Схема моделі з зазначенням термічних опорів представлена на рисунку 2.3.



Рисунку 2.3 – Схема моделі з термічними опорами

Зазначені термічні опори теплообміну на поверхнях зовнішньої оболонки ( $R_{T1}$ ), теплоізоляції ( $R_{T4}$ ), картону упаковки ( $R_{T8}$ ), внутрішній поверхні скляної пляшки ( $R_{T8}$ ) та термічні опори теплопровідності шару теплоізоляції ( $R_{T3}$ ), шару картону упаковки ( $R_{T6}$ ), шару скла пляшки ( $R_{T7}$ ). Внаслідок малого розміру прошарка повітря між зовнішньою оболонкою та теплоізоляцією для моделі його термічний опір враховується як термічний опір теплопровідності. Але при моделюванні для теплоізованого фургона будемо враховувати термічний опір відповідного прошарка як термічний опір теплообміну на поверхнях.

Для спрощення моделі зменшимо кількість об'єктів теплопередачі. Для цього об'єднаємо рідину, скло пляшки, картон упаковки та палети в один об'єкт, а повітря кузовного простору, шари теплоізоляції та зовнішньої оболонки в другий. Відповідно перераховується теплоємність та термічні опори на еквівалентні для кожної з груп об'єктів. Спрощена еквівалентна схема, на основі якої розроблена математична модель, представлена на рисунку 2.4.

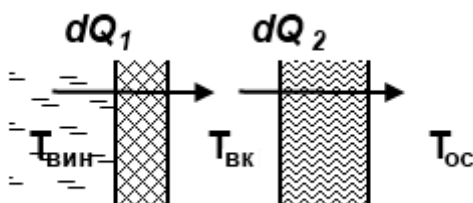


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема математичної моделі термоізованого фургона

За малий інтервал часу  $dt$  відбувається передача тепла  $dQ_1$  від рідини до повітря в просторі термоізованого фургона (через скло тари, повітряний прошарок упаковки, та картон упаковки), а далі тепло  $dQ_2$  передається від повітря в фургоні до оточуючої середовища (через шар теплоізоляції, повітряний прошарок та зовнішню оболонку). Таким чином, внутрішня енергія рідини та

повітря фургона зменшуються. Внаслідок цього змінюються їх температури, які визначаються рівняннями:

$$T_v = T_v - \frac{dQ_1}{C_1}, \quad (2.2)$$

$$T_{vk} = T_{vk} - \frac{dQ_2 - dQ_1}{C_2}, \quad (2.3)$$

Приведені вище рівняння, а також геометричні розміри моделі, фізичні властивості матеріалів, рівняння для розрахунку термічних опорів складають математичну модель.

### 2.3 Апробація математичної моделі

Для відповідних умовам експериментів даних, які представлені вище (п.2.1), були проведені і математичні експерименти (розрахунки) з використанням створеної програми. Отримані результати представлені на рисунках 2.5, 2.6.

Аналіз результатів показує, що отримано досить хороший збіг експериментальних і розрахункових результатів. В усіх випадках розрахункова швидкість охолодження рідини незначно менше експериментальної. Розбіжність розрахункового та експериментального часу охолодження вина до 2°C за різних умов охолодження в середньому складає 14%.

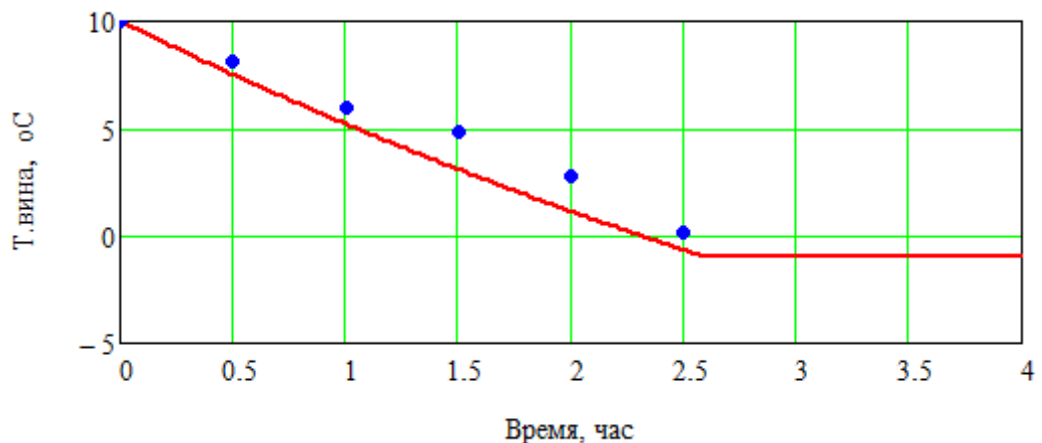


Рисунок 2.5

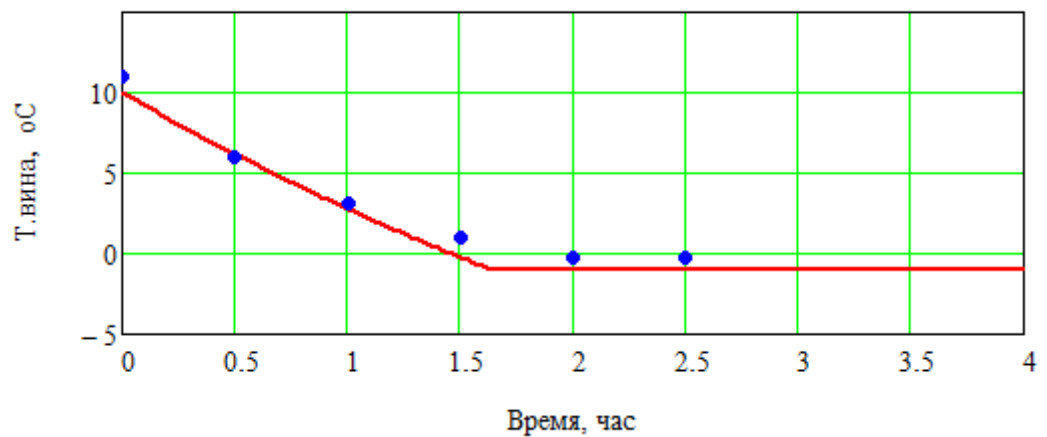


Рисунок 2.6

Виходячи з вище наведеного, створена математична модель може бути використана для розрахунку процесів охолодження вина в фургоні вантажного автомобіля при використанні термоізоляційного вкладиша за різних умов експлуатації.

#### 2.4 Результати математичного експерименту для термофургона

З використанням створеної математичної моделі і програми розрахунку досліджувався вплив швидкості руху автомобіля на процес охолодження вантажа. Проведені експерименти для товщини ізоляції 5 мм, температури довкілля  $-10^{\circ}\text{C}$ , початкової температури вина  $10^{\circ}\text{C}$ .

У експериментах варіювалася швидкість руху: 0 км/годину (стоянка); 60 км/годину і 100 км/годину. Результати розрахунків (час охолодження до  $0^{\circ}\text{C}$  і середня тепловтрата) представлені в таблиці 2.1 та на рисунку 2.7.

Таблиця 2.1

Швидкість руху $w$ , км/час	0	60	100
Термін охолодження, час	99,7	86,7	86
Середня тепловтрата $Q$ , кВт	1,68	1,93	1,94

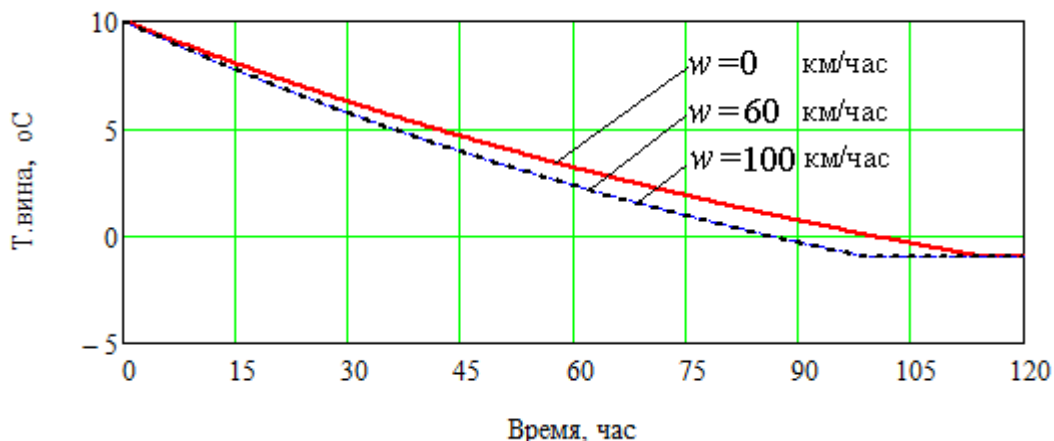


Рисунок 2.7 – Залежність швидкості охолодження віна від швидкості руху автомобіля

Чисельний експеримент показав, що тривалість охолодження до  $0^{\circ}\text{C}$  незначно залежить від швидкості повітряного потоку (швидкості руху). Крім того, навіть у разі стоянки автомобіля швидкість повітряного потоку на поверхні тенту практично ніколи не буде  $0\text{ м/с}$  із-за природного руху повітря (вітер). Отже, можна зробити висновок, що швидкість руху автомобіля істотно не впливатиме на тривалість охолодження.

Такий результат пояснюється тим, що хоч термічний опір теплообміну на раружній поверхні тенту з ростом швидкості змінюється в чотири рази (рисунок 2.8), але його вклад в загальний технічний опір мал. Так наприклад, термічний опір теплоізоляції при товщині  $5\text{ мм}$  складає  $0,13\text{ (м}^2\text{ К)/Вт}$ .

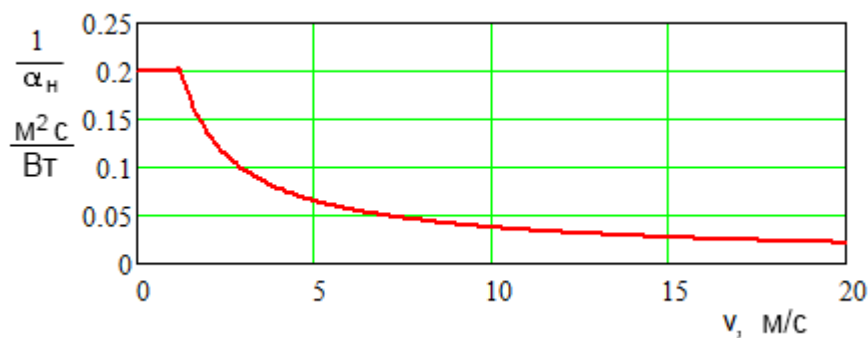


Рисунок 2.8 – Залежність термічного опору теплообміну на раружній поверхні тенту від швидкості руху автомобіля

З урахуванням отриманих даних подальші чисельні експерименти проведені для однієї швидкості 60 км/годину. Досліджувався вплив товщини теплоізоляції ( $\delta_{\text{из}}$ ), температури оточуючої середовища ( $T_{\text{oc}}$ ) і початкової температури вина ( $T_{\text{н}}$ ) на тривалість процесу охолодження вина від початкової температури до  $0^{\circ}\text{C}$  і середня тепловтрата за час процесу охолодження. Результати представлені в таблицях 2.2 і 2.3 і на рисунку 2.9.

Таблиця 2.2

$T_{\text{oc}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{н}}, ^{\circ}\text{C}$	Тривалість процесу охолодження, час		
		$\delta_{\text{из}}=3 \text{ мм}$	$\delta_{\text{из}}=5 \text{ мм}$	$\delta_{\text{из}}=10 \text{ мм}$
-5	5	82,7	86,7	96
	15	165,3	172,7	191,7
-20	5	26,7	27,8	31,0
	15	66,8	69,8	77,3

Таблиця 2.3

$T_{\text{oc}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{н}}, ^{\circ}\text{C}$	Середня тепловтрата, кВт		
		$\delta_{\text{из}}=3 \text{ мм}$	$\delta_{\text{из}}=5 \text{ мм}$	$\delta_{\text{из}}=10 \text{ мм}$
-5	5	1,01	0,96	0,87
	15	1,52	1,45	1,31
-20	5	3,13	3,01	2,70
	15	3,75	3,59	3,24



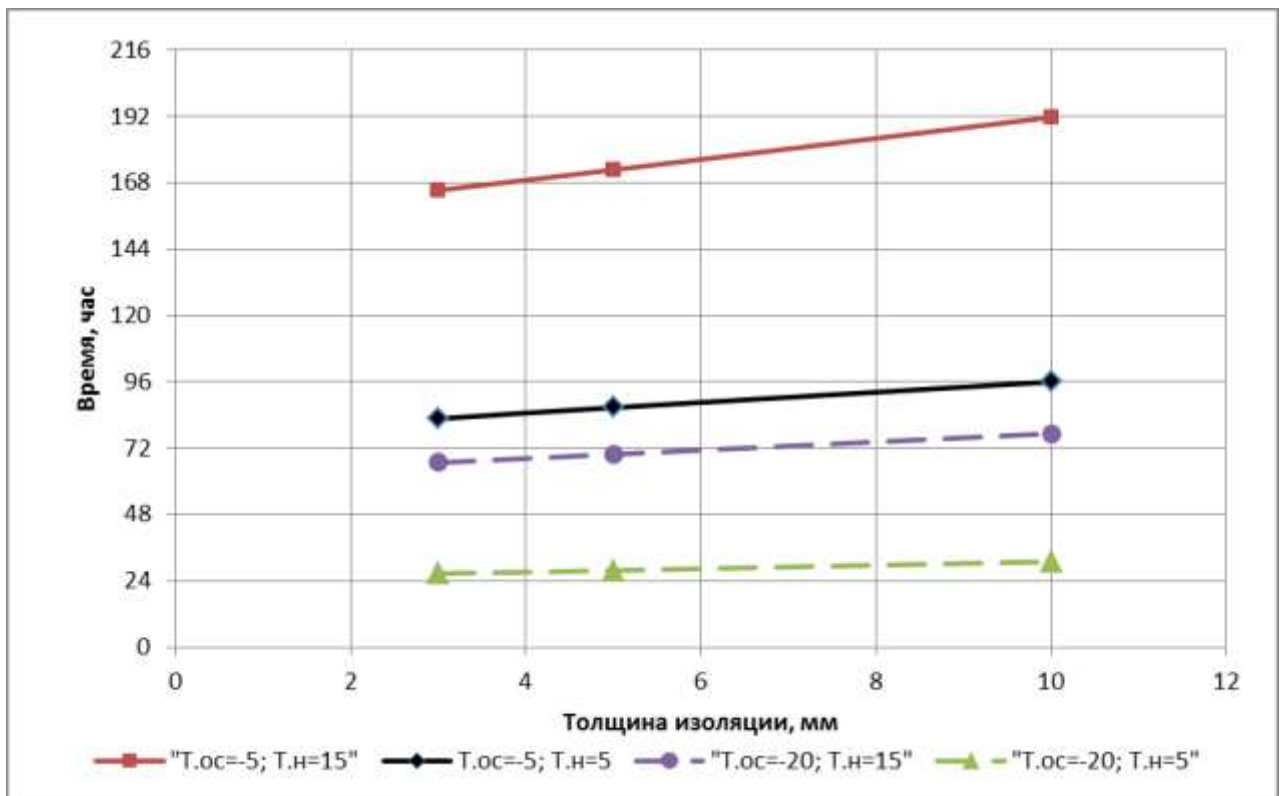


Рисунок 2.9 – Розрахункова тривалість охолодження вина для різних умов

Аналіз отриманих розрахункових результатів показує, що час охолодження істотно залежить від температури довкілля і початкової температури вина і, в меншій мірі, від товщини теплоізоляційного матеріалу.

## ВИСНОВКИ

У роботі розглянуті термоізолювані фургони автомобілів для перевезення вантажів з дотриманням заданого температурного інтервалу, види теплоізоляційних матеріалів і їх характеристики.

Для розглядаємої задачі створена математична модель, алгоритм та програма розрахунку для пакету Mathcad.

Проведена перевірка достовірності розрахункових даних порівнянням з експериментальними даними.

Розраховані процеси охолодження бутильованого вина для різних температурних умов, товщин теплоізоляційного матеріалу, швидкості руху вантажного автомобіля, та отримані рекомендації для практичного застосування теплоізолюваного фургона розглядаємої конструкції.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Как выбрать рефрижератор? Преимущества и недостатки. // [https://www.tbncom.com/publ/avtomobilnye\\_perevozki\\_road\\_transport/refrizherator\\_y/kak\\_vybrat\\_refrizherator\\_preimushhestva\\_i\\_nedostatki/16-1-0-143](https://www.tbncom.com/publ/avtomobilnye_perevozki_road_transport/refrizherator_y/kak_vybrat_refrizherator_preimushhestva_i_nedostatki/16-1-0-143) . – 10.12.19.
2. Теплоизоляционные материалы: виды, свойства, теплопроводность. // <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/teploizolyatsiya/teploizolyatsionnye-materialy-vidy-svoystva-teploprovodnost> . – 10.12.19.
3. Новиченок Н.Л., Шульман З.П. Теплофизические свойства полимеров. Минск, «Наука и техника» 1971. – 120 с.
4. Лучшие теплоизоляционные материалы: виды и свойства // <https://santehnikportal.ru/otoplenie/teploizolacia-vidi.html> . – 10.12.19.
5. Теплоизоляционные материалы: виды, описание, фото, свойства. // <https://building-ooo.ru/uncategorized/teploizolyacionnye-materialy-vidyopisaniefotosvoystva/.html> . – 10.12.19.
6. Руденко Н.З., Юшко С.В., Борщ О.Е. Отчет по НИР, 2019.
7. Исаченко В.П. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е, перераб. И доп. – М., Энергия, 1975. – 488с.
8. Кулинченко В.Р. Справочник по теплообменным расчетам.– К.: Техника, 1999.–165 с.
9. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
10. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

ДОДАТОК А  
ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ

Температури начальные	$T_1 \equiv -20$	$T_{vi} \equiv 15$	$T_k \equiv T_{vi}$
Размеры фуры	$L_1 := 13.65$	$W_1 := 2.5$	$H_1 := 2.65$
Размеры и количество палет	$L_2 := 1.2$	$W_2 := 0.8$	$H_2 := 1.4$
	$N := 33$		

Свойства материалов

Стекло	$\delta_{gl} := 0.002$	$\lambda_{gl} := 0.95$	$c_{gl} := 670$
Картон коробок	$\delta_{kor} := 0.004$	$\lambda_{kor} := 0.1$	$c_{kor} := 1650$
Изоляция	$\delta_{iz} \equiv 0.005$	$\lambda_{iz} := 0.04$	$c_{pe} := 1550$
	$\rho_{pe} := 950$	$\rho_{iz} := 0.05 \cdot \rho_{pe} = 47.5$	
Вино	$c_{vi} := 4200$		
Їàëàòà	$c_p := 2700$		
Воздух	$c_v := 1005$	$\lambda_v := 0.024$	$\mu_v := 17.2 \cdot 10^{-6}$
	$P := 1.01 \cdot 10^5$	$\rho_v := \frac{P}{\frac{8.31}{0.029} \cdot 273} = 1.291$	
	$\nu_v := \frac{\mu_v}{\rho_v} = 1.332 \times 10^{-5}$	$Pr_v := \frac{\mu_v \cdot c_v}{\lambda_v} = 0.72$	
Скорость наружного воздуха	$w \equiv 60$ км/час	$w := \frac{w \cdot 10^3}{3600} = 16.667$ м/с	
Коэффициенты теплообмена в возд. зазорах		$\alpha_2 := 5$	$\alpha_3 := 5$

Загрузка палеты	Коробки	$n_1 := 5 \cdot 2 \cdot 4$	$n_1 = 40$
	Бутылок в коробке		$n_2 := 12$
	Масса коробки		$m_{kor} := 0.5$
	Масса вина в бутылке		$m_{vi} := 0.75$
	Масса бутылки		$m_b := 0.65$
	Масса палеты		$m_p := 25$

Площади поверхности и объемы кузова и палет

$$S_1 := 2 \cdot (L_1 \cdot W_1 + L_1 \cdot H_1 + W_1 \cdot H_1) = 153.845 \quad V_1 := L_1 \cdot W_1 \cdot H_1 = 90.431$$

$$S_2 := 2 \cdot (L_2 \cdot W_2 + L_2 \cdot H_2 + W_2 \cdot H_2) \cdot N = 248.16 \quad V_2 := L_2 \cdot W_2 \cdot H_2 \cdot N = 44.352$$

Масса вина  $M_{vi} := m_{vi} \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot N = 1.188 \times 10^4$

Масса палет  $M_p := m_p \cdot N = 825$

Масса коробок  $M_{kor} := m_{kor} \cdot n_1 \cdot N = 660$

Масса бутылок  $M_b := m_b \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot N = 1.03 \times 10^4$

Масса изоляции термофургона  $M_{iz.tf} := S_1 \cdot \delta_{iz} \cdot \rho_{iz} = 36.538$

Масса изоляции палет  $M_{iz.p} := S_2 \cdot \delta_{iz} \cdot \rho_{iz} = 58.938$

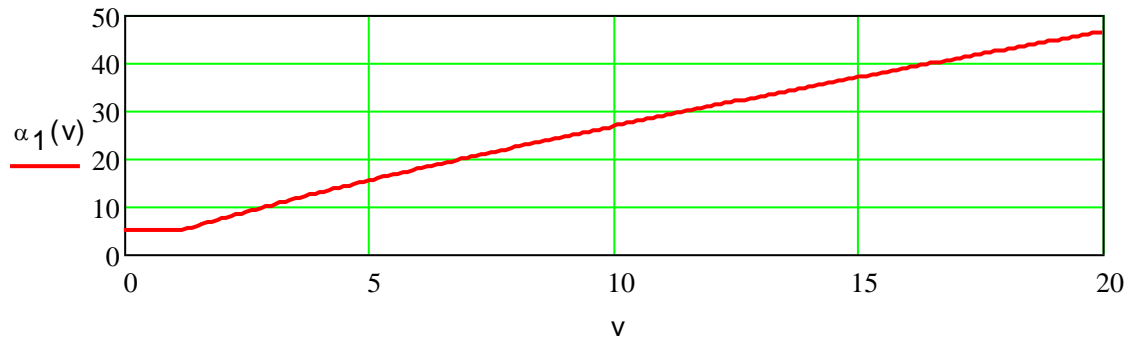
Наружный коэффициент теплообмена

$$Re(w) := \frac{w \cdot H_1}{\nu_v} \quad Re(w) = 3.315 \times 10^6$$

$$Nu(w) := 0.03 \cdot Re(w)^{0.8} \cdot Pr_v^{0.33} \quad Nu(w) = 4.431 \times 10^3$$

$$\alpha_1(w) := \begin{cases} \frac{Nu(w) \cdot \lambda_v}{H_1} & \text{if } w > 1.2 \\ 5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha_1(w) = 40.13$$

$v := 0, 0.1 .. 20$



Термические сопротивления

$$R_{t1} := \frac{1}{\alpha_1 (w)} = 0.025$$

наружный воздух - тент

$$R_{t2} := 2 \cdot \frac{1}{\alpha_2} = 0.4$$

возд. прослойка тент - изоляция

$$R_{t3} := \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz}} = 0.125$$

изоляция

$$R_{t4} := \frac{1}{\alpha_3} = 0.2$$

возд. прослойка изоляция - картон

$$R_{t5} := \frac{\delta_{kor}}{\lambda_{kor}} = 0.04$$

картон

$$R_{t6} := 2 \cdot \frac{1}{\alpha_3} = 0.4$$

возд. прослойка картон - стекло

$$R_{t7} := \frac{\delta_{gl}}{\lambda_{gl}} = 2.105 \times 10^{-3}$$

стекло

Полные эквивалентные теплоемкости

$$C_1 := M_{vi} \cdot c_{vi} + M_b \cdot c_{gl} + M_{kor} \cdot c_{kor} + M_p \cdot c_p + M_{iz,p} \cdot c_{pe} = 6.02 \times 10^7$$

$$C_2 := (V_1 - V_2) \cdot \rho_v \cdot c_v + M_{iz,tf} \cdot c_{pe} = 1.164 \times 10^5$$

Длительность процесса охлаждения, час

$$\tau_p := 5$$

Шаг времени (для расчета), с

$$d\tau := 10$$

Кратность вывода

$$k := 60$$

$$j := \frac{\tau_p \cdot 24 \cdot 3600}{d\tau \cdot k} = 720$$

$$i := 0..j$$

```

T :=
  T1,0 ← Tvi
  T2,0 ← Tk
  dτ ← 10
  τsum ← τp · 24 · 3600
  j ←  $\frac{\tau_{\text{sum}}}{d\tau}$ 
  for i ∈ 1..j
    τ ← i · dτ
    dQ1 ←  $\frac{(T_{vi} - T_k)}{R_{t4} + R_{t5} + R_{t6}} \cdot S_2 \cdot d\tau$ 
    dQ2 ←  $\frac{T_k - T_1}{R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4}} \cdot S_1 \cdot d\tau$ 
    Tk ← Tk +  $\frac{dQ_1 - dQ_2}{C_2}$ 
    Tvi ← Tvi -  $\frac{dQ_2}{C_1}$ 
    Tvi ← -1 if Tvi ≤ -1
    if mod(i, k) = 0
      T0,  $\frac{i}{k}$  ← τ
      T1,  $\frac{i}{k}$  ← Tvi
      T2,  $\frac{i}{k}$  ← Tk
      T3,  $\frac{i}{k}$  ←  $-\frac{dQ_1}{d\tau}$ 
      T4,  $\frac{i}{k}$  ←  $-\frac{dQ_2}{d\tau}$ 
  return T

```

время

T вина

T возд. фургона

теплопотери вина

теплопотери фургона

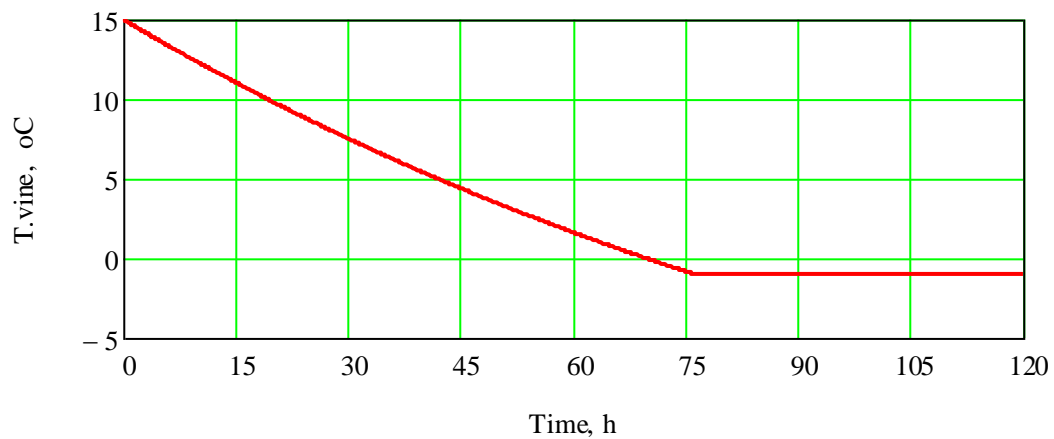
	0	1	2	3	4
T =	0	600	$1.2 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^3$
0	0	14.945	14.898	14.852	14.805
1	15	3.391	2.856	2.804	2.772
2	15	$-4.47 \cdot 10^3$	$-4.669 \cdot 10^3$	$-4.672 \cdot 10^3$	$-4.666 \cdot 10^3$
3	0	$-4.804 \cdot 10^3$	$-4.689 \cdot 10^3$	$-4.678 \cdot 10^3$	...
4	0				

$\Delta\tau_{\text{cool}} :=$ 

$i \leftarrow 1$ while $T_{1,i} \geq 0$ $i \leftarrow i + 1$ $R \leftarrow \frac{T_{0,i}}{3600}$ return R	$\Delta\tau_{\text{cool}} = 69.833$
---	-------------------------------------

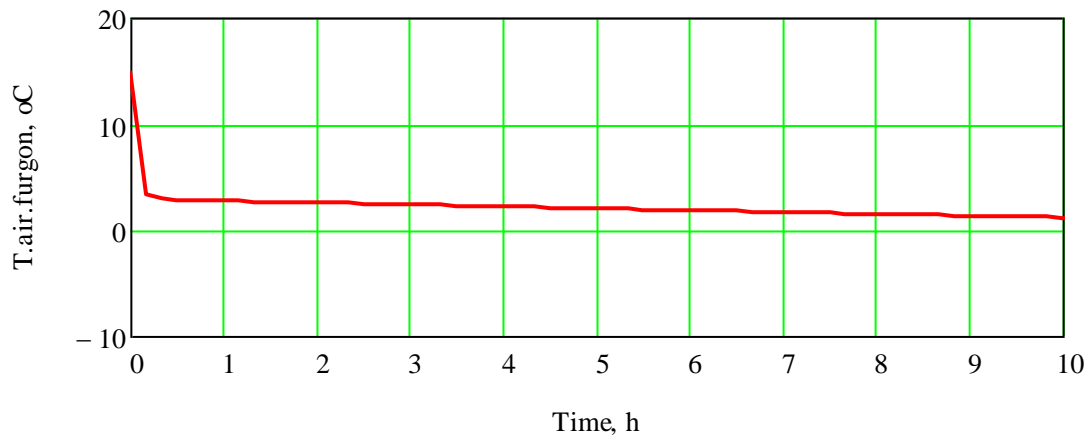
$$Q_m := \frac{(C_1 + C_2) \cdot (T_{vi} - 0)}{\Delta\tau_{\text{cool}} \cdot 3600} = 3.599 \times 10^3$$

Температура вина

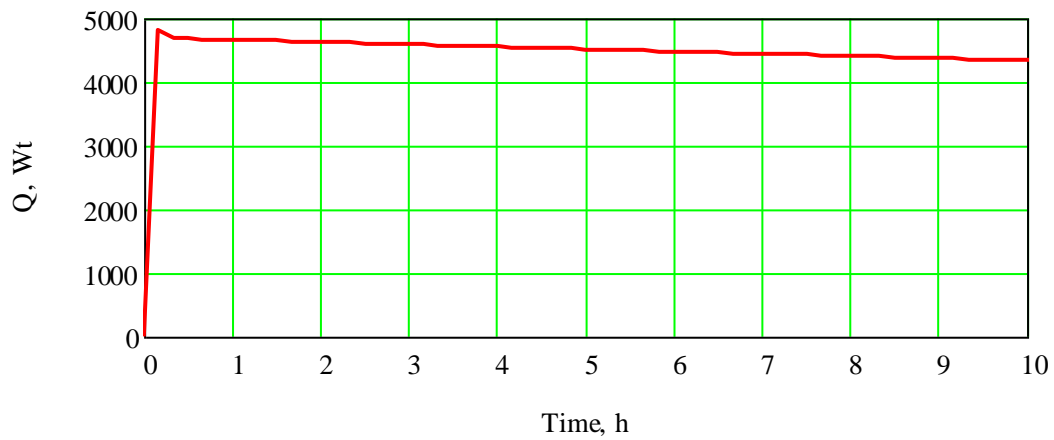




Температура возд. фургона



Теплопотери фургона



Теплопотери вина

