

**ТЕПЛОВІ АКУМУЛЯТОРИ ФАЗОВОГО  
ПЕРЕХОДУ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ  
ТЕПЛОСИЛОВИХ УСТАНОВОК**

*Навчальний посібник*

**Харків 2016**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**ТЕПЛОВІ АКУМУЛЯТОРИ ФАЗОВОГО  
ПЕРЕХОДУ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ  
ТЕПЛОСИЛОВИХ УСТАНОВОК**

*Навчальний посібник*

Харків 2016

УДК 621.43+621.43.016.4-57+536.421+541.6:541.183

ББК 39.33-08:39.35:24.5:22.365

Т 34

*Рекомендовано вченою радою Українського державного університету залізничного транспорту як навчальний посібник (витяг з протоколу № 4 від 24 травня 2016 р.)*

**Рецензенти:**

доктор техн. наук, професор *А. І. Троцан* (Інститут Проблем Матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України);  
доктор техн. наук, професор *В. Г. Маслієв* (НТУ «ХП»);  
доктор техн. наук, професор *Л. А. Тимофєєва* (УкрДУЗТ)

**Авторський колектив:**

Панченко С.В., Александров В.Д., Фалендиш А.П., Волков В.П.,  
Грицук І.В., Каграманян А.О., Пархоменко Л.О.

**Т 34** Теплові акумулятори фазового переходу для транспортних теплосилових установок: Навч. посібник / С.В. Панченко, В.Д. Александров, А.П. Фалендиш та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – 281 с., рис. 85, табл. 18.

ISBN 978-617-654-055-7

У навчальному посібнику виконано аналіз сучасного стану проектування, створення й експлуатації теплових акумуляторів фазового переходу для систем прогріву двигунів внутрішнього згорання транспортних засобів і стаціонарних енергетичних установок на основі положень матеріалознавства фазоперехідних елементів теплових акумуляторів. Особливу увагу приділено математичному моделюванню, конструюванню і основам розрахунку теплових акумуляторів систем прогріву транспортних і стаціонарних двигунів.

Наведено результати експериментальних досліджень теплоакуючих матеріалів на основі фазового переходу для використання в теплових акумуляторах, а також самих теплових акумуляторів транспортних засобів і стаціонарних енергетичних установок. Видання розраховано на студентів і магістрів технічних університетів, а також спеціалістів транспортного комплексу, які займаються експлуатацією стаціонарного устаткування, техніки транспортного призначення і транспортних засобів із двигунами внутрішнього згорання.

УДК 621.43+621.43.016.4-57+536.421+541.6:541.183

ББК 39.33-08:39.35:24.5:22.365

ISBN 978-617-654-055-7

© Панченко С.В., Александров В.Д.,  
Фалендиш А.П., Волков В.П., Грицук І.В.,  
Каграманян А.О., Пархоменко Л.О., 2016.  
© Український державний університет  
залізничного транспорту, 2016.

Навчальний посібник

**Панченко** Сергій Володимирович,  
**Александров** Валерій Дмитрович,  
**Фалендиш** Анатолій Петрович  
та ін.

**ТЕПЛОВІ АКУМУЛЯТОРИ ФАЗОВОГО  
ПЕРЕХОДУ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ  
ТЕПЛΟΣИЛОВИХ УСТАНОВОК**

Відповідальний за випуск Фалендиш А.П.

Редактор Ібрагімова Н.В.

---

Підписано до друку 22.09.15 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 13,00. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту  
61050, Харків - 50, майдан Фейсрбаха, 7

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

## ЗМІСТ

<b>Умовні позначення</b> .....	6
<b>Словник абревіатур</b> .....	11
<b>Вступ</b> .....	13
<b>Розділ 1. Теплове акумулювання енергії в теплових акумуляторах фазового переходу</b> .....	16
1.1. Загальні положення про акумулятори теплової енергії фазового переходу.....	16
1.2. Особливості конструкції теплових акумуляторів фазового переходу для мобільних машин і стаціонарних енергетичних установок з ДВЗ.....	23
1.3. Аналіз конструкцій теплових акумуляторів фазового переходу транспортних засобів і енергетичних установок....	32
Контрольні запитання.....	71
<b>Розділ 2. Теплоакумулюючі матеріали на основі фазових перетворень і їх властивості. Теплові акумулятори фазового переходу</b> .....	73
2.1. Класифікація теплоакумулюючих матеріалів.....	73
2.2. Вимоги, що висуваються до теплоакумулюючих матеріалів.....	78
2.3. Фізико-хімічні основи фазових перетворень першого роду в теплоакумулюючих матеріалах.....	79
2.4. Вплив зовнішніх факторів на фазові перетворення в теплоакумулюючих матеріалах.....	85
2.5. Кристалізація сплавів евтектичного типу.....	92
2.6. Розроблення методики експериментальних досліджень.....	101
2.7. Плавлення й кристалізація кристалогідратів.....	107
2.8. Побудова рівноважних і нерівноважних діаграм стану....	119
Контрольні запитання.....	125
<b>Розділ 3. Основи теорії акумулювання і проектування теплових акумуляторів фазового переходу транспортних засобів і теплосилових установок</b> .....	127
3.1. Розроблення математичних моделей ТА.....	127
3.2. Модель роботи ТА фазового переходу ДВЗ у режимі заряджання.....	131

3.3. Модель роботи ТА фазового переходу ДВЗ у режимі зберігання теплової енергії.....	135
3.4. Модель роботи ТА фазового переходу СКП ДВЗ у режимі розрядження.....	136
3.5. Моделювання параметрів роботи теплонакопичувача керованої передпускової системи мащення двигуна внутрішнього згорання.....	140
3.6. Моделювання параметрів роботи контактного теплового акумулятора фазового переходу системи регулювання температури охолоджуючої рідини й моторної оливи ДВЗ.....	146
Контрольні запитання.....	158
<b>Розділ 4. Дослідження процесів акумулювання теплоти на основі фазових переходів у матеріалах теплових акумуляторів транспортних теплосилових установок...</b>	<b>159</b>
4.1. Дослідження процесів акумулювання теплоти на основі фазових переходів у матеріалах для використання в пристроях формування комфортного мікроклімату на залізничному транспорті для роботи локомотивних бригад.....	159
4.2. Дослідження процесів акумулювання теплоти на основі фазових переходів у матеріалах для використання в багатосекційному тепловому акумуляторі капсульного типу при прогріві ДВЗ тягового рухомого складу.....	172
4.3. Дослідження процесів акумулювання теплоти на основі фазових переходів у матеріалах для використання в тепловому акумуляторі при передпусковому прогріві стаціонарного двигуна в умовах низьких температур.....	183
Контрольні запитання.....	202
<b>Розділ 5. Перспективи покращення параметрів робочих процесів прогріву ДВЗ транспортних засобів при формуванні конструкції теплових акумуляторів.....</b>	<b>203</b>
5.1. Класифікація теплових акумуляторів фазового переходу.....	203
5.2. Покращення параметрів робочих процесів прогріву ДВЗ при формуванні і проектуванні теплових акумуляторів фазового переходу.....	206

5.3. Основні співвідношення для визначення параметрів акумулювання за допомогою використання теплоти фазового переходу.....	217
5.4. Порівняння параметрів теплових акумуляторів фазового переходу, що характеризують ефективність їх використання.....	223
5.5. Показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу.....	230
5.6. Загальні рекомендації щодо створення теплових акумуляторів і вибору теплоакumuлюючих матеріалів.....	259
Контрольні запитання.....	265
<b>Бібліографічний список.....</b>	<b>267</b>
<b>Предметний покажчик.....</b>	<b>278</b>

## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$Q_e$  – теплова енергія, перетворена в корисну роботу

$Q_w$  – теплова енергія, втрачена з охолоджуючою рідиною

$Q_g$  – теплова енергія, втрачена з відпрацьованими газами

$Q_x$  – теплова енергія, втрачена внаслідок хімічної неповноти згорання

$Q_{пр}$  – теплова енергія, необхідна для прогріву ДВЗ

$Q_{кон}$  – теплова енергія, необхідна на нагрів елементів конструкції ДВЗ

$Q_{ор}$  – теплова енергія, необхідна на нагрів охолоджуючої рідини ДВЗ

$Q_{мас}$  – теплова енергія, необхідна на нагрів оливи ДВЗ

$Q_{вт}$  – теплова енергія, яка буде втрачена у вигляді променевого теплообміну, конвекції та інших видів теплових втрат

$Q_{пр}$  – теплова енергія, необхідна для прогріву ДВЗ

$Q_{ТА}$  – теплова потужність теплового акумулятора (кількість накопиченої теплової енергії в ТА фазового переходу)

$Q_{ТО}$  – теплова потужність теплообмінника, встановленого у випускній трубі ДВЗ (виходячи з теплової потужності ТА фазового переходу)

$t_{вх}$  і  $t_{вих}$  – температура вхідної та вихідної охолоджуючої рідини з ДВЗ

$T_{г}$  і  $T_{а}$  – температура відпрацьованих газів і свіжого заряду

$t_{ок.н}$  – початкове значення температури навколишнього середовища

$T_w$  – температура рідини

$\bar{T}_g$  – середня температура газового потоку

$T_g^i$  – поточне значення температури газового потоку

$T_g^0$  – початкове значення температури газового потоку

$T_{g1}, T_{g2}$  – кінцева та початкова температури ВГ

$T_{w1}, T_{w2}$  – початкова та кінцева температури рідини

$T_{ТАМ1}, T_{ТАМ2}$  – кінцева та початкова температури ТАМ

$\Delta T_W$  – різниця температур рідкого теплоносія на вході і виході з ТА

$\Delta T_0^-$  – переохолодження за відсутності зовнішнього впливу

$T_L$  – температура плавлення

$T_S$  – температура рівноважної кристалізації

$\Delta T^+$  – величина перегріву рідкої фази відносно температури плавлення  $T_L$

$T_{\min}$  – межа метастабільності

$\Delta T^- = T_L - T_{\min}$  – ступінь передкристалізаційного переохолодження

$\Delta T_L^-, \Delta T_S^-$  – переохолодження відносно ліній ліквідусу й солідусу для бінарних систем

$T_k^+$  – температура структурних перебудов у рідкій фазі

$G_B$  – витрата охолоджуючої рідини, кг/год

$G_{BG}$  – годинна витрата ВГ

$G_W$  – витрата рідкого теплоносія

$V_g$  – швидкість газового потоку в найбільш вузькому місці пакета

$V_w$  – швидкість потоку рідкого теплоносія

$C_B$  – питома теплоємність води

$c_g$  – теплоємність ВГ

$c_w$  – теплоємність ОР

$c_{ТА}$  – теплоємність ТАМ

$L$  – питома теплова енергія фазового переходу ТАМ

$\rho_g$  – густина газового потоку

$\rho_w$  – густина рідини

$M_{п.с.}$  і  $M_1$  – кількість молей продуктів згорання і свіжого заряду на 1 кг палива

$m_{ср}$  і  $m_{ср}$  – молярні теплоємності продуктів згорання і свіжого заряду при  $p = \text{const}$

$\eta_{ТА}$  – коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії при прогріві ДВЗ від ТАМ теплового акумулятора (втрати теплової енергії на нагрів трубопроводів, розсіювання тощо)



$\eta_{TO}$  – коефіцієнт, що враховує втрати теплової енергії при заряджання ТА від теплообмінника (втрати теплової енергії на нагрів трубопроводів, теплоносія, розсіювання тощо)

$\xi_H$  – початкова температура перегріву об'єкта

$\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря

$\alpha_T$  - коефіцієнт, що залежить від температури зовнішнього повітря і теплоізоляції відсіку

$l$  – поточне значення довжини трубопроводу

$\hat{K}$  - коефіцієнт тепловіддачі

$Nu_w$  - число Нусельта для рідкого теплоносія

$Re_w$  - число Рейнольдса для рідкого теплоносія

$Re_g$  - число Рейнольдса для ВГ

$Pr_{gw}$  - число Прандтля для газу

$Pr_w$  - число Прандтля для рідкого теплоносія

$\alpha_g$  - коефіцієнт тепловіддачі від газу до стінки

$a_g^c$  - складова конвекційного теплообміну

$a_g^r$  - складова радіаційного теплообміну

$\alpha_w$  - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до рідини

$\alpha_{TA}$  - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до ТАМ

$\alpha_{TAM}$  - коефіцієнт тепловіддачі від ТАМ до стінки

$\alpha_{ST}$  - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до навколишнього середовища;

$\lambda_{ст}$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу трубок

$\lambda$  - безрозмірна величина, що характеризує ефективність згорання у двигуні через співвідношення повітря та пального, визначена з урахуванням складу газових викидів, яку розраховують за стандартизованою формулою або вимірюють

$\lambda_{TAM}$  - коефіцієнт теплопровідності ТАМ

$\lambda_g$  – теплопровідність потоку ВГ

$\lambda_w$  – теплопровідність рідини

$\lambda_i$  - коефіцієнт теплопровідності  $i$ -го шару теплоізоляції ТА

$\nu_w$  - кінетична в'язкість рідини

$\mu_w$  - динамічна в'язкість рідини

$\mu_g$  - динамічна в'язкість потоку ВГ

$d_{в}$  - внутрішній діаметр трубок

$d_z$  - зовнішній діаметр трубок  
 $d_{нар}$  - зовнішній діаметр трубки теплообмінника  
 $dx$  - зона фазового переходу  
 $\varepsilon$  - коефіцієнт, що залежить від характеру потоку  
 $\varepsilon_w$  - ступінь чорноти зовнішньої поверхні трубок  
 $\varepsilon_g$  - ступінь чорноти газу  
 $K_{ТО}$  – коефіцієнт теплопередачі від теплообмінника  
 $K_{ТА}$  - коефіцієнт теплопередачі від теплового акумулятора  
 $K_{ТАМ}$  - коефіцієнт теплопередачі ТАМ навколишньому середовищу  
 $\delta$  – товщина стінок  
 $\delta_i$  – товщина  $i$ -го шару теплоізоляції ТА  
 $dT_{ТО}$  - середній температурний напір  
 $dT_{ТА}$  - середній температурний напір у ТА  
 $F_{ТО}$  - площа теплообміну в теплообміннику  
 $F_{ТА}$  - площа теплообміну в ТА  
 $q_{ТА}$  - тепловий потік, який отримує ТАМ від утилізаційного теплообмінника  
 $m_{ТА}$  - вага ТАМ  
 $t_{зар}$  - час заряджання ТА  
 $V_R$  - об'єм ОР біля циліндрів  
 $V_c$  - витрата ОР  
 $V_{R1}$  - об'єм ОР біля одного циліндра  
 $V_{c1}$  – витрата ОР біля одного циліндра  
 $b$  – кількість циліндрів  
 $\Delta\mu_v$  – зміна хімічного потенціалу при фазовому перетворенні  
 $\sigma_{SL}$  – міжфазна поверхнева енергія на границі розплав – кристал при кристалізації при температурі  $T_m$  меншої, ніж температура плавлення  $T_L$   
 $G_i^0(T)$  – енергія Гіббса  $i$ -ї фази за відсутності поля, як функція від температури  
 $U_i(E)$  – додаткова енергія, обумовлена електризацією діелектрика  
 $\varepsilon_0$  – електрична постійна

$\varepsilon_i$  – діелектрична проникність  $i$ -ї фази  
 $\Delta H_{LS}^0, \Delta S_{LS}^0$  – ентальпія й ентропія фазового перетворення  
 $J_0$  – інтенсивність падаючих на тіло променів  
 $\mu_1, \mu_2$  – коефіцієнти поглинання УЗ у твердому й рідкому середовищі відповідно  
 $l$  – лінійний розмір тіла уздовж напрямку променів  
 $\varpi = J_0 t$  – енергія на одиницю площі  
 $\Delta H_L$  – ентальпія плавлення або кристалізації  
 $\tau$  і  $v$  – час і швидкість плавлення або кристалізації  
 $\tau_1$  – інкубаційний період зародження нової фази  
 $\tau_B$  – час ізотермічної витримки розплаву  
 $\tau_2$  і  $v_k$  – час і швидкість коагуляції зародків  
 $\tau_3$  – час затвердіння після коагуляції зародків  
 $\eta$  – ступінь кристалічності  
 $v_{нагр}, v_{охл}$  – швидкості нагрівання й охолодження тощо

## СЛОВНИК АБРЕВІАТУР

$C_mH_n$  - позначення вуглеводнів, атомарний склад яких позначено цифрами, що відповідають літерам  $m$  та  $n$

CO - позначення монооксиду вуглецю

$NO_x$  - позначення оксидів азоту, атомарний склад якого позначено цифрою, що відповідає літері  $x$

$O_2$  - позначення кисню

АД - автомобільний двигун

АТ – автомобільний транспорт

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

БСТА - багатосекційний тепловий акумулятор

ВГ – відпрацьовані газы

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання

ДонІЗТ – Донецький інститут залізничного транспорту

УкрДУЗТ

ДС - двигун Стирлінга

ДСК - диференціальна скануюча калориметрія

ДТА - диференціальний термічний аналіз

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ЕУ – енергетична установка

ІГ НАНУ - Інститут Газу Національної Академії Наук

України (м. Київ)

КВП - коефіцієнт використання теплоти палива

КПСМД - керована передпускова система мащення двигуна

КРК - квазірівноважна кристалізація

НМОР - низькомолекулярні органічні речовини

НРВК - нерівноважно-вибухова кристалізація

НТУ – Національний транспортний університет

ОР - охолоджуюча рідина

ОСЧ - речовини особливої чистоти

ПК - персональний комп'ютер

РК – рівноважна кристалізація

РС – рухомий склад

СОД - система охолодження двигуна

СТА – статистичний термічний аналіз

СУ - силова установка

ТА - тепловий акумулятор

ТАЕ - тепловий акумулятор енергії  
ТАМ - теплоакumuлюючий матеріал  
ТГА - термогравіметричний аналіз  
ТЕН - тепловий електричний нагрівач  
ТЗ – транспортний засіб  
ТКО - температурний коефіцієнт опору  
ТН - теплонакопичувач  
ТП – термопара  
ТХА – термопара хромель-алюмелева  
УОПД - пристрій полегшення пуску двигуна  
ФП1 - фазовий перехід типу плавлення ↔ кристалізація  
першого роду  
УкрДУЗТ - Український державний університет  
залізничного транспорту  
х.х. – холостий хід двигуна внутрішнього згорання  
ЦТА - циклічний термічний аналіз  
ЧДА – речовини чисті для аналізу

## ВСТУП

Навчальний посібник підготовлений для використання при вивченні навчальної дисципліни «Теплосилові установки на залізничному транспорті», для розгляду таких тем: «Енергозбереження. Системи утилізації теплоти системи охолодження та випускних газів», «Системи повітропостачання та випуску відпрацьованих газів. Глушники шуму», «Системи запуску ТСУ локомотивів та ДЕС», «Системи охолодження», «Системи змащування», а також «Стаціонарні теплосилові установки», «Пересувні теплосилові установки на залізничному транспорті», «Дизельні силові установки тепловозів» тощо і є складовою частиною забезпечення навчального курсу.

При експлуатації двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), особливо в умовах низьких температур, виникає проблема їх безаварійного пуску й підготовки до роботи з навантаженням (попередній передпусковий прогрів), що пояснюється порушеннями нормального теплового балансу ДВЗ. Ефективність використання ДВЗ суттєво залежить від часу, що витрачається на допоміжні операції. До таких операцій належить передпускова підготовка ДВЗ, яка містить у собі комплекс заходів, що забезпечують впевнений пуск двигуна і прискорену підготовку його до прийняття навантаження. Тепловий стан ДВЗ впливає на процеси утворення різних видів відкладань, показники міцності матеріалів деталей, вихідні ефективні показники двигунів, процеси зношування поверхонь деталей. Відомо, що знижена температура стінок циліндра (нижче точки роси відпрацьованих газів (ВГ)) сприяє прискоренню їх корозійно-механічного зношування. При цьому погіршується сумішоутворення і зменшується швидкість згорання паливоповітряної суміші, що знижує ефективність, паливну економічність роботи двигуна і підвищує токсичність ВГ. Також при суттєво знижених температурах поршня й циліндра, сконденсовані водяні пари, що проникають у картерну оливу, викликають інтенсивну коагуляцію домішок і гідроліз присадок з утворенням відкладень – «шламів», які, забруднюючи циркуляційні канали оливи, сітки відстійників і фільтри оливи, суттєво порушують нормальну роботу системи мащення.

Для усунення вищевказаних проблем доцільно піти шляхом впровадження технології акумулювання теплоти в матеріалах на основі фазових переходів типу плавлення й кристалізації. Наукові проблеми вибору оптимального теплоакumuлюючого матеріалу (ТАМ) для проєктованого теплового акумулятора (ТА) фазового переходу є досить складними й у загальному випадку полягають у визначенні співвідношень між характеристиками матеріалів, експлуатаційними вимогами їх призначення і необхідними конструктивними й технічними даними. Відомо, що існує велика кількість ТАМ, що мають найрізноманітніші властивості. У зв'язку з цим виникає необхідність у виконанні обґрунтування і дослідження властивостей ТАМ, яке б дозволило розробити методику їх вибору та експлуатації. Дане видання базується на результатах багаторічних експериментальних і теоретичних досліджень авторів у галузі проєктування, створення й експлуатації теплових акумуляторів фазового переходу для систем прогріву двигунів внутрішнього згорання транспортних засобів і стаціонарних енергетичних установок, а також у галузі матеріалознавства фазоперехідних процесів у теплових акумуляторах.

Перший розділ навчального посібника присвячено особливостям конструкції теплових акумуляторів фазового переходу для мобільних машин і стаціонарних енергетичних установок з ДВЗ. Також наведено виконаний аналіз конструкцій теплових акумуляторів фазового переходу.

У другому розділі наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень щодо визначення властивостей, створення нових теплоакumuлюючих матеріалів, що можуть бути застосовані в теплових акумуляторах транспортних засобів і енергетичних установок.

Третій розділ навчального посібника присвячено формуванню теоретичних основ акумулювання і проєктування робочих процесів теплових акумуляторів фазового переходу транспортних засобів. Багато уваги приділено математичному моделюванню роботи ТА у режимах заряджання, розряджання і зберігання теплової енергії. Крім того наведено результати математичного моделювання теплонакопичувача керованої передпускової системи мащення двигуна внутрішнього згорання

(ДВЗ) і контактного теплового акумулятора фазового переходу системи регулювання температури охолоджуючої рідини й моторної оливи ДВЗ.

Четвертий розділ присвячено результатам експериментальних досліджень процесів акумулювання тепла на основі фазових переходів у матеріалах: для використання в пристроях формування комфортного мікроклімату на залізничному транспорті для роботи локомотивних бригад, для використання в багатосекційному тепловому акумуляторі капсульного типу при прогріві ДВЗ тягового рухомого складу, а також у тепловому акумуляторі при передпусковому прогріві стаціонарного двигуна в умовах низьких температур.

У п'ятому розділі наведено пропозиції авторів щодо перспектив покращення параметрів робочих процесів прогріву ДВЗ транспортних засобів при формуванні конструкції теплових акумуляторів, а також загальні рекомендації щодо створення теплових акумуляторів і вибору теплоакumuлюючих матеріалів для них.

Для усунення співпадіння в позначеннях формул і при викладенні матеріалу умовні позначення наводяться по мірі використання в тексті.



## РОЗДІЛ 1

### ТЕПЛОВЕ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРАХ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ

#### 1.1. Загальні положення про акумулятори теплової енергії фазового переходу

Тепловий акумулятор (ТА) може застосовуватись як перспективний індивідуальний накопичувач теплової енергії, призначений для передпускової теплової підготовки двигуна як енергетичної, так і транспортної машини, опалювання її кабіни й обігріву агрегатів трансмісії при непрацюючому ДВЗ. Таке ставлення до ТА стало можливим завдяки тому, що, по-перше, існує досить велика кількість різних апробованих і перспективних технічних рішень у цьому напрямку; по-друге, в останні роки з'явилося багато різноманітних нових типів і конструкцій ТА, а по-третє, ТА випускаються невеликими партіями вітчизняними й закордонними підприємствами. Тому доцільно виконати аналіз відомих схем і конструкцій ТА фазового переходу і на основі цього аналізу відкоректувати їхню класифікацію.

Наведемо деякі визначення.

*Теплове акумулювання* – це фізичні і хімічні процеси, за допомогою яких відбувається накопичення теплоти в тепловому акумуляторі енергії (ТАЕ). Можливість акумулювання теплової енергії заснована на використанні фізичного або хімічного процесу, пов'язаного з поглинанням і виділенням теплоти. До основних процесів належать накопичення-видалення внутрішньої енергії при нагріванні-охолодженні твердих або рідких тіл, фазові переходи з поглинанням-видаленням прихованої теплоти, процес сорбції-десорбції або оборотна хімічна реакція, що протікає з виділенням-поглинанням теплоти (теплової енергії). Зазначені процеси реалізуються у спеціальних пристроях – теплових акумуляторах. Речовини, що використовуються для накопичення теплової енергії, називаються теплоакумулюючими матеріалами (ТАМ).

За типом процесу в ТА розрізняють:

- теплове акумулювання енергії твердими і рідкими тілами за рахунок зміни температури речовини - теплоємнісна акумуляція;

- теплове акумулювання енергії за допомогою використання теплоти фазового переходу;

- термохімічне акумулювання теплової енергії.

Теплоємнісна акумуляція заснована на здатності речовин накопичувати енергію при нагріванні. При цьому кількість акумульованої енергії залежить від температури, на яку нагрівається ТАМ, і його питомої теплоємності. Цей спосіб є найбільш простим і давно застосовується, наприклад при опаленні печами, які виконуються досить масивними і накопичують під час нагрівання теплоту, яка потім поступово витрачається на обігрів приміщення. З точки зору величини питомої теплоємності, тобто здатності акумулювати теплоту в розрахунку на 1 кг маси, однією із найкращих речовин є вода.

Іншим способом є акумулювання теплової енергії, що ґрунтується на використанні оборотного процесу фазового переходу плавлення-твердіння. У цьому випадку в якості ТАМ використовується матеріал, що змінює фази. Реалізація цього способу є складнішою через необхідність ускладнення конструкції ТА. Однак у таких теплових акумуляторах, що називають тепловими акумуляторами на фазових переходах, на одиницю об'єму запасастся набагато більша кількість теплової енергії. При цьому процес заряджання і розряджання може бути здійснений у вузькому температурному діапазоні, що є дуже важливим при необхідності роботи ТА в умовах невеликих температурних градієнтів.

Спосіб термохімічного акумулювання теплової енергії ґрунтується на використанні оборотних хімічних реакцій. Він дозволяє запасати теплової енергії на одиницю маси більше, ніж у перших двох випадках, але складний у реалізації.

З перерахованих трьох типів процесів акумулювання теплоти найбільшу перспективу мають акумулятори теплоти на фазових переходах, які застосовуються на теплоелектростанціях у якості резервних накопичувачів теплоти, у системах утилізації скидного тепла, у системах опалення повітря для поліпшення теплової ефективності і теплозахисту стінових огорожувальних конструкцій тощо.

Через свої основні переваги - велика кількість теплоти, що запасується, і здатність до термостабілізації при відносній простоті конструкції – ТА фазового переходу знаходять все нові сфери застосування. Основні напрямки застосування ТА фазового переходу пов'язані з певним температурним діапазоном. За інтервалами робочих температур їх можна поділити на 4 класи (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

**Класи ТА фазового переходу залежно від діапазону температур**

Клас ТА фазового переходу	Для виробництва холоду	Низько-температурні	Середньо-температурні	Високо-температурні
Діапазон робочих температур, °С	менше 20	20 - 200	200 - 500	більше 500

Використання ТА фазового переходу для виробництва холоду пов'язано з необхідністю зберігання харчових продуктів і медичних тканин, у тому числі в умовах транспортування. Середньо- і високотемпературні ТА фазового переходу поки не знайшли широкого застосування в промисловості. Використання середньотемпературних ТА фазового переходу пов'язано в основному з енергетичними установками і системами утилізації теплової енергії. Високотемпературні ТА фазового переходу застосовують у металургії та енергетиці. Найбільш широке застосування знайшли низькотемпературні ТА фазового переходу, використання яких пов'язано з системами життєзабезпечення людини, екологічно чистими способами виробництва енергії та оптимізацією споживання енергії.

*Акумулятор* складається з резервуара для зберігання (зазвичай теплоізолюваного) середовища, що акумулює (робочого тіла), обладнання для заряджання й розряджання й допоміжного устаткування.

*Теплоакумулюючий матеріал фазового переходу* – речовина, що має високі значення теплоємності і ентальпії фазового перетворення, які використовуються для роботи теплового акумулятора.

Класичним прикладом теплоакумулюючого матеріалу на основі фазових перетворень може бути вода, що має достатньо високі теплові характеристики. Так, питома теплоємність води складає  $4,19 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ , а льоду  $2,1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ , питома теплота плавлення льоду дорівнює  $330 \text{ кДж}/\text{кг}$ , а питома теплота пароутворення  $2,3 \text{ МДж}/\text{кг}$ . На рис. 1.1 наведено діаграму стану води, яка ілюструє фазові перетворення типу плавлення $\leftrightarrow$ кристалізація, пароутворення $\leftrightarrow$ конденсація, що відбуваються під дією температури і тиску. Оскільки різні термодинамічні фази описуються різними рівняннями стану, завжди можна за діаграмою знайти величину, яка стрибкоподібно змінюється при фазових перетвореннях.

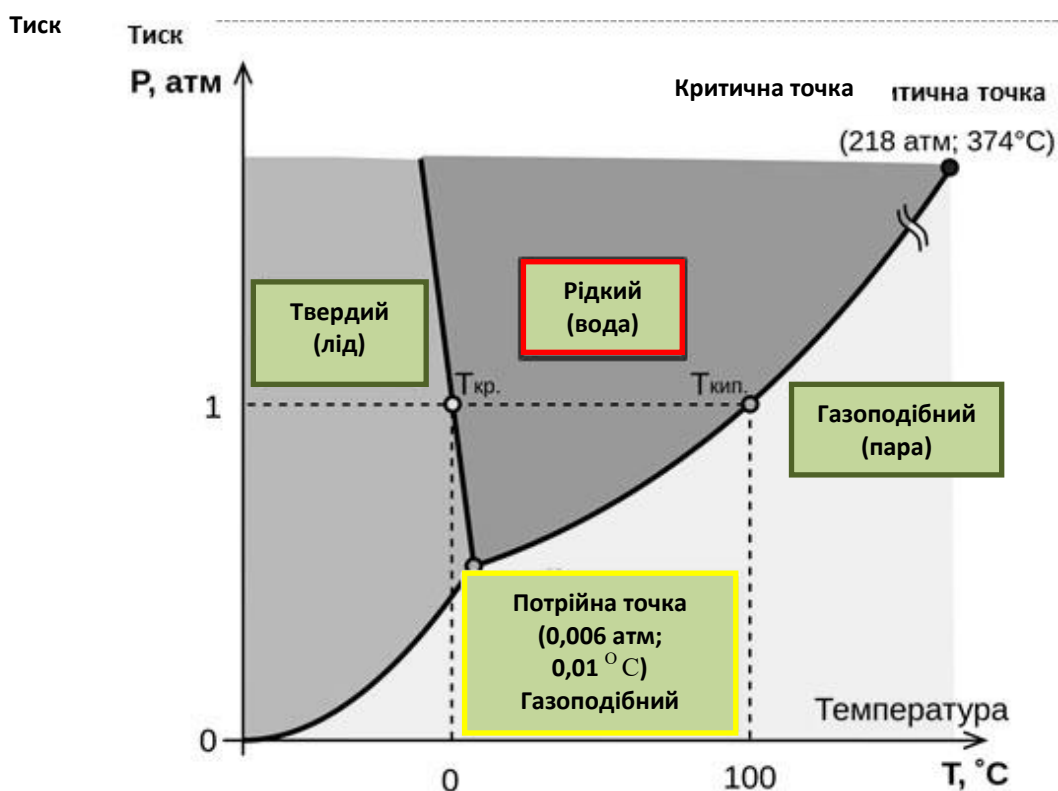


Рис. 1.1. Діаграма стану (на прикладі води)

*Акумуляюча система* характеризується способами, якими енергія для заряджання акумулятора відбирається від джерела, трансформується (за необхідності) у необхідний вид енергії й віддається споживачеві.

На рис. 1.2 показано схему теплового акумулювання з використанням посудини-акумулятора.

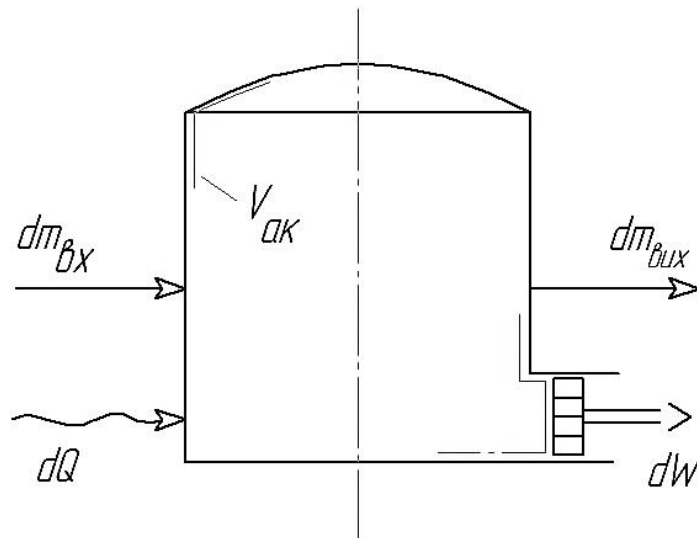


Рис. 1.2. Енергетичний баланс теплового акумулятора:  
 $V_{ак}$  – об’єм акумулятора;  $dm_{вх}$  – маса середовища вхідна;  
 $dm_{вих}$  – маса середовища вихідна;  $dQ$  – теплота, підведена до системи;  $dW$  – робота системи, що не залежить від перенесення маси (наприклад, при русі стінок системи, електрична енергія, енергія вала двигуна тощо)

Баланс енергії для цього процесу в загальному вигляді можливо записати так:

$$E_{вх} - E_{вих} = E_{ак} , \quad (1.1)$$

де  $E_{вх}$  – підведена енергія;  
 $E_{вих}$  – відведена енергія;  
 $E_{ак}$  – акумульована енергія.

Застосовуючи перший закон термодинаміки для підведеної й відведеної енергії, одержимо основне рівняння акумулювання енергії для відкритих систем у диференціальній формі:

$$(U + pV + gh + v^2 / 2)_{ex} dm_{ex} + dQ - (U + pV + gh + v^2 / 2)_{вих} dm_{вих} - dW = d \left[ (U + gh + v^2 / 2)_{ак} dm_{ак} \right], \quad (1.2)$$

де  $dm_{ex}$  – маса середовища вхідна;

$dm_{вих}$  – маса середовища вихідна;

$dm_{ак}$  – маса середовища, що акумулює;

$U$  – внутрішня енергія (відлічувана від довільного нульового рівня);

$p$  – тиск;

$V$  – питомий об'єм;

$g$  – прискорення сили тяжіння;

$h$  – висота (відлічувана від довільного нульового рівня);

$gh$  – питома потенціальна енергія;

$v$  – швидкість течії;

$v^2/2$  – питома кінетична енергія;

$dQ$  – теплота, підведена до системи;

$dW$  – робота системи, що не залежить від перенесення маси (наприклад, при русі стінок системи, електрична енергія, енергія вала двигуна тощо).

Дослідження загального рівняння (1.2) показує, що акумулювання енергії може здійснюватися в результаті зміни: а) питомої внутрішньої енергії; б) питомої потенційної енергії; в) питомої кінетичної енергії; г) маси системи. До теплового акумулювання енергії звичайно відносять випадок (а), а також випадок (б), якщо питома внутрішня енергія робочого тіла вище, ніж навколишнього середовища. Якщо накопичення кінетичної і потенційної енергії виключено ( $v_{ак} = 0$ ,  $h = 0$ ) і, крім того, члени рівняння (1.2), що відповідають кінетичній і потенційній енергіям мас, що підводяться і відводяться, дуже малі, а робота обмежена рухом поверхонь, що обмежують систему, тобто

$$dW = p_{ак} dV_{ак}, \quad (1.3)$$

де  $V_{ак}$  – об'єм акумулятора;

$p_{ак}$  – тиск в акумуляторі,

то рівняння (1.2) можна записати у вигляді придатної для акумулятора теплової енергії:

$$(U + pV)_{\text{ex}} dm_{\text{ex}} + dQ - (U + pV)_{\text{вих}} dm_{\text{вих}} = d(Um)_{\text{ак}} + p_{\text{ак}} dV_{\text{ак}}, \quad (1.4)$$

Використовуючи рівняння ентальпії, маємо

$$H = U + pV, \quad (1.5)$$

і, отже, енергетичний баланс виразу (1.2) набуде вигляду

$$H_{\text{ex}} dm_{\text{ex}} + dQ - H_{\text{вих}} dm_{\text{вих}} = d(Um)_{\text{ак}} + p_{\text{ак}} dV_{\text{ак}}. \quad (1.6)$$

Відповідно баланс маси запишеться як

$$dm_{\text{ex}} - dm_{\text{вих}} = dm_{\text{ак}}. \quad (1.7)$$

Процеси заряджання й розряджання описуються в загальному вигляді рівняннями (1.4) або (1.6) і (1.7). У простих випадках можливе аналітичне розв'язання. В інших, більш складних, випадках можуть бути отримані чисельні розв'язки (особливо це стосується процесу розряджання).

Відповідно до прийнятих вище визначень і зроблених висновків можливо провести попередній розподіл акумуляторів теплоти залежно від напрямку передачі енергії на ТА, у яких здійснюється:

- пряме акумулювання, що може бути акумулюючим і теплообмінним у тому самому середовищі;
- непряме акумулювання, коли енергія акумулюється тільки за допомогою теплообміну (наприклад, теплопровідність через стінки резервуара).

Крім того, ТА фазового переходу поділяються за часовим фактором їх використання, відповідно до якого вони бувають короткострокової (добової) і довгострокової дії. Час циклу роботи ТА фазового переходу короткострокової дії не перевищує тривалості однієї доби. У ТА фазового переходу довгострокової дії тривалість процесу заряджання і розряджання може досягати річного періоду. Конструктивна відмінність між першими і

другими позначається в першу чергу на їх розмірах, що пов'язано з необхідністю акумулювання різної кількості теплової енергії. Крім того, ТА фазового переходу довгострокової дії необхідно ефективно теплоізолювати через необхідність тривалого зберігання запасеної теплоти.

Після проведення аналізу конструкцій теплових акумуляторів можна виконати більш повну їх класифікацію.

Маса або об'єм теплоакумулюючого матеріалу (ТАМ) залежить від відповідної густини енергії, що запасається, і ККД процесу акумулювання тепла. У реальному процесі акумулювання теплоти густина енергії, що запасається, нижче від теоретичного значення внаслідок теплових втрат, вирівнювання поля температур, втрат при заряджанні й розряджанні акумулятора.

## **1.2. Особливості конструкції теплових акумуляторів фазового переходу для мобільних машин і стаціонарних енергетичних і теплосилових установок з ДВЗ**

Відомо багато видів і конструкцій ТА з зернистим ТАМ. Це обумовлено широким спектром сфер застосування ТА. Різноманіття методів і способів акумулювання призводить до формування і створення різних технічних і конструктивних рішень, а саме принципів схем виконання ТА: ТА з твердим ТАМ; ТА з ТАМ, що плавиться; рідинні ТА; парові ТА; термохімічні ТА; ТА з електронагрівальним елементом тощо.

У роботах [1-10] розглядаються ТА з нерухомою або рухомою матрицями. Використання нерухомої матриці забезпечує максимальну простоту конструкції, але вимагає більших мас ТАМ. Крім того, температура теплоносія на виході з акумулятора змінюється протягом часу, що вимагає додаткової системи підтримання постійних параметрів шляхом перепускання. Такі ТА можливо використовувати в стаціонарних енергетичних установках з ДВЗ.

Для використання ТА фазового переходу на мобільних машинах і стаціонарних енергетичних установках з ДВЗ необхідно розглядати їх основні показники, що визначаються залежно від їх конструктивних рішень і призначення. При цьому



застосовують основні припущення про рівномірність розподілу потоків теплоносіїв за площею матриці ТА, незалежність властивостей ТАМ і теплоносіїв від температури, а також ряд інших. При використанні теплоти плавлення деяких речовин забезпечується висока густина енергії, що запасається ТА, невеликі перепади температур і стабільна температура на виході з теплового акумулятора. Незважаючи на це, більшість ТАМ у розплавленому стані є корозійно-активними речовинами, здебільшого мають низький коефіцієнт теплопровідності, змінюють об'єм при плавленні й мають відносно велику вартість. Відомий досить широкий спектр речовин, що забезпечують температуру акумуляування від 0 до 1400 °С. Слід зазначити, що широке застосування теплових акумуляторів з плавким ТАМ стримується, насамперед, виходячи з міркувань економічності створюваних енергетичних установок з ТА.

При невеликих робочих температурах (до 120 °С) рекомендується застосування кристалогідратів неорганічних солей, що пов'язано в першу чергу з використанням у якості ТАМ природних речовин [11]. Для реального застосування необхідно розглядати тільки ті речовини, що не розкладаються при плавленні або не розчиняються в надлишковій воді, що входить до складу ТАМ. Використання органічних речовин повністю знімає питання корозійного руйнування корпусу ТА, забезпечує високу густина теплової енергії, що запасається, і досить великі техніко-економічні показники. Однак у процесі роботи ТА з органічними ТАМ відбувається зниження теплоти плавлення внаслідок руйнування достатньо довгих ланцюжків молекул полімерів. Через низький коефіцієнт теплопровідності органічних ТАМ потрібне створення й застосування розвинених поверхонь теплообміну, що, у свою чергу, накладає конструктивні обмеження на використання ТА.

При робочих температурах від 500 до 1600 °С застосовуються, як правило, сполуки й сплави лужних і лужноземельних металів. Істотним недоліком застосування сполук металів прийнято вважати низький коефіцієнт теплопровідності, корозійну активність, зміну об'єму при плавленні. Для захисту від хімічної корозії корпусу ТА необхідно підбирати конструкційні матеріали або інгібітори корозії, що забезпечують заданий при конструюванні термін служби теплового акумулятора.

Перспективно використовувати суміші й сплави органічних і неорганічних речовин, що дозволяють забезпечувати необхідні значення температур плавлення й більші терміни служби ТА в цілому.

Застосування різноманітних теплоакумулюючих матеріалів вимагає розроблення надійних конструктивних рішень, спрямованих на максимальне використання позитивних якостей ТАМ і виключення їх недоліків, у першу чергу на мобільних машинах і також на стаціонарних енергетичних установках з ДВЗ.

Розміщення ТАМ у капсулах (рис. 1.3) забезпечує високу надійність конструкції ТА, дозволяє створювати розвинену поверхню теплообміну, компенсувати (при використанні гнучких капсул) зміну об'єму в процесі фазових переходів. Однак внаслідок низької теплопровідності ТАМ необхідна велика кількість капсул малого розміру, що призводить до великої трудомісткості виготовлення ТА. Тому є доцільним застосування капсульних ТА у випадках малих теплових енергетичних потоків, що відводяться теплообмінною поверхнею.

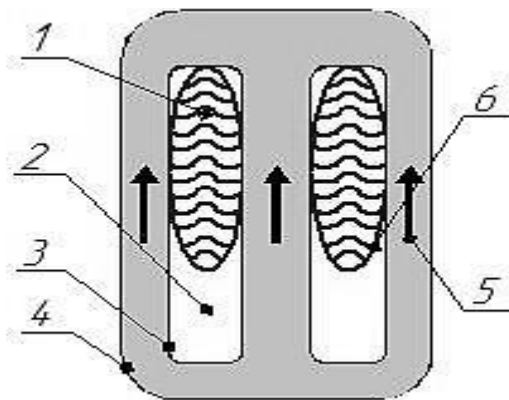


Рис. 1.3. Тепловий акумулятор фазового переходу капсульного типу:  
1 – місце розташування рідкого ТАМ у ТА; 2 – місце розташування твердого ТАМ у ТА; 3 – поверхня теплообміну;  
4 – корпус теплового акумулятора; 5 – теплоносій; 6 – границя розділення фаз

Розташування ТАМ у міжтрубному просторі кожухотрубного теплообмінника (рис. 1.4) забезпечує раціональне використання внутрішнього об'єму теплового

аккумулятора й застосування традиційних технологій виготовлення теплообмінних апаратів. Однак при такій конструкції ускладнено забезпечення вільного розширення ТАМ, внаслідок чого знижена надійність аккумулятора в цілому.

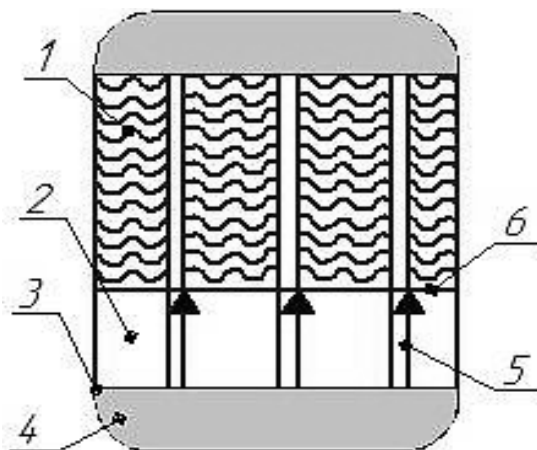


Рис. 1.4. Тепловий акумулятор фазового переходу кожухотрубного типу: 1 – місце розташування рідкого ТАМ у ТА; 2 – місце розташування твердого ТАМ у ТА; 3 – поверхня теплообміну; 4 – корпус теплового аккумулятора; 5 – теплоносій; 6 – границя розділення фаз

Найскладнішим технологічно і найдорожчим елементом теплового аккумулятора традиційної конструкції є теплообмінна поверхня. Внаслідок низьких коефіцієнтів теплопровідності більшості ТАМ, які плавляться, запропоновано різні способи зменшення поверхні теплообміну шляхом знімання ТАМ зскрібанням (рис. 1.5, а, б), шляхом ультразвукового або електрогідравлічного руйнування затверділого ТАМ (рис. 1.6).

Зазначені вище способи дозволяють суттєво знизити величину термічного опору теплообмінної поверхні, але в той же час вони в кілька разів збільшують навантаження на конструктивні елементи аккумулятора.

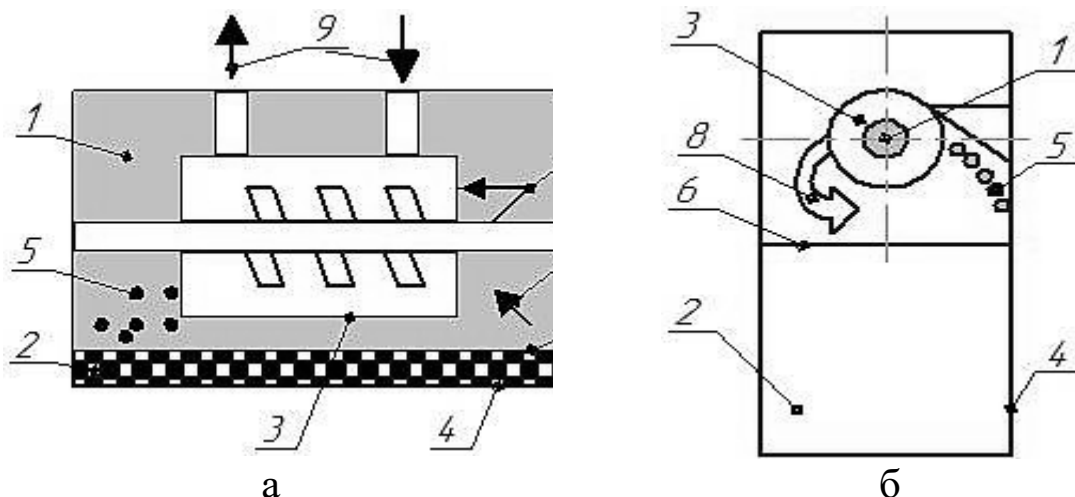


Рис. 1.5. Теплові акумулятори фазового переходу зі скребковим видаленням ТАМ: 1 – місце розташування рідкого ТАМ у ТА; 2 – місце розташування твердого ТАМ у ТА; 3 – поверхня теплообміну; 4 – корпус теплового акумулятора; 5 – частки твердого ТАМ; 6 – границя розділу фаз; 7 – переміщення частинок твердого ТАМ до рідкого ТАМ у ТА; 8 – напрямок руху обертової частини ТА; 9 – теплоносій

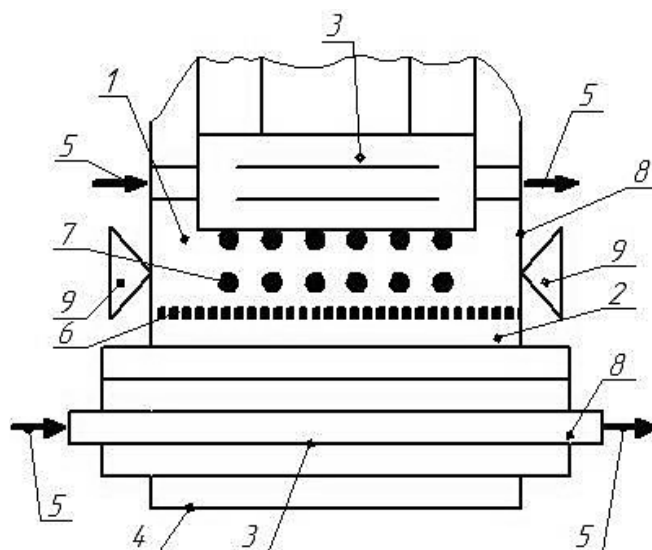


Рис. 1.6. Тепловий акумулятор фазового переходу з ультразвуковим видаленням ТАМ: 1 – місце розташування рідкого ТАМ у ТА; 2 – місце розташування твердого ТАМ у ТА; 3 – поверхня теплообміну; 4 – корпус теплового акумулятора; 5 – теплоносій; 6 – границя розділення фаз; 7 – частинки твердого ТАМ; 8 – проміжний теплообмінник; 9 – джерело ультразвуку

Відомо, що кращим варіантом теплообмінної поверхні є її повна відсутність, тобто безпосередній контакт теплоакumuлюючого матеріалу й теплоносія. Очевидно, що в цьому випадку необхідно підбирати як теплоакumuлюючі матеріали, так і теплоносії за ознаками, що забезпечують працездатність конструкцій. Теплоакumuлюючі матеріали в цьому випадку повинні відповідати таким вимогам: кристалізуватися окремими кристалами; мати більшу різницю густини твердої й рідкої фаз; бути хімічно стабільними; не утворювати емульсій з теплоносієм. Теплоносії підбираються за такими ознаками: хімічна стабільність у суміші з ТАМ; більша різниця густини в суміші відносно ТАМ; мала здатність до спінення і ряд інших вимог, що впливають із особливостей конструкції. Виходячи з наведених міркувань при використанні більш щільного теплоносія, ніж твердий ТАМ, реалізується схема, зображена на рис. 1.7. У процесі роботи акумулятор заповнений сумішшю теплоакumuлюючого матеріалу й теплоносія. У верхню частину теплового акумулятора подається рідкий теплоносій, який потрапляє на поверхню ТАМ, охолоджує (нагріває) його й відводиться з нижньої частини акумулятора. За рахунок меншої густини рідкої фази ТАМ порівняно з твердою його частинки, що закристалізувались, опускаються в нижню частину акумулятора. Надалі відбувається поступове заповнення всього об'єму ТАМ, що закристалізувався.

При використанні теплоносія з густиною, меншою від густини ТАМ, реалізується схема, зображена на рис. 1.8. Розпил теплоносія відбувається в нижній частині акумулятора. У процесі спливання краплин теплоносія ТАМ нагрівається або охолоджується й одночасно інтенсивно переміщується. Очевидно, основними недоліками наведених способів контакту ТАМ і теплоносія є потреби в сторонньому джерелі енергії для прокачування й необхідність ретельної фільтрації теплоносія з метою перешкоджання винесенню частинок ТАМ.

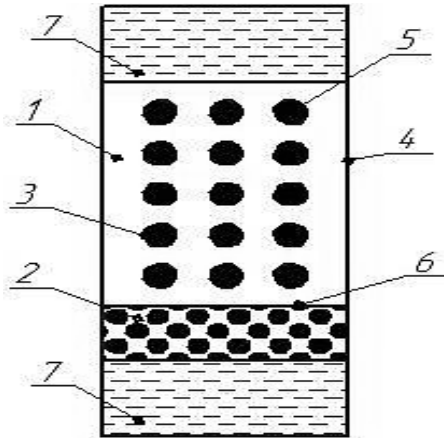


Рис. 1.7. Тепловий акумулятор фазового переходу з прямим контактом з ТАМ: 1 – місце розташування рідкого ТАМ у ТА; 2 – місце розташування твердого ТАМ у ТА; 3 – поверхня теплообміну; 4 – корпус теплового акумулятора; 5 – теплоносіє; 6 – границя розділення фаз; 7 – теплообмінне середовище

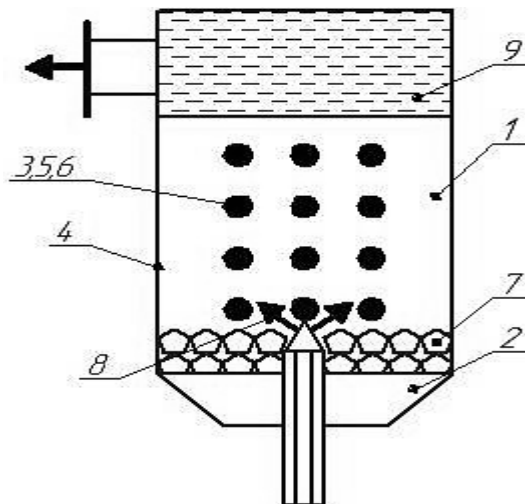


Рис. 1.8. Тепловий акумулятор фазового переходу з прокачуванням ТАМ: 1 – місце розташування рідкого ТАМ у ТА; 2 – місце розташування твердого ТАМ у ТА; 3 – поверхня теплообміну; 4 – корпус теплового акумулятора; 5 – теплоносіє; 6 – границя розділення фаз; 7 – частинки твердого ТАМ; 8 – напрямок прокачування ТАМ; 9 – теплообмінне середовище

Зазначені недоліки відсутні в конструкції, що використовує принцип випаровувально-конвективного перенесення теплоти при безпосередньому контакті ТАМ і теплоносія (рис. 1.9). Для забезпечення працездатності теплового акумулятора необхідно, щоб температура кипіння теплоносія при атмосферному тиску була трохи нижче від температури плавлення ТАМ. Для заряджання акумулятора тиск  $i$ , відповідно, температура кипіння теплоносія в ньому встановлюються вище від температури плавлення ТАМ. У зарядному теплообміннику здійснюється підведення теплоти. Теплоносій закипає, бульбашки пари при температурі вище від температури плавлення ТАМ піднімаються нагору й підігрівають ТАМ. При цьому відбувається плавлення ТАМ і конденсація теплоносія. Розплавлений ТАМ піднімається нагору, а конденсат теплоносія опускається вниз. Під час плавлення ТАМ бульбашки теплоносія виходять у паровий простір теплового акумулятора, і наприкінці процесу заряджання весь теплоносій у паровій фазі перебуває в паровому просторі. На етапі відведення теплоти від теплового акумулятора тиск у ньому знижується так, що температура конденсації теплоносія стає нижче від температури плавлення ТАМ. При відведенні теплоти на поверхні розрядного теплообмінника відбувається конденсація теплоносія, який стікає на розплавлений ТАМ. У результаті відбувається випаровування крапель теплоносія й кристалізація частинок ТАМ. Затверділий ТАМ опускається в нижню частину теплового акумулятора, а пара теплоносія піднімається нагору. Під час охолодження ТАМ краплі теплоносія опускаються все нижче й нижче, і наприкінці розряджання весь теплоносій опиняється в нижній частині теплового акумулятора.

Найбільшого поширення одержали рідинні теплові акумулятори. Докладніше про такі акумулятори можна прочитати в опублікованих роботах [1, 3, 4, 6-8].

Парові теплові акумулятори конструктивно можуть бути виконані у вигляді сталевого суцільнозвареного корпусу; посудини з попередньо напруженого залізобетону або чавуну; підземного резервуара високого тиску. Великі габарити, значна трудомісткість і складність у виготовленні, ускладнений контроль і огляд (при підземному розміщенні) теплових акумуляторів такого типу перешкоджає їхньому широкому поширенню.

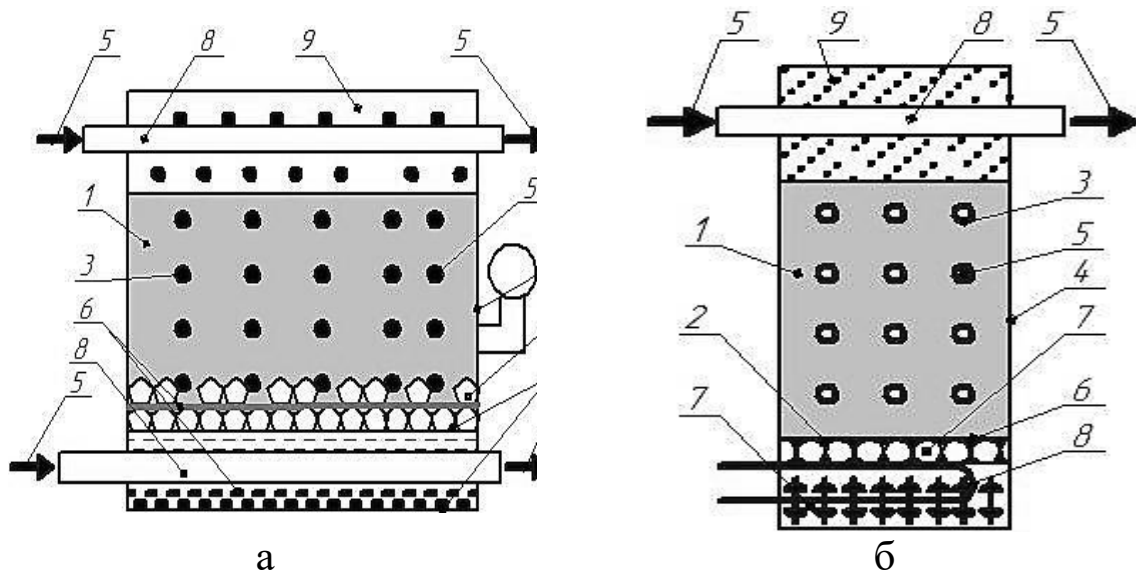


Рис. 1.9. Теплові акумулятори фазового переходу з випаровувально-конвективним перенесенням теплової енергії: 1 – місце розташування рідкого ТАМ у ТА; 2 – місце розташування твердого ТАМ у ТА; 3 – поверхня теплообміну; 4 – корпус теплового акумулятора; 5 – теплоносій; 6 – границя розділення фаз; 7 – частинки твердого ТАМ; 8 – проміжний теплообмінник; 9 – паровий і рідкий простір для теплоносія

Використання термохімічних циклів у теплових акумуляторах ґрунтується на принципі виникнення хімічного потенціалу в результаті оборотної хімічної реакції в нерівноваговому стані. Важливою перевагою хімічних способів акумулявання теплової енергії порівняно зі звичайними є те, що запасена енергія може зберігатися досить тривалий час без застосування теплової ізоляції, вирішується проблема транспортування енергії на значні відстані.

У цілому можна говорити, що застосування різноманітних принципових схем акумуляторів теплоти в системах утилізації теплоти на транспорті дозволить суттєво підвищити ефективність використання палива, ширше застосовувати вторинні енергоресурси, нетрадиційні й поновлювані джерела енергії.



### 1.3. Аналіз конструкцій теплових акумуляторів фазового переходу транспортних засобів і енергетичних установок

Виконання аналізу конструкцій ТА фазового переходу краще почати з інформації, яка наводиться в роботах відомого баварського інженера О. Schatz, який створив найбільш відомий серійний ТА фазового переходу для транспортних засобів. Конструктивно даний ТА фазового переходу побудований таким чином (рис. 1.10).

Теплоакumuлюючий матеріал – октагідрат гідроксиду барію  $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$  – укладено в герметично запаяні капсули 1, виготовлені з тонких мідних пластин. Пакет таких капсул зібрано в єдину матрицю. Між капсулами 1 є щілинні зазори 2, у яких розміщено турбулізатори (завихрювачі), що сприяють кращому теплообміну з циркулюючою охолоджуючою рідиною (ОР) між капсулами. Матриця з капсул 1 розміщена у внутрішньому корпусі 3. Між внутрішнім 3 і зовнішнім 4 корпусами, виготовленими з нержавіючої сталі, передбачено вакуумну теплову ізоляцію 5 і теплоізолятор 6. Для підведення й відведення ОР передбачено вхідний 7 і вихідний 8 патрубки. Накопичення теплової енергії ТА фазового переходу здійснюється при роботі ДВЗ за рахунок теплообміну його ОР з ТАМ, що перебувають у капсулах 1. ОР підводиться через вхідний патрубок 7, проходить через щілинні зазори 2 і подається через вихідний патрубок, при цьому ТАМ нагрівається у твердій фазі до температури плавлення, плавиться, а потім нагрівається в рідкій фазі до відповідної температури, при якій настає теплова рівновага між ним і ОР. Зберігання накопиченої теплоти здійснюється за рахунок наявності в конструкції ТА фазового переходу прошарку вакуумної теплоізоляції 5 і теплоізолятора 6. Розігрів ДВЗ автомобіля або його салону відбувається за рахунок теплообміну ОР з розплавленим ТАМ, при якому останній знає оборотного фазового переходу з рідкого стану у твердий й виділяє приховану теплоту кристалізації. Теплота, що виділяється, переноситься охолоджуючою рідиною й передається деталям ДВЗ або повітрю, що перебуває в салоні.

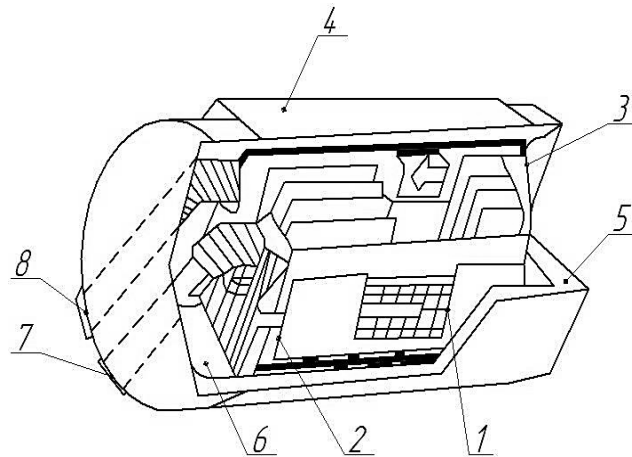


Рис. 1.10. Особливості будови ТА фазового переходу конструкції О. Schatz: 1 – капсули з теплоакумуючим матеріалом; 2 – щілинні зазори; 3 – внутрішній корпус; 4 – зовнішній корпус; 5 – вакуумна теплова ізоляція; 6 – теплоізолятор; 7 – вхідний патрубок; 8 – вихідний патрубок

Вищеописаний ТА фазового переходу характеризується такими технічними параметрами: енергоємність – 0,65 кВт·год; маса – 12 кг; запасеної теплоти достатньо для розігріву ДВЗ легкового автомобіля при безгаражному зберіганні протягом 3 діб при  $T_0 = 253$  К; процес розігріву двигуна або салону триває близько 4 хв; початкова теплова потужність – 35 кВт, а середня – 7 кВт. При направленні теплової потужності на обігрів салону автомобіля при непрацюючому ДВЗ температура повітря на виході з нагрівача вже через 45 с досягає 313 К, внаслідок чого вже через 5 хв у салоні автомобіля встановлюється «кімнатна» температура.

Перевагою описаного ТА фазового переходу є те, що при його застосуванні в процесі передпускового прогріву двигун автомобіля виділяє в навколишнє середовище в період пуску й прогріву значно менше забруднюючих речовин. Якщо ж на автомобілі встановлено каталітичний нейтралізатор, його температура швидше досягне робочої величини 673-773 К. Значне зменшення токсичних викидів під час прогріву ДВЗ дозволяє використовувати автомобіль у режимі прогріву навіть у закритих приміщеннях. Основним недоліком описаного ТА виходячи з технологічних можливостей ДВЗ є складність підтримання температури рідкого теплоносія в межах

$T_{\text{рід}} = 90...100 \text{ }^\circ\text{C}$  для гарантованого накопичення ТА фазового переходу теплової енергії й зниження в цей період температури повітря в салоні, а крім того, при низькій температурі навколишнього середовища складно забезпечити у двигуні після пуску температуру «гарячого прогріву».

Описаний ТА випускається у виробничих умовах за кордоном. У роботі [16] наведено результати випробувань ТА фазового переходу конструкції Oskara Schatz, які були виконані у Фінляндії на двигуні Volvo D24 і довели доцільність застосування ТА фазового переходу на автомобільному транспорті. У результаті випробувань, що проводились також у Європі й Північній Америці, з'явилась система акумулювання теплоти, яка ефективна в якості підігрівача у холодних кліматичних умовах. У 1995 році цей винахід одержав належну оцінку – система акумулювання тепла була визнана досягненням у галузі збереження й повторного використання енергії. Рішенням експертів з інженерії, науки й навколишнього середовища Oskar Schatz отримав премію престижного німецького клубу «Моторист протекшн».

Канадською фірмою «CENTAUR Thermal Systems Inc» за ліцензією освоєно випуск і випускається до сьогодні ТА фазового переходу вищеописаної конструкції чотирьох типів з енергоємністю 550, 600, 900 і 1070 Вт·год (табл. 1.2), які забезпечують зберігання накопиченої теплоти протягом 12 – 168 год.

Таблиця 1.2

**Основні технічні характеристики акумуляторів Centaur**

Модель приладу	4,6	5	7,5	9
Теплоємність (при нагріванні від -20 до 90 °C), Вт·год	550	600	900	1070
Маса приладу, кг	2,4	2,6	3,3	3,8
Маса приладу, заповненого охолоджуючою рідиною, кг	7	7,6	10,8	12,8
Габарити, мм	164 x 340	164 x 370	164 x 513	164 x 596
Місткість приладу, л	4,6	5	7,5	9
Застосовується на двигунах з робочим об'ємом, л	1,0 – 1,5	1,5 – 1,8	до 3,0	більше 3,0

Акумулятор теплоти Centaur виконує функції передпускового підігрівача. У ньому зберігається, а потім використовується теплова енергія, що виділяється від працюючого двигуна через систему рідинного охолодження. Centaur являє собою термос, виготовлений з нержавіючої сталі, який включено в систему охолодження ДВЗ (рис. 1.11). Його місткість дорівнює місткості всієї системи охолодження. При роботі двигуна електричний насос через електронно-керований регулюючий клапан поступово заповнює термос нагрітою до робочої температури рідиною. Момент початку потрапляння нагрітої рідини з оболонки охолодження в термос визначає датчик температури, електронний термостат і система керування. Холодна рідина, що заповнює термос, витісняється в систему охолодження. Коли температури рідини в термосі й системі охолодження двигуна вирівнюються, процес «заряджання» акумулятора теплоти припиняється. При тривалій стоянці двигун і всі його системи охолоджуються, а в термосі зберігається запас розігрітої до робочої температури охолоджуючої рідини. При наступному запуску ДВЗ гаряча рідина з термоса в лічені секунди заміщує у двигуні холодну, завдяки чому двигун швидко розігрівається й легко заводиться. Коли в процесі руху мотор прогріється до оптимальної температури, холодна рідина в термосі поступово буде замінитися гарячою, що не впливає на тепловий режим двигуна.

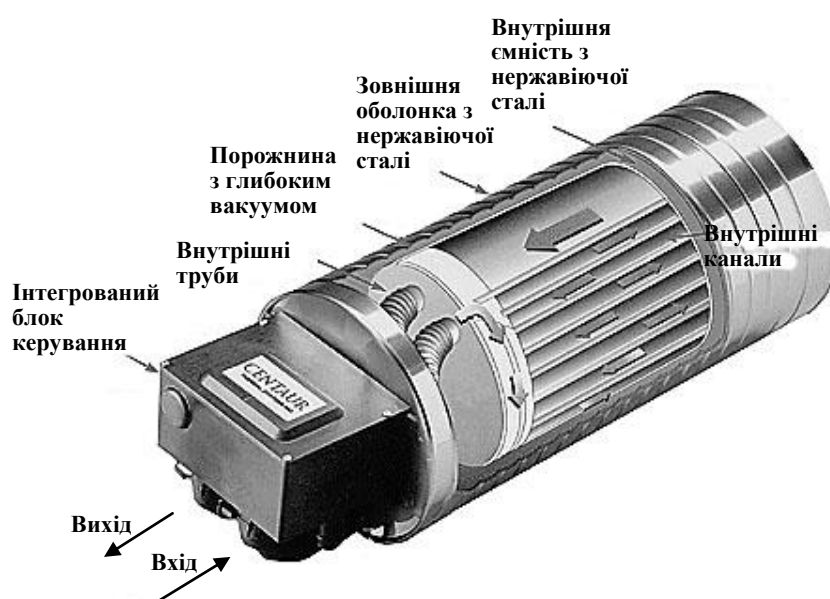


Рис. 1.11. Зовнішній вигляд теплового акумулятора Centaur

Акумулятори теплоти Centaur надійні й безпечні, а керування ними повністю автоматизоване – роботу всіх їхніх вузлів і частин контролює електронний блок керування. Тривалі випробування, що проводились як у холодильних камерах, так і в умовах Аляски, показали їхню високу ефективність і відповідність екологічним нормам, прийнятим у Європі й США. Завдяки термосу тепле повітря починає надходити в кабінку вже через 30 с, вміст у відпрацьованих газах CO зменшується на 50 %, а вуглеводнів – на 30 %, при цьому економія палива може досягати 14 %. Але головні переваги акумуляторів теплоти Centaur полягають у їхній енергонезалежності й здатності працювати однаково успішно як із бензиновими двигунами, так і з дизелями.

Система тестувалася на автомобілі з об'ємом 1,6 л при температурі навколишнього середовища  $-20^{\circ}\text{C}$ . Через дві хвилини температура ДВЗ досягала  $+25\dots30^{\circ}\text{C}$ . Під час руху автомобіля електронний термостат регулярно контролює температуру двигуна. Коли двигун досягає оптимальної для роботи температури, холодна охолоджуюча рідина повільно надходить назад у систему охолодження за допомогою регульовального клапана, замінюючи гарячу охолоджуючу рідину, щоб та була готова для використання при наступному холодному старті. Влітку в системі з ТА Centaur нема потреби в демонтажі останнього, вона працює так само, але не на підігрів двигуна, а на його охолодження.

Спеціальні датчики реагують на підвищення температури тосолу й при досягненні граничних значень порціями видають холодний тосол у систему охолодження під час поїздки, тим самим захищаючи двигун від закипання. Звичайно, як і будь-який винахід, система акумуляювання тепла Centaur має свій недолік. Вона не може ефективно використовуватись на тих машинах, які експлуатуються рідше, ніж раз на три доби. Перерва в експлуатації не повинна бути великою, щоб тосол у тепловому акумуляторі не охолонув.

Для цього необхідно вирішити завдання забезпечення можливості утилізації й накопичення теплової енергії без зниження ефективності накопичення теплоти для наступної утилізації при зменшенні об'ємної витрати гарячого теплоносія.

Поставлене завдання вирішується за рахунок того (рис. 1.12), що в теплоізолюваному корпусі виконано два трубні пучки, один утворює газовий контур, другий – водяний контур, а міжтрубний простір заповнено теплоакуючим матеріалом.

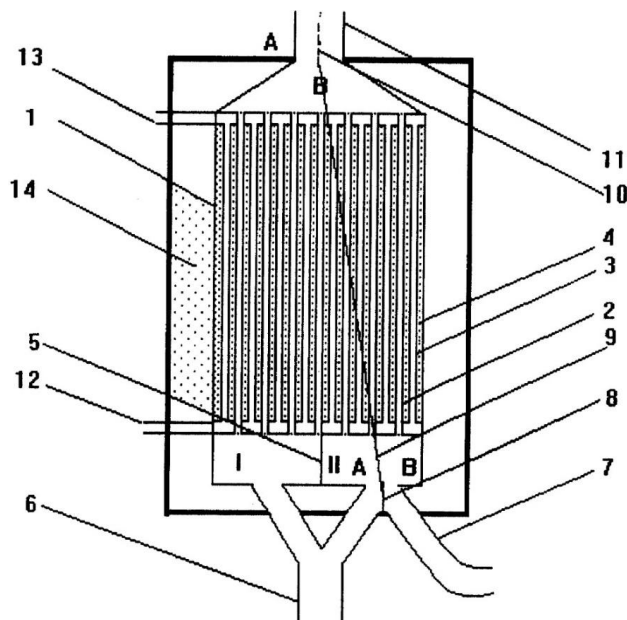


Рис. 1.12. Пристрій для утилізації і накопичення теплової енергії

При цьому газовий контур перегородкою розділено на дві частини: і ліву (I) і праву (II), що дозволяє при більших об'ємних витратах газів працювати за одноходовою схемою, а при малих об'ємних витратах газів – за двоходовою, причому ліва його частина за величиною прохідного перетину й поверхні теплообміну більша за праву, оскільки в другому заході при охолодженні газів за двоходовою схемою має місце зменшення об'ємної витрати газів. Колектор підведення гарячого теплоносія виконано розгалуженим, один з патрубків з'єднаний з лівою (I) частиною пристрою для утилізації і накопичення теплової енергії (ТА), а другий із правою (II) частиною пристрою. На патрубку підведення газів до правої частини пристрою встановлено додатковий трубопровід, розділений саморегулюючою заслінкою, яка може перекривати патрубок підведення гарячих газів, або додатковий трубопровід, залежно від об'ємної витрати газів, змінюючи тим самим схему роботи утилізаційного пристрою. При закритому правому патрубку підведення газів утилізаційний пристрій працює як двоходовий теплообмінник, а при закритому

додатковому трубопроводі – як одноходовий теплообмінник. Синхронно з цією заслінкою працює заслінка, що встановлена у випускному колекторі. При закритому правому патрубку підведення газів вона закрита, а при закритому додатковому трубопроводі - відкрита. Новим у ТА є наявність перегородки в корпусі пристрою, а також виконано розгалуженим колектор підведення гарячих газів, що має два підвідних патрубки і додатково трубопровід, який розділено від підвідних патрубків заслінкою, що має механізм саморегулювання, а крім того, у вихідному колекторі також встановлена заслінка.

Особливості конструкції ТА пояснюються на рис. 1.12, де зображена конструкція пристрою для утилізації й накопичення теплової енергії, що складається з корпусу 1 із трубками газового контуру 2 і трубками водяного контуру 3, а міжтрубний простір заповнено теплоакumuлюючим матеріалом 4 - бінарна сольова евтектична суміш  $KNO_3 - LiNO_3$ . У корпусі є перегородка 5, що утворює дві порожнини I і II, до яких підходять патрубки колектора підведення газів 6, крім того, на правому патрубку колектора підведення газів зроблено додатковий трубопровід відведення газів 7, розділений за допомогою саморегулюючої заслінки 8, яка з'єднується за допомогою тяги 9 із заслінкою 10, виконаною в колекторі відведення газів 11. Трубки водяного контуру мають підвідний 12 і відвідний 13 патрубки. Корпус пристрою ізолювано теплоізоляційним шаром 14.

Описаний ТА дозволяє покращити процеси передачі теплоти від гарячих газів за рахунок збільшення коефіцієнта теплопередачі при роботі з малими об'ємними витратами.

Проблемною ситуацією при конструюванні ТА описаного типу є значна трудомісткість заправлення капсул теплоакumuлюючим матеріалом, тому що необхідно заправляти кожен капсулу окремо. Спостерігається недостатня надійність зварених швів і технологічні труднощі перевірки їхньої герметичності, тому що кожна капсула перед зварюванням швів, які герметизують внутрішній обсяг капсул, заповнюється ТАМ. Відповідно кожний зварювальний шов перед зварюванням треба очистити від ТАМ, щоб забезпечити надійну герметизацію швів, оскільки при розгерметизації капсул ТАМ потрапляє в систему охолодження двигуна й може створити значні труднощі. Кожний

шов у даній ситуації є замикаючим, тому вимоги щодо перевірки його герметичності є особливими, а методи перевірки спеціальними й технічно складними, наприклад визначення хімічного складу рідини, у яку може при випробуваннях виділитися ТАМ. Враховуючи, що оптимальна кількість капсул в акумуляторі теплоти для автомобіля залежно від їхньої конструкції становить від 30 до 150 і більше штук, проблема заправлення капсул і їх герметизації становлять великі технологічні труднощі.

Актуальність зменшення трудомісткості заправлення капсул ТАМ, збільшення надійності зварних швів і зменшення технологічних труднощів перевірки їхньої герметичності очевидна, оскільки вони безпосередньо впливають на вартість кінцевої продукції, а відповідно, на споживчі якості ТА. Ця проблема успішно вирішена конструкцією ТА, для якого спрощена й зменшена трудомісткість заправлення ТАМ, збільшена надійність герметизації місць з'єднання деталей, зменшена технологічна складність перевірки герметичності місць з'єднання деталей, за рахунок того, що в тепловому акумуляторі (рис. 1.13), який містить капсульний блок, розміщено в теплоізолюваному корпусі з вхідним і вихідним отворами. Капсульний блок містить плоскі порожні кільцеві диски з центральним отвором і заповнені ТАМ, що змінює свій агрегатний стан в інтервалі робочих температур. На одній плоскій поверхні дисків є виступи заданої висоти і з заданим розташуванням. При цьому на одній плоскій поверхні диска виконано два отвори, а на іншій – є два отвори з кромками, спрямованими назовні диска, висота яких більше від висоти виступів, співвісних з отворами на протилежному боці дисків. Диски капсульного блока з'єднані між собою герметично, причому кромки кожного диска з'єднані з отворами іншого диска.

На рис. 1.13, а – показана конструкція ТА; а на рис. 1.13, б – фрагмент перерізу ТА (вигляд А). Акумулятор теплоти містить капсульний блок 1, розміщений у теплоізолюваному корпусі 2 із вхідним 3 і вихідним 4 отворами. Капсульний блок 1 складається з плоских порожніх кільцевих подвійних дисків 5 із центральним отвором і заповнений теплоакumuлюючим речовиною 6, що змінює свій агрегатний стан в інтервалі робочих



температур. На одній плоскій поверхні дисків 5 є виступи 7 заданої висоти й із заданим розташуванням і два отвори, а на іншій плоскій поверхні диска 5 є два отвори з відбортовками, спрямованими назовні диска 5, висота яких більше висоти виступів 7, співвісних з отворами 8 на протилежній стороні дисків 5. Диски 5 капсульного блока 1 з'єднані між собою герметично, причому відбортовки кожного диска 5 з'єднано з отворами іншого диска.

Прикладом використання акумулятора теплоти описаної вище конструкції може бути його застосування в системі передпускової теплової підготовки ДВЗ ТЗ або ЕУ. При русі автомобіля охолоджуюча рідина (ОР) двигуна розігріває теплоакumuлюючу речовину, наприклад гідроксид барію (температура плавлення 360 К (87 °С), питома теплота плавлення 305 кДж/кг). Під час стоянки автомобіля запасена теплота зберігається, а при запуску автомобіля при температурі навколишнього середовища до -40 °С насос прокачує ОР через акумулятор теплоти й двигун. Далі двигун нагрівається й надійно запускається. Процес може повторюватись.

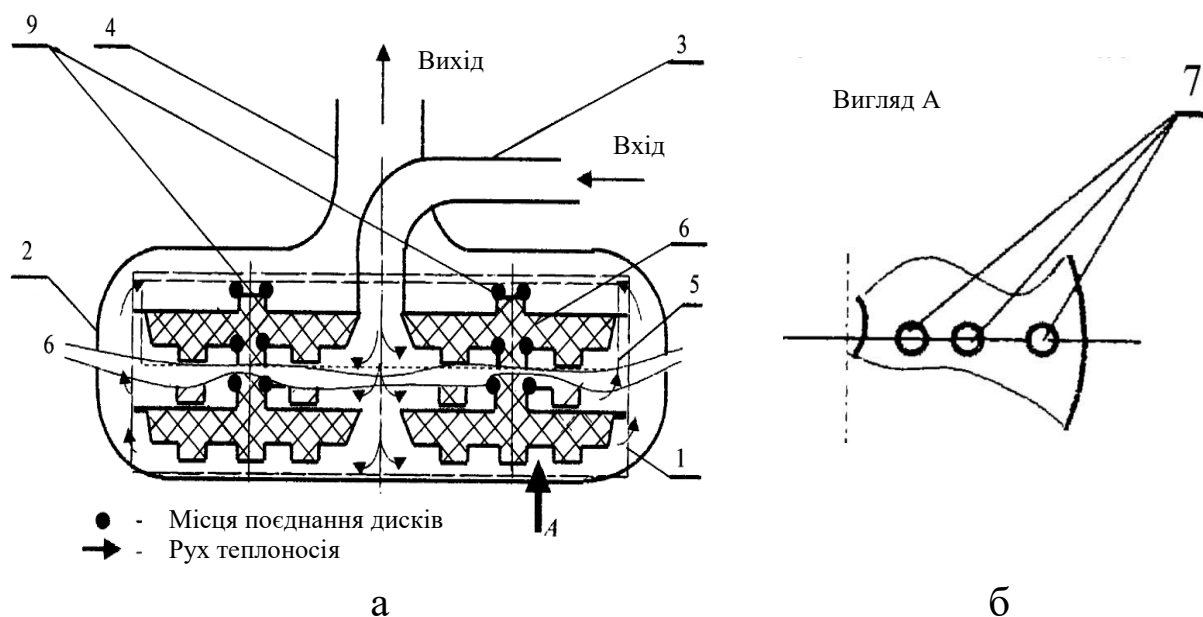


Рис. 1.13. Схема акумулятора теплоти

Позитивний ефект досягається за рахунок створення конструкції капсульного блока, що поєднує внутрішні об'єми всіх дисків, у результаті чого заправлення теплоакumuлюючою речовиною здійснюється один раз у повному обсязі, герметизація

місць з'єднання деталей не вимагає спеціальної підготовки поверхонь, зокрема видалення їх теплоакумулюючою речовиною, перевірка всіх місць з'єднання деталей на герметичність здійснюється через відсутність у внутрішніх порожнинах теплоакумулюючі речовини найпростішими технічними засобами, що дозволяє спростити й зменшити трудомісткість операції з заправлення, збільшити надійність герметизації місць з'єднання деталей, зменшити технологічну складність перевірки герметичності місць з'єднання деталей.

Таким чином, для описаної конструкції кількість заправлень акумулятора теплоти теплоакумулюючою речовиною зменшується в 30-100 разів, відповідно так само зменшується і кількість місць з'єднання деталей, що вимагають герметичності й перевірки на герметичність за наявності теплоакумулюючої речовини у внутрішній порожнині. Таким чином, у конструкції ТА зменшено трудомісткість виготовлення й випробувань і збільшено його надійність.

ТА фазового переходу описаний, розроблений і виготовляється в Російській Федерації серійно під назвою «Пристрій полегшення пуску автомобільного двигуна» УОПД. Цей ТА має конструкцію, що суттєво відрізняється від конструкції O. Schatz (див. рис. 1.14). Теплообмінна матриця його являє собою пакет герметично заварених циліндричних капсул з нержавіючої сталі, які за допомогою перегородок відповідним чином встановлені у внутрішньому корпусі ТА фазового переходу для більш ефективного відведення від них накопиченої теплоти. У якості ТАМ застосовується моногідрат гідроксиду натрію  $NaOH \cdot H_2O$ , яким заповнені циліндричні капсули. У конструкції ТА фазового переходу застосована високоефективна вакуумно-порошкова теплоізоляція.

Підігрів ДВЗ проводиться за рахунок теплової енергії, що накопичується тепловим акумулятором від працюючого ДВЗ, і може зберігатися до двох діб. Перед запуском ДВЗ або під час запуску гаряча охолоджуюча рідина (ОР) за допомогою електронасоса подається з теплового акумулятора в малий контур двигуна і підігріває його. При цьому холодна охолоджуюча рідина з ДВЗ надходить у тепловий акумулятор, перемішуючи і заміщаючи гарячу охолоджуючу рідину без перемішування.

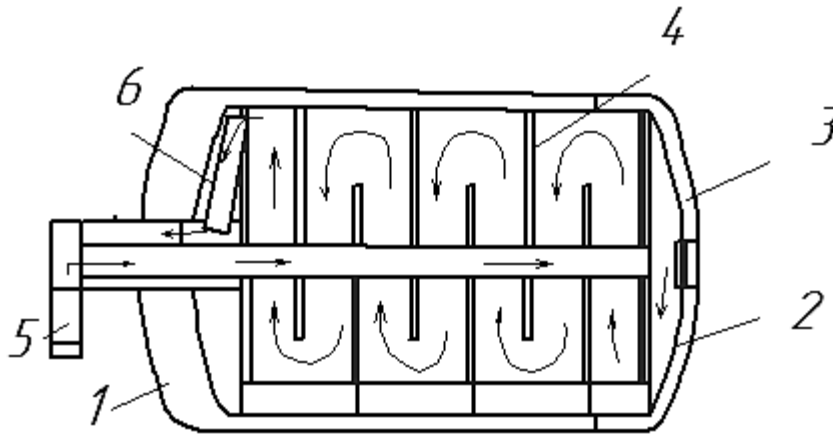


Рис. 1.14. Схема теплового акумулятора фазового переходу УОПД: 1 – зовнішній корпус; 2 – внутрішній корпус; 3 – вакуумно-порошкова теплова ізоляція; 4 – перегородки; 5 – вхідний патрубок; 6 – вихідний патрубок

УОПД має кілька варіантів виконання (УОПД-0,2, УОПД-0,5 і УОПД-0,8) з тепловою ємністю 200, 500 і 800 Вт·год, призначені для підігріву бензинових, дизельних і працюючих на газі ДВЗ із робочим об'ємом до 9 л. Технічна характеристика УОПД наведена в табл. 1.3. До складу комплексу УОПД входять тепловий акумулятор з ложементом, електричний насос, гідророзподільник, пульт керування і блок керування; з'єднувальна гідравлічна і механічна арматура.

Результати випробування підігрівача УОПД-0,2, що були проведені в "АвтоПлюсМАДИ" на автомобілі ВАЗ-21093і з бортовим комп'ютером, наведені на рис. 1.15-1.17. Пристрій був установлений також на автомобілі ВАЗ 2110/ 11/12 (рис. 1.18). При температурі повітря  $-20^{\circ}\text{C}$  і стоянці протягом 10-12 год після циклу прогріву температурний датчик зафіксував температуру рідини  $+12^{\circ}\text{C}$ . Час прогріву до  $40^{\circ}\text{C}$  з уже працюючого двигуна скоротився в 4 рази, а до робочої температури ( $80^{\circ}\text{C}$ ) – у 2 рази. Витрата палива в режимі прогріву скоротилась на 40-50 % і наблизилась до літніх показників.

Таблиця 1.3

## Технічні характеристики УОПД-0,2, УОПД-0,5 і УОПД-0,8

Технічна характеристика УОПД	0,2	0,5	0,8
Максимальний робочий об'єм ДВЗ, що підігрівається, дм <sup>3</sup>	1,8	4,0	9,0
Теплова ємність при температурі заряджання не менше 80 °С, кВт·год	0,2	0,35	0,75
Час (термін) зберігання тепла, що забезпечує ефективний прогрів ДВЗ перед запуском при температурі повітря -40 °С, год	36		42
Маса УОПД суха, не більше, кг	5,5	7,5	19
Маса УОПД, заповненого теплоносієм, не більше, кг	10,6	16,0	22,5
Кількість охолоджуючої рідини, що додатково заливається в систему, л	4,8	8,5	3,5
Термін заряджання теплового акумулятора при температурі теплоносія в системі охолодження ДВЗ не менше 80 °С, не більше, хв	1		15
Терміни підігріву ДВЗ, не більше, хв	1		3-5
Максимально допустима робоча температура охолоджуючої рідини в усіх режимах, °С	110		
Напруга бортової мережі автомобіля, В	12		
Споживаний струм, не більше, А	4		
Кліматичне виконання за ГОСТ 15 150-69	УХПІ		
Встановлення додаткових теплових акумуляторів дозволяє забезпечити підігрів ДВЗ з робочим об'ємом більше 9 л			

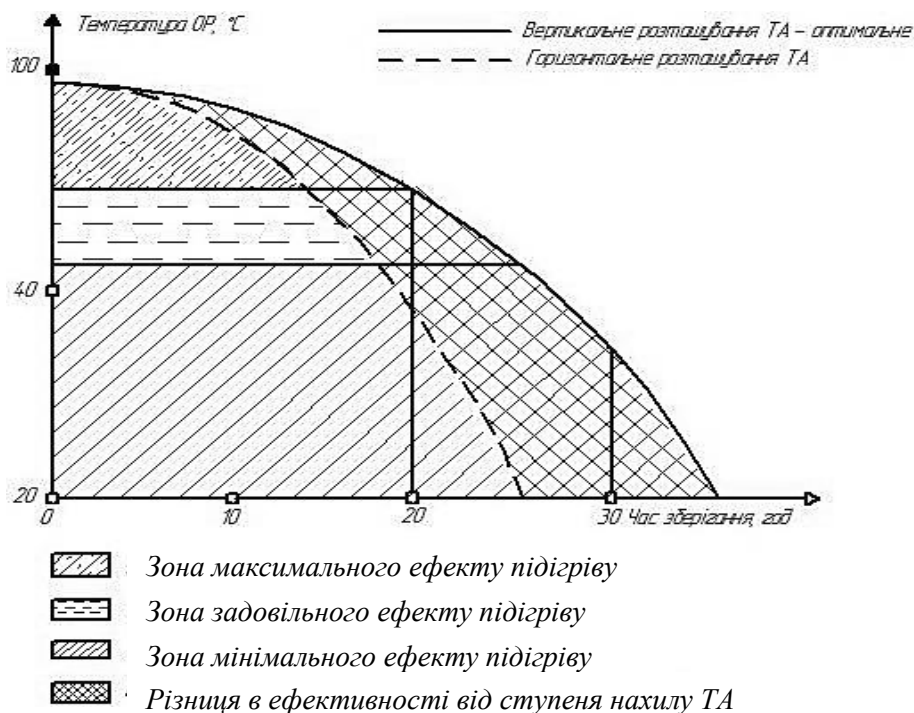


Рис. 1.15. Залежність температури ОР у ТА УОПД-0,2 від часу зберігання

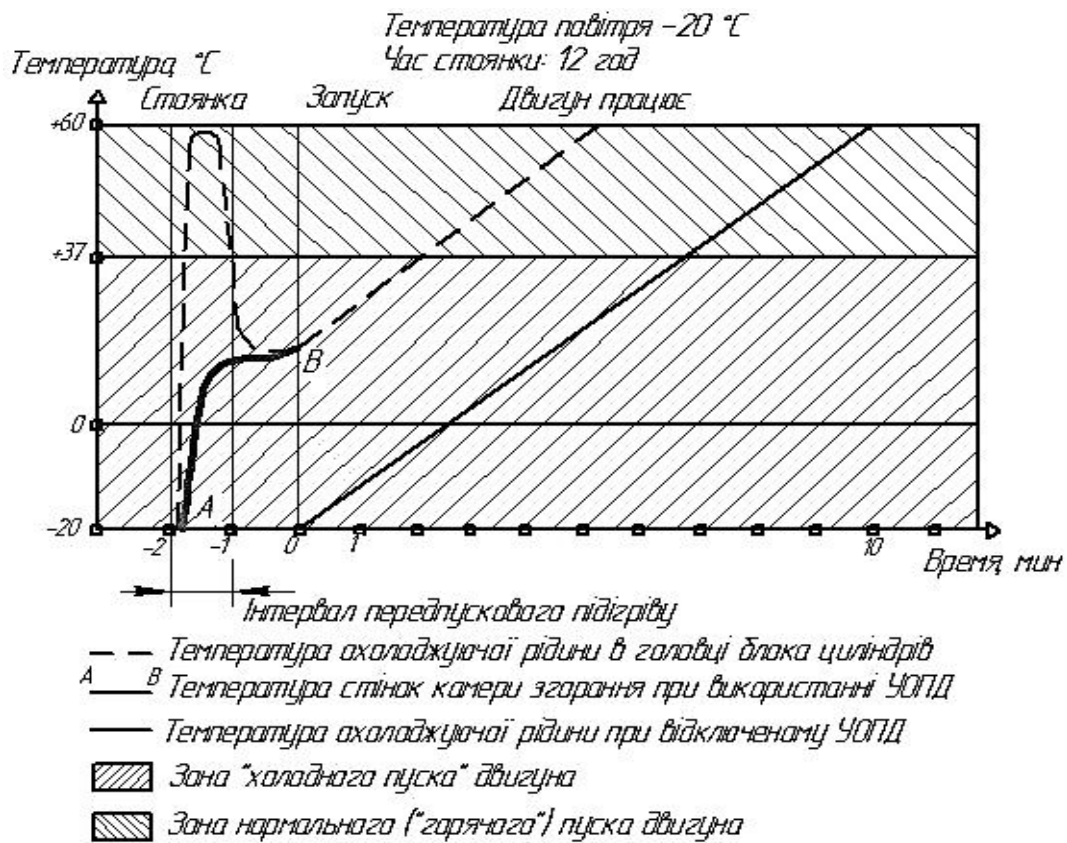


Рис. 1.16. Графік прогріву автомобіля ВАЗ-21093і зі встановленим вертикально УОПД-0,2 (5,1 л)

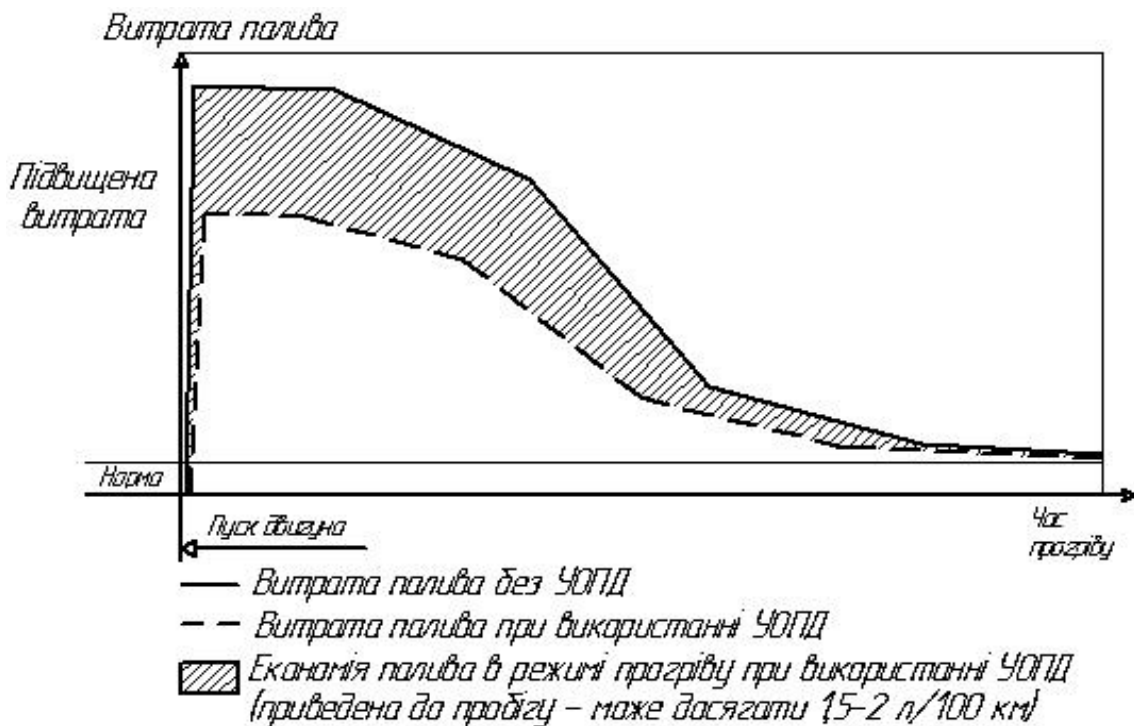


Рис. 1.17. Графік витрати палива від часу прогріву ДВЗ ВАЗ-21093і при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $n = 1300 - 1500 \text{ хв}^{-1}$



Рис. 1.18. Встановлення ТА на автомобілі ВАЗ 2110/ 11/12 від «АвтоПлюсМАДИ»: вид моторного відсіку зі встановленим ТА (1)

У роботах [13, 14] описана конструкція ТА фазового переходу для автобуса ЛАЗ-695Н. ТА фазового переходу було розроблено в Державній науковій установі «Інститут тепло- і масообміну імені А.В. Ликова» Національної Академії Наук Білорусі. ТА фазового переходу (рис. 1.19) складається з зовнішнього 1 і внутрішнього 2 корпусів, між якими розташована теплова ізоляція 3; циліндричних капсул 4 зі щільним гексагональним упакуванням, що зібрані в єдину матрицю, яка обмежена від осьового переміщення пластинами 6 і 7 з отворами; вихідного 5 й вхідного 8 патрубків. У якості ТАМ застосовується моногідрат гідроксиду натрію  $NaOH \cdot H_2O$  з присадкою, що запобігає його переохолодженню в процесі розрядження ТА. Із усіх випробовуваних присадок найкращі результати були отримані при використанні нового кристалоутворювача у вигляді оксиду барію  $BaO$ , що додається в кількості, яка відповідає 5 % октагідрату гідроксиду барію в робочому складі ТАМ. Максимальне переохолодження становило не більше  $2^{\circ}C$ . У якості матеріалу капсул використовувались поліетилен і нержавіюча сталь, у якості теплоізоляційних матеріалів – повсть і пінополіуретан. Випробовувались також і експериментальні зразки ТА фазового переходу з вакуумно-порошковою тепловою ізоляцією.

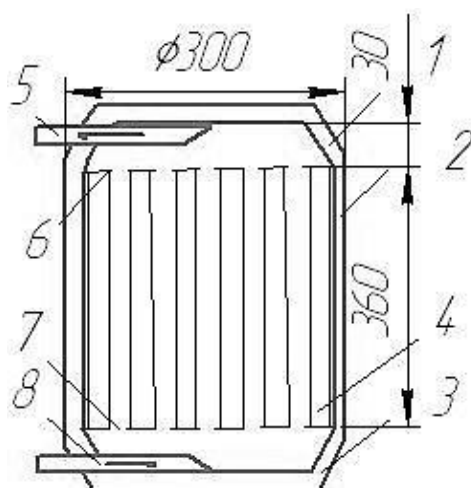


Рис. 1.19. Тепловий акумулятор фазового переходу, адаптований для автобуса ЛАЗ-695Н: 1 – зовнішній корпус; 2 – внутрішній корпус; 3 – теплова ізоляція; 4 – циліндричні капсули; 5 – вихідний патрубок; 6, 7 – пластини з отворами; 8 – вхідний патрубок

Була виготовлена дослідна партія ТА фазового переходу в кількості 10 штук для передпускового розігріву двигунів ЗИЛ-508.10 міських автобусів ЛАЗ-695Н. Вони були встановлені на автобуси в п'яťох містах Республіки Білорусь і одержали позитивні відгуки експлуатаційників. Характеристики ТА фазового переходу наведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

### Технічні характеристики ТА фазового переходу

Параметр	Значення
1	2
Теплоакумулюючий матеріал	$NaOH H_2O + BaO$
Маса теплоакумулюючого матеріалу, кг	27,25
Маса ТА фазового переходу, кг	75
Габаритні розміри, мм х мм	350 х 506
Теплоізоляційний матеріал	пінополіуретан
Кількість капсул, шт.	109
Матеріал капсул	нержавіюча сталь
Довжина капсул, мм	400
Діаметр капсул, мм	25
Теплова ємність ТА фазового переходу, кВт·год	3,6
Час зберігання теплоти, год	36

Застосовувані в ТА фазового переходу капсули можуть мати різну форму. Відомі основні форми капсул, які добре себе показали в умовах експлуатації. Але деякі форми будуть особливо цікаві виходячи з умов ефективного теплообміну. Так, у ТА фазового переходу, описаному в роботі [30], капсули з ТАМ являють собою коаксіально розташовані циліндри з утвореними між ними кільцевими зазорами для проходження рідкого теплоносія - тосолю (рис. 1.20). Завдяки такій конструкції забезпечується більш раціональне використання внутрішнього обсягу ТА фазового переходу.

У роботі [35] подано конструкцію експериментального ТА фазового переходу, що застосовується в якості накопичувача теплової енергії в системі передпускового розігріву для двигуна автомобіля УАЗ-31514 (рис. 1.21). ТА складається з зовнішнього корпусу 1, шару теплової ізоляції 2 і внутрішнього корпусу 3. У середині внутрішнього корпусу 3 розташовано трубний оребрений теплообмінник 4, оточений ТАМ 5. Теплообмінник 4 має вхідний 6 і вихідний 7 патрубки. Корпуси 1, 3 виготовлені зі сталі, теплообмінник 4 - із міді. У якості ТАМ 5 застосовується октагідрат гідроксиду барію  $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ , а в якості теплоізоляційного матеріалу – пінополіуретан.

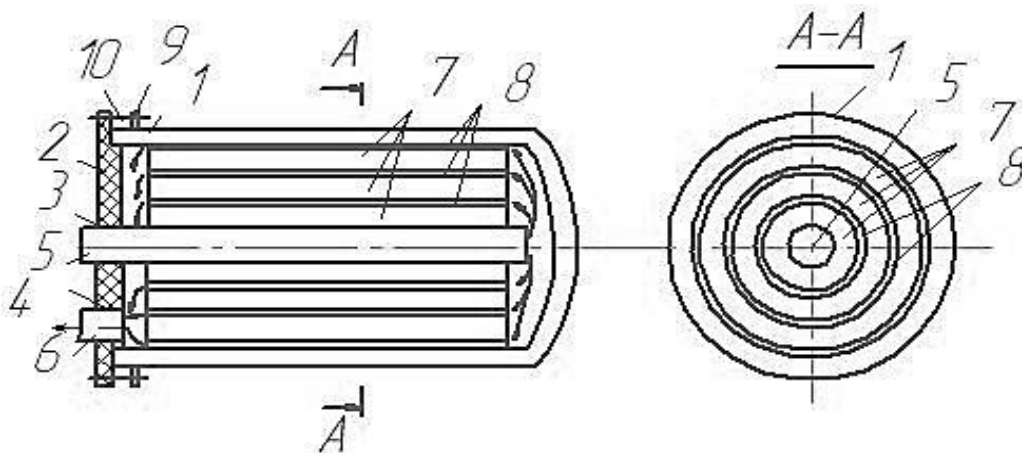


Рис. 1.20. Тепловий акумулятор фазового переходу:  
 1 – вакуумований корпус; 2 – знімна кришка; 3, 4 – відповідно вхідний і вихідний отвори в знімній кришці; 5, 6 – відповідно впускна й випускна труби; 7 – циліндричні коаксіально розташовані капсули, заповнені фазоперехідним теплоакумулюючим матеріалом; 8 – кільцеві зазори; 9 – кільце; 10 – болтове з'єднання



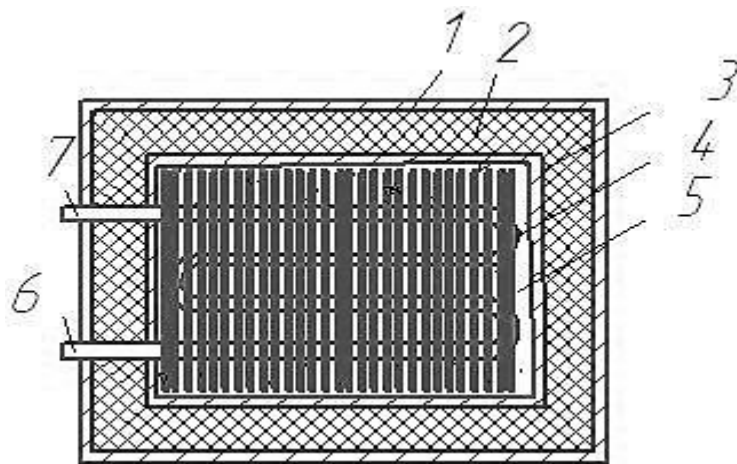


Рис. 1.21. Тепловий акумулятор фазового переходу для автомобіля УАЗ-31514: 1 – зовнішній корпус; 2 – шар теплової ізоляції; 3 – внутрішній корпус; 4 – трубний оребрений теплообмінник; 5 – ТАМ; 6 – вхідний патрубок; 7 – вихідний патрубок

Випробування даного ТА фазового переходу в умовах зимової експлуатації, які проводились у Санкт-Петербурзі при  $t_0 = 256-263$  К, були такими. Зарядження ТА фазового переходу здійснювалось під час руху автомобіля в умовах міста за 30-40 хв, при цьому ТАМ після плавлення нагрівався до 357-361 К. При зберіганні теплоти протягом 16 год температура ТАМ зменшувалась до 351-353 К. Розігрів двигуна перед пуском тривав не більше 3-5 хв, при цьому тосол у позаоболонковому просторі ДВЗ нагрівався до 307-309 К, а його витрата становила 15 л/хв. Пуск ДВЗ проводився з першої спроби.

У роботі [25] описується ТА, який може бути використаний в установках, що споживають теплову енергію при нерівномірному її одержанні або витраті. Акумулятор теплоти містить теплоізолюваний корпус із впускною і випускною трубами, капсулу, виконану у вигляді герметичного простору, утвореного поверхнею внутрішньої й додаткової співвісної стінок, і заповнену змінюючим агрегатний стан у робочому діапазоні температур теплоакумулюючим матеріалом (складом). З метою поліпшення питомих теплофізичних характеристик і створення універсального акумулятора теплоти для використання як у системі охолодження, так і в системі мащення ДВЗ при його передпусковій підготовці в холодну погоду впускна й випускна

труби виконані відокремленими від донної поверхні капсулами на різних відстанях, причому в перпендикулярно поздовжній осі корпусу на заданій відстані один від одного встановлено гідравлічні перешкоди, наприклад у вигляді перфорованих дисків, при цьому перешкоди розташовані вище (нижче) кінцевої частини впускної (випускної) труби, а вся поверхня внутрішньої стінки корпусу використана для утворення капсули. Збільшення теплофізичних (питомих) характеристик в описаному технічному рішенні досягнуто за рахунок використання всієї поверхні внутрішньої стінки корпусу для утворення капсули, тобто за інших рівних умов маса теплоакумулюючої речовини значно більше. Крім того, забезпечення циркуляції теплоносія уздовж усієї поверхні внутрішнього об'єму ТА сприяє надійному теплообміну між ТАМ і теплоносієм. Використання гідравлічних перешкод і їх розміщення певним чином уздовж впускної (випускної) труби дозволяють практично не змішувати рідини різної температури між собою, що дуже важливо при використанні ТА на транспортному засобі.

У ТА на рис. 1.22 через корпус і ізолювану порожнину проходить транзитом додатковий канал відпрацьованих газів, що є теплоносієм заряджання, а ОР - є теплоносієм розряджання. У якості теплоакумулюючого елемента (наповнювача) застосовано суміші на основі нітрату літію. Зовнішній і внутрішній корпуси й канали виконано з однорідного металу – нержавіючої сталі.

Особливістю ТА для ДВЗ є те, що він заряджається від високотемпературних вихлопних газів двигуна (від 300 до 600 °С), які дозволяють використовувати, крім прихованої теплоти плавлення речовини, його теплоємність, завдяки цьому загальна величина теплової енергії, що запасується, на одиниці об'єму акумулятора значно збільшується (до 865 кДж/кг при прихованій теплоті плавлення 362 кДж/кг). Високі температури розігріву нітрату літію (більше 300 °С при температурі плавлення 253 °С) дозволяють одночасно підняти температуру двигуна при розігріві до й понад високі параметри і застосувати для виготовлення деталей акумулятора однорідний матеріал - нержавіючу сталь. Це збільшує його корозійну і механічну міцність. Завдяки набагато більшій кількості теплової енергії, що накопичується, порівняно з відомими ТА термін зберігання

теплоти при температурі  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  зростають. Акумулятор здатний довгостроково зберігати теплоту навіть при більш низьких температурах навколишнього середовища. Стає можливим для обігріву автомобіля, якщо буде потреба, використовувати штатну грубку без конструктивних або схемних змін, робота якої може здійснюватись паралельно прогріву двигуна. Під час роботи грубки інтенсифікується теплообмін через зростання температурного напору, особливо наприкінці процесу розігріву.

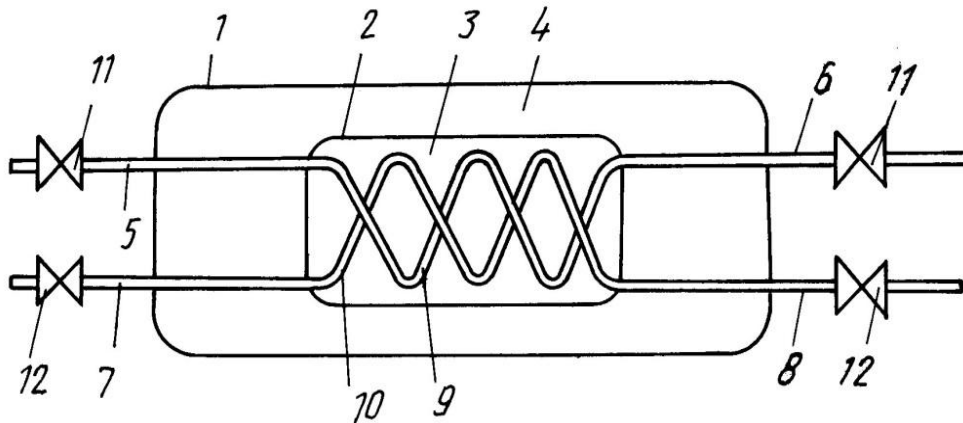


Рис. 1.22. Тепловий акумулятор [46]

ТА, зображений на рис. 1.22, містить зовнішній корпус 1, усередині якого розміщено внутрішній корпус 2, заповнений теплоакумулюючим елементом (наповнювачем) 3 (сумішшю на основі нітрату літію). Простір між внутрішнім 2 і зовнішнім корпусу 1 утворюють ізольовану порожнину 4 зі зниженим тиском. Через стінки зовнішнього корпусу 1, ізольовану порожнину 4 і стінки внутрішнього корпусу 2 проходить трубопровід для циркуляції теплонесучого середовища, що має вхідний кінець 5 і вихідний кінець 6; додаткова трубка для проходження відпрацьованих газів має вхідний кінець 7 і вихідний кінець 8, внутрішні порожнини яких утворюють у внутрішньому корпусі 2, заповненому теплоакумулюючим елементом (наповнювачем) 3, канал 9 теплонесучого середовища й канал 10 відпрацьованих газів. Канал 9 має відповідно вхідний кінець 5 трубопроводу й вихідний кінець 6. Канал 10 має відповідно вхідний кінець 7 і вихідний кінець 8 додаткової трубки. Перед входом у зовнішній корпус 1 і при виході з зовнішнього корпусу 1 трубопровід має клапан 11 трубопроводу

теплонесучого середовища, а додаткова трубка клапани 12. Трубопровід і додаткова трубка виконані, як і зовнішній і внутрішній корпуси, з нержавіючої сталі.

У тепловому акумуляторі на рис. 1.23, внутрішній корпус ТА підвішений відносно зовнішнього корпусу на ділянках трубопроводів, призначених для підведення й відведення заряджаючих теплоносіїв, які й розряджають акумулятор. ТА фазового переходу виконано у зазорі між корпусами у вигляді невзаємозв'язаних спіралей. Спіральне виконання дозволяє одержати більшу довжину, ніж гофроване коліно, при однакових габаритах призводить до зменшення теплових втрат. Крім того, спіралі служать гасниками можливих механічних коливань внутрішнього корпусу відносно зовнішнього, одночасно добре компенсуючи температурні розширення конструкційних матеріалів при заряджанні й розряджанні теплового акумулятора.

Тепловий акумулятор, зображений на рис. 1.23, містить зовнішній корпус 1, усередині якого розташований внутрішній корпус 2 з теплоакумулюючою речовиною. Між внутрішнім 2 і зовнішнім 1 корпусами утворена ізолювана порожнина 3 зі зниженим тиском. До корпусу 1 приєднано трубопроводи 4 (на вході) і 5 (на виході з корпусу). Через корпуси 1, 2 і ізолювану порожнину 3 проходять трубопроводи 6 для теплоносіїв заряджання й розряджання акумулятора, що є продовженням трубопроводів 4. На ділянці ізолюваної порожнини 3 трубопроводи 6 виконуються у вигляді невзаємозв'язаних спіралей, що не стикаються зі стінками 7 і 8 корпусів 1 і 2. Внутрішній корпус 2 підвішений відносно зовнішнього корпусу 1 на цих же спіралеподібних трубопроводах 6.

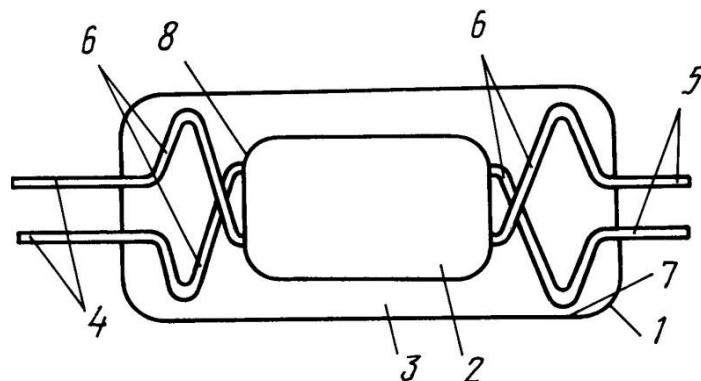


Рис. 1.23. Тепловий акумулятор [47]

Відомий ще один різновид теплового акумулятора, конструкція якого показана на рис. 1.24. ТА являє собою циліндричний корпус 1 з вакуумною теплоізоляцією й кришкою 2, у вхідний отвір 3 якої запресовано впускну трубу 4, у вихідний отвір 5 - випускную трубу 6, що розміщені в корпусі 1, герметичні

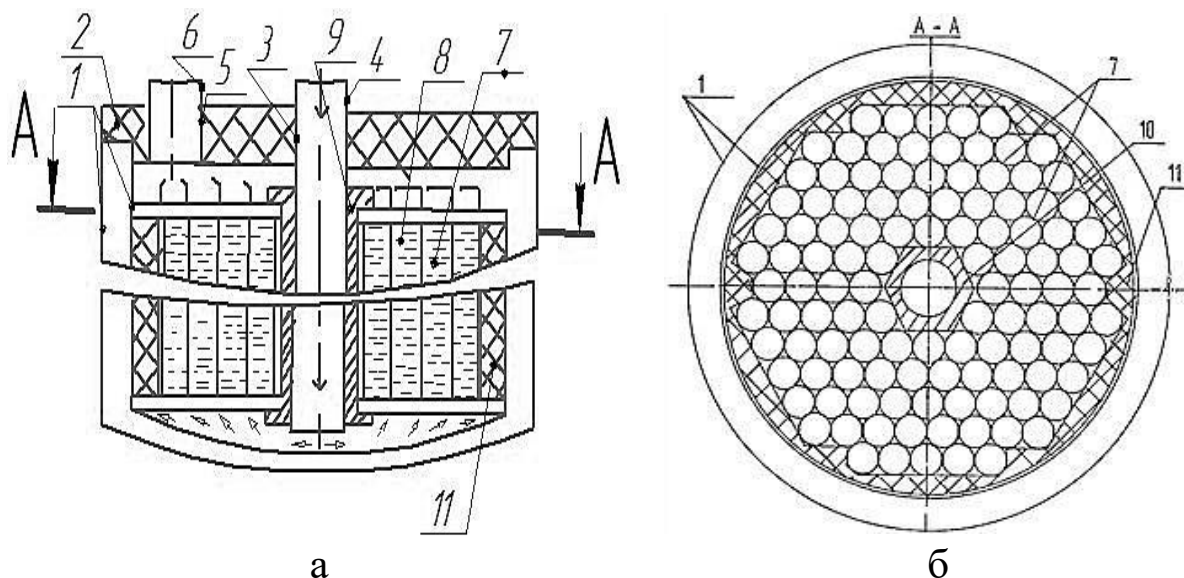


Рис. 1.24. Схема теплового акумулятора фазового переходу

капсули 7, які заповнені теплоакумулюючою речовиною 8, зібрані у вигляді блока й установлені паралельно одна одній між двома роздільними пластинами 9, напрямну втулку 10 у центральній частині блока капсул, що установлений усередині обойми 11 із внутрішньою порожниною призматичної форми. При цьому вхід вихідної труби 6 у кришці 2 повинен мати максимально можливий зсув від поздовжньої осі корпусу 1. Подібна конструкція дозволяє використовувати ТА як у горизонтальному, так і вертикальному положеннях, оскільки у випадку кріплення ТА на транспортному засобі вихідним отвором зверху акумулятор теплоти завжди буде повністю заповнений теплоносієм і всі капсули будуть обмиватися ним.

Капсули 7 розташовані в шаховому порядку щільно одна з одною й утворюють у поперечному перерізі міжтрубного простору безліч замкнених криволінійних трикутників. З метою розміщення найбільшої кількості капсул 7 внутрішня порожнина обойми 11 виконана у вигляді фігури складної призматичної форми (див. рис. 1.24). Порівнюючи описану конструкцію ТА і

аналогічні конструкції, легко зробити висновок, що в описаному випадку питома маса ТАМ 8 при однакових розмірах усіх капсул 7 суттєво більше, ніж в аналогічних конструкціях. При цьому практично не погіршуються теплофізичні або інші характеристики ТА. Особливо слід відзначити той факт, що не зменшується швидкість розряджання ТА. Подібний ефект обумовлений тим, що в перетині міжтрубного простору утворюється безліч криволінійних трикутників кривизною всередину, через які рухається теплоносій (на рис. 1.24, а показано стрілками). Рух рідини ламінарний, тобто практично не відбувається перемішування теплоносія, але відбувається інтенсивний теплообмін, оскільки при однаковій масі теплоносія в цьому випадку площа його контакту з ТАМ 8 набагато вище, ніж у будь-яких аналогічних конструкціях. Вибираючи відповідний діаметр трубчастих капсул 7 за критерієм мінімуму швидкості розряджання, максимуму маси ТАМ 8, можна одержати оптимальні параметри ТА. Експериментально й розрахунками було підтверджено, що оптимальний розмір трубчастих капсул становить 8-10 мм при товщині стінки 0,3 - 0,4 мм. Товщина капсули 7 вибирається з умови необхідної міцності й технології їхньої герметизації. Такі розміри капсул 7 не погіршують технологію їх заправлення теплоакумуючою речовиною 8.

Описаний вище підхід дозволяє суттєво спростити конструкцію ТА. Дійсно, розміщення блока капсул в обоймі 11 і закріплення їх за допомогою гідравлічно прозорих пластин 9 і втулки 10 не тільки робить конструкцію простою і надійною, але й спрощує технологію складання блока капсул і ТА у цілому. При цьому блок капсул має значну поверхню контакту з внутрішньою стінкою корпусу 1, що зменшує відповідні механічні навантаження на конструкцію.

Перевагою цього ТА є те, що трубчаста форма капсул значно спрощує технологію їх виготовлення й заправлення ТАМ у заводських умовах. При цьому заправлення капсул ТАМ може бути здійснено (після закладення одного торця трубки) у різних температурних режимах ТАМ. Крім того, трубчасті капсули мають значну механічну міцність до впливу внутрішніх тисків, що виникають у капсулах при максимальних температурах ТАМ.

Таким чином, у конструкції ТА досягається збільшення питомої маси теплоакumuлюючої речовини, спрощення конструкції без істотного погіршення теплофізичних або інших характеристик акумулятора теплоти.

Прикладом використання даного акумулятора теплоти може бути його застосування в системі передпускової теплової підготовки ДВЗ автомобіля. При русі автомобіля охолоджуюча рідина (наприклад, тосол) розігріває ТАМ, наприклад гідроксид барію ( $t_{\text{плав}} = 78 \text{ }^\circ\text{C}$ , прихована теплота плавлення дорівнює 305 кДж/кг). Під час стоянки автомобіля запасена теплота зберігається, а при запуску автомобіля при низькій температурі навколишнього повітря до  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  насосом з електроприводом тосол прокачується через ТА і двигун. При цьому двигун нагрівається перед пуском до температури пуску і запускається. Можливий також і обігрів салону автомобіля.

ТА, схема якого подана на рис. 1.25, являє собою циліндричний корпус 1 з вакуумною теплоізоляцією 2, вхідним 3 і вихідним 4 отворами, що розташовані на поздовжній осі корпусу 1, насосом 5 з електроприводом, капсулами 6 у вигляді суцільного диска зі змінюючим агрегатний стан у робочому діапазоні температур ТАМ 7, впускною 8 і випускною 9 трубами, розподільними пластинами 10, гідравлічними перешкодами 11, штоками 12. На плоскій поверхні капсул 6 розміщено виступи 13, при цьому капсули 6 установлені перпендикулярно до осі корпусу 1 співвісно з виступами 13 в один бік. Між корпусом 1 і кожною капсулою 6 існує кільцевий зазор 14. На плоскій поверхні капсул 6 уздовж їх зовнішнього діаметра (периметра) попарно розміщено гідравлічні перешкоди 11, причому перешкоди 11 мають однакову довжину, але утворюють рівнорозмірні просвіти (кут А більше кута В (див. рис. 1.25, б)). Гідравлічна перешкода 11 може бути виконана з гумової прокладки спеціальної форми й призначена для фіксації відстані між капсулами й формування потоку теплоносія на даній ділянці. Теплоносій надходить із кільцевого зазора 14 через великий просвіт у простір між капсулами, який і обмежується гідравлічними перешкодами 11, у радіальному напрямку потрапляє через малий просвіт у кільцевий зазор протилежної сторони.

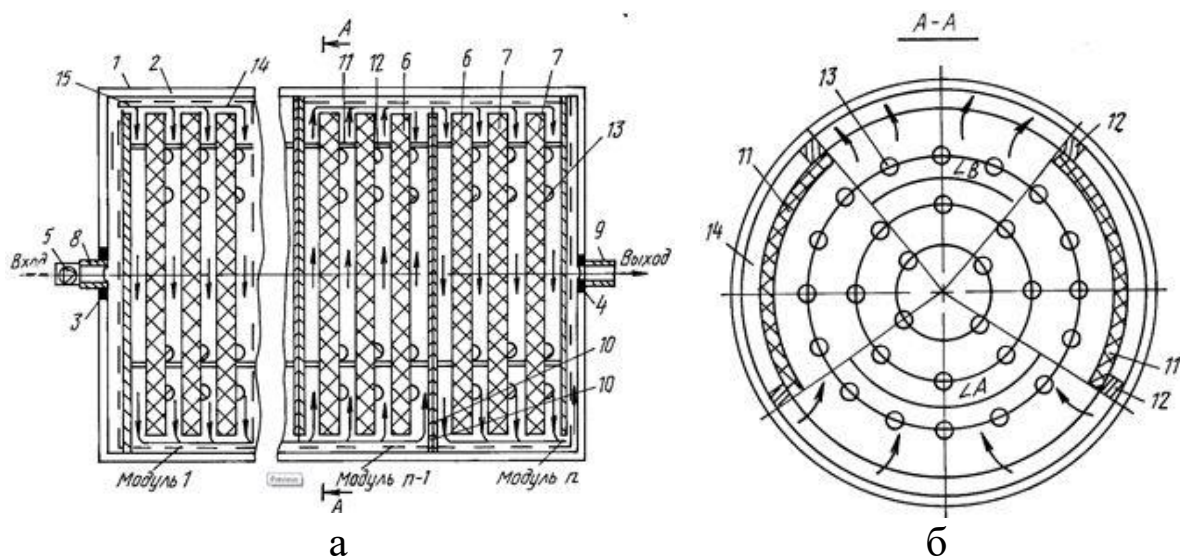


Рис. 1.25. Схема теплового акумулятора фазового переходу

На розподільних пластинах 10 із зовнішнього боку виконано дугоподібний паз 15 шириною, що дорівнює ширині кільцевого зазора 14, при цьому пази в модулі рознесені навколо поздовжньої осі корпусу 1 на  $180^\circ$  і перебувають у секторах розташування вищезгаданих просвітів. Розподільні пластини 10 і пази 15 призначено для організації послідовно-паралельного потоку теплоносія, причому в теплообмінному модулі рух потоку паралельний (показано на рис. 1.25 стрілками), а модулі між собою гідравлічно з'єднані послідовно. Капсули 6 об'єднані в типові модулі, що містять крім капсул 6, з розподільних пластин 10, гідравлічних перешкод 11, штоків 12. Штоки 12 встановлено в секторах розміщення гідравлічних перешкод 11. Оскільки штоки 12, крім стягування пластин 10, виконують функцію гідравлічної перешкоди (обмежують рух теплоносія в кільцевому зазорі 14 за колом), то його розміри дорівнюють відстані між корпусом 1 і капсулами 6. Модульне виконання спрощує конструкцію ТА і полегшує його складання в заводських умовах. Висота гідравлічних перешкод може вибиратися оптимальною й перевищує висоту виступів 13. Ця обставина дозволяє плоским стінкам капсул 6 вільно деформуватися при фазовому переході ТАМ.

Перевагами цього ТА є те, що така конструкція дозволяє збільшити теплоємність, оскільки за інших рівних умов збільшується об'єм ТАМ за рахунок виключення центрального



отвору в капсулах; підвищується технологічність виготовлення капсул у заводських умовах, тому що герметизація суцільних дискових капсул не викликає особливих труднощів; підвищується й надійність роботи ТА через зменшення довжини з'єднувального шва й виключення центрального отвору, герметизація якого становить найбільш складну й ненадійну технологічну операцію. Таким чином, в описаній конструкції збільшено теплоємність ТА, підвищено технологічність виготовлення елементів конструкції в заводських умовах і надійність роботи всього акумулятора теплоти.

Описані вище конструкції ТА фазового переходу, що включаються до складу систем передпускової теплової підготовки ДВЗ, утилізують і акумулюють теплоту ОР двигуна. При цьому ТАМ розташовується або в герметичних капсулах, або в міжтрубному просторі трубного теплообмінника. Теплообмін рідкого теплоносія з ТАМ здійснюється шляхом змушеної конвекції через нерухому жорстку або еластичну пружну стінки капсульного теплообмінника, а також через нерухому тверду стінку трубного теплообмінника.

Досвід проектування й експлуатації ТА фазового переходу в різних технічних системах показує, що розміщення ТАМ у капсулах забезпечує високу надійність конструкції, дозволяє створювати розвинену поверхню теплообміну, при використанні капсул з еластичними пружними стінками компенсувати зміну об'єму ТАМ в процесі фазових переходів. Однак внаслідок низької теплопровідності більшості відомих ТАМ необхідна велика кількість капсул малого розміру, що призводить до великої трудомісткості виготовлення ТА фазового переходу, недостатньо раціонального використання об'єму. Доцільним є застосування ТА фазового переходу з капсульними теплообмінниками у випадках малих теплових потоків теплообмінної поверхні.

Розташування ТАМ в міжтрубному просторі трубного теплообмінника забезпечує раціональне використання внутрішнього об'єму ТА фазового переходу і застосування традиційної технології виготовлення теплообмінних апаратів. Однак при такій конструкції ускладнено забезпечення вільного розширення ТАМ при його плавленні, тому знижується надійність ТА фазового переходу в цілому.

Велика кількість ТА фазового переходу, розроблених для використання на мобільних машинах, утилізують і акумулюють теплоту відпрацьованих газів ДВЗ.

Конструкція експериментального ТА фазового переходу, який призначений для передпускового розігріву двигуна трелювального трактора ТДТ-55А, показана на рис. 1.26. За основу ТА фазового переходу, що виконаний у вигляді теплообмінного апарата кожухотрубного типу, служить теплоакумулююче ядро, що складається з пучків газових 1 і рідинних 2 труб, закріплених у трубних дошках 3 і 4. Між газовим і рідинними теплообмінниками перебуває ТАМ 5, а для підведення й відведення ВГ і ОР акумулятор оснащено газовими коробами 6, 7 і рідинні патрубками 8, 9. Теплоакумулююче ядро й зовнішній корпус 10 ТА розділені шаром теплової ізоляції 11.

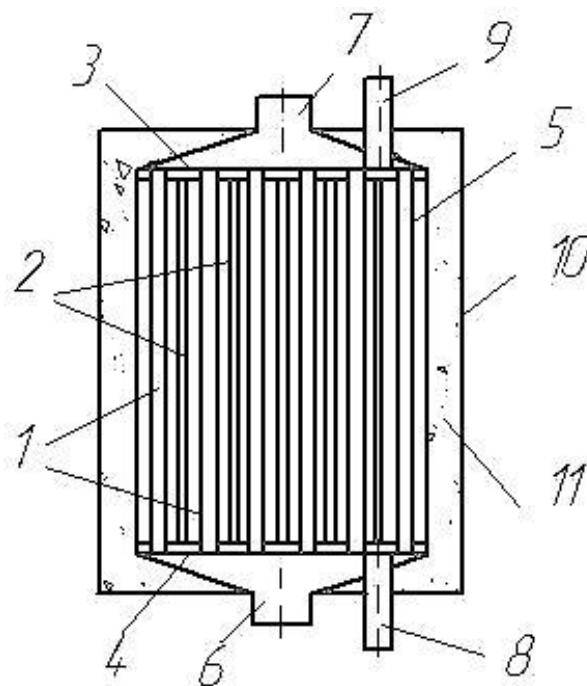


Рис. 1.26. Схема теплового акумулятора фазового переходу для трелювального трактора ТДТ-55А: 1 – пучок газових труб; 2 – пучок рідинних труб; 3, 4 – трубні дошки; 5 – ТАМ; 6, 7 – газові коробки; 8, 9 – рідинні патрубки; 10 – зовнішній корпус; 11 – шар теплової ізоляції

Накопичення теплової енергії ТА фазового переходу, встановленого на тракторний дизель, здійснюється в процесі його роботи за рахунок теплообміну ВГ з ТАМ 5, які надходять у газовий короб 6, розділяються за трубами 1 газового теплообмінника й викидаються в атмосферу через газовий короб 7.

Розрядження ТА відбувається за рахунок теплообміну ОР (тосолу) з розплавленим ТАМ 5. При цьому тосол спочатку подається в патрубок 8 і надходить у простір, утворений трубними дошками 3, 4, а потім розподіляється за трубами 2 рідинного теплообмінника. Нагріваючись, він видаляється з ТА фазового переходу через патрубок 9. Даний ТА фазового переходу був розроблений авторами робіт [17, 20] для роботи від температури навколишнього середовища до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У якості ТАМ у ньому застосовується біполярна евтектична система з солей неорганічних кислот.

Оскільки вищеописаний акумулятор може працювати на низькозамерзаючих рідинах, то конструкція ТА фазового переходу дозволяє в якості теплоносія використовувати воду. Це досягається завдяки тому, що ТА фазового переходу кожухотрубного типу, що принципово не відрізняється від описаного в роботі [20], з'єднаний з ємністю для зберігання води, причому ТА фазового переходу і ємність розміщені в єдиному корпусі й розділені перегородкою з теплоізоляційного матеріалу.

На рис. 1.27 показана схема теплоакумулятора для привода (у поздовжньому розрізі) й переріз ТА в одній з площин. Він складається з корпусу теплоакумулятора 1, покритого теплоізоляційним матеріалом 2. Порожнина корпусу 1 заповнена теплоакумуляюючим матеріалом 3, наприклад поліетиленом. У корпусі 1 є канали 4, що проходять по всій довжині акумулятора, призначені для пропускання гарячих відпрацьованих газів ДВЗ, які призначені бути гріючим теплоносієм теплоакумулятора. Ці канали 4 мають прямокутний переріз, а їх кількість (2 і більше) залежить від розміру теплоакумулятора. Між каналами 4, а також між стінками крайніх каналів і стінками корпусу 1 акумулятора проходять труби 5 теплообмінника для пропускання теплоносія, що нагрівається, кожна з яких виконана у вигляді змійовика й має

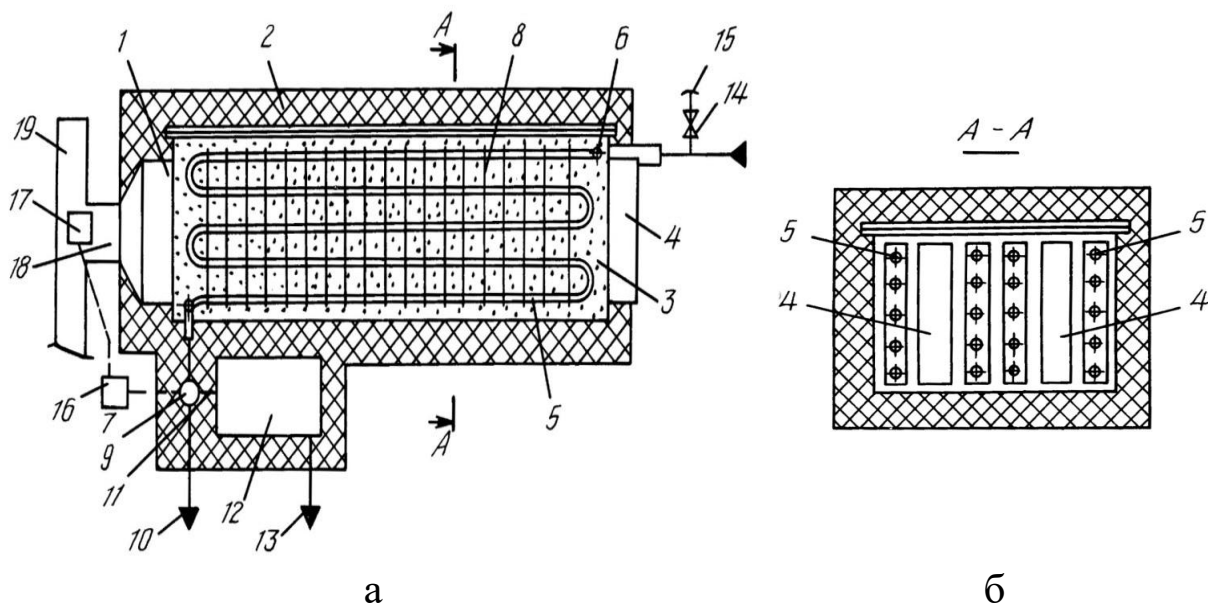


Рис. 1.27. Схема теплового акумулятора для привода транспортного засобу: а – загальний вигляд теплоакумулятора в поздовжньому перерізі; б – переріз ТА (а) в площині А-А

по всій своїй довжині ухил від верхнього вхідного колектора 6 до вихідного нижнього 7. Труби 5 оснащені ребрами 8, які збільшують поверхню теплообміну. Нижній вихідний колектор з'єднаний двопозиційним триходовим клапаном 9, від якого відходять дві лінії: одна лінія 10 у контур системи охолодження двигуна (не показано), інша лінія 11 веде до додаткового бачка 12, розміщеного під корпусом 1 теплоакумулятора, що й має загальну з ним теплоізоляцію 2, у тому числі й по поверхні, що відділяє днище теплоакумулятора від поверхні бачка 12. Від додаткового бачка 12 відходить ще одна лінія 13 у контур системи охолодження двигуна. На вході теплообмінника встановлено клапан 14 із сапуном 15. Клапан 9 з'єднаний блокувальним зв'язком 16 із клапаном 17, який встановлено на вхідному колекторі 18, з'єднаним з вихлопною трубою 19 двигуна. Цей блокувальний зв'язок 16 може бути виконаний механічним (кінематичним) або електричним. Ємність додаткового бачка 12 повинна бути не менше від сумарної ємності труб теплообмінника 5.

Перед зарядженням теплоакумулятора відкривають клапан 14, з'єднуючи верхню точку теплообмінника 5 з атмосферою через сапун 15 і клапан 9, який у своїй першій позиції з'єднує нижній кінець теплообмінника 5 з додатковим бачком 12. Рідина,

що перебуває в зміювиках теплообмінника, завдяки наявності ухилу по всій довжині зміювиків самопливом зливається в бачок 12. При цьому лінія 13 роз'єднана з контуром циркуляції теплоносія, що нагрівається, тобто з контуром системи рідинного охолодження двигуна. Блокувальний зв'язок 16 не дозволяє відкрити клапан 17 для пропускання відпрацьованих газів у канали 4 теплоаккумулятора до того часу, поки клапан 9 не буде встановлено на з'єднання теплообмінника 5 з додатковим бачком 12. Це запобігає роботі теплоаккумулятора в режимі заряджання за наявності рідини в теплообміннику 5, що могло б призвести до неприпустимого перегріву теплоносія, що нагрівається (антифриз, вода), який у цьому режимі повністю вилучений з теплообмінника 5 у додатковий бачок 12. Злив рідини в додатковий бачок 12 необхідний тому, що до вмикання насоса контуру циркуляції рідини системи охолодження цей контур увесь заповнений і не може прийняти додатковий обсяг рідини. Крім того, теплоізолюваний додатковий бачок не дає об'єму теплоносія, що перебуває в ньому, значно охолонути так, щоб дозволити згодом, при запуску насоса системи охолодження, мати додаткове джерело тепла в усмоктувальній лінії цього насоса. Через відкритий клапан 17 гарячі відпрацьовані гази спрямовуються в канали 4 і віддають частину теплової енергії ТАМ 3. Останній нагрівається й при досягненні температури плавлення переходить у рідку фазу, відпрацьовані гази викидаються в атмосферу. У режимі розряджання теплоаккумулятора закривають клапан 14, від'єднуючи теплообмінник 5 від атмосфери, клапан 9 перемикається в другу позицію, з'єднуючи колектор 7 з лінією 10, закривається клапан 17, від'єднуючи газовий колектор 18 від труби 19. При вмиканні насоса контуру циркуляції рідини системи охолодження на вхід цього насоса надходить рідина з додаткового бачка 12 і змішується з загальним потоком рідини, який через вхідний колектор 6 теплообмінника 5 проходить по його трубах і забирає теплоту від розігрітого ТАМ 3 через стінки труб і ребра 8. Теплова енергія, накопичена в ТАМ теплоаккумулятора, підвищує температуру рідини системи охолодження, у контур якої тепер включений теплообмінник 5. Ця рідина нагріває двигун і полегшує його запуск при низьких температурах.

Перевагами теплоаккумулятора порівняно з відомими є таке: перегрів охолоджуючої рідини (антифризу) виключається завдяки її зливу в додатковий бачок у режимі заряджання теплоаккумулятора й при простому й зручному поверненні цієї рідини в контур системи охолодження в режимі розряджання для передпускового нагрівання; наявність постійного ухилу труб другого каналу виключає застій рідини: вона повністю стікає самопливом; теплова ізоляція додаткового бачка від навколишнього середовища дозволяє зберегти рідину досить теплою, що покликано полегшити її подальше введення в контур циркуляції при запуску й зберегти частину енергії, а теплова ізоляція додаткового бачка від корпусу теплоаккумулятора виключає перегрів рідини в самому додатковому бачку; виконання об'єму додаткового бачка не меншим, ніж сумарний об'єм другого каналу, гарантує повне його спустошення при зливі рідини для заряджання теплоаккумулятора; наявність кінематичного або електричного блокування між клапанами, що відкривають доступ у додатковий бачок рідини з другого каналу теплоаккумулятора, і пристроєм, що відкриває доступ відпрацьованим газам у перший канал при заряджанні теплоаккумулятора, забезпечує безпеку роботи, крім випадків, коли заряджання може здійснюватись при заповненому рідиною другому каналі в результаті недбалості персоналу.

Описаний ТА дозволяє використовувати акумульовану теплову енергію також для нагрівання оливи системи мащення силової установки, нагрівання акумуляторних батарей, опалення кабіни й інших споживачів. Це дозволяє вирішувати завдання заощадження дефіцитних енергоресурсів з високим ступенем надійності.

У роботах [17, 22] повідомляється про випробування макетного зразка ТА фазового переходу, створеного в Тюменському державному нафтогазовому університеті й призначеного для передпускового розігріву дизеля й гідросистеми будівельної машини. Конструктивно він містить у собі два теплообмінники - газовий і рідинний, причому останній з метою інтенсифікації теплообміну між ТАМ і антифризом виконано ребреним. У якості ТАМ використовується поліетилен високої густини марки 273. Проведені випробування макетного

зразка ТА фазового переходу, що включається в систему передпускового розігріву дизеля Д-160, показали його високу ефективність при  $t_0 = 223 \text{ K}$ . Це пов'язане, головним чином, із тим, що в перші 10 хв розігріву теплова потужність розряджання ТА фазового переходу становить 40-50 кВт, потім, протягом розігріву ДВЗ, воно знижується до 6-7 кВт. Це призводить до того, що на першому етапі від ТА фазового переходу до дизеля передається до 75-80 % теплоти й тільки 20-25 % переноситься в другій фазі. При цьому в першій фазі температура антифризу в області головок блока циліндрів дизеля досягає 333 К, а на виході з нього – вище на 5-10 К. Температура оливи в картері дизеля в області оливоприймача становить 293-303 К.

У роботі наводяться відомості про проведення експериментальних досліджень на запатентованому тепловому акумуляторі, про розроблення рекомендацій з раціональних параметрів його конструкції і про особливості конструкції ТА (рис. 1.28). Його основні фізичні, геометричні і технологічні параметри подано в табл. 1.5.

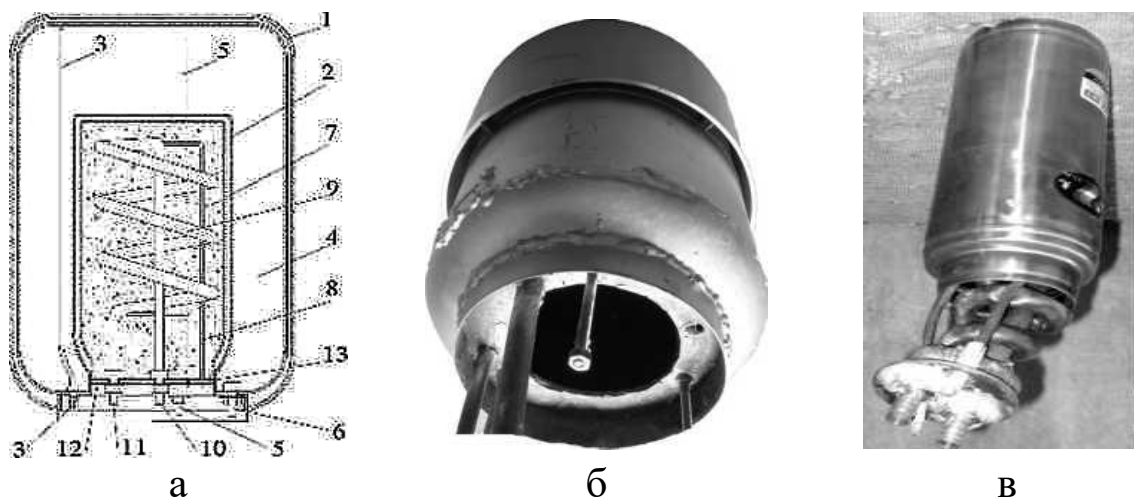


Рис. 1.28. Тепловий акумулятор:  
 а – схема теплового акумулятора; б – корпус теплового акумулятора в розрізі; в – знімна капсула з теплоакumuлюючим матеріалом, мідним теплообмінником і ТЕНОм

ТА складається з корпусу 1, виконаного з подвійними стінками й повітряно-вакуумною ізоляцією (зазор між стінками), капсули 2, що знімається, трубки 3 для відведення повітря з

порожнини 4 теплового акумулятора, трубок 5 і 6 відповідно для підведення й відведення охолоджуючої двигун рідини (ОР) з порожнини 4 ТА. Капсула 2, що знімається, складається з корпусу з подвійними стінками й повітряно-вакуумною ізоляцією (зазор між стінками), порожнини, що заповнена ТАМ 7, який плавиться, теплового електричного нагрівача 8 (ТЕН), що підводить теплоту до ТАМ 7, теплообмінника 9 для ОР із вхідним 10 і вихідним 11 штуцерами. Для виключення пробоя між кришкою 12 і ТЕН 8 капсули 2, що знімається, знаходиться ізоляційний паранітовий шар 13.

Таблиця 1.5

### Фізико-геометричні параметри теплового акумулятора

Параметр	Значення
Стальний корпус теплового акумулятора (висота x діаметр x товщина), м:	
зовнішня стінка	0,307x0,245x0,002
внутрішня стінка	0,270x0,221x0,001
питома теплоємність, $c_p$ , кДж/(кг·К)	0,462
теплопровідність, $\lambda$ , Вт/(м·°С)	45,4
густина, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7900
Стальний корпус капсули, що знімається (висота x діаметр x товщина), м:	
зовнішня стінка	0,240x0,100x0,001
внутрішня стінка	0,230x0,092x0,001
питома теплоємність, $c_p$ , кДж/(кг·К)	0,462
теплопровідність, $\lambda$ , Вт/(м·°С)	45,4
густина, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7900
Внутрішній об'єм порожнини теплового акумулятора, м <sup>3</sup>	0,008
Внутрішній об'єм порожнини капсули, що знімається, м <sup>3</sup>	0,0015
Маса теплоакумуючої речовини, кг	1

Дослідження передпускового розігріву двигуна системою утилізації теплоти з описаним ТА фазового переходу проводились після того як ОР знаходилась у ТА після закінчення



16 год, при температурі навколишнього середовища  $-17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура двигуна знизилася з  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура теплоакumuлюючого матеріалу - з  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При цьому на момент розігріву двигуна його температура була  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результати експериментальних досліджень подано у вигляді графіків зміни температур різних ділянок двигуна на рис. 1.29. Підведення ОР з ТА здійснювалось у нижньому поясі сорочки охолодження ДВЗ.

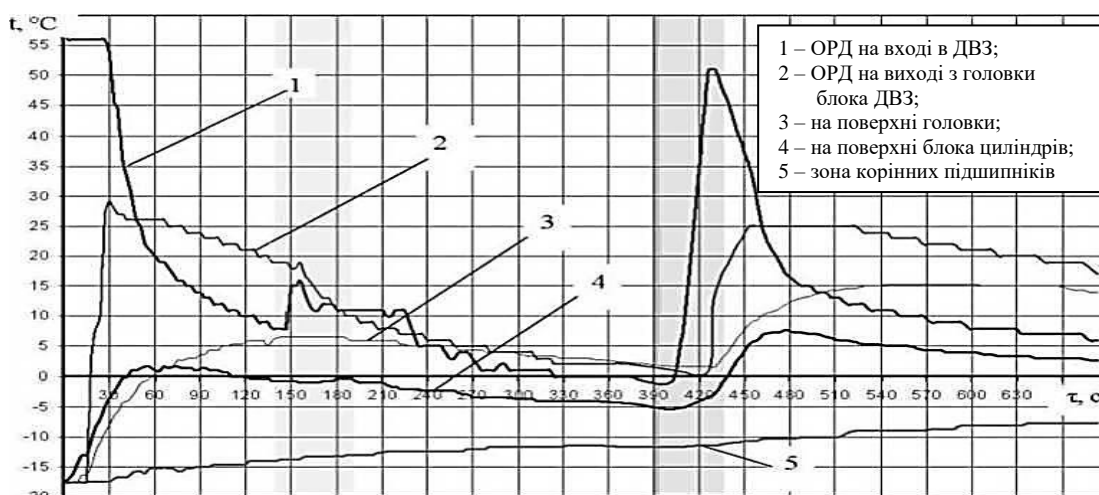


Рис. 1.29. Зміна температур різних ділянок двигуна при його розігріві ОР з ТА

Результат, який може бути отриманий при використанні конструкції ТА, полягає в підвищенні ефективності тепловіддачі від ТАМ до середовища, що нагрівається; у підтримці постійної температури середовища, що нагрівається, протягом усього процесу розряджання; у більш повному використанні теплоти ТАМ, що акумулюється.

Поставлене завдання вирішується за допомогою, що в описаному способі роботи акумулятора теплоти фазового переходу видалення скоринки затверділого ТАМ з теплообмінної поверхні (наприклад, трубок) у режимі розряджання відбувається в результаті того, що речовину, що нагрівається, пропускають по черзі через групи теплообмінних поверхонь (наприклад, групи трубок), а на незадіяних групах у цей час відбувається плавлення затверділого ТАМ за рахунок його внутрішньої енергії.

Перевагою запропонованого способу є те, що він дозволяє одержувати середовище, що нагрівається з однаковою температурою під час усього процесу розряджання ТА фазового переходу, а час, протягом якого середовище, що нагрівається, має високу температуру, збільшується.

Особливість ТА полягає в тому, що в процесі розряджання ТА фазового переходу відбувається почергове використання груп теплообмінних поверхонь.

На рис. 1.30, а зображена схема розташування елементів установки, що забезпечує реалізацію запропонованого способу, наприклад із чотирма групами теплообмінних поверхонь (трубок); на рис. 1.30, б – приклад розташування груп трубок, наприклад чотирьох, у поперечному перерізі теплообмінника.

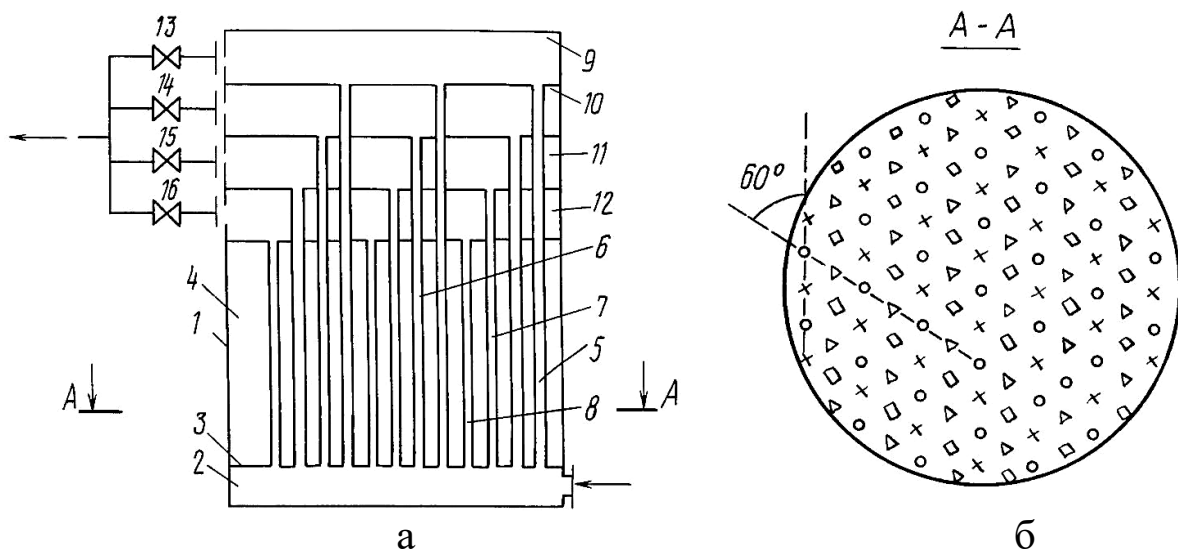


Рис. 1.30. Схема акумулятора теплоти фазового переходу

ТА складається з вертикального кожухотрубного теплообмінника 1, що має в нижній частині вхідну камеру 2 і трубну дошку 3, у якій укріплено, наприклад, чотири групи трубок 5-8, причому останні виходять відповідно в чотири випускні камери 9-12, кожна з яких має на виході в мережу запірний пристрій 13-16 відповідно. Між трубною дошкою 3 і камерою 12 розташовано міжтрубний простір 4.

Приклад розташування груп трубок у поперечному перерізі теплообмінника показано на рис. 1.30, б. Для чотирьох груп трубки розташовано таким чином, що навколо кожної з трубок однієї групи розташовано трубки трьох інших груп за вершинами правильного шестикутника.

Для здійснення запропонованого способу подана принципова схема роботи ТА фазового переходу, що включає процес нагрівання ТАМ за рахунок пропускання гарячого тепловіддавальної речовини через усі групи трубок одночасно, плавлення ТАМ і нагрівання іншої теплопоглинальної речовини, що пропускається через окремі групи трубок по черзі до повного затвердіння ТАМ у такій послідовності: 5 (I група), потім 6 (II група), потім 7 (III група), потім 8 (IV група), потім знову 5 (I група), 6 (II група), 7 (III група), 8 (IV група) і потім усі чотири групи одночасно. Даний ТА може використовуватись у системах накопичення теплоти й використання її в пікові навантаження, а також для підтримки постійної температури середовища, що нагрівається [27].

Для максимально повної утилізації в ТА теплової енергії ВГ ДВЗ відомо технічне рішення, при якому в умовах низьких температур використовують багатосекційний (у розглянутому випадку 3 секції) ТА фазового переходу. Для такого ТА необхідні фазоперехідні ТАМ різних категорій: середньо- і низькотемпературні, які повинні мати стійкість до тривалої роботи в діапазоні температур 120 – 500 °С, тобто температури відпрацьованих газів ДВЗ.

Відомим є тепловий акумулятор фазового переходу, який містить теплоізолюваний вакуумований циліндричний корпус зі знімною кришкою, що має вхідний і вихідний отвори, впускну і випускні труби, блок капсул, заповнених однаковим теплоакумулюючим матеріалом і виконаних з коаксіально розташованих циліндрів з утворенням між ними кільцевих зазорів для проходження рідкого теплоносія. Він містить не менше двох блоків капсул з різним теплоакумулюючим матеріалом, розміщених в одному вакуумованому корпусі, має спільні вхідний і вихідний трубопроводи, причому впускні труби блоків капсул з'єднані перепускними трубами з вхідним трубопроводом, а випускні труби блоків капсул з'єднані перепускними трубами з впускними трубами блоків з більш низьким діапазоном робочих температур і на кожній перепускній трубці встановлено запірний клапан.

Такий акумулятор дозволяє здійснювати відбір теплової енергії від відпрацьованих газів ДВЗ в більш широкому

температурному діапазоні і тим самим накопичувати й утримувати більшу кількість теплоти, а також забезпечує вибірковість діапазону робочих температур.

При здійсненні пошуку низькотемпературних матеріалів для багатосекційного ТА варто враховувати, що при низьких температурах (менше 100 °С) у випускному колекторі дизеля починається процес конденсації вологи. При взаємодії вологи з компонентами газового потоку утворюються кислоти, в основному сірчиста і сірчана, які осаджуються на стінках колектора й руйнують їх. Щоб уникнути «холодної корозії» колектора, необхідно тримати нижній інтервал температур працюючого ТАМ у межах 100 – 120 °С. Для більшого акумулювання теплової енергії верхня межа температури ТАМ повинна бути 500-525 °С, тобто відповідати температурі вихлопних газів ДВЗ. Однак необхідний температурний максимум при практичному використанні теплової енергії, що відводиться, становить 350 °С, тому дана величина й прийнята за верхню межу температури в описаному ТАМ. Таким чином, посекційно працюючі значення температур для ТАМ такі: 1 секція 300 – 350 °С; 2 секція 200 – 250 °С; 3 секція 100 – 120 °С. Умовно роботу системи прогрівання можливо розділити на декілька режимів: режим 1 – подача гарячого повітря в об'єм порожнини картера дизеля (прогрівання картера і деталей двигуна; працюють секції 1 і 2 ТА); режим 2 – прогрівання водяної системи дизеля (секція 3 ТА); режим 3 – комбінований.

На рис. 1.31 наведено схему багатосекційного теплового акумулятора фазового переходу. Тепловий акумулятор фазового переходу складається з вакуумованого корпусу 1, знімної кришки 2, що має входні 3, 4, 5 і вихідні 6, 7, 8 отвори, у які запресовано впускні 9, 10, 11 і випускні 12, 13, 14 труби блоків. У середині корпусу знаходяться блоки 15, 16, 17, що складаються з коаксіально розташованих циліндричних капсул 18 із зазорами 19 для проходження рідини. Вся конструкція теплообмінника змонтована на знімній кришці 2, яка закріплена за допомогою болтового з'єднання 20 до кільця 21, привареного до корпусу. Регулювати кількість тепла, що подається, дозволяє наявність на перепускних трубах запірних клапанів 22, 23, 24, 25, 26.

*Принцип роботи пристрою* (див. рис. 1.31). При роботі ДВЗ потік вихлопних газів поступає через вхідний трубопровід у впускну трубу 9, потім проходить через кільцеві канали 19, виходить з блока 15 з середньотемпературним ТАМ (350 °С) у впускну трубу 12 і далі, проходячи послідовно через впускні 10, 11 і впускну 13 трубу до блока з низькотемпературним ТАМ (120 °С), виходить через вхідний трубопровід 14. При цьому ТАМ, що знаходиться в циліндрових капсулах 18, нагрівається у твердій фазі до температури плавлення, плавиться, а потім нагрівається в рідкій фазі до відповідної температури, при якій настає теплова рівновага між ним і відпрацьованими газами. Збереження теплоти здійснюється за рахунок наявності вакуумованого корпусу 1. Кришка 2 з вхідними 3, 4, 5 і вихідними 6, 7, 8 отворами знімається і кріпиться за допомогою болтового з'єднання 20 до привареного до корпусу кільця 21. Процес віддачі акумулятором теплової енергії в загальному випадку здійснюється шляхом прокачування теплоносія через трубопровід 14, впускні і впускні труби блоків 17, 16, 15, кільцеві зазори 19 і трубопровід 9. При цьому відбувається обернений фазовий перехід, у результаті якого теплоакumuлюючий матеріал кристалізується і віддає раніше накопичену енергію теплоносію. У якості теплоносія в режимі прогрівання ДВЗ використовується повітря або вода (залежно від робочого блока), що нагріваються робочими блоками 15, 16 і 17. Регулювання кількості теплового потоку, що подається, здійснюється перепускними запірними клапанами 22, 23, 24, 25, 26 (обв'язка теплоакumuлюючих блоків і систем дизеля умовно не показана). Пристрій розрахований на роботу при температурі довкілля до -45 °С. Теплоносій нагрівається і передає теплову енергію деталям двигуна. Слід зазначити, що бортовий ТА може працювати як на нагрів, так і на охолодження і забезпечує температурну стабілізацію теплових процесів шляхом «запозичення» теплоти, якої не вистачає, або «скидання» зайвої теплоти.

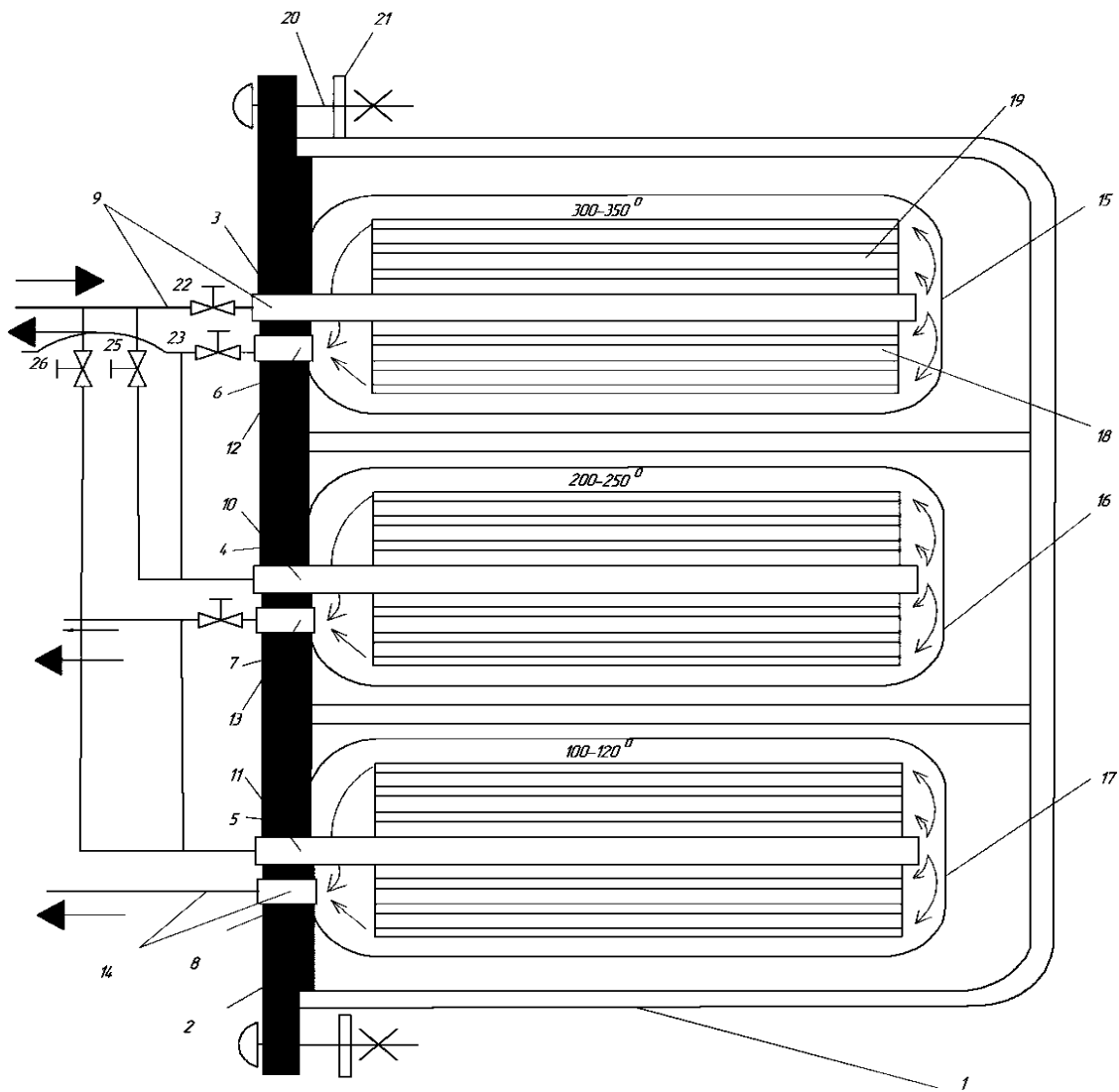


Рис. 1.31. Схема багатосекційного теплового акумулятора фазового переходу

Використання високотемпературних акумуляторів на базі тепла фазового переходу у двигунах Стирлінга було запропоновано для автобусів і легкових автомобілів. Фірмою Sigma Research Inc. розроблено проект автомобіля з дальністю пробігу 160 км при швидкості 88 км/год або 120 км на міських маршрутах. При ККД двигуна Стирлінга 40 % теплова ємність акумулятора повинна становити 102 кВт·год. На рис. 1.32 показана принципова схема цієї системи. Евтектична суміш солей ( $LiF+MgF_2$ ) з температурою плавлення 741 °С використовується в температурному інтервалі між 825 і 600 °С (тобто з фазовим переходом). При цьому ємність акумулятора збільшується на одну третину порівняно з акумуляуванням однієї лише теплоти

фазового переходу. Можливо використання і більш широкого температурного інтервалу. Суміш солей міститься в трубах з нержавіючої сталі, які розташовані в горизонтальній циліндричній посудині-акумуляторі, що виготовлено з інконелю (нікель-хромовий жароміцний сплав, що легується залежно від призначення алюмінієм, титаном, молібденом тощо). Акумулятована теплота передається за допомогою контуру нагрівачу двигуна Стирлінга. Маса соляного акумулятора становить 500 кг, а об'єм 0,4 м<sup>3</sup>. Він має вакуумну теплоізоляцію з наповнювачем з високопористого окису кремнію.

На рис. 1.33 показано можливе розташування теплового акумулятора в легковому автомобілі. Заряджання акумулятора здійснюється за допомогою стаціонарного газового підігрівника або за допомогою електроенергії. Загальний ККД автомобіля становить 20 % при підзаряджанні від газового пальника й 32 % при електричному підзарядці.

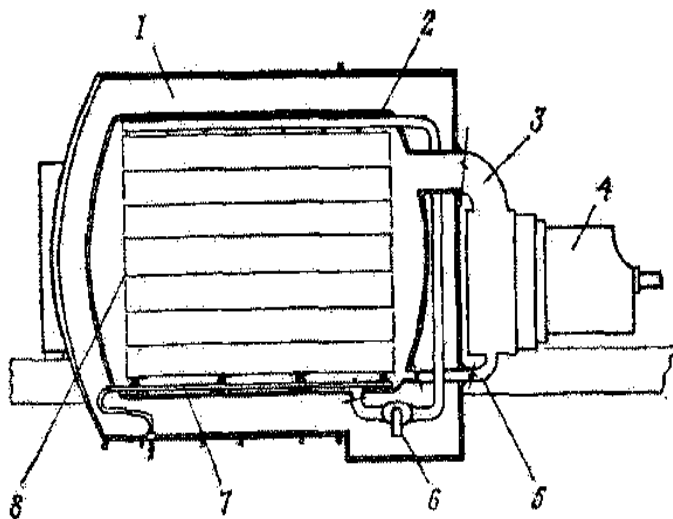


Рис. 1.32. Привод автомобіля з акумуляванням тепла фазового переходу і двигуном Стирлінга: 1 – високоефективна теплоізоляція; 2 – посудина-акумулятор (інконель – 617); 3 – вихід пари; 4 – двигун Стирлінга; 5 – повернення конденсату; 6 – електромагнітний калієвий насос; 7 – електричний опір для підзаряджання; 8 – капсули з LiF /Mg з нержавіючої сталі

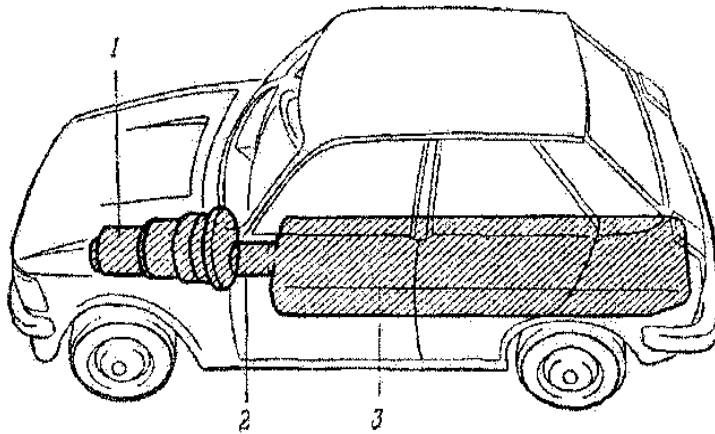


Рис. 1.33. Загальне обладнання легкового автомобіля з тепловим акумулюванням; 1 – двигун з хитною шайбою; 2 – теплова труба; 3 – тепловий акумулятор

Крім того, теплове акумулювання знайшло застосування на повітряних, водних, залізничних і звичайних дорожніх транспортних засобах. Значні зусилля в галузі транспорту спрямовані на розроблення енергозберігаючих транспортних засобів. Це може бути досягнуто шляхом заміни дорогих видів палива більш дешевими, електрифікації й акумулювання енергії. Теплове акумулювання на транспортних засобах може застосовуватися в автомобілях, а також у маневрових локомотивах.

### Контрольні запитання

1. Що таке теплове акумулювання?
2. Як розрізняють ТА за типом процесу, що відбувається в них?
3. Яку речовину називають теплоакумуючим матеріалом фазового переходу?
4. Наведіть схему енергетичного балансу теплового акумулятора.
5. Наведіть основне рівняння акумулювання енергії для відкритих систем у диференціальній формі.
6. Наведіть схеми і поясніть принцип роботи теплових акумуляторів фазового переходу капсульного і кожухотрубного типу.



7. Наведіть схеми і поясніть принцип роботи теплових акумуляторів фазового переходу зі скребковим видаленням ТАМ.

8. Наведіть схеми і поясніть принцип роботи теплових акумуляторів фазового переходу з ультразвуковим видаленням ТАМ.

9. Наведіть схеми і поясніть принцип роботи теплових акумуляторів фазового переходу з прямим контактом з ТАМ та з прокачуванням ТАМ.

10. Наведіть схеми і поясніть принцип роботи теплових акумуляторів фазового переходу з випарувально-конвективним перенесенням теплової енергії.

11. Наведіть приклади використання теплових акумуляторів фазового переходу в стаціонарних енергетичних установках.

12. Наведіть приклади використання теплових акумуляторів фазового переходу в транспортних засобах.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ І ЇХ ВЛАСТИВОСТІ. ТЕПЛОВІ АКУМУЛЯТОРИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ

#### 2.1. Класифікація теплоакumuлюючих матеріалів

У широкому колі завдань раціонального використання пасивних ресурсів і захисту навколишнього середовища досить актуальними є технології теплоакumuлювання на основі теплоти  $Q$  фазового переходу рідина $\leftrightarrow$ тверде тіло. Теплоакumuлюючі матеріали (ТАМ) широко використовуються в будівництві: в апаратах для кондиціонування приміщень, при виготовленні панелей для утеплення підлог і стін тощо. Крім того, при розробленні і дослідженні систем комбінованого прогріву двигунів внутрішнього згорання з елементами прискореного прогріву та елементами утилізації теплоти двигуна тепловим акумуляторам фазового переходу висуває основна вимога щодо їх створення – зменшення витрати палива і шкідливих викидів при підтриманні температури системи охолодження енергетичної установки або транспортного засобу при вимкненому двигуні в межах температур «гарячого пуску» при низьких температурах повітря в реальних умовах експлуатації.

На рис. 2.1 і в табл. 2.1 наведено загальну класифікацію й фізико-хімічні характеристики речовин, які застосовуються як ТАМ на основі оборотних фазових переходів типу плавлення $\leftrightarrow$ кристалізація першого роду (ФП1).

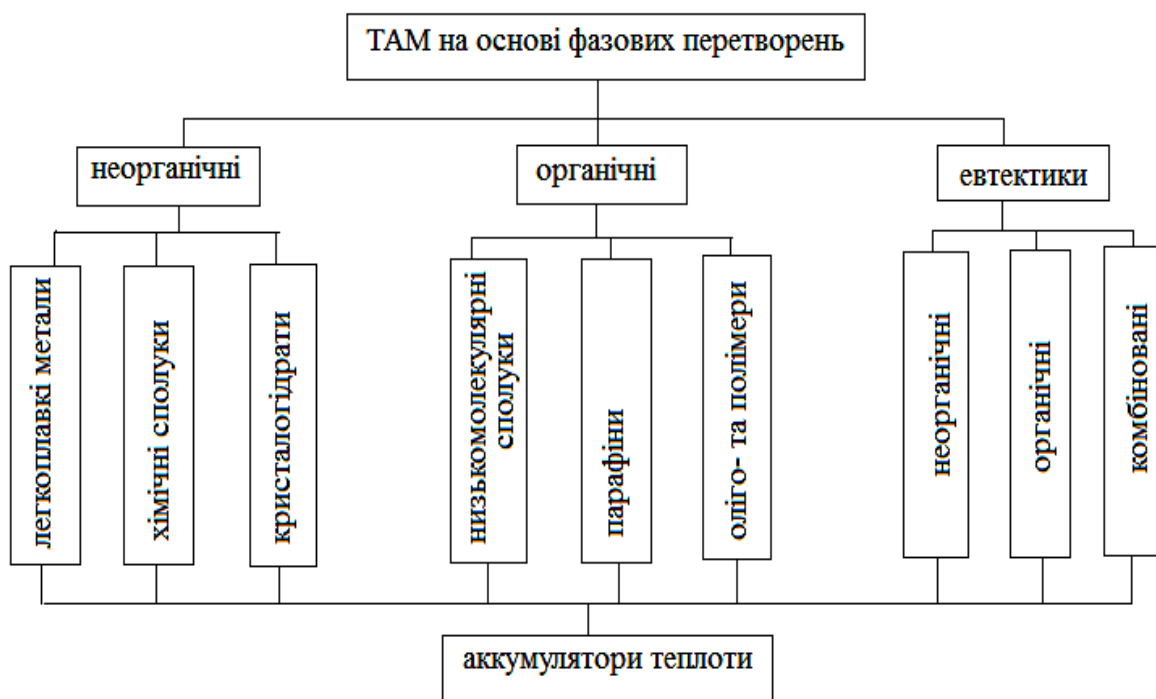


Рис. 2.1. Класифікація класів речовин, що застосовуються як ТАМ на основі фазових перетворень

У табл. 2.1, 2.2 наведено такі характеристики: хімічна формула, густина  $\rho$ , температура плавлення  $T_L$ , переохолодження  $\Delta T^-$ , ентальпія плавлення  $\Delta H_{LS}$ , склад і температура  $T_e$  евтектичних сумішей.

З аналізу цієї таблиці випливає, що теплоакumuлюючі матеріали за температурами плавлення можливо розділити на кілька категорій:

- високо- і середньотемпературні в межах від 200 до 800 °С (метали й сплави, солі, бінарні й трикомпонентні суміші неорганічних сполук);

- низькотемпературні від 0 до 200 °С (кристалогідрати і їх суміші, низькомолекулярні органічні сполуки і їх суміші, включаючи евтектики);

- працюючі при негативних температурах (евтектичні сполуки кристалогідратів).

Таблиця 2.1

### Характеристики речовин, що використовуються в якості ТАМ

№	Речовина	Хімічна формула	Густина $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Температура плавлення $T_L$ , °C	Ступінь переохолодження $\Delta T^-$ , °C	Ентальпія плавлення $\Delta H_{LS}$ , кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7
Легкоплавкі метали						
1	Індій	In	7,30	156,4	1-2	28,47
2	Олово	Sn	5,85	232,0	10	61,0
3	Свинець	Pb	11,34	327,44	11	23,4
4	Галій	Ga	5,9	29,76	40	80,2
5	Вісмут	Bi	9,84	271,0	25	54,69
6	Сурма	Sb	6,60	630,5	60	162,44
7	Телур	Te	6,27	449,95	100	137,25
8	Алюміній	Al	2,56	660,0	-	400,0
Неорганічні сполуки						
1	Вода	H <sub>2</sub> O	1,0	0	10	335,0
2	Їдкий калій	KOH	2,12	405,0	-	134
3	Їдкий натрій	NaOH	2,13	322,0	-	160
4	Нітрат літію	LiNO <sub>3</sub>	2310	252	-	530
5	Їдкий літій	LiOH	1425	471	-	1080
6	Карбонат літію	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2114	726	-	607
7	Хлорид натрію	NaCl	2,17	801,0	-	486
8	Хлорид калію	KCl	1,99	776,0	-	355
9	Прустит	Ag <sub>2</sub> AsS <sub>3</sub>	5,57	498,0	80	-
10	Двохлористий свинець	PbCl <sub>2</sub>	5,85	500,0	24	-
11	Інтерметалеві сполуки	In <sub>2</sub> Bi	8,14	89,2	2	-
12		InBi	8,57	110,0	16	-
13	Антимонід індію	InSb	5,77	525,2	6	107,87
Кристалогідрати						
1	Пентагідрат натрію тіосульфат	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	-	48,0	44	201,0-206,0
2	Декагідрат натрію сульфат	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	1,55	32,4	16	251,0
3	Гептагідрат натрію сульфат	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O	1,17	33,4	25	179,0
4	Декагідрат натрію карбонат	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O	1,44	22,0-36,1	-	247,6

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7
5	Тригідрат натрію ацетат	$\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1,45	58,0	70	272,4
6	Натрію тетраборат	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	–	68,0	–	241,0
7	Декагідрат тетранатрію пірафосфат	$\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	–	70,0	–	184,0
8	Гептагідрат алюмінію нітрат	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	–	70,0	–	155,1
9	Гексагідрат магнію нітрат	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1,50	95,0	–	160,1
10	Октагідрат барію оксид	$\text{BaOH} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	–	78,0	–	301,0
Органічні сполуки						
1	Бензол	$\text{C}_6\text{H}_6$	0,97 (0 °C)	5,6	4	128
2	Нафталін	$\text{C}_{10}\text{H}_8$	1,03 (20°C)	80,3	10	147
3	Дифеніл	$\text{C}_{12}\text{H}_{10}$	1,18 (0 °C)	71,1	10	190
4	Парафіни	$\text{C}_{18} - \text{C}_{35}$	0,88-0,915 (15 °C)	40-65	-	-
5	Пірокатехін	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2-1,2$	1,15 (20°C)	105	30	207
6	Гідрохінон	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2-1,4$	1,36 (20°C)	175,6	9	246
7	Резорцин	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2-1,3$	1,29 (20°C)	110,8	60	194
8	Пірогалол	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_3-1,2,3$	1,45 (20°C)	132,5	13	166,7
9	Дибензил	$\text{C}_{14}\text{H}_{14}$		52	24	129,4
10	Антрацен	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	1,25 (20°C)	216,0	2	161,2
11	Кумарин	$\text{C}_6\text{H}_4\text{OCOC}_2\text{H}_2$	0,93(20°C)	70	14	68,1
12	<i>o</i> -Терфеніл	$\text{C}_{18}\text{H}_{14} -1,2$	1,37 (20°C)	57	23	74,65
13	<i>m</i> -Терфеніл	$\text{C}_{18}\text{H}_{14} -1,3$	1,40 (20°C)	85	38	-
14	<i>p</i> -Терфеніл	$\text{C}_{18}\text{H}_{14} -1,4$	1,20 (0°C)	213	13	154
15	$\alpha$ -Нафтол	$\text{C}_{10}\text{H}_7\text{OH}$	1,09 (25°C)	91,6	23	163
16	Бензойна кислота	$\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$	1,27 (15°C)	122,4	-	147
17	Оцтова кислота	$\text{CH}_3\text{COOH}$	1,05 (20°C)	16,7	19	192

Таблиця 2.2

Евтектики сумішей кристалогідратів неорганічних сполук				
№	Евтектика суміші	Температура евтектичних сумішей $T_e$ , °C	Ступінь переохолодження $\cdot \Delta T^-$ , °C	Ентальпія плавлення $\Delta H_{LS}$ , кДж/кг
1	2	3	4	5
1	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(51 \div 55) / \text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	16,5	-	250
2	$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(52 \div 45) / \text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	17,2	-	220
3	$\text{LiNO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(65 \div 55) / \text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	24,2	-	230
4	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}(45) / \text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	25,0	-	130
5	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}(67) / \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30,0	-	135
6	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(82) / \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	32,0	-	136
7	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(61,5 \text{ мол.}\%) / \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	59,1	-	144
8	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(53) / \text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	61,0	-	148

## Продовження табл. 2.2

1	2	3	4	5
Евтектики кристалогідратів солей натрію				
1	52,2% H <sub>2</sub> O+ 47,8% Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	-15,0	1-2	193,7
2	90% H <sub>2</sub> O+ 10% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	-1,2	2	–
3	60% H <sub>2</sub> O+ 40% Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O	-5,0		–
4	60% H <sub>2</sub> O+ 40% Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O		1	–
5	78% H <sub>2</sub> O+ 22% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O	-3,0	0	–
6	40% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O+ 60% Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	-1,5	1-2	–
7	50% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O+ 50%Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O	-1,0	0	–
8	45% Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O+ 55% Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O	15,0	5	–
9	47%Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O+ 53%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	-1,0	2	–
10	34%Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O + 66%Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O		1	
Евтектики сумішей органічних вуглеводнів				
1	80% бензол+20% нафталін	3,6	4	130,0
2	73% бензол+27% дифеніл	-6,0	3	120,2
3	58% дифеніл+42% нафталін	41,0	3	108,0
4	67,1% бензойна кислота+32,9% нафталін	67,0	2	123,0
5	32% нафталін+ 68% дибензил	32,0	2	132,8
6	50% резорцин + 50% пірокатехін	58,0	0	148,9
7	67% резорцин + 33% гідрохінон	126,0	17	170,0
8	70% пірокатехін + 30% гідрохінон	85,0	10	213,0
Бінарні і трикомпонентні суміші неорганічних сполук				
1	48 NaCl/52 MgCl <sub>2</sub>	450	-	431
2	33 NaCl/ 67 CaCl <sub>2</sub>	500	-	282
3	35Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / 65K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	505	-	345
4	88 Al/12Si	579	-	515
5	67 LiF/ 33 MgF <sub>2</sub>	741	-	900
6	67 NaF/ 33 MgF <sub>2</sub>	832	-	618
7	24,5 NaCl/ 20,5 KCl/ 55 MgCl <sub>2</sub>	385-393	-	410
8	32 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / 35 K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / 33 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	397	-	277

У табл. 2.1 наведено такі характеристики: хімічна формула, густина  $\rho$ , температура плавлення  $T_L$ , переохолодження  $\Delta T^-$ , ентальпія плавлення  $\Delta H_{LS}$ , склад і температура  $T_e$  евтектичних сумішей.

З аналізу цієї таблиці випливає, що теплоакумуючі матеріали за температурами плавлення можливо розділити на кілька категорій:

- високо- і середньотемпературні в межах від 200 до 800 °С (метали й сплави, солі, бінарні й трикомпонентні суміші неорганічних сполук);

- низькотемпературні від 0 до 200 °С (кристалогідрати і їх суміші, низькомолекулярні органічні сполуки і їх суміші, включаючи евтектики);
- працюючі при негативних температурах (евтектичні сполуки кристалогідратів).

## **2.2. Вимоги, що висуваються до теплоакumuлюючих матеріалів**

До теплоакumuлюючих матеріалів на основі фазових перетворень висувають такі вимоги:

- фазовий перехід повинен мати виразний ефект прихованої теплоти;
- зручна з експлуатаційних умов температура плавлення;
- фазовий перехід повинен відбуватися поблизу реальної температури плавлення;
- висока теплопровідність у твердій і рідкій фазах (достатні теплообмінні властивості);
- висока теплоємність у твердій і рідкій фазах;
- відсутність тенденції до розшарування;
- відсутність можливості переохолодження при затвердінні й перегріву при плавленні;
- низьке термічне розширення й незначна зміна об'єму при плавленні;
- слабка хімічна активність;
- наявність доброї відтворюваності фазоперехідних властивостей протягом великої кількості термоциклів;
- невисока ціна та доступність;
- має задовольняти вимоги санітарної й екологічної безпеки;
- упакування ТАМ у контейнер і матеріал контейнера повинні забезпечувати найкращі умови передачі теплоти.

Більшість ТАМ у розплавленому стані є корозійно-активними речовинами, в основному мають низький коефіцієнт теплопровідності, змінюють об'єм при плавленні й відносно дорого коштують. Широке застосування теплоакumuляторів з ТАМ, що плавляться, стримується, насамперед, міркуваннями економічності створених установок.

При робочих температурах від 0 до 80 °С рекомендується застосовувати кристалогідрати неорганічних солей, що пов'язано з їх доступністю і малою вартістю. Для реального застосування розглядаються кристалогідрати, що не розкладаються при плавленні або розчиняються в кристалізаційній воді, що входять до складу ТАМ. З метою забезпечення кристалізації з малим переохолодженням необхідно проведення систематичних досліджень залежності переохолодження від концентрації компонентів, термічної передісторії рідкої фази, впливу зовнішніх факторів (домішки, що стимулюють кристалізацію, ультразвукові й електромагнітні впливи). До недоліків кристалогідратів слід віднести їхню підвищену корозійну активність, осадження безводної солі на стінках контейнера при багаторазовому термоциклюванні.

Використання органічних речовин практично повністю знімає питання корозійного руйнування корпусу, забезпечує високі щільності енергії, що запасується, непогані економічні показники. Однак у процесі роботи високомолекулярних органічних речовин відбувається зниження теплоти плавлення за рахунок деструкції молекул. Застосування органічних матеріалів вимагає розвинених поверхонь теплообміну внаслідок низького коефіцієнта теплопровідності ТАМ.

При більш високих робочих температурах застосовуються сполуки й сплави легких металів і солі. Недоліками перерахованих речовин є низькі коефіцієнти теплопровідності, корозійна активність, зміна об'єму при фазовому перетворенні.

### **2.3. Фізико-хімічні основи фазових перетворень першого роду в теплоакуючих матеріалах**

**2.3.1. Основи теорії кристалізації.** Оскільки характеристики ТАМ пов'язані з фазовими перетвореннями, то до них повинні бути застосовані основні положення теорії плавлення й кристалізації. Як було сказано вище, одним з основних недоліків цих ТАМ є наявність перегрівів рідкої фази й переохолоджень відносно температури плавлення. При плавленні перегрів практично не спостерігаються, тоді як значні переохолодження є неодмінним атрибутом кристалізації. Тому необхідні деякі знання з теорії кристалізації рідкої фази.



Процес кристалізації складається з ряду послідовних етапів: зародкоутворення, ріст зародків, їх злиття й так звана масова кристалізація. Механізми кожного етапу затвердіння добре відомі.

Теорія зародкоутворення при кристалізації розплавів була створена Гіббсом, Фольмером і Косселем. Вона заснована на припущенні, що в результаті флуктуації в переохолодженій фазі можна подолати енергетичний бар'єр зародкоутворення, обумовлений формуванням поверхні кристала.

Виходячи з цих припущень і теорії абсолютних швидкостей реакцій було виведено класичну формулу для швидкості зародкоутворення:

$$I = (1/V)dN / dt = (N_0 kT / h) \exp(-(\Delta G + \Delta G_\eta) / nkT). \quad (2.1)$$

Швидкість  $I$  показує, яка кількість зародків утворюється в секунду з  $N$  незакристалізованих молекул у результаті одиночного акту кристалізації,  $k$  – стала Больцмана,  $h$  – стала Планка,  $n$  – кількість молекул у зародку. Другий член в експоненті рівняння (2.1) являє собою вільну енергію активації  $\Delta G_\eta$  процесів дифузії елемента, що кристалізується, через границю фаз на невелику відстань. Для речовин, схильних до скловання,  $\Delta G_\eta$  знаходять із формули  $\Delta G_\eta = kT(a + b/(T - T_c))$ , де  $a$ ,  $b$  – const,  $T_c$  – температура скловання. Величина  $\Delta G$  означає зміну енергії Гіббса при утворенні критичного зародка. Різниця енергій Гіббса  $\Delta G$  співіснуючих фаз показує напрямок фазового перетворення й дорівнює роботі утворення нової фази, наприклад при переході розплав ( $L$ )  $\rightarrow$  кристал ( $S$ )  $\Delta G = |G_L - G_S|$ .

Розклавши функцію  $\Delta G = \Delta G(\Delta T^-)$  в ряд, одержують

$$\Delta G = \frac{\Delta H_{LS}}{T_L} \Delta T + \frac{(C_{ps} - C_{pL})}{2T_L} \Delta T^2 + \frac{1}{6T_L} \left( \frac{\partial C_{ps}}{\partial T} - \frac{\partial C_{pL}}{\partial T} \right) \Delta T^3 + K, \quad (2.2)$$

де  $C_{ps}, C_{pL}$  – теплоємності твердої й рідкої фаз.

Робота для зародка критичного розміру  $l_k$  кристала кубічної форми, стійкого до подальшого росту, дорівнює  $A_k = 32\sigma_{SL}^3 / \Delta\mu_V^3 = 32\sigma_{SL}^3 / T_L^2 / \rho^2 \Delta H_{SL}^2 (\Delta T^-)^2$ , а сам критичний розмір

$$l_k = 4\sigma_{SL} / \Delta\mu_V = 4\sigma_{SL} T_L / \rho \Delta H_{SL} \Delta T^-, \quad (2.3)$$

де  $\Delta\mu_V$  – зміна хімічного потенціалу при фазовому перетворенні;

$\sigma_{SL}$  – міжфазна поверхнева енергія на границі розплав – кристал;

$\Delta T^-$  - передкристалізаційне переохолодження.

Ще однією важливою кінетичною характеристикою є масова кристалізація й пов'язаний з нею ступінь кристалічності  $\eta$ , що залежить від швидкості зародкоутворення  $I = \frac{1}{V} \frac{dN}{dt}$  ( $V$  – об'єм,  $N$  – кількість зародків), швидкості росту зародків  $\nu$ , інкубаційного періоду  $\tau_1$ , ступеня переохолодження  $\Delta T^-$ .

Макроскопічний опис залежності ступеня кристалічності  $\eta$  від часу  $t$  описується рівнянням Аврамі – Колмогорова

$$\eta = 1 - \exp[-Z(t - \tau_1)^n], \quad (2.4)$$

що дозволяє обчислювати відносну частку  $\eta$  закристалізованого об'єму  $V_x$  відносно всього об'єму  $V$  речовини:

$$\eta = V_x / V. \quad (2.5)$$

Константа кристалізації  $Z$  пов'язана зі швидкістю зародкоутворення  $I$  і швидкістю росту зародків  $\nu$ . Наприклад, для кубічних зародків  $Z = I\nu^3$ . Показник Аврамі  $n$  характеризує морфологію кристалів і тип кристалізації.

В основі термодинамічних уявлень про фазові перетворення першого роду (плавлення, кристалізація, поліморфні перетворення) є аналіз залежності ізобарно-ізотермічного потенціалу  $G$  (або вільної енергії Гіббса) від температури, тиску, концентрації тощо. На рис. 2.2 показана залежність енергії Гіббса

для кристала  $G_S$  й розплаву  $G_L$  від температури  $T$  для рівноважного фазового перетворення, що відбувається при температурі плавлення  $T_L$ . Кристалічна й рідка фази перебувають у рівновазі лише при  $T_L$ . Зі зміною температури в той або інший бік від  $T_L$  різниця енергій Гіббса  $\Delta G = G_S - G_L$  змінює знак. При  $T > T_L$   $\Delta G > 0$  – стійка рідка фаза, а при  $T < T_L$   $\Delta G < 0$  – стабільна тверда фаза. Такий фазовий перехід, що відбувається в точці  $T_L$  без переохолодження ( $\Delta T^- = 0$ ), є рівноважним. У цьому випадку при охолодженні розплаву крива  $G(T)$  буде йти шляхом  $abe$  (рис. 2.2).

Однак за певних умов для тих самих речовин можуть спостерігатися відхилення від зазначених рівноваг. Відомі ефекти перегріву кристала при плавленні й значного переохолодження розплаву при кристалізації. В останньому випадку енергія Гіббса  $G$  при охолодженні розплаву буде змінюватися шляхом  $abcdbe$ . Ділянка температур від  $T_L$  до початку кристалізації  $T_m$  називається передкристалізаційним фізичним переохолодженням  $\Delta T_\phi^- = T_L - T_m$ , а стан рідини в цьому інтервалі – метастабільним.

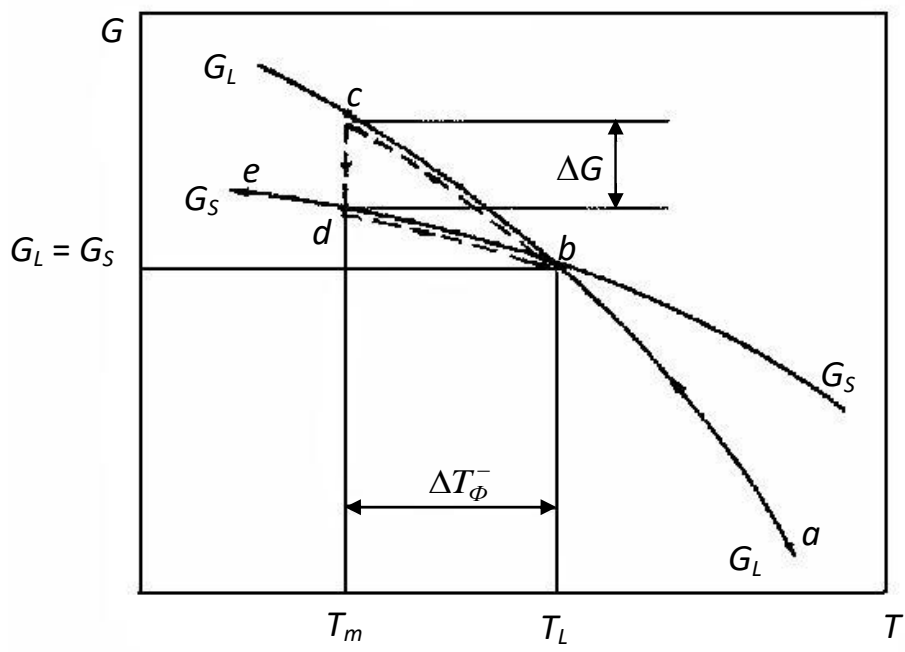


Рис. 2.2. Залежність енергії Гіббса  $G$  від температури  $T$  для твердої  $G_S$  і рідкої  $G_L$  фаз

З наведених вище даних можна побачити, що величина переохолодження повинна враховуватись при аналізі різних термодинамічних і кінетичних характеристик фазових перетворень: робота утворення зародків і їх критичні розміри, швидкість зародкоутворення, швидкість росту кристалів, ступінь кристалічності, константа масової кристалізації. Тому першочерговим завданням при дослідженні кінетики кристалізації є вивчення переохолоджень і вплив на них різних факторів (термічної передісторії розплавів, умов проведення експериментів, зовнішніх впливів, домішок тощо).

Основними методами вивчення переохолоджень, а також теплових ефектів при фазових перетвореннях є термічні ДТА, ДСК, ЦТА, СТА тощо. Особливо ефективними в цьому плані виявилися розроблені нами методи циклічного термічного аналізу (ЦТА) з особливою чутливістю термопар, сполучений метод ЦТА й ДТА, спосіб знаходження теплоакумулюючого матеріалу у вигляді суміші кристалогідратів на основі діаграми стану.

**2.3.2. Аналіз параметрів кристалізації за кривими охолодження.** Експериментальні дослідження свідчать про те, що більшість речовин починає кристалізуватися при температурі  $T_m$ , меншій, ніж температура плавлення  $T_L$ . При цьому ступінь переохолодження розплавів  $\Delta T_L^- = T_L - T_m$  для багатьох речовин навіть за нормальних умов і швидкостях охолодження  $0,001 \div 10$  К/с може досягати десятки градусів.

Для опису кривої охолодження в координатах  $T(\tau)$ , що охоплює область кристалізації переохолодженого розплаву, розглянемо схематичні експериментальні криві охолодження (рис. 2.3, *a*, *б*), що зареєстровані методом термічного аналізу. Ділянка *ABC* на рис. 2.3, *a* відповідає охолодженню розплаву до деякої температури  $T_m < T_L$ . У переохолодженому стані розплав перебуває протягом часу  $\tau_1$  (ділянка *BC*). Охолонувши до деякої мінімальної температури  $T_m$ , зразок за час  $\tau_2$  миттєво прогрівається до  $T_L$  (лінія *CD*). Подальше затвердіння зразка (ділянка *DE*) проходить ізотермічно при  $T_L$  протягом часу  $\tau_3$ . Після затвердіння речовина охолоджується (ділянка *EF*).

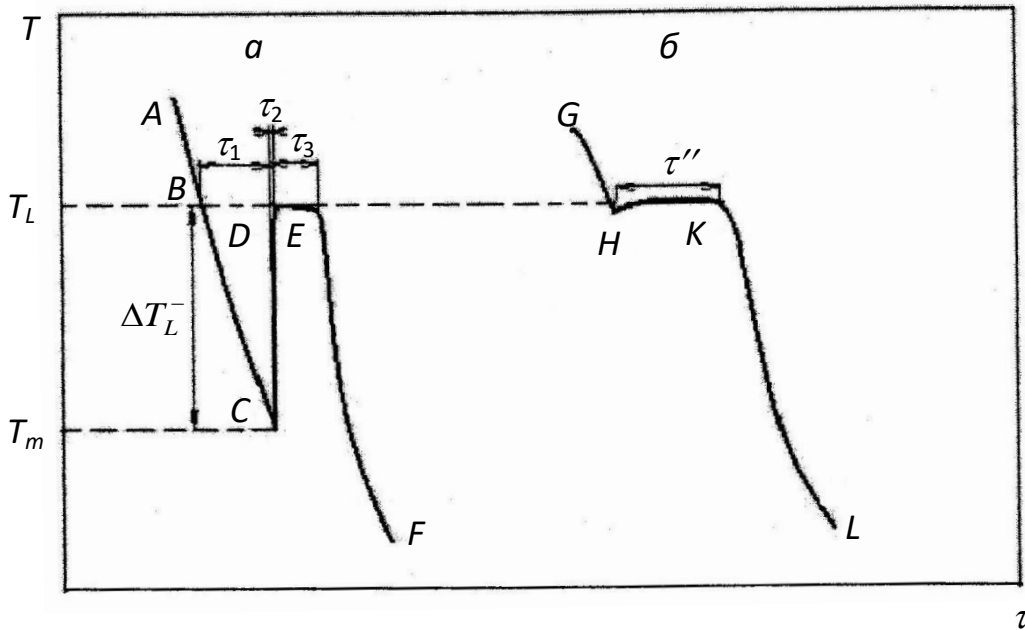


Рис. 2.3. Схематичні криві охолодження розплавів, що характеризують кристалізацію з переохолодженням (а) і без переохолодження (б)

Таким чином, повний час кристалізації  $\tau' = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ . Тип кристалізації, наведений на рис. 2.3, а, назвемо нерівноважно-вибуховим (НРВК).

Крива охолодження на рис. 2.3, б відповідає квазірівноважній кристалізації (КРК) з незначним переохолодженням. Як правило, КРК спостерігається для розплавів, що не перегріваються вище деякої критичної температури  $T_k^+ > T_L$ . Перегрітий понад  $T_k^+$  розплав кристалізується з переохолодженням  $\Delta T_L^-$ , середнє значення якого практично не залежить від ступеня перегріву розплаву. Загальний час затвердіння  $\tau''$  при КРК завжди менше від загального часу  $\tau'$  при НРВК.

У процесі затвердіння рідкої фази функція тепловиділення за рахунок теплоти кристалізації  $\Delta H_L$  має вигляд

$$Q(r, t) = \Delta H_L \frac{dm}{dt} = \Delta H_L m_0 \frac{d\eta}{dt}, \quad (2.6)$$

де  $\eta = m(t)/m_0$  – ступінь кристалічності;

$Q(t)$  – теплота, що виділяється при кристалізації маси  $dm$  розплаву за час  $dt$ ;

$m_0$  – маса зразка.

Крім перелічених параметрів за термограмами можна визначити швидкість  $\nu_m = dm/dt$  масової кристалізації, швидкість  $\nu_z$  виникнення зародків кристалів в об'ємі  $V_x$  за час  $\tau_1$  ( $\nu_z = m_x/\tau_1$ ), швидкість  $\nu_k$  коагуляції зародків за час  $\tau_2$  ( $\nu_k = m_x/\tau_2$ ), швидкість  $\nu_T$  підвищення температури від  $T_m$  до  $T_L$  при вибуховій кристалізації ( $\nu_T = \Delta T_L^-/\tau_2$ ), відносну концентрацію зародків у переохолодженому розплаві  $C_3 = \tau_1/\tau''$ .

## 2.4. Вплив зовнішніх факторів на фазові перетворення в теплоакumuлюючих матеріалах

**2.4.1. Вплив постійного електричного поля.** У літературі є багато відомостей щодо впливу електромагнітних полів на кінетику кристалізації й структуру речовини [11, 17-20]. Оскільки кристалогідрати й низькомолекулярні органічні речовини є діелектриками, то цікаво було б проаналізувати вплив постійного електричного поля на їх електризацію й різні термодинамічні параметри фазового переходу.

Розглянемо систему рідина – кристал діелектрика, розташованого в однорідному постійному електричному полі з напруженістю  $\vec{E}$  при постійному зовнішньому тиску ( $p = \text{const}$ ). Вільна енергія Гіббса  $i$ -ї масової фази в електричному полі дорівнює

$$G_i(T, E) = G_i^0(T) + U_i(E), \quad (2.7)$$

де  $G_i^0(T)$  – енергія Гіббса  $i$ -ї фази за час відсутності поля, як функція від температури;

$U_i(E)$  – додаткова енергія, обумовлена електризацією діелектрика,

$$U_i(E) = (\varepsilon_0 \varepsilon_i E^2/2)V, \quad (2.8)$$

де  $\varepsilon_0$  – електрична постійна;  
 $\varepsilon_i$  – діелектрична проникність  $i$ -ї фази;  
 $V$  – об'єм.

Тоді різницю енергій у твердій ( $U_2$ ) і рідкій ( $U_1$ ) фазах можна записати як

$$U_2 - U_1 = \alpha E^2 \cdot V, \quad (2.9)$$

де  $\alpha = (\varepsilon_{0/2})(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ ;  $\alpha > 0$  при  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$  і  $\alpha < 0$  при  $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ .

Умова рівноваги фаз при кристалізації в електричному полі  $G_2^E(T, E) = G_1^E(T, E)$  з урахуванням виразів (2.7) і (2.8) запишемо як

$$G_2^0(T) = G_1^0(T) + \alpha E^2. \quad (2.10)$$

Диференціюючи рівняння (2.10) по  $E$  і враховуючи, що  $(\partial G_2^0 / \partial T)_{p,E} = S_2^0$ ;  $(\partial G_1^0 / \partial T)_{p,T} = S_1^0$ ;  $S_2^0 - S_1^0 = \Delta H^0 / T_L^0$  (де  $T_L^0$  – температура плавлення за відсутності поля;  $S_1$  і  $S_2$  – ентропії відповідних фаз;  $\Delta H^0$  – різниця ентальпій при фазовому перетворенні), одержимо

$$dT = (2\alpha T_L^0 V / \Delta H^0) E dE. \quad (2.11)$$

Інтегруючи вираз (2.11) від  $T_L^0$  при  $E = 0$  до  $T_L^E$  при  $E \neq 0$ , знаходимо

$$T_L^E = T_L^0 (\Delta H^0 + \alpha E^2 V) / \Delta H^0. \quad (2.12)$$

Позначивши зміну ентальпії в полі

$$\Delta H^E = \Delta H^0 + \alpha E^2 V, \quad (2.13)$$

одержимо залежності температури фазового перетворення  $T_L^E$  й питомої теплоти перетворення  $L^E$  в електричному полі:

$$T_L^E = T_L^0(1 + \alpha'E^2 / L^0), \quad (2.14)$$

$$L^E = L^0 + \alpha'E^2, \quad (2.15)$$

де  $\alpha' = \alpha\rho$ ;  $[L]$  - питома робота, Дж/кг.

Проаналізуємо зміну питомої об'ємної вільної енергії Гіббса ( $\Delta q^E = DG_V^E / V$ ) при утворенні кристала з розплаву, що перебуває в електричному полі. З виразів (2.7) і (2.9) випливає, що

$$\Delta q^E = \Delta q^0 + \alpha E^2, \quad (2.16)$$

де  $\Delta q^0$  – зміна питомої енергії при кристалізації розплаву за час відсутності електричного поля ( $E = 0$ ).

Величина  $\Delta q^0$  пов'язана з переохолодженням розплаву  $\Delta T^0$  відносно температури плавлення  $T_L^0$  [93]:

$$\Delta q^0 = \rho L^0 \Delta T^0 / T_L^0, \quad (2.17)$$

де  $\rho$  – густина речовини.

В електричному полі

$$\Delta q^E = \rho L^E \Delta T^E / T_L^E. \quad (2.18)$$

Підставивши у вираз (2.17) вираз для  $T_L^E$  й  $L^E$  з виразів (2.14) і (2.15), одержимо

$$\Delta q^E = \Delta q^0 \Delta T^E / \Delta T^0$$

або

$$\Delta q^E = \frac{\rho L^0}{T_L^0} \Delta T^E. \quad (2.19)$$



Використовуючи вирази (2.16), (2.17) і (2.19), можна зв'язати переохолодження в полі  $\Delta T^E$  й без поля  $\Delta T^0$ :

$$\Delta T^E = \Delta T^0 + \alpha E^2 T_L^0 / (\rho L^0). \quad (2.20)$$

Таким чином, передкристалізаційне переохолодження розплаву діелектрика залежить від різниці діелектричної проникності ( $\Delta \varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ ) твердої й рідкої фаз, а також від напруженості електричного поля.

**2.4.2. Вплив ультразвуку.** З літератури відомо про суттєвий вплив ультразвуку на кінетику кристалізації з рідкої фази й структуру твердої фази. У даному пункті показано зміни цілого ряду термодинамічних характеристик даного процесу під дією ультразвуку, оскільки ці характеристики прямо пов'язані з властивостями ТАМ.

Як відомо, рушійною силою кристалізації за відсутності зовнішніх впливів є різниця вільних енергій Гіббса  $\Delta G_{LS}^0 = G_L^0 - G_S^0$  між рідкою ( $G_L^0$ ) і твердою ( $G_S^0$ ) фазами. Вона прямо пов'язана з передкристалізаційним переохолодженням  $\Delta T^-$  відносно температури плавлення  $T_L$  ( $\Delta T^- = T_L - T, T < T_L$ ), тому що

$$\Delta G_{LS}^0 = \Delta H_{LS}^0 - T \Delta S_{LS}^0 = \Delta H_{LS}^0 \Delta T_0^- / T_L, \quad (2.21)$$

де  $\Delta H_{LS}^0$ ,  $\Delta S_{LS}^0$  – ентальпія й ентропія фазового перетворення;

$\Delta T_0^-$  – переохолодження за відсутності зовнішнього впливу.

Запис виразу (2.21) припускає, що як  $\Delta G_{LS}^0$ , так і  $\Delta H_{LS}$  вимірюються в джоулях на моль (Дж/моль). Запишемо вираз (2.21) як

$$\Delta G_{LS}^0 = (\rho \Delta H_{LS}^0 \Delta T_0^- / T_L) V, \quad (2.22)$$

де  $[\Delta G_{LS}]$  – вільна енергія Гіббса, Дж;

$[\Delta H_{LS}^0]$  – ентальпія фазового перетворення, Дж/кг;

$\rho$  – густина;

$V$  – об'єм тіла.

Енергетичний внесок у процес фазового перетворення під дією ультразвуку можна визначити в такий спосіб. Нехай інтенсивність ультразвуку слабшає при його проходженні через тверде тіло і становить

$$J_1 = J_0 e^{-2\mu_1 l}, \quad (2.23)$$

а через рідину

$$J_2 = J_0 e^{-2\mu_2 l}, \quad (2.24)$$

де  $J_0$  – інтенсивність падаючих на тіло променів;

$\mu_1, \mu_2$  – коефіцієнти поглинання УЗ у твердому й рідкому середовищі відповідно;

$l$  – лінійний розмір тіла уздовж напрямку променів.

Інтенсивності  $J_1$  і  $J_2$  променів, поглинених конденсованими середовищами, імовірно, будуть дорівнювати

$$J_1 = J_0 (1 - e^{-2\mu_1 l}), \quad (2.25)$$

$$J_2 = J_0 (1 - e^{-2\mu_2 l}). \quad (2.26)$$

Різниця  $\Delta J$  характеризує інтенсивність хвиль, що впливає на енергетику фазового перетворення:

$$\Delta J = J_0 (e^{-2\mu_2 l} - e^{-2\mu_1 l}). \quad (2.27)$$

У першому наближенні

$$\Delta J = 2J_0 \Delta\mu l, \quad (2.28)$$

де  $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$ .

Для рівномірного потоку, що поглинається через площу перетину  $F$  за час  $t$ ,  $\Delta J = \Delta W / Ft$ . Тоді поглинена тілом енергія  $\Delta W$  ультразвуку в процесі кристалізації може бути виражена як

$$\Delta W = \Delta J F t \approx 2\varpi V \Delta \mu . \quad (2.29)$$

де  $\varpi = J_0 \tau$  – енергія на одиницю площі.

Поєднуючи вирази (2.22) і (2.29), можна знайти зміну енергії Гіббса  $\Delta G_{LS}^{v3}$  при фазовому перетворенні з урахуванням внеску енергії  $\Delta W$  ультразвуку:

$$\Delta G_{LS}^{v3} = \Delta G_{LS}^0 + 2\varpi V \Delta \mu . \quad (2.30)$$

Запишемо праву частину рівняння (2.22) у випадку ультразвукового впливу на кристалізацію й у випадку його відсутності і підставимо отримані вирази у вираз (2.30):

$$\left( \Delta H_{LS} \Delta T_{v3}^- / T_L \right) V = \left( \Delta H_{LS} \Delta T_0^- / T_L \right) V + 2\varpi V \Delta \mu ,$$

звідки одержимо формулу залежності переохолодження  $\Delta T_{v3}^-$  від параметрів ультразвуку

$$\Delta T_{v3}^- = \Delta T_0^- - \frac{2\varpi \Delta \mu T_L}{\rho \Delta H_{LS}} . \quad (2.31)$$

Тут прийнято, що величини  $T_L$ ,  $\Delta H_{LS}$  не залежать від ультразвукового поля.

За рівнянням (2.31), залежно від інтенсивності падаючих променів на тіло й від часу впливу УЗ величина переохолодження закономірно зменшується, оскільки  $\varpi = J_0 \tau$ . Такий висновок узгоджується з експериментальними даними з впливу УЗ на кристалізацію різних речовин.

Розрахуємо значення параметра  $\varpi$  на прикладі кристалізації переохолодженої води до  $-10$  °С. Нехай ультразвукове поле знижує переохолодження води до нуля, тобто  $\Delta T_{v3}^- = 0$ . Тоді з

формули (2.31) будемо мати  $\varpi = \frac{\rho \Delta H_{LS} \Delta T_0^-}{2 \Delta \mu T_L}$ . Наприклад, при частоті 1 МГц  $\mu_B \approx 0,1 \text{ м}^{-1}$ ,  $\mu_L \approx 3,4 \text{ м}^{-1}$  ( $\Delta \mu = 3,3$ ), знаючи, що  $\rho = 103 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_L = 273 \text{ К}$ ,  $\Delta H_{LS} = 335 \text{ кДж/кг}$ , одержимо  $\varpi \approx 1,9 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^2$ .

Якщо врахувати, що  $\varpi = J_0 \tau$ , то можна оцінити інтенсивність  $J_0$  ультразвуку, що падає на тіло, і час його впливу. На рис. 2.4 показана залежність  $J_0 = \frac{\varpi}{\tau}$  при  $\varpi = 1,9 \text{ МДж/м}^2$  (крива 1), звідки можна дібрати значення  $J_0$  й  $\tau$  для зведення переохолодження до нуля.

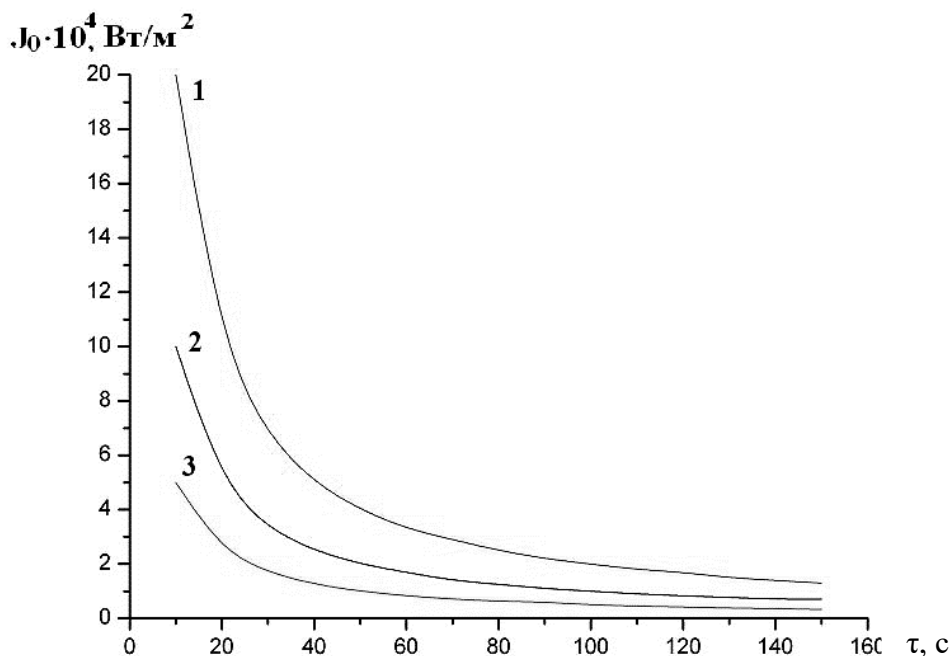


Рис. 2.4. Залежність інтенсивності  $J_0$  ультразвуку від часу  $\tau$  його впливу на кристалізацію при  $\varpi_1 = 1,9 \text{ МДж/м}^2$  (1),  $\varpi_2 = 0,95 \text{ МДж/м}^2$  (2),  $\varpi_3 = 0,475 \text{ МДж/м}^2$  (3)

Припустимо, що  $J_0 = 1,9 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ , тоді час опромінення  $\tau \approx 100 \text{ с}$ . Якщо  $J_0 = 1,9 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ , то  $\tau \approx 1 \text{ с}$  тощо. Якщо необхідно зменшити переохолодження води  $\Delta T_{y3}^-$  під дією ультразвуку приблизно у два рази, то значення  $\varpi$  повинно бути  $\approx 0,95 \text{ МДж/м}^2$  (крива 2), якщо необхідно зменшити  $\Delta T_{y3}^-$  в чотири рази, то

$\sigma_3=0,475$  МДж/м<sup>2</sup> (крива 3). Таким чином, добираючи значення  $J_0$  й  $\tau$  за кривими 1-3, можна знижувати величину переохолодження на задану величину.

Інтенсивність звуку  $J_0$  впливає й на коефіцієнти поглинання  $\mu_1$  й  $\mu_2$ . Однак розрахунки показують, що різниця  $\Delta\mu$  практично не змінюється. Так, для тієї самої води при частоті  $\nu=1,5$  МГц наводяться такі дані:  $\mu_B \approx 0,6$  м<sup>-1</sup>,  $\mu_L \approx 4,0$  м<sup>-1</sup>. Видно, що різниця  $\Delta\mu \approx 3,4$  практично збігається з різницею  $\Delta\mu$  при частоті ультразвуку в 1 МГц.

## 2.5. Кристалізація сплавів евтектичного типу

### 2.5.1. Переохолодження в сплавах евтектичного типу.

Евтектичні сплави широко застосовуються як ТАМ, тому становить особливий інтерес вивчення діаграм стану евтектичного типу, залежності теплових ефектів і ступеня переохолодження від концентрації компонентів і термічної передісторії розплавів.

Аналіз літературних даних з кристалізації показує, що залежно від умов мають місце різні передкристалізаційні переохолодження відносно температури плавлення  $T_L$  для чистих речовин і температури ліквідус для сплавів.

На рис. 2.5 (праворуч) подано схематичні термограми охолодження розплавів індивідуальних речовин і бінарних сплавів, що характеризують різні види кристалізації. Термограми I і II відповідають кристалізації чистого компонента В. Вони характеризують перехід від рівноважної кристалізації до нерівноважної залежно від величини попереднього прогріву рідкої фази. Це явище було детально розглянуто в п. 2.3.2 і показано на рис. 2.3. Термограми III – V на рис. 2.5 характеризують кристалізацію сплавів з різними переохолодженнями відносно лінії ліквідусу.

У літературі практично не розглянуто шляхи кристалізації у випадку затвердіння з метастабільної області з переохолодженням  $\Delta T_L^-$  відносно температури ліквідусу  $T_L$  ( $\Delta T_L^- = T_L - T_{\min}$ ). Величину  $\Delta T_L^-$  не слід плутати з концентраційним

переохолодженням  $\Delta T_{LA} = T_{LA} - T_L$ . Набір точок  $T_{\min}$  для сплавів з різною концентрацією  $A$  й  $B$ , у тому числі й для чистих компонентів, утворює границю метастабільної області розплаву відносно лабільного стану (на рис. 2.5 пунктирні лінії на діаграмах).

До точок між лініями ліквідусу й солідусу можна застосувати правило фаз Гіббса. Так, у метастабільній області, наприклад у точці  $e$ , до початку кристалізації кількість ступенів свободи дорівнює  $i = 2 - 1 + 1 = 2$  (при  $p = const$ ), отже переохолоджений пересичений рідкий стан бінарного сплаву визначається двома параметрами: концентрацією й температурою. У тій самій точці після кристалізації  $i = 2 - 2 + 1 = 1$ . Таким чином, рідкий стан (насичений розчин) однозначно визначається температурою й відповідною їй розчинністю.

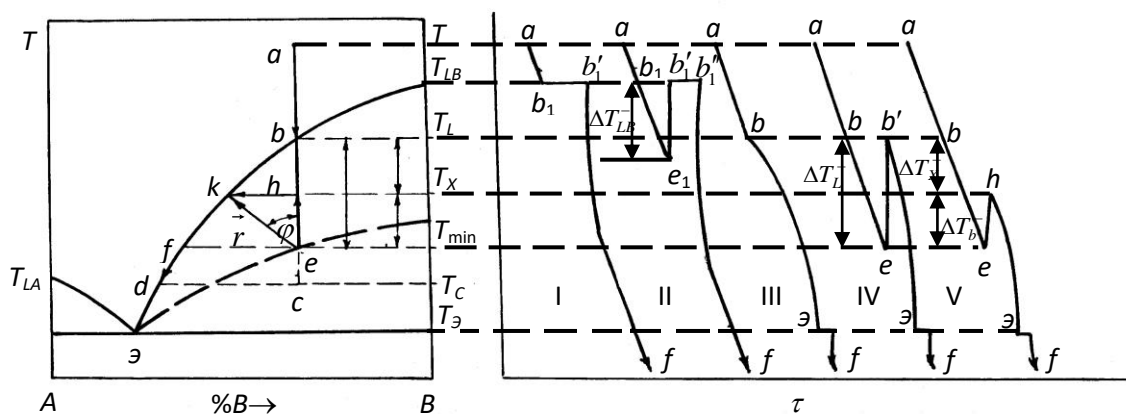


Рис. 2.5. Термограми охолодження простих речовин (I-II) і сплавів (III-IV) з різними видами кристалізації: рівноважної (РК) – криві I, III і нерівноважно-вибухової (НРВК) – II, IV, V (праворуч). Діаграма стану, відповідна кривим охолодження I-V для заевтектичної області з зазначенням шляхів кристалізації РК і НРВК (ліворуч)

Шлях нерівноважної кристалізації сплаву (приклад V) при його охолодженні з рідкого стану, наприклад із точки  $a$  до точки  $C$ , можна подати у вигляді схеми  $a \rightarrow e \rightarrow h \rightarrow k \rightarrow d$  або через вектор  $\overrightarrow{ek}$ :  $a \rightarrow e \rightarrow k \rightarrow d$ , показаний на діаграмі (рис. 2.5, праворуч).

Кут  $\varphi$  нахилу вектора  $\vec{r}(\overline{ek})$  відносно вертикалі залежить від різних факторів: швидкості охолодження затравок, що вводяться, тощо. Так, зі збільшенням швидкості охолодження розплаву кут  $\varphi$  може збільшуватися від  $0$  до  $180^\circ$ . Для прикладу III цей кут становить  $0^\circ$ , для IV  $\varphi \approx 50^\circ$ . Якщо кристалізація буде відбуватися при температурі  $T_{\min}$  рівноважно, то  $\varphi = 90^\circ$  тощо. При наближенні  $\varphi$  до  $180^\circ$  можна «проскочити» кристалізацію й перевести розплав в аморфний стан.

**2.5.2. Застосування методів геометричної термодинаміки для аналізу енергії Гіббса при кристалізації сплавів евтектичного типу.** У значенні термодинамічної функції  $G(T)$  при постійному тиску для простої речовини в однофазному стані можливо виділити ряд складових різного походження (складова електронів  $G_{ел}$ , гармонічних  $G_{гарм}$  і ангармонічних  $G_{анг}$  коливань кристалічних ґрат електронів, магнітних  $G_{магн}$  і дефектних  $G_{деф}$  складових):

$$G(T) = H_0 + G_{эл}(T) + G_{гарм}(T) + G_{анг}(T) + G_{магн}(T) + G_{деф}(T), \quad (2.32)$$

де  $H_0$  – ентальпія при  $0$  К.

Перераховані фактори свідчать про надзвичайно складну залежність  $G = f(T)$ , що практично не піддається точному аналізу для конкретних речовин. Феноменологічний підхід до аналізу функції  $G = f(T)$  для індивідуальної однофазної речовини А (або В) зводиться до аналізу енергій  $G^A = H^A - S^A T$  або ( $G^B = H^B - S^B T$ ), де  $S^A = \int_0^T C_p^A dT$  або ( $S^B = \int_0^T C_p^B dT$ ) – ентропії компонентів А і В;  $H^A, H^B, C_p^A, C_p^B$  – ентальпії й теплоємності тих самих компонентів. На рис. 2.6 показано подібні залежності для рідкої  $G_L^A(T), G_L^B(T)$  й для твердої  $G_S^A(T), G_S^B(T)$  фаз [99] для компонентів А (праворуч) і В (ліворуч). Через те що повний диференціал  $dG = -SdT + VdP$  (де  $S$  – ентропія,  $V$  – об'єм,  $P$  – тиск) і  $(\partial G^A / \partial T)_P < 0$  і  $(\partial G^B / \partial T)_P < 0$ , зі збільшенням температури криві

$G^A(T)$  й  $G^B(T)$  будуть знижуватися й будуть звернені опуклістю нагору, оскільки  $(\partial^2 G^A / \partial T^2) < 0$  і  $(\partial^2 G^B / \partial T^2) < 0$ .

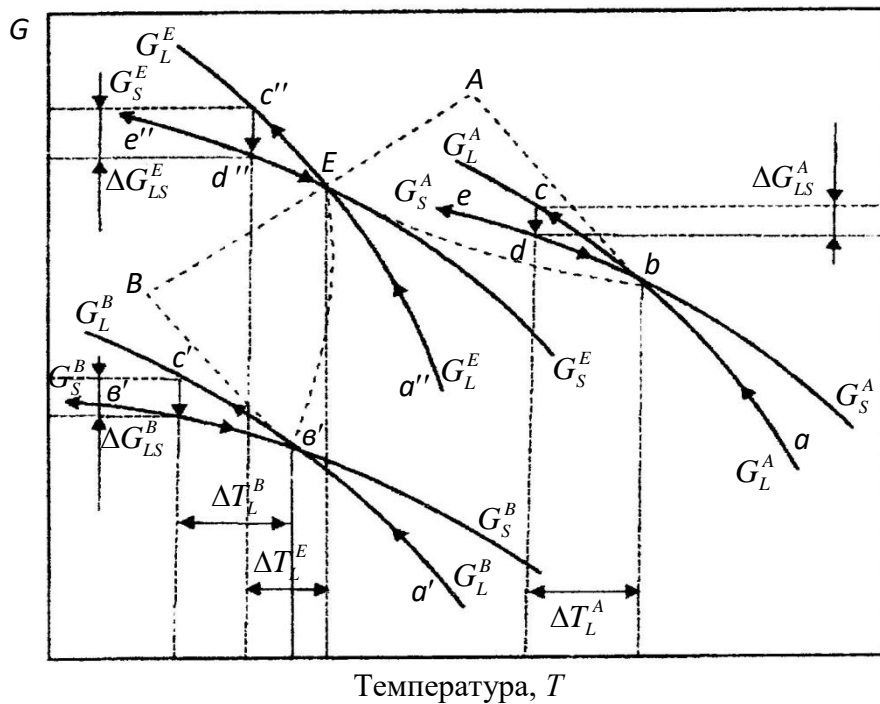


Рис. 2.6. Графіки температурної залежності енергії Гіббса  $G$  від температури для рідкої ( $G_L$ ) і твердої ( $G_S$ ) фази, побудовані для чистих компонентів А, В, а також евтектичного сплаву Е

У точці  $b$  перетинаються криві  $G_L^A(T)$  й  $G_S^A(T)$ , а в точці  $b'$  – криві  $G_L^B(T)$  й  $G_S^B(T)$ . Ці точки відповідають температурам плавлення  $T_L^A$  компонента А і  $T_L^B$  компонента В. При цих температурах дотримується рівновага, оскільки  $G_L^A = G_S^A$  в точці  $b$  і  $G_L^B = G_S^B$  в точці  $b'$ . Шлях дійсної залежності  $G(T)$  з урахуванням фазового перетворення й охолодження розплаву проходить через точки  $a, b, e$  для компонента А і через точки  $a', b', e'$  для компонента В.

Видно, що вище температури  $T_L^A$  (або  $T_L^B$ ) – стійка рідка фаза, а нижче цих температур – тверда фаза, оскільки в будь-якій точці енергія Гіббса однієї з фаз менше від енергії Гіббса іншої фази в тій самій точці.

При вивченні кристалізації важливим є аналіз різниці енергій Гіббса  $\Delta G = G_\alpha - G_\beta$  між співіснуючими фазами  $\alpha$  і  $\beta$ :



$$\Delta G = \Delta H_0 + \Delta G_{эл} + \Delta G_{зарм} + \Delta G_{анг} + \Delta G_{магн} + \Delta G_{деф} + \Delta G_{нов}, \quad (2.33)$$

де  $\Delta G_{нов}$  – складова, що пов'язана з появою поверхні розподілу фаз між рідкою і твердою фазами.

У цьому випадку з'являється новий доданок  $\Delta G_{нов}$ , пов'язаний з наявністю міжфазної поверхневої енергії.

Залежно від роду фазових перетворень складова ряду членів у вираз (2.33) стає малозначною, тоді як на перший план висуваються інші. Так, при різкій зміні електронних властивостей у процесі фазових перетворень є суттєвою складова  $\Delta G_{эл}$ ; при перетворенні в точці Кюрі феромагнетика в парамагнетик – складова  $\Delta G_{магн}$  тощо. При кристалізації вирішальну роль відіграють об'ємні конфігураційні складові  $\Delta G_V = \Delta G_{зарм} + \Delta G_{анг}$ , а також  $\Delta G_{нов}$  і  $\Delta G_{деф}$ . Феноменологічний підхід призводить до залежності  $\Delta G$  від переохолодження  $\Delta T^-$  при кристалізації речовини:

$$\Delta G = \Delta H - \Delta ST = \Delta H - \frac{\Delta H}{T_L} T = \frac{\Delta H \Delta T^-}{T_L}, \quad (2.34)$$

де  $\Delta H$  – ентальпія перетворення;

$$\Delta T^- = T_L - T,$$

де  $T_L$  – температура перетворення.

Аналогічна залежність  $\Delta G = f(\Delta T^-)$  є рушійною силою фазового переходу й універсальною для будь-якого перетворення щодо відповідних точок фазового перетворення (температур плавлення простих речовин і хімічних сполук, температур ліквідусу  $T_L$  і солідусу  $T_S$  для розчинів тощо). На рис. 2.6 видно залежність  $\Delta G_{LS} = f(\Delta T^-)$  при кристалізації компонентів А і В.

Для сплавів у виразі (2.33) додається енергія змішування  $\Delta G_{смеш}$  компонентів, що ще більше ускладнює аналіз залежності

$\Delta G$  не тільки від температури, але й від концентрації компонентів  $x_A$ ,  $x_B$ , енергії міжмолекулярної взаємодії  $u_{AB}$  від типу розчинів. Так, для бінарних регулярних розчинів за статистичною моделлю

$$\Delta G_{\text{смеш}} = x_A x_B u_{AB} + RT(x_A \ln x_B + x_B \ln x_A), \quad (2.35)$$

а для інших типів розчинів і моделей ця залежність ще складніше.

При кристалізації сплавів слід мати на увазі, що стан системи проходить через три зони – рідку, рідко-тверду й тверду. Враховуючи відсутність у літературі надійних даних про залежність  $G = f(T, x)$  для сплавів, можна лише провести якісну оцінку методами геометричної термодинаміки значення  $G_L^{AB}(T)$ ,  $G_{LS}^{AB}(T)$ ,  $G_S^{AB}(T)$  для зазначених зон.

Розглянемо бінарну систему А+В евтектичного типу без взаємної розчинності компонентів у твердій фазі. Тут можливі два варіанти аналізу енергії Гіббса. Перший – це аналіз температурної залежності  $G_L^{AB}(T)$ ,  $G_{LS}^{AB}(T)$ ,  $G_S^{AB}(T)$  для сплаву А+В фіксованого складу з урахуванням фазових перетворень. Другий – аналіз  $G_L(T)$  для рідкого розчину фіксованого складу,  $G_S^A(T)$  і  $G_S^B(T)$  для кристалів А і В, оскільки маємо в остаточному підсумку механічну суміш кристалів індивідуальних речовин А і В з урахуванням зміни концентраційної залежності  $G_L = f(T, x)$  в області рідко-твердого стану (цей варіант тут не розглядається).

На рис. 2.7 показано перший з передбачуваних варіантів як для доевтектичних (індекс (1)), так і для заевтектичних (індекс (2)) сплавів. Для доевтектичного сплаву 1 фіксованого складу нижче температури  $T_{L1}$  повинні збігатися на лінії  $m_1 n_1$  три криві:  $G_{L1}^{AB}(T)$ ,  $G_{LS1}^{AB}(T)$  і  $G_{S1}^{AB}(T)$ . Вибір цих енергій пов'язаний з тим, що вище  $T_{L1}$  – стійкий рідкий розчин, нижче температури ліквідусу виділяються А-кристали, а при температурі солідусу  $T_{S1}$  твердіє суміш А–В – кристалів. При цьому загальний зміст компонентів А і В зберігається незмінним як вище  $T_{L1}$ , так і нижче  $T_{L1}$  і  $T_{S1}$ . Вище  $T_{L1}$   $G_{L1}^{AB} < G_{LS1}^{AB} < G_{S1}^{AB}$ . Між  $T_{L1}$  і  $T_{S1}$  до точки  $O_1$

$G_{LS1}^{AB} < G_{L1}^{AB} < G_{S1}^{AB}$ , а після  $O_1$   $G_{LS1}^{AB} < G_{S1}^{AB} < G_{L1}^{AB}$ . Нижче евтектичної температури  $T_E$   $G_{S1}^{AB} < G_{LS1}^{AB} < G_{L1}^{AB}$ .

Для заевтектичної зони 2 збігаються криві  $G_{L2}^{AB}(T), G_{LS2}^{AB}(T), G_{S2}^{AB}(T)$ , а їх поведінка аналогічна схожим залежностям для доевтектичної області 1, за винятком того, що між температурами  $T_{L2}$  і  $T_{S2}$  виділяються В-кристали.

На рис. 2.7 жирними лініями виділено зміни енергії Гіббса для рідкої фази, що охолоджується, рівноважної кристалізації між  $T_L$  і  $T_S$  і подальшого охолодження твердої фази. Приклади, розібрані на рис. 2.7, належать до аналізу залежності енергій Гіббса в різних фазових областях при незмінній концентрації компонентів, у тому числі для рідко-твердого стану. Але навіть у цьому стані загальна концентрація компонентів А і В залишається сталою тому, що при випаданні, наприклад, А-кристалів у доевтектичній області розплав збіднюється на компонент А і збагачується на компонент В. З урахуванням цієї обставини можливий варіант аналізу енергій Гіббса  $G_S^A$  й  $G_S^B$  твердих компонентів А і В й енергій  $G_L(x, T)$  для рідкого розчину.

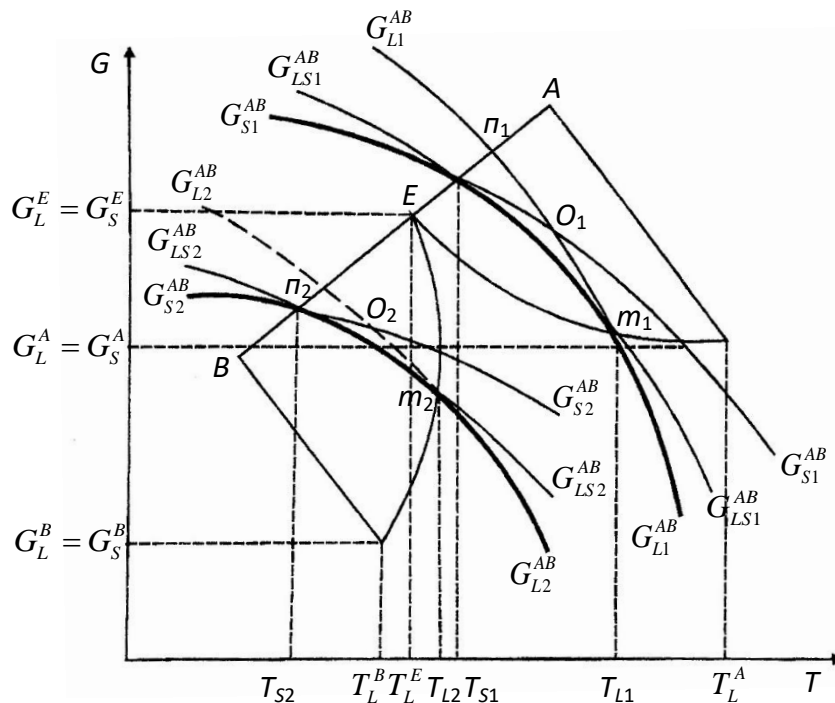


Рис. 2.7. Залежність енергії Гіббса від температури для розчинів бінарної системи евтектичного типу

Розглянуті вище залежності енергії Гіббса від температури й концентрації дозволяють із термодинамічних позицій обґрунтувати різні види кристалізації від КРК із практичною відсутністю переохолоджень до НРВК зі значними переохолодженнями, указувати на їх напрямки й рушійні сили.

Для простих речовин і хімічних сполук шлях кристалізації типу КРК (рис. 2.6) проходить через точки  $abc$ , а типу НРВК за схемою  $a \rightarrow b \rightarrow z \rightarrow d \rightarrow b \rightarrow e$  з рушійною силою  $\Delta G_{LS}^A (\Delta T_L^A)$ . Аналогічно для В при КРК шлях кристалізації лежить через точки  $a'b'c'$ , а типу НРВК за схемою  $a' \rightarrow b' \rightarrow z' \rightarrow d' \rightarrow b' \rightarrow e'$  з рушійною силою  $\Delta G_{LS}^B (\Delta T_L^B)$ . Подібні різновиди процесів кристалізації залежно від умов експерименту й типу речовини виявлено в хімічних елементах і сполуках, у сплавах евтектичного типу. Ці різновиди показано у вигляді схематичних графіків охолодження в координатах температура – час на рис. 2.8. Для хімічних елементів і сполук спостерігаються термограми, відповідні кривим 1 і 2.

Наявність одночасних  $\Delta T_L^-$  і  $\Delta T_S^-$  або їх відсутність відносно ліній ліквідусу і солідусу характеризують криві 3 і 6 відповідно. Крива охолодження 4 свідчить про відсутність  $\Delta T_L^-$  і наявність  $\Delta T_S^-$ , а крива 5, навпаки, про наявність  $\Delta T_L^-$  і відсутність  $\Delta T_S^-$ . «Шляхи» подібних різновидів кристалізації в сплавах можна простежити й на кривих залежності вільних енергій Гіббса від температури на прикладі доевтектичного сплаву (рис. 2.9).

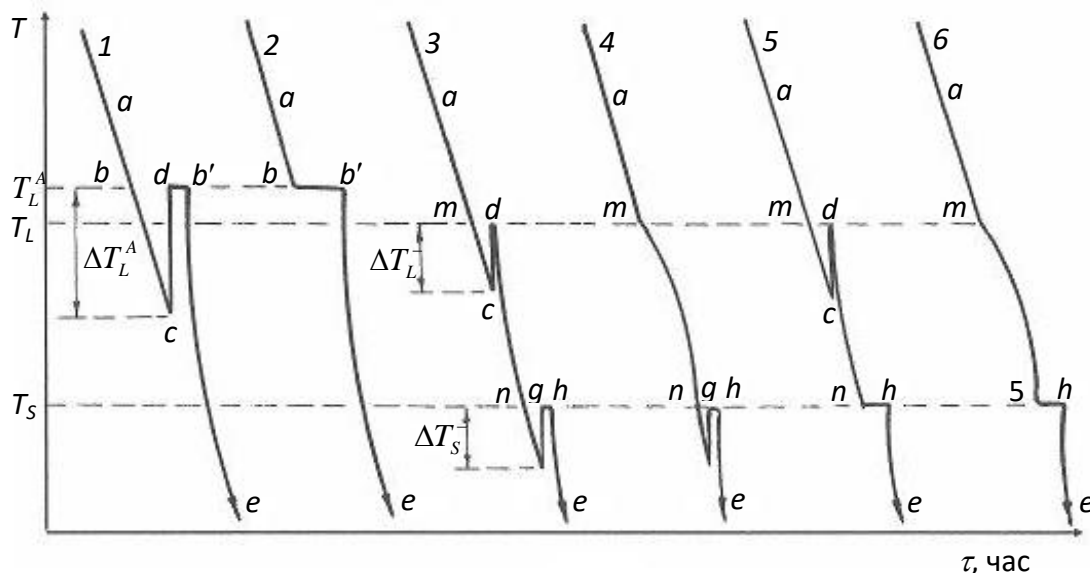


Рис. 2.8. Характерні криві охолодження при синтезі кристалогідратів із власної кристалізаційної води (1, 2) і з водяних розчинів (3-6)

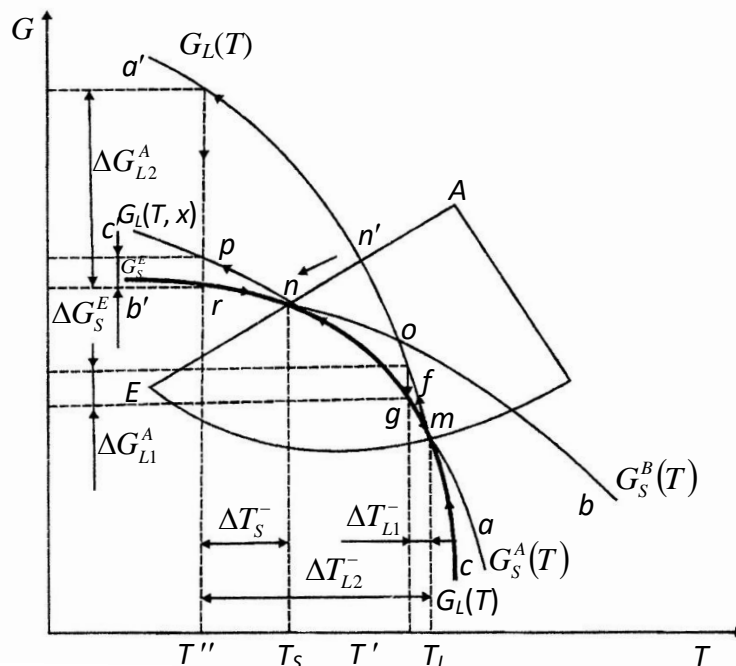


Рис. 2.9. Шляхи синтезу кристалогідрату *A* в доевтектичній області в системі вода – кристалогідрат

Співставляючи криві 3-6 на рис. 2.8 зі шляхами кристалізації на рис. 2.9, можна зробити такі висновки:

– крива 3 на рис. 2.8 з  $\Delta T_L^- \neq 0$ ,  $\Delta T_S^- \neq 0$  відповідає ходу кривій  $G(T)$  на рис. 2.9 за схемою  $c \rightarrow m \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow m \rightarrow g \rightarrow n \rightarrow p \rightarrow r \rightarrow n \rightarrow b'$  з рушійними силами «фазових перетворень»  $\Delta G_L^A > 0$ ,  $\Delta G_L^E > 0$ ;

– крива 4 (рис. 2.8) з  $\Delta T_L^- = 0$ ,  $\Delta T_S^- \neq 0$  відповідає зміні  $G(T)$  (рис. 2.9) за схемою  $c \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow p \rightarrow r \rightarrow n \rightarrow b'$  з  $\Delta G_L^A \approx 0$ ,  $\Delta G_L^E > 0$ ;

– крива 5 (рис. 2.8) з  $\Delta T_L^- \neq 0$ ,  $\Delta T_S^- = 0$  відповідає зміні  $G(T)$  (рис. 2.9) за схемою  $c \rightarrow m \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow b$  (рис. 2.8) з  $\Delta G_L^A > 0$ ,  $\Delta G_L^E \approx 0$ ;

– крива 6 (рис. 2.8) з  $\Delta T_L^- = 0$ ,  $\Delta T_S^- = 0$  відповідає зміні  $G(T)$  за схемою  $c \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow b'$ .

Що стосується евтектичного сплаву *E*, то при кристалізації з  $\Delta T_L^E = 0$  і  $\Delta G_{LS}^E \approx 0$  хід кривої  $G(T)$  можливий шляхом  $a'' \rightarrow E \rightarrow e''$ , а при кристалізації з  $\Delta T_L^E \neq 0$ ,  $\Delta G_{LS}^E > 0$  крива  $G(T)$  буде йти за схемою  $a'' \rightarrow E \rightarrow c'' \rightarrow d'' \rightarrow E \rightarrow e''$  (рис. 2.6).

## 2.6. Розроблення методик експериментальних досліджень

### 2.6.1. Матеріали для дослідження й підготовка зразків.

Для дослідження кристалогідратів і їх сумішей, низькомолекулярних органічних сполук і їх сплавів вибираються речовини особливої чистоти (ОСЧ) або чисті для аналізу (ЧДА). Зразки готували за стандартною відповідною методикою. Наважки компонентів зважували на аналітичних вагах АДВ-100.

**2.6.2. Методи циклічного термічного аналізу (ЦТА) і диференціально-термічного аналізу (ДТА).** При дослідженні переохолоджень, ендо- і екзотермічних ефектів фазових перетворень поширеними методами є диференціальний термічний аналіз (ДТА), диференціальна скануюча калориметрія (ДСК), термогравіметричний аналіз (ТГА), статистичний термічний аналіз (СТА) тощо, які дозволяють кількісно і якісно визначати температурні інтервали фазових перетворень, ступені переохолоджень, перетворень тощо.

У роботах [26, 30] головним методом є послідовний циклічний термічний аналіз (ЦТА), а також метод ДТА. У вивченні фазових перетворень особливе місце займають періодичні процеси або термоцикли, що забезпечують багаторазове повторення експерименту в тих самих умовах. Таким методом саме і є метод ЦТА, у якому джерелом інформації є ціла група параметрів, що характеризують процеси плавлення, кінетику кристалізації переохолоджених розчинів, фазових перетворень, що супроводжуються екзо- і ендотермічними ефектами. Такими параметрами є:

$T_L$  – температура плавлення;

$T_S$  – температура рівноважної кристалізації;

$\Delta T^+$  – величина перегріву рідкої фази відносно температури плавлення  $T_L$ ;

$T_{\min}$  – межа метастабільності;

$\Delta T^- = T_L - T_{\min}$  – ступінь передкристалізаційного переохолодження;

$\Delta T_L^-$ ,  $\Delta T_S^-$  – переохолодження відносно ліній ліквідусу й солідусу для бінарних систем;

$T_k^+$  – температура структурних перебудов у рідкій фазі;  
 $\Delta H_L$  – ентальпія плавлення або кристалізації;  
 $\tau$  і  $v$  – час і швидкість плавлення або кристалізації;  
 $\tau_1$  – інкубаційний період зародження нової фази;  
 $\tau_B$  – час ізотермічної витримки розплаву;  
 $\tau_2$  і  $v_k$  – час і швидкість коагуляції зародків;  
 $\tau_3$  – час затвердіння після коагуляції зародків;  
 $\eta$  – ступінь кристалічності;  
 $v_{нагр}$ ,  $v_{охол}$  – швидкості нагрівання й охолодження тощо.

Зміст методу ЦТА полягає в досягненні спеціально підібраним режимом вмикання або вимикання печі, чим забезпечується мінімальна різниця в температурах печі й зразка (за рахунок інерційності печі). Тим самим з підвищеною чутливістю реєструються температури термічних перетворень. Для виявлення нових ендо- і екзотермічних ефектів перевіряється кожний градус, після чого ретельно досліджується виявлений фазовий перехід шляхом термоциклювання. Із цією метою нижня границя  $T_{нижн}^- < T_L$  підтримується постійною, а кожний наступний термоцикл відрізняється від попереднього тим, що вимикання печі проводиться пізніше або раніше, ніж у попередньому термоциклі, що призводить до підвищення або зниження верхньої границі температури від циклу до циклу на 1-2° (рис. 2.10). Зокрема при переході від циклу 1 до циклу 2 (аналогічно від 3 до 4 і від 5 до 6) на цьому рисунку видно перехід від типу кристалізації без переохолодження (1, 3, 5) до вибухового типу кристалізації (2, 4, 6).

На рис. 2.11, *a* і *б* для двох послідовних термоциклів наведено схематичні узагальнені криві нагрівання й охолодження, що характеризують плавлення й кристалізацію речовини з різними переохолодженнями. На ділянках *abcd* (термоцикл 1) і *hklm* (термоцикл 2) відбувається нагрівання. Ділянки *bc* термоциклу 1 і *kl* термоциклу 2 свідчать про плавлення зразка за час  $\tau_L$  (при однаковій швидкості нагрівання). На лінії *dd'e* (у 1-му термоциклі) зразок охолоджується. На ділянці *d'e* рідина перебуває в переохоложеному метастабільному стані протягом часу  $\tau_1$ .

Охолонувши до деякої мінімальної температури  $T_m$ , зразок протягом часу  $\tau_2$  мимовільно прогрівається до температури плавлення  $T_L$  (лінія  $ef$ ). На ділянці  $fg$  відбувається подальше твердіння зразка протягом часу  $\tau_3$  і далі на лінії  $gh$  затверділий зразок охолоджується. Таким чином, повний час кристалізації становить  $\tau' = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ . Швидкість охолодження  $v_{охол}$  (або нагрівання  $v_{нагр}$ ) у будь-який момент часу (за відсутності фазових перетворень) визначається як тангенс кута  $\varphi$  між дотичною до температурної кривої в даній точці й віссю часу –  $v_{охол} = dt/d\tau = tg\varphi$ .

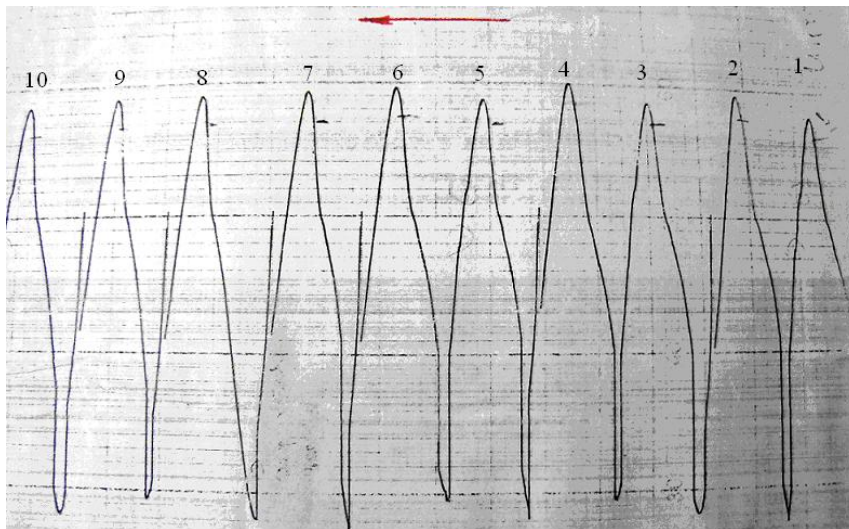


Рис. 2.10. Циклічні термограми охолодження й нагрівання методом ЦТА

Термоцикл 1 є узагальненим прикладом нерівноважно-вибухової кристалізації (НРВК) з наступною ізотермічною докристалізацією при  $T_L$ . Термоцикл 2 є узагальненим прикладом квазірівноважної кристалізації (КРК), що відбувається практично без переохолодження  $\Delta T^-$ . Два послідовні термоцикли, в одному з яких кристалізація відбувається за типом НРВК, а в іншому – за типом КРК, служать джерелом для визначення різних кінетичних параметрів зародкоутворення й масової кристалізації (швидкість фазових перетворень, переохолодження, ступінь кристалічності тощо).

Метод ДТА засновано на порівнянні термічних властивостей зразка досліджуваної речовини й термічно інертної речовини, що прийнята як еталон. Параметр, що реєструється, є



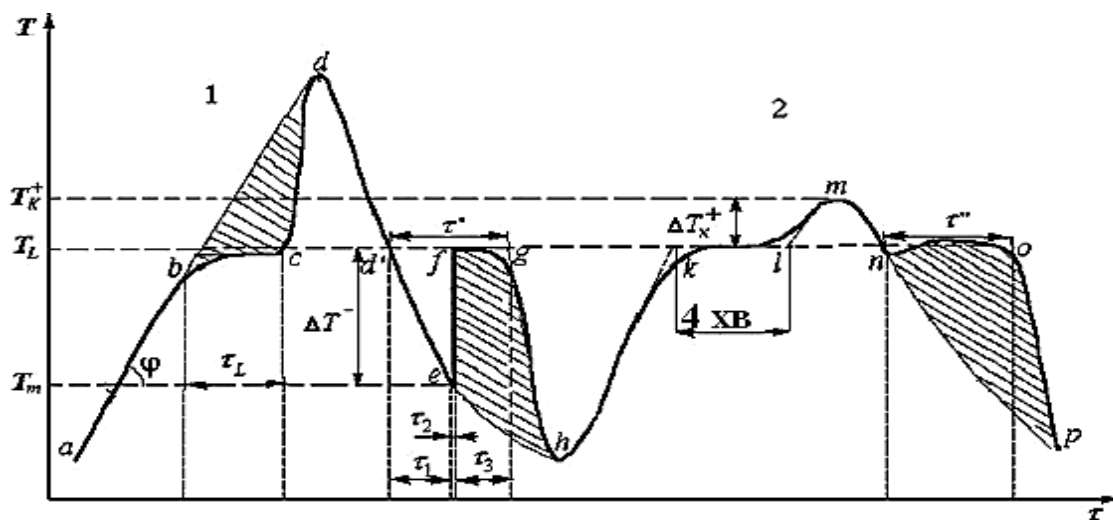
різницею їх температур, вимірюваного при нагріванні або охолодженні зразка з постійною швидкістю, яка може бути у вигляді функції температури зразка (або часу), еталона й нагрівача. На рис. 2.11, б наведено узагальнені криві ДТА, відповідні температурним кривим на рис. 2.11, а. Також метод ДТА є чутливим до фазових переходів 2-го роду (ФП2).

Методи ДТА й ЦТА один відносно одного мають переваги й недоліки. Так, за кривими ЦТА неможливо задовільно оцінювати величини теплових ефектів, оскільки площі ефектів (заштриховані ділянки на рис. 2.11) залежать від швидкості охолодження (нагрівання). Основні недоліки методу ДТА для дослідження кінетики зародкоутворення при кристалізації індивідуальної речовини – це відсутність на диференціальних кривих інформації про інкубаційний період нуклеації, а також складності вибору матеріалу для еталона. Але видно, що ці два методи доповнюють один одного: ДТА дає оцінку ендо- і екзотермічних ефектів фазових перетворень і хімічних реакцій (похибка визначення питомої величини ентальпії перетворення може становити не більше 2 %), що відбуваються в зразку; ЦТА ж показує загальну картину зміни температури зразка від часу.

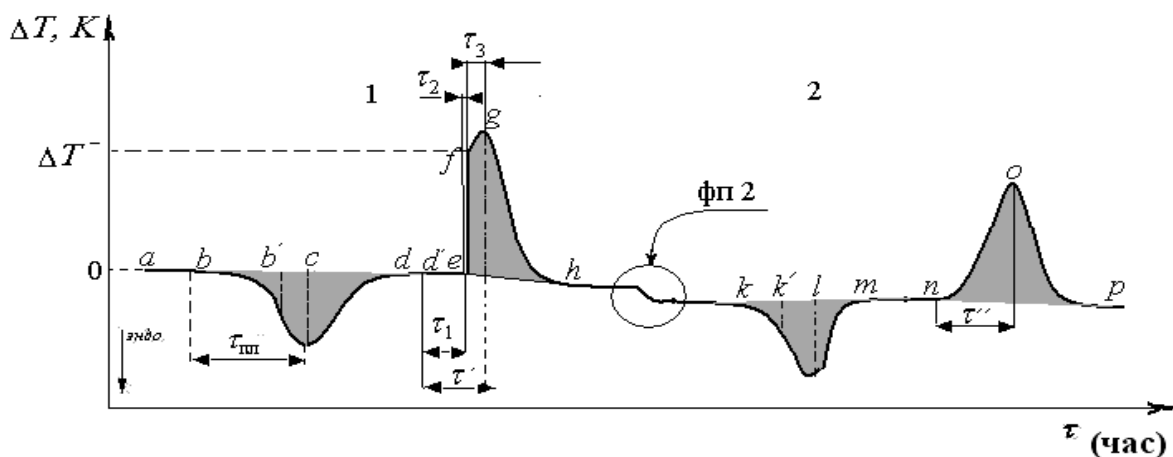
Пристрій для термографування складається зі зв'язаних між собою частин і систем: вимірювальної системи (аналоговий самописець і АЦП із виходом на ПК); електронного блока регулювання температурного режиму печі; блока стабілізації напруги живлення (рис. 2.12). Вимірювальна система містить у собі термопари (ТП), вимірники – регулятори ТРМ-202 (2-канальний) і УКТ-38 (8-канальний) фірми ОВЕН, які підключаються через інтерфейс RS-232; цифрові мультиметри, потенціометр постійного струму ПП-63, автоматичні самописні потенціометри КСП-4 зі шкалою на 2 і 5 мВ, печі (терморезистивні та на основі гнізд Пельтьє).

Для термографування при низьких температурах (до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) були використані сучасні побутові морозильні камери, з поміщеним усередину термогніздом Пельтьє.

При виборі матеріалів для ТАМ важливим є випробування зразків тривалим термоциклюванням, оскільки використовуваний у теплоакумуляторі матеріал повинен без серйозних змін витримати більш ніж тисячу термоциклів нагрівання-охолодження.



а



б

Рис. 2.11. Загальна картина фазового перетворення, яка визначається методами ЦТА й ДТА при плавленні й кристалізації речовини: а – схематичні криві нагрівання й охолодження, що характеризують кристалізацію речовини з переохолодженням (термоцикл 1) і без переохолодження (термоцикл 2), отримані методом ЦТА; б – криві ДТА, які відповідають верхнім температурним кривим

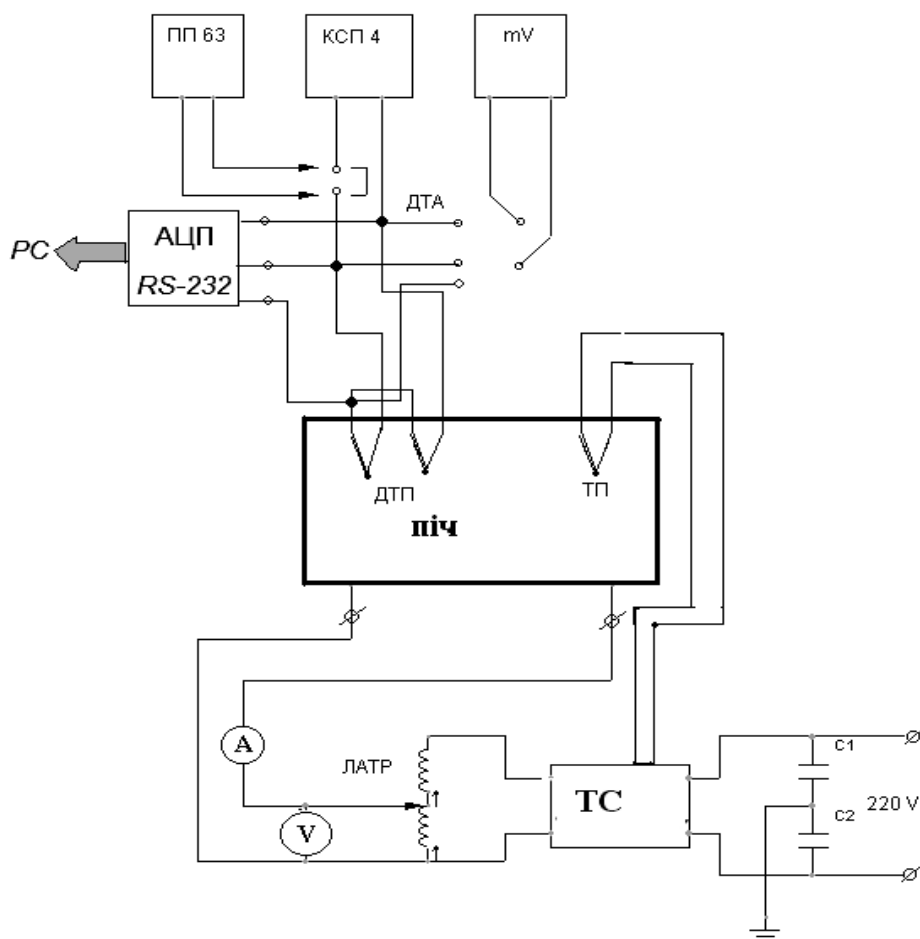


Рис. 2.12. Схема обладнання для термографування матеріалів методами ЦТА й ДТА

**2.6.3. Методи термогравіметричного аналізу (ТГА) і диференціальної скануючої калориметрії (ДСК).** При ДСК–аналізі використовувався термоаналітичний комплекс Du Pont 9900 в умовах лінійного підвищення температури зі швидкістю  $10\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ . Метод ДСК заснований на нагріванні (охолодженні) зразка й еталона з заданою швидкістю (при збереженні їх температур однаковими) і вимірюванні теплового потоку, що компенсує, від температури, а в ізотермічних дослідках – від часу. Зміна температури в цьому методі використовується для регулювання потоку, що компенсує, прямо пропорційно зміні внутрішньої енергії (ентальпії) зразка. Площа під ДСК-піком пропорційна сумарній зміні ентальпії. У приладі Du Pont 9900 автоматично підраховується тепловий ефект й інтервал температур, а інформація записується на ДСК-грами.

Для термогравіметрії використовували термогравіметричний аналізатор ТГА–951 у складі термоаналітичного комплексу Du Pont 9900. ТГА складається з трьох основних вузлів: піч, ваги й шафа. Піч в установці Du Pont 9900 являє собою працююче від електромережі обладнання потужністю 500 Вт із низькою теплопровідністю, що забезпечує швидке нагрівання й охолодження. Контрольна термопара Platinel II у стінці печі контролює температуру. Обладнання ваг складається з корпусу, контрольної камери й відсіку для зразка, поміщеного в платинові чашки. ТГА–951 працює за принципом нульового балансу. Наважку поміщали на чашку ваг і нагрівали зі швидкістю 10 °С/хв. При цьому безупинно відзначалася вага досліджуваної речовини.

## **2.7. Плавлення й кристалізація кристалогідратів**

**2.7.1. Синтез кристалогідратів з водяних розчинів.** Кристалогідрати і їх суміші широко застосовуються як ТАМ, тому необхідно коротко зупинитися на процесах їх синтезу з водяних розчинів.

Як доводять Є.В. Хамський, Я. Нівлт, Л.Н. Матусевич, кристалізація з водяних розчинів належить до найпоширеніших процесів хімічної технології. На відміну від кристалізації безводних солей з розчинів, кристалогідрати можуть утворюватися як із власної кристалізаційної води, так і з водяного розчину. У першому випадку синтез відбувається ніби з розплаву кристалогідрату. У другому випадку синтез кристалогідрату підкорюється законам кристалізації з розчину.

Процеси кристалізації з рідкої фази прямо залежать від ступеня пересичення розчинів і від величини переохолодження. Залежно від концентрації розчиненої речовини розчини бувають ненасиченими, насиченими або пересиченими. Розчинність залежить від температури, і характер цієї залежності може бути різним. Зі збільшенням температури розчинність може зростати, зменшуватися або залишатися постійною.

Як ненасичені, так і насичені розчини перебувають у стійкому стані й зберігаються в незмінному виді необмежений

час. На відміну від них, пересичені розчини нестабільні. Незважаючи на це, у ряді випадків вони також можуть залишатися без змін протягом того або іншого проміжку часу. Як довго може тривати цей стан, залежить від ступеня відхилення розчину від рівноваги й природи утворюючих розчин речовин. Перехід з нерівноважного стану в рівноважний супроводжується кристалізацією. Рівноважний стан визначається концентрацією насиченого розчину, тобто розчинністю. Наявність пересиченого розчину є умовою його кристалізації. Кристали в ненасиченому розчині розчиняються.

Граничне пересичення  $\Delta C_{\max}^+$  – це пересичення, при досягненні якого починається спонтанна кристалізація. Особливо схильні до утворення пересичених розчинів сполуки, що мають у своєму складі кристалізаційну воду, тобто кристалогідрати. Явище граничного пересичення тісно пов'язано зі стабільністю пересичених розчинів, яка визначається межею метастабільності. Межа метастабільності поділяє область пересичення на дві частини: лабільну й метастабільну (рис. 2.13). Лабільна область характеризується тим, що розчини мають концентрацію вище граничної, а кристалізація відбувається миттєво. Метастабільна область характерна тим, що в ній розчини мають концентрацію нижче граничної, а кристалізація в таких розчинах не відбувається.

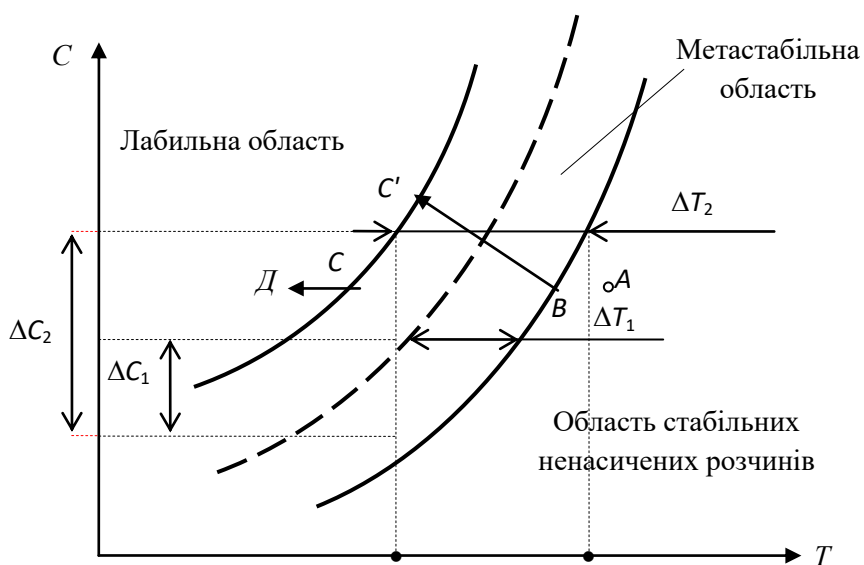


Рис. 2.13. Схематичне зображення різних станів розчинів і шляхи їх охолодження до того, як наступить кристалізація

Розглянемо шляхи синтезу кристалогідрату з водяного розчину на прикладі бінарної системи евтектичного типу в заевтектичній області, де  $A$  – вода, а  $B$  – кристалогідрат (рис. 2.14). На цьому рисунку лінія ліквідусу  $T_{LB}ebde$  є кривою розчинності кристалогідрату  $B$  у воді,  $T_{LB}$  – температура плавлення кристалогідрату.

Охолодження ненасиченого розчину, що має температуру  $T_L$  й концентрацію  $C_1$  (точка  $a$ ), до температури  $T_C$  умовно можна зобразити лінією  $ac$ , що характеризує на ділянці  $bc$  політермічний характер кристалізації.

При знятті пересичення  $\Delta C = C_1 - C_2$  при температурі  $T_C$  процес кристалізації зображується лінією  $cd$ , а кінцевий стан розчину – точкою  $d$  на кривій розчинності, що відповідає рівноважній концентрації  $C_2$ . У цьому випадку шлях кристалізації гідрату буде зображено лінією  $abcd$ .

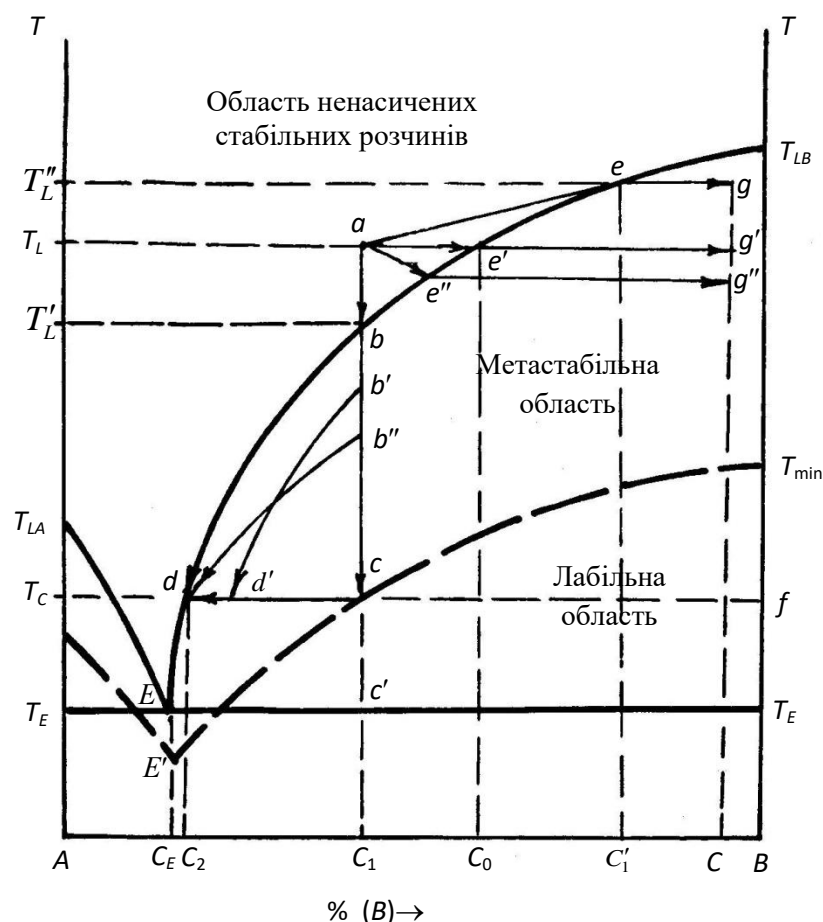


Рис. 2.14. Діаграма стану розчинів у бінарній системі евтектичного типу з значенням напрямків ізоконцентраційної та ізотермічної кристалізації в заевтектичній області. Пунктиром показано межу метастабільності

Якщо розчин не здатний до утворення пересичення, шлях рівноважної кристалізації насиченого водяного розчину відповідає лінії  $abd$ . Залежно від швидкості охолодження і його здатності утворювати пересичення, реальний процес може протікати також за лініями  $ab'd'd$  або  $ab''d$ .

За правилом важеля в точці  $c$  можна визначити масові частки  $\xi_S$  кристалогідрату  $B$  й  $\xi_L$  рідкого пересиченого розчину  $\xi_S = dc/df$ ;  $\xi_L = cf/df$ . Точка  $E$  – евтектична точка, у якій у рівновазі перебувають насичений розчин і дві тверді фази – лід і кристалогідрат.

Якщо розчинена речовина кристалізується у вигляді кристалогідрату, то вихід цих кристалів при повній втраті вільного розчинника становить  $m_{к2} = m_p \cdot C_1 \cdot X$ , де  $X = M_{к2}/M_c$  – відношення молярних мас кристалогідрату  $M_{к2}$  і безводної солі  $M_c$  відповідно,  $m_c$  - вихід кристалів,  $m_p$  – початкова маса розчинника,  $C_1$  – початкова концентрація розчину.

Без втрати розчинника  $m_c = \frac{m_p \cdot X(C_1 - C_2)}{1 - C_2(X - 1)}$ , а при частковій втраті розчинника  $m_c = \frac{m_p \cdot X(C_1 - C_2(1 - \eta))}{1 - C_2(X - 1)}$ .

Ключовою ланкою в теорії зародкоутворення з розчинів є питання про умови формування стабільних зародків нової фази. Формально швидкість зародження нової фази  $J$  з ідеально чистих розчинів може бути описана рівнянням кінетики хімічних реакцій, що зв'язують величину  $J$  з концентрацією пересиченого розчину  $C$ :  $J = K_p C^P$ , де  $P$  – порядок реакції,  $K_p$  – константа реакції. Із цього рівняння випливає, що зі збільшенням пересичення швидкість утворення зародків швидко зростає.

**2.7.2. Термоакумулюючі матеріали на основі кристалогідратів солей натрію.** Кристалогідрати є представниками великого класу молекулярних сполук. До них належить глауберова сіль  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , мідний купорос  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , залізний купорос  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , гіпс  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , пентагідрат тіосульфату натрію  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , гептагідрат сульфиту натрію  $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  тощо.

Ефективність використання кристалогідратів як ТАМ обумовлена тим, що багато кристалогідратів мають високі ентальпії фазових переходів. За аналогією з системою «лід – вода», у якій перехід з одного стану в інший здійснюється при 0 °С з виділенням (поглинанням) тепла, подібні процеси відбуваються й у кристалогідратах. Так, наприклад, температура плавлення  $T_L$  десятиводного сульфату натрію становить 32,4 °С, п'ятиводного тіосульфату натрію ~48 °С, семиводного сульфату натрію 33,4 °С, десятиводного карбонату натрію 32,2 °С, а температури замерзання їхніх водяних розчинів охоплюють весь спектр «нормальних» температур від  $T_L$  до нульових.

Нині пошук речовин, які використовуються як ТАМ, що працюють у тому або іншому температурному режимі, зосереджено не тільки на вивченні сумішей різних кристалогідратів, але й підбору добавок до них, що зменшують ступінь переохолодження, що запобігають швидкому викиданню теплоти за рахунок вибухової кристалізації, що знижують ефекти випаровування кристалізаційної води, тим самим сприяючи тривалості використання ТАМ у результаті багаторазового термоциклювання.

Патентний пошук свідчить [11], що ефективними ТАМ є суміші кристалогідратів ацетату натрію й тіосульфату натрію, ацетату натрію й сульфату натрію (20 ÷ 90%  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 80 \div 10\% \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), сечовина – сульфат натрію – вода; глауберова сіль – бікарбонат амонію в масовому співвідношенні від 100:20 до 100:50 тощо. Вивчені співвідношення компонентів, які зменшують розшарування сполуки, знижують ємність акумулювання теплоти й підвищують стабільність сполуки. Це сполуки 58%  $\text{H}_2\text{O} + 16\% \text{Na}_2\text{SO}_4 + 26\% \text{Na}_2\text{CO}_3$ , 58%  $\text{H}_2\text{O} + 25\% \text{Na}_2\text{SO}_4 + 17\% \text{Na}_2\text{CO}_3$ , 70%  $\text{H}_2\text{O} + 14\% \text{Na}_2\text{SO}_4 + 16\% \text{Na}_2\text{CO}_3$ , 70%  $\text{H}_2\text{O} + 4\% \text{Na}_2\text{SO}_4 + 26\% \text{Na}_2\text{CO}_3$ , глауберова сіль + сечовина в співвідношенні від 1:1 до 1:3 і пентагідрат тіосульфату натрію + сечовина від 1:2 до 1:1,8;  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  від 5:4 до 1:2;  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (основа) + 2 ÷ 15% бури (як інгібітор переохолодження) + 2 ÷ 15%  $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  (інгібітор розшарування твердої й рідкої фаз) + 0,5 ÷ 10% тонкодисперсний порошок  $\text{SiO}_2$  (як згущувач).



Тут наведено лише невеликий перелік винаходів, що належить до ТАМ, у яких використовуються суміші кристалогідратів з різними добавками. Разом з тим їх аналіз і аналіз наступних винаходів і інших літературних джерел [23, 27, 51] свідчить про відсутність систематичних досліджень не тільки індивідуальних кристалогідратів, але й подвійних, потрійних систем а їх участю. Нема наукового підходу до розроблення подібних ТАМ, заснованих на діаграмах стану сумішей кристалогідратів, через відсутність таких у літературі.

**2.7.3. Вивчення термічних ефектів при нагріванні кристалогідратів натрію методами термогравіметрії й диференціальної скануючої калориметрії.** У даному пункті наводяться експериментальні результати з вивчення термічних ефектів при плавленні й дегідратації кристалогідратів натрію: ацетату триводного (АН-3), тіосульфату п'ятиводного (ТСН-5) і сульфату десятиводного (СН-10) у режимі безперервного нагрівання методами термогравіметричного аналізу (ТГА) і диференціальної скануючої калориметрії (ДСК). Ці дослідження важливі для встановлення температурних меж стабільного існування кристалогідратів.

Проаналізуємо експериментальні графіки, отримані методами ТГА й ДСК для перерахованих речовин.

**Ацетат натрію триводний ( $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )**

На рис. 2.15 показано результат термогравіметричного аналізу при нагріванні вихідного триводного ацетату натрію в інтервалі від кімнатної температури до 250 °С. Графік характеризує повільну дегідратацію кристалогідрату  $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  до безводного  $\text{NaCH}_3\text{COO}$  і випаровування 9,476 % кристалізаційної води в інтервалі температур від ~50 до 100 °С з наступним інтенсивним випаровуванням і випаровуванням основної маси 27,99 % кристалізаційної води в інтервалі від ~100 до 170 °С. Розрахунки показують, що при температурі ~170 °С утворюється практично безводний ацетат натрію. Дійсно, із пропорції

$$m(3\text{H}_2\text{O}) = \frac{m(\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}) \cdot M(3\text{H}_2\text{O})}{M(\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O})},$$

де  $m(3\text{H}_2\text{O})$  – маса всієї кристалізаційної води  
 $m(\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}) = 17,595$  мг – маса кристалогідрату, використаного в методі ТГА;

$M(3\text{H}_2\text{O}) = 54$  г/моль,  $M(\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}) = 136$  г/моль – молярні маси кристалізаційної води й АН – 3,

одержимо  $m(3\text{H}_2\text{O}) = \frac{17,595 \cdot 54}{136} = 6,986$  Г, що становить  $\approx 39,8\%$  загальної маси кристалогідрату.

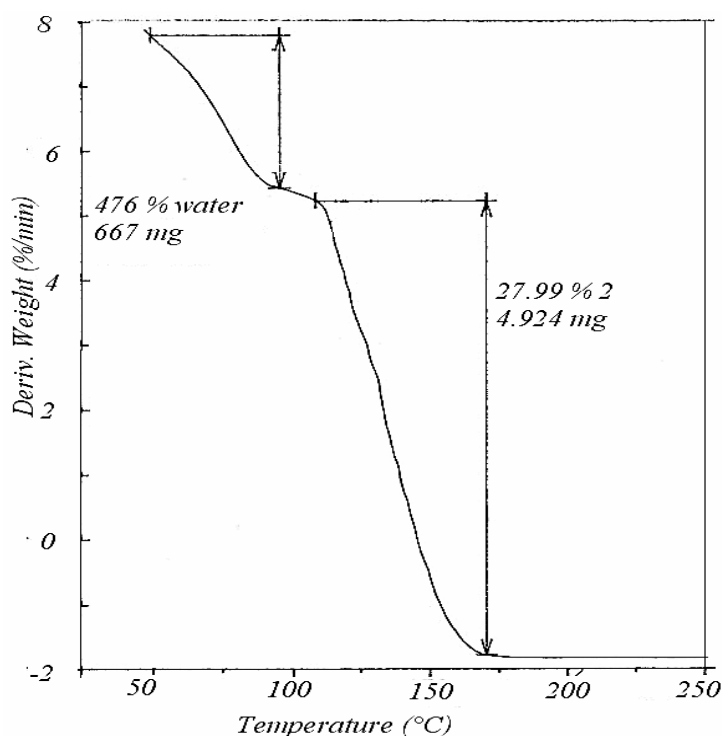


Рис. 2.15. Термогравіметрична крива АН-3→АН

З даних ТГА на рис. 2.15 випливає, що втрата маси води становить у цілому  $1,667$  мг +  $4,924$  мг =  $6,591$  мг або  $37,5\%$  загальної маси кристалогідрату.

Як бачимо, метод ТГА з достатньою надійністю у  $\sim 2,3\%$  збігається з розрахунковими за молярними масами компонентів АН-3.

На рис. 2.16 наведено запис ендотермічних ефектів при нагріванні ацетату натрію від водного до безводного в інтервалі температур від  $-60$  °С до  $+400$  °С методом ДСК. За даними,

наведеними на цьому рисунку, плавлення (або розчинення)  $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  у власній кристалізаційній воді починається при  $55,54^\circ\text{C}$  і закінчується при температурі  $66,05^\circ\text{C}$ . Дотична до лінії ендотермії перетинає вісь температур на  $\sim 58^\circ\text{C}$ , що збігається з довідковим значенням. Ентальпія плавлення  $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  при цьому складає  $\Delta H_L(\text{АН-3}) = 274,4$  Дж/г. Ентальпія плавлення  $\Delta H_L$  досить чутлива до умов експерименту й стану кристалогідрату ацетату натрію. У наших дослідах на різних зразках величина  $\Delta H(\text{АН-3})$  коливалася від  $273,5$  до  $289,0$  Дж/г.

Наступний ендотермічний ефект, показаний на рис. 2.16, відповідає термогравіметричному ефекту втрати кристалізаційної води в інтервалі від  $+100$  до  $+175^\circ\text{C}$  (рис. 2.16). Тепловий ефект випаровування кристалізаційної води склав при цьому  $642,2$  Дж/г.

На цьому ж рисунку видно тепловий ефект плавлення безводного ацетату натрію, який починається при температурі  $324^\circ\text{C}$  і закінчується при температурі  $337^\circ\text{C}$ . Температура  $324^\circ\text{C}$  відповідає довідковому значенню температури плавлення ацетату натрію, а ентальпія плавлення  $\Delta H_L(\text{АН}) = 103$  Дж/г менше від ентальпії плавлення водного ацетату натрію у  $2,66$  разу. Максимальне поглинання теплоти має місце при  $331^\circ\text{C}$  при швидкості нагрівання  $10^\circ\text{C}/\text{хв}$ .

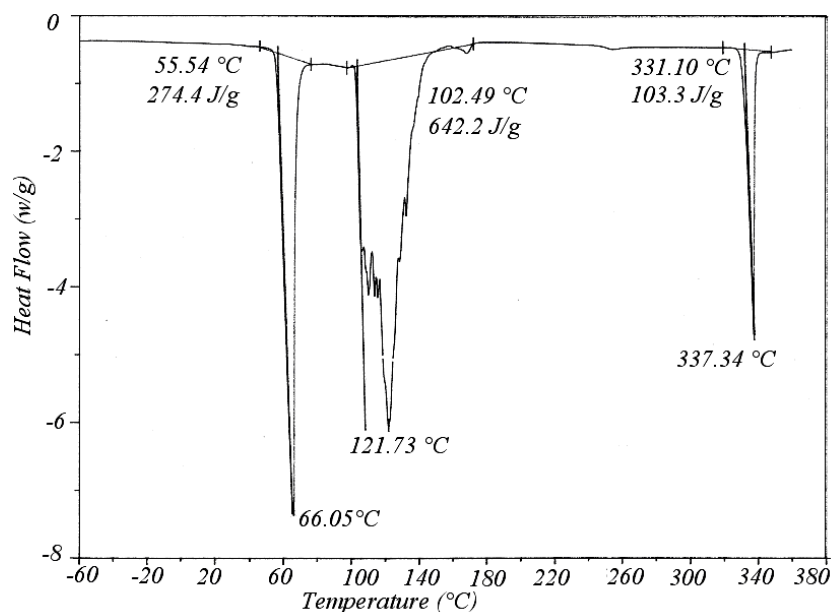


Рис. 2.16. ДСК-грами термічних ефектів при нагріванні  $\text{АН-3} \rightarrow \text{АН}$

### Тіосульфат натрію п'ятиводний ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

На рис. 2.17 наведено графік зміни маси ТСН-5 при його нагріванні від кімнатної температури до  $\sim 900^\circ\text{C}$ . Видно, що втрата маси відбувається в кілька етапів. Очевидно, що втрата маси пов'язана з явищем дегідратації ТСН-5 і випаровуванням кристалізаційної води. У рідкій фазі до  $80^\circ\text{C}$  слабо зв'язані молекули  $\text{H}_2\text{O}$  можуть відриватися з розчину й випаровуватися. Їх відсоток, як видно з рис. 2.17, становить 3,208 % загальної маси кристалогідрату. За діаграмою стану вода – тіосульфат натрію до цих температур, у розчині відбувається деструкція молекул  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  за схемою  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 0,5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .

При вивільненні води й подальшому нагріванні кількість вільних молекул зростає, отже інтенсивніше відбувається їх випаровування. На другому етапі поблизу температури кипіння води відсоток молекул води, що видаляються при випаровуванні, становить 7,629 %. На третьому етапі від  $100$  до  $150^\circ\text{C}$  відбувається найбільш інтенсивна дегідратація розчину з випаровуванням молекул води, про що свідчить 18,39 % води. Найміцніше зв'язані молекули води (6,002 %) залишають розчин повільно в інтервалі температур  $150 \dots 450^\circ\text{C}$ .

Останні молекули води, найімовірніше, «відриваються» при розкладанні молекул тіосульфату в результаті реакції  $4\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{S}_5$ , що відбувається саме при температурі  $440^\circ\text{C}$ . У цілому втрата маси води при дегідратації й випаровуванні склала 35,23 % загальної маси кристалогідрату.

Той факт, що втрата маси кристалогідрату пов'язана саме з втратою води, а не інших фракцій, свідчить стехіометричний розрахунок за формулою

$$m(5\text{H}_2\text{O}) = \frac{m(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) \cdot M(5\text{H}_2\text{O})}{M(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})},$$

де  $m(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) = 24,0830$  мг – маса наважки кристалогідрату;

$M(5\text{H}_2\text{O}) = 90$  г/моль – молярна маса кристалізаційної води;

$M(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) = 254$  г/моль – молярна маса кристалогідрату ТСН-5.

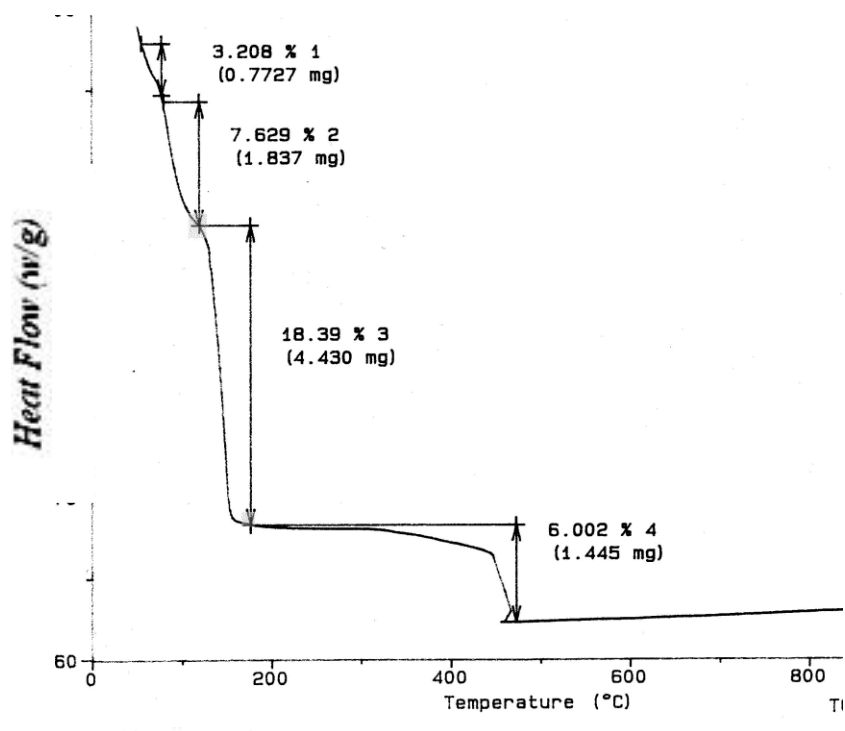


Рис. 2.17. Графік зміни маси ТСН-5 при його нагріванні від кімнатної температури до  $\sim 900^\circ\text{C}$

Розрахунок за наведеною формулою показав, що  $m(5\text{H}_2\text{O})$  загальної маси навішення (24,0830 г) склав 8,4847 мг або 35,43 %. Як бачимо, розрахункове значення втрати маси відрізняється від експериментального (за методом ТГА) лише на 0,2 %!

На рис. 2.18 наведена ДСК-грама нагрівання кристалогідрату ТСН-5 від кімнатної температури до  $\sim 164^\circ\text{C}$ , з якої випливає, що плавлення ТСН-5 починається при температурі  $44^\circ\text{C}$  і закінчується при  $55^\circ\text{C}$ , а перетинання дотичної з віссю температури дозволяє визначити температуру плавлення  $T_L = 48^\circ\text{C}$ , що збігається з довідковим значенням. Ентальпія плавлення в наших умовах виявилася 204,8 Дж/г, що найбільш близько до даних робіт [6, 10, 69]. Далі на тому самому рисунку (праворуч) наведено температури найбільшої дегідратації розчину й установлений тепловий ефект даного явища 533 Дж/г.

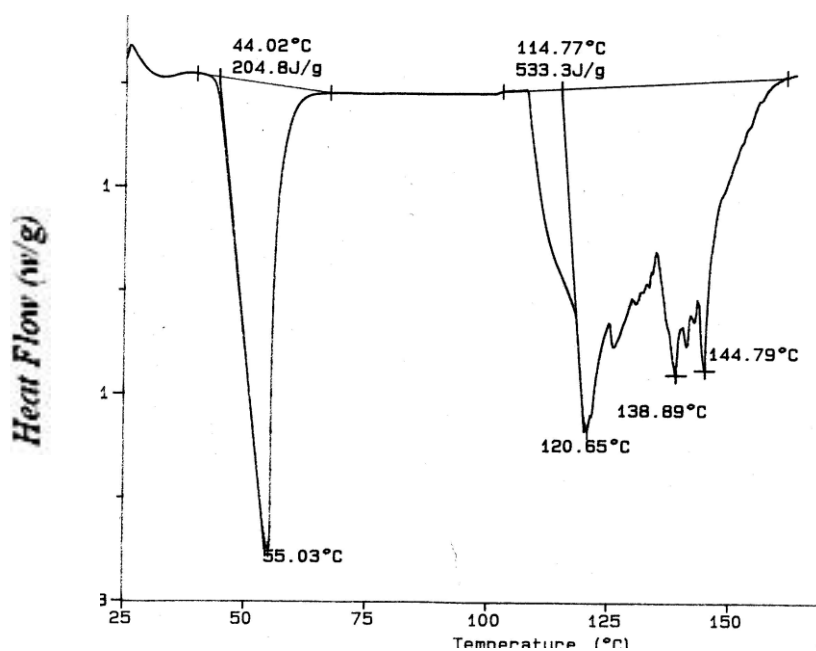


Рис. 2.18. ДСК-виміри ентальпії плавлення ТСН-5 у власній кристалізаційній воді

### Сульфат натрію десятиводний (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10H<sub>2</sub>O)

На рис. 2.19 наведено графік втрати маси при нагріванні СН-10 від температури плавлення  $T_L$  до  $\sim 425$  °С, отриманий нами методом ТГА. З нього випливає, що випаровування води відбувається в інтервалі температур  $T_L = 30 \sim 140$  °С з втратою маси води  $m = 9,303$  г від загальної маси навішення кристалогідрату  $m(\text{СС} - 10) = 18,576$  мг, що становить  $\sim 50,08\%$   $m(\text{СН} - 10)$ . Стехіометричний розрахунок за молярними масами кристалізаційної води  $M(10\text{H}_2\text{O})$  й кристалогідрату  $M(\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O})$  дає значення  $\frac{M(10\text{H}_2\text{O})}{M(\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O})} \cdot 100\% = 55,93\%$ , що лише на 5,85% відрізняється від експериментально знайденого (50,08%). Близькість цих величин указує на те, що в процесі нагрівання відбулася майже повна (94,15%) дегідратація СН-10.

Порівнюючи ТГА-криві для АН-3, ТСН-5 і СН-10 (рис. 2.15, 2.17 і 2.19 відповідно), бачимо, що для СН-10 дегідратація відбувається монотонно в інтервалі від 30 до 140 °С, тоді як для АН-3 і ТСН-5 – дискретно з різними швидкостями в кожному

інтервалі температур. Такий хід кривої ТГА для СН-10 узгодиться з діаграмою вода – сіль СН, відповідно до якої в інтервалі від 30 до 100 °С з СН-10 ніяких інших перетворень не відбувається.

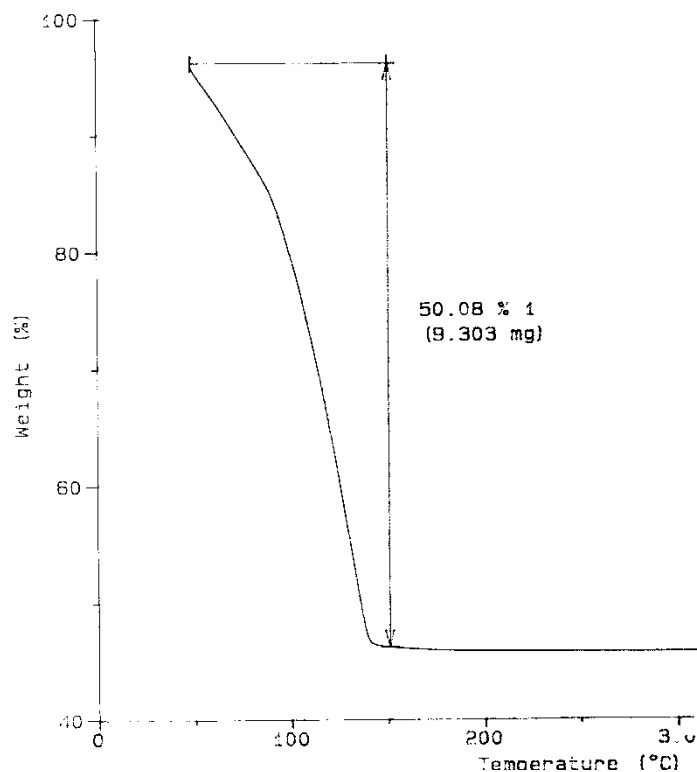


Рис. 2.19. Графік втрати маси при нагріванні СН-10 від температури плавлення  $T_L$  до  $\approx 425$  °С, отриманий методом ТГА

На рис. 2.20 показана ДСК-грама нагрівання СН-10 в інтервалі температур від  $-40$  до  $+110$  °С. З нього випливає, що плавлення СН-10 починається при  $29,96$  °С, а закінчується при  $40,34$  °С. Дотична до ендокривої перетинає вісь температур при  $T_L = 32,4$  °С, що відповідає до довідковому показнику  $32,4$  °С. Ентальпія плавлення  $\Delta H_L$  СН-10 у наших досвідах склала  $191,4$  Дж/г. У правій частині ДСК-грами наведено температури найбільш інтенсивних термо ефектів дегідратації й випаровування кристалізаційної води з розчину, максимальна інтенсивність якої припадає на температуру кипіння дистильованої води ( $100$  °С).

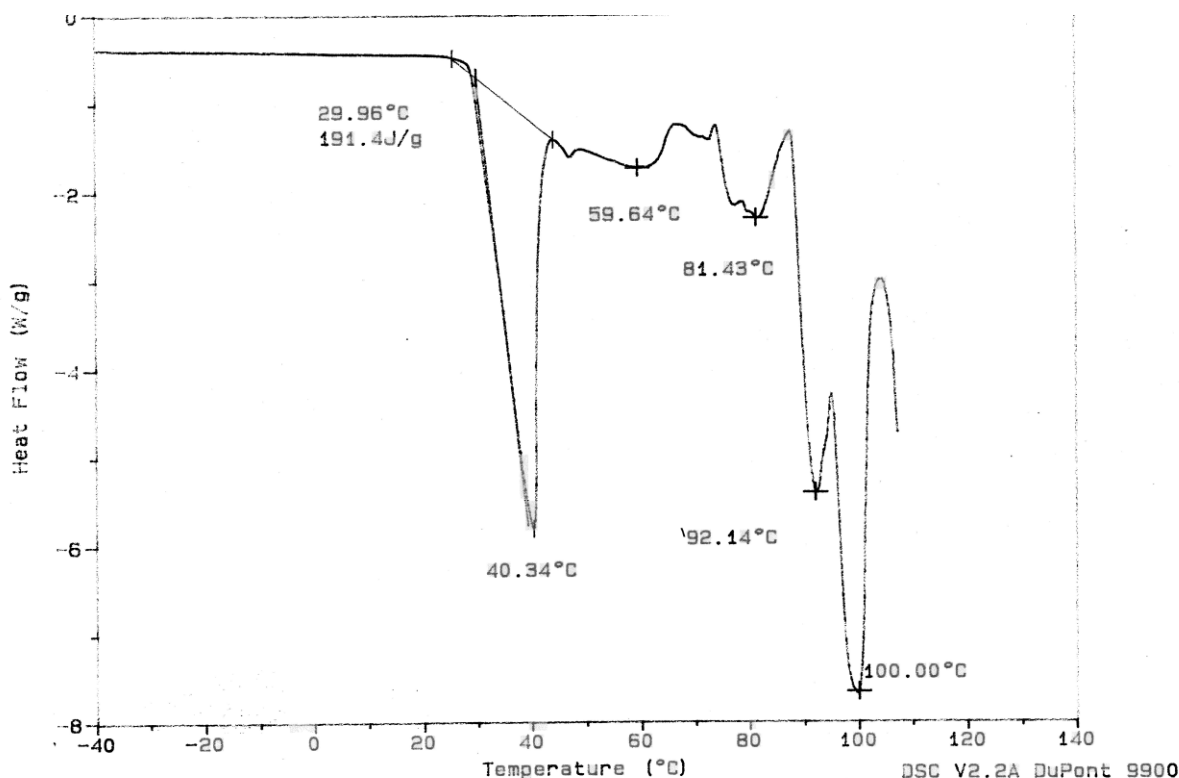


Рис. 2.20. ДСК-грама нагрівання СН-10 в інтервалі температур від  $-40$  до  $+110$  °С

Таким чином, методами ТГА й ДСК уточнено основні термічні характеристики триводного ацетату натрію, п'ятиводного тіосульфату натрію й десятиводного сульфату натрію: температурні інтервали стійких гідратів та ентальпії плавлення й дегідратації.

## 2.8. Побудова рівноважних і нерівноважних діаграм стану

**2.8.1. Системи кристалогідратів солей натрію.** Досить важливими завданнями в процесі пошуку й розроблення ТАМ є дослідження кінетичних і термодинамічних закономірностей кристалізації та плавлення у дво- і більше компонентних системах. Дані дослідження узагальнюються та систематизуються компактним образом у вигляді діаграм стану в координатах температура  $T$  – склад  $S$ . У випадку розчинів стан системи можливо змінювати ще і шляхом варіювання складу, що



значно збагачує можливості у виборі ТАМ. Діаграма стану дозволяє позначити параметри суміші, що найбільш прийнятні за тепловими властивостями до вимог, пропонованих до ТАМ: склад, температура плавлення, ступінь переохолодження, ентальпія плавлення й кристалізації, а також їх стійкість до чисельного термоциклювання. Це стосується не тільки відомих діаграм стану. У літературі найчастіше відсутні діаграми стану сумішей кристалогідратів, що використовуються в теплових акумуляторах у вигляді робочого тіла. Тому для створення надійних ТАМ необхідний науковий підхід до побудови й аналізу рівноважних і нерівноважних діаграм стану, а також до вивчення термодинаміки й кінетики фазових перетворень як індивідуальних речовин, так і їх сумішей. Опираючись на подібні дослідження, розроблено склади сумішей для використання в якості ТАМ, які подано в табл. 2.1. Як приклад, на рис. 2.21, 2.22 наведено діаграми стану кристалогідратів  $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$  -  $Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$  (рис. 2.21),  $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$  -  $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$  (рис. 2.22).

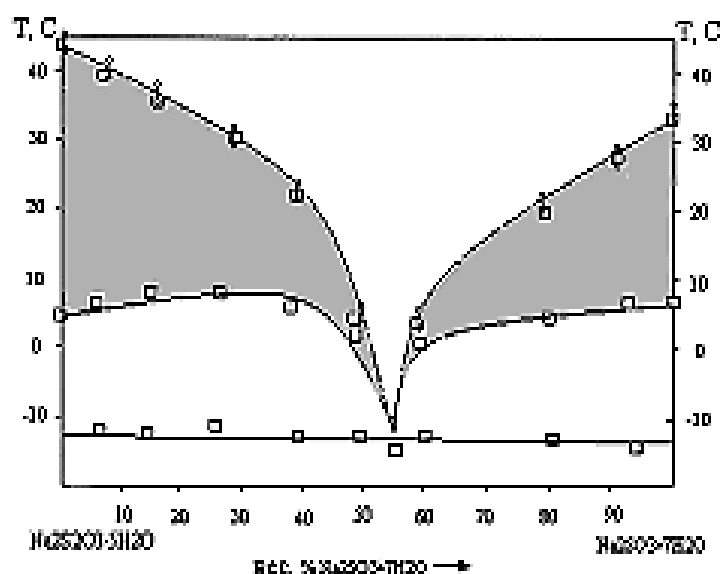


Рис. 2.21. Діаграма стану кристалогідратів  $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$  -  $Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$  з метастабільними областями (затемнені зони)

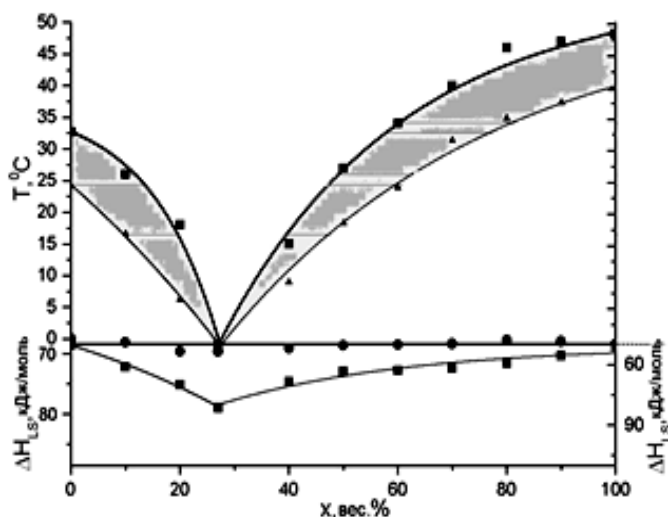


Рис. 2.22. Діаграма стану  $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O - Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$  з метастабільними областями (затемнені зони)

Із затемнених ділянок цих систем (що характеризують метастабільні області) видно, що найбільш прийнятними сполуками є суміші евтектичних складів, у яких величина переохолодження близька до нуля з високими значеннями теплоти фазових перетворень.

### 2.8.2. Системи низькомолекулярних органічних речовин.

Низькомолекулярні органічні речовини (НМОР) і їх суміші (див. табл. 2.1), як і кристалогідрати, багато в чому задовольняють умови, що висувуються до ТАМ. У наш час практично для всіх бінарних і потрійних сумішей НМОР відомі діаграми стану. У багатьох роботах практично відсутні систематичні дослідження впливу концентрації компонентів і термічної передісторії на ступінь переохолодження, ентальпії плавлення сплавів тощо. Із цієї причини нема однозначних відповідей на запитання: чи задовольняють ці сплави вимоги до ТАМ. У цьому зв'язку нами проведено чисельні дослідження бінарних сплавів НМОР з цього приводу.

Як приклад наведено дослідження в системі дифеніл – нафталін для визначення складу, що найбільше задовольняє вимоги, пропоновані до ТАМ. Цей приклад характеризує методологію розроблення ТАМ, тому він описаний докладно.

Досліджено сполуки дифеніл  $(1-x)$  – нафталін ( $x$  – ваг. частки), де  $x = 0,00$  (I);  $0,10$  (II);  $0,20$  (III);  $0,30$  (IV);  $0,40$  (V);  $0,50$  (VI);  $0,60$  (VII);  $0,70$  (VIII);  $0,80$  (IX);  $0,90$  (X);  $1,00$  (XI).

При дослідженні впливу перегріву  $\Delta T^+$  рідких дифенілу й нафталіну відносно  $T_L$  мають місце два різновиди кристалізації при наступному охолодженні. На рис. 2.23 як приклад наведено послідовні термоцикли нагрівання й охолодження дифенілу, що характеризують подібний перехід. Після прогріву розплаву дифенілу до температур нижче  $T_k^+ = 346$  К кристалізація відбувалася без переохолодження за типом КРК. Після прогріву вище  $346$  К ( $\Delta T^+ \geq 3$  К) «перегрітий» розплав при охолодженні нижче температури плавлення кристалізувався за типом НРВК із помітним переохолодженням. Перехід від КРК до НРВК мав місце не тільки при підвищенні верхньої границі прогріву в циклі відносно попереднього циклу. Спостерігався й зворотний перехід від НРВК до КРК при зниженні верхньої границі циклу. Середні значення переохолоджень  $\langle \Delta T^- \rangle$  як для дифенілу, так і для нафталіну виявилися в межах  $10$  градусів. Розкид переохолоджень від циклу до циклу склав  $\pm 1,5$  градуса відносно  $\langle \Delta T^- \rangle$ . Такий самий розкид мав місце й після прогріву рідких дифенілу й нафталіну до  $383$  К.

Слід зазначити, що як для дифенілу, так і для нафталіну і їх сплавів на середні значення переохолоджень не впливали ні подальший перегрів розплаву вище «критичних» температур, ні тривала ізотермічна витримка рідкої фази при цих температурах, ні зміна швидкостей охолодження розплавів у межах від  $0,001$  до  $0,1$  К/с. Ця обставина була врахована при дослідженні сплавів II-X, для яких були обрані інтервали термографування від  $303$  К до температур, що перевищують відповідні температури ліквідусу на  $30$  градусів, тому що в цей інтервал потрапляють евтектична й «ліквідусні» температури, а їх кристалізація відбувалася з відповідними переохолодженнями.

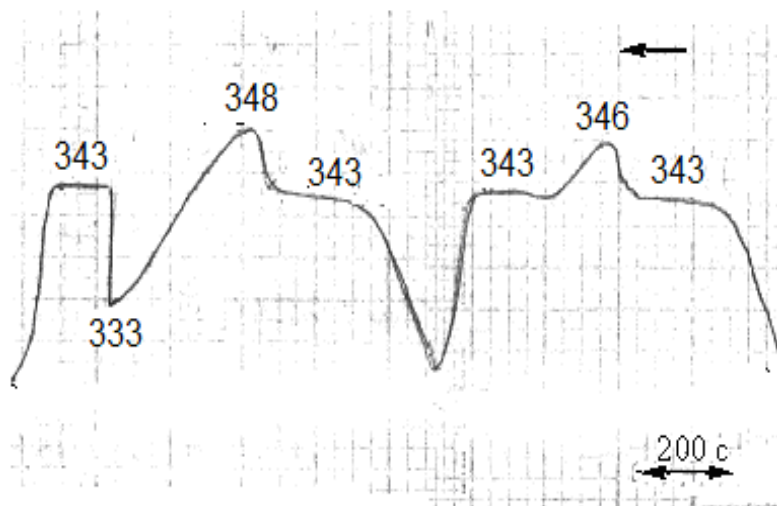


Рис. 2.23. Експериментальні термограми плавлення й кристалізації дифенілу. Запис читати справа наліво

На наступному етапі термографували сплави II-X. На рис. 2.24, б як приклад наведено характерні криві охолодження дифенілу (I), нафталіну (XI) і сплавів – евтектичного (V) і заевтектичного (VIII) складу суміші. Із цих термограм випливає, що температура кристалізації евтектики лежить на 3-4 градуси нижче від температури її плавлення. Крім того, як доевтектичні, так і заевтектичні склади переохолоджуються відносно температури ліквідусу, а кристалізація носить нерівноважний характер.

За температурами ліквідусу по кривих нагрівання сполук I-XI була побудована діаграма стану дифеніл – нафталін (рис. 2.24, а), яка майже збіглася з літературною діаграмою. Застосувавши рівняння Шредера, одержимо рівняння лінії ліквідусу й координати евтектики ( $x_E$ ,  $T_E$ ) у наближенні ідеальних розчинів:

$$T_L = \begin{cases} \frac{\Delta H_D}{\Delta H_D/T_D - (R/M_D)\ln X_D}, & x \leq x_E \\ \frac{\Delta H_H}{\Delta H_H/T_H - (R/M_H)\ln X_H}, & x > x_E \end{cases} \quad x_E = 0,385, T_E = 312,5 \text{ K}, \quad (2.36)$$

де  $X_D$  і  $X_H$  – відносні молярні концентрації;

$M_D$  і  $M_H$  – молярні маси дифенілу й нафталіну відповідно;

$x$  – вагова частка нафталіну.

Розрахунки за формулою (2.36) показали добру відповідність експериментальним даним.

Експериментальні середні переохолодження  $\Delta T^-$  відносно лінії ліквідусу, отримані на зразках I-XI, були нанесені на діаграму стану дифеніл – нафталін. Тим самим для нормальних умов кристалізації вдалося в цій діаграмі виділити метастабільну область і показати, що при збільшенні концентрації одного з компонентів в іншому величина передкристалізаційного переохолодження монотонно зменшується, наближуючись до мінімального значення для сплаву евтектичного складу.

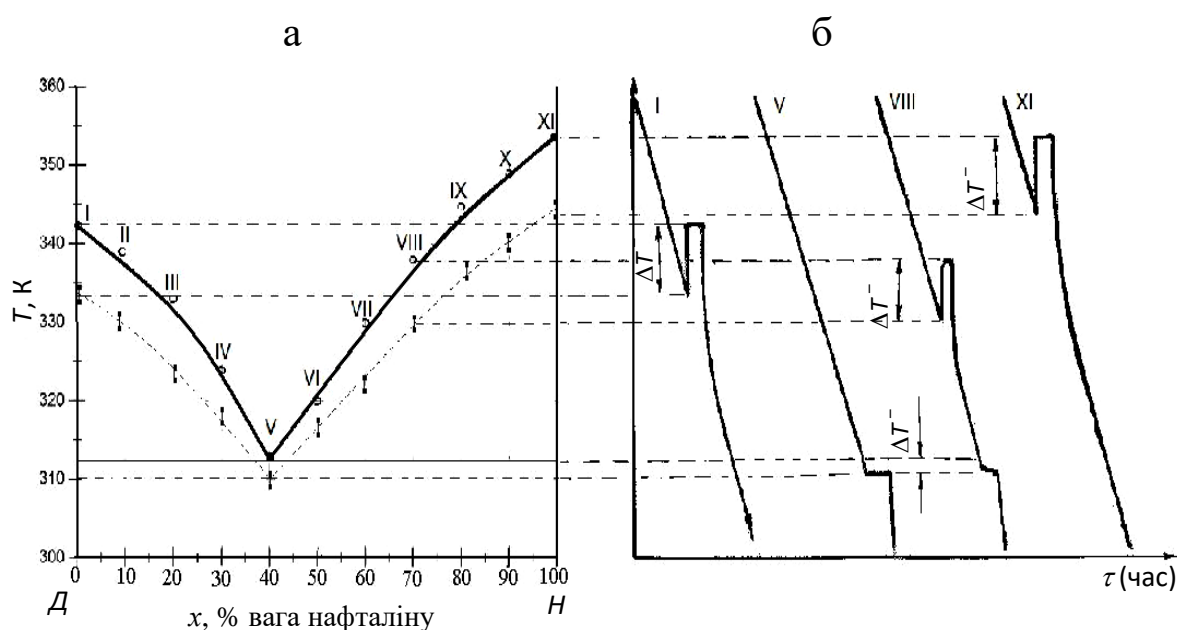


Рис. 2.24. Діаграма стану дифеніл – нафталін (а) (суцільні лінії) з нижніми границями метастабільного стану (пунктирні лінії) і схематичні термограми плавкості (б): для дифенілу (I), нафталіну (XI), евтектичного складу V і заевтектичного складу VIII. Отримані точки ліквідусу позначені кружками, суцільні лінії на діаграмі побудовані за рівнянням (2.36)

Крім методу ЦТА, у роботі [84] використано також метод ДТА, за допомогою якого визначали теплові ефекти плавлення  $\Delta H_{SL}$  й кристалізації  $\Delta H_{LS}$  зразків I-XI.

У результаті проведених досліджень для сплавів у системі дифеніл-нафталін встановлено таке:

1) для зменшення переохолодження до нуля для всіх складів необхідно створювати умову для квазірівноважної кристалізації, тобто не перегрівати розплави;

2) евтектичний склад при будь-якій кристалізації має мінімальне переохолодження відносно інших складів.

На основі проведених досліджень евтектичний склад у цій системі рекомендований для використання як теплоакумлюючий матеріал.

За аналогічною методикою було досліджено численні діаграми стану бінарних вуглеводнів (табл. 2.1) і запропоновано відповідні склади для їх використання як ТАМ. Як приклад на рис. 2.25, 2.26 наведено діаграми стану резорцин – гідрохінон, пірокатехін-гідрохінон.

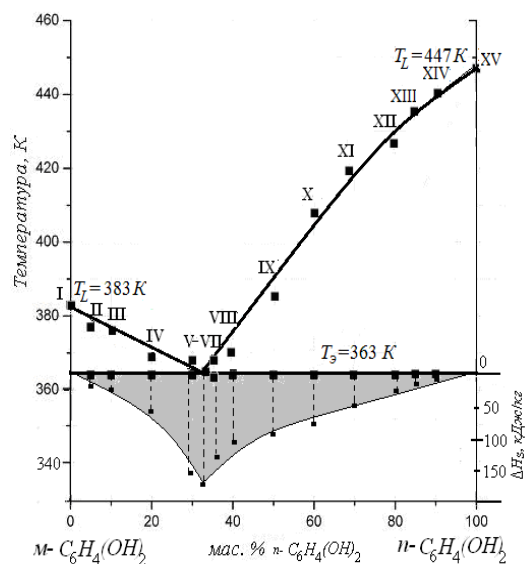


Рис. 2.25. Діаграма стану резорцин – гідрохінон

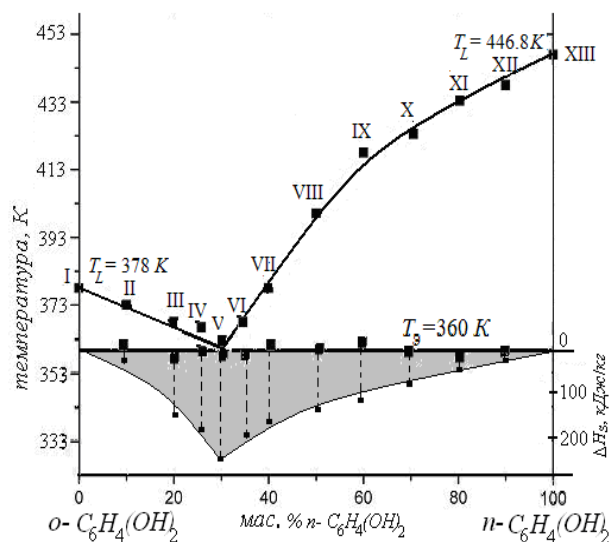


Рис. 2.26. Діаграма стану пірокатехін – гідрохінон

### Контрольні запитання

1. Дайте класифікацію теплоакумлюючих матеріалів.
2. Розкажіть, що ви знаєте про кристалогідрати як одні з основних речовин для створення ТАМ.
3. Перелічіть основні вимоги, що висувуються до ТАМ фазового переходу.

4. Яким є принцип використання теплоти фазового перетворення типу плавлення-кристалізація для теплоаккумуляторів?

5. Перерахуйте основні термодинамічні та кінетичні параметри плавлення і кристалізації ТАМ.

6. Наведіть графіки залежності ізобарно-ізотермічних потенціалів (енергії Гіббса) для твердої і рідкої фаз. За цими графіками вкажіть напрямки фазових перетворень і їхні рушійні сили.

7. Розкажіть, які методи термічного аналізу використовують для визначення параметрів фазових перетворень ТАМ.

8. У чому полягає сутність циклічного термічного аналізу (ЦТА) для вивчення параметрів фазових перетворень ТАМ?

9. Яку інформацію, що характеризує теплові властивості ТАМ, можна отримати з термограм плавкості речовини методами ЦТА і ДТА?

10. Який параметр кристалізації, що визначається за допомогою термічного аналізу, небажаний для ефективного використання ТАМ? Чому?

11. Якими способами можна домогтися зниження ступенів переохолодження ТАМ?

12. Чому склади евтектичного типу представляють інтерес для розроблення ТАМ на основі фазового переходу типу плавлення-кристалізація?

13. Накресліть рівноважну діаграму стану бінарних складів евтектичного типу.

14. Як за допомогою термічного аналізу будують діаграму стану?

15. Порівняйте термограми плавкості для простих речовин і складів.

16. Розшифруйте діаграму стану з евтектикою.

17. Побудуйте нерівноважну діаграму стану складів евтектичного типу. Вкажіть за допомогою цієї діаграми, чому склади евтектичного типу є найбільш прийнятними для їх використання в якості ТАМ.

## РОЗДІЛ 3

# ОСНОВИ ТЕОРІЇ АКУМУЛЮВАННЯ І ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ І ТЕПЛОСИЛОВИХ УСТАНОВОК

### 3.1. Розроблення математичних моделей ТА

Дослідженням, присвяченим тепловому розрахунку теплових акумуляторів фазового переходу, приділяється багато уваги в роботах вітчизняних і закордонних учених. Основою багатьох відомих математичних моделей є задача Стефана, у якій розв'язується розподіл температур у тілі ТА за наявності фазового переходу плавлення-кристалізації і про місце розташування і швидкості руху лінії розділу фаз.

Основою методу вирішення нестационарних завдань теплообміну за наявності фазового переходу є математична модель розрахунків теплоємнісних теплообмінників з однофазним ТАМ. Даний метод апробований Ю.М. Лукашовим, Б.З. Токарем, Е.В. Котенком і М.Е. Шиленковим та іншими у роботах при побудові математичної моделі ТА фазового переходу, яка містить обмежену кількість ефективних характеристик і режимних параметрів, що є функціоналами просторово-часового температурного поля в теплоакумуючому обсязі кожухотрубного ТА фазового переходу. Підходи цього методу було використано при розробленні і формуванні математичних моделей функціонування теплового акумулятора фазового переходу досліджуваної системи прогріву ДВЗ, що описана нижче.

У Донецькому інституті залізничного транспорту УкрДУЗТ на кафедрі «Рухомий склад залізниць» спільно з УкрДУЗТ і ІГ НАНУ (м. Київ) протягом тривалого часу проводились дослідження системи комбінованого прогріву (СКП) при здійсненні передпускового підігріву двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) К461М1 (6ЧН 12/14) і К159М2 (6Ч 12/14). Особливість системи комбінованого прогріву полягає в тому, що вона включає в себе тепловий акумулятор (ТА) фазового переходу і елементи прискореного прогріву для забезпечення



ефективної передпускової теплової підготовки системи охолодження (СОД) ДВЗ і його прискореного прогріву після пуску в умовах низьких температур.

Математичний опис процесів, що відбуваються в ТА фазового переходу, яким обладнано СКП ДВЗ, виконано для визначення конструктивних параметрів ТА, параметрів теплоакumuлюючого матеріалу (ТАМ), можливостей та ефективності ТА у складі системи комбінованого прогріву двигуна. У роботі [83] описано ТА, що конструктивно являє собою резервуар зі встановленими теплообмінниками заряджання та розряджання у вигляді змійовиків. Наповнювачем ТА, який заповнює простір між теплообмінниками заряджання та розряджання, а також стінками резервуара, є теплоакumuлюючий матеріал (ТАМ) - поліетилен високої густини (низького тиску). Математичне моделювання роботи ТА з точки зору його роботи у складі системи комбінованого прогріву ДВЗ полягає в розрахунку потужності ТА фазового переходу, яка б відповідала вимогам надійної експлуатації системи при низьких температурах, мала запас теплової потужності та малий час накопичення теплової енергії для подальшого її використання. Отже головними вихідними параметрами при розрахунку ТА фазового переходу є маса двигуна (його складових елементів), об'єм системи охолодження, максимально низька температура навколишнього середовища, при якій має бути забезпечена працездатність СКП, і час зберігання теплової енергії ТА. Останнє залежить від інтервалів між роботою ДВЗ, що ґрунтується на моніторингу процесу охолодження ДВЗ. Результатами моделювання процесів роботи ТА є значення необхідної потужності ТА для визначеного ДВЗ та умов середовища, відображення процесу накопичення теплової енергії (залежно від режимів роботи ДВЗ), часу заряджання та розряджання ТА, процесу зберігання теплової енергії, характеру зміни температури і тепловіддачі ТАМ у процесах заряджання-розряджання, а також деяких конструктивних параметрів роботи ТА. Принципова схема функціонування теплового акумулятора фазового переходу системи комбінованого прогріву ДВЗ показана на рис. 3.1, а на рис. 3.2 – графічні пояснення до математичного опису процесу плавлення ТАМ в ТА.

Для врахування особливості застосування ТА ДВЗ в математичну модель закладено умови, основні припущення і модельні уявлення, необхідні для побудови математичної моделі функціонування ДВЗ з ТА прийнятої конструкції, при яких відбувається його вмикання, робота і вимикання.

Серед них такі:

- ТА, встановлений на ДВЗ, працює однаково, при будь-яких температурах, визначених у дослідженні;

- у СОД відсутні витоки ОР, крім того, ОР не містить у собі не розчиненого в ній повітря;

- робота ТА при різних температурах навколишнього середовища відбувається однаково при сталих власних параметрах;

- тепловий стан ДВЗ оцінюється за змінною в часі температурою його деталей, дотичних з ОР;

- у процесах заряджання і розряджання ТА теплові втрати в навколишнє середовище від з'єднуючих трубопроводів незначні, тому температура охолоджуючої рідини на вході в ТА дорівнює її температурі на виході з ДВЗ, а температура охолоджуючої рідини на виході з ТА дорівнює її температурі на вході в ДВЗ. Теплові втрати в навколишнє середовище ТА в процесі його розряджання, а також теплові втрати на нагрів сусідніх з двигуном агрегатів не враховуються;

- оскільки всі елементи теплообмінника ТА, розташовані у вигляді послідовно-паралельних циліндричних поверхонь, мають у радіальному напрямку той самий розмір (товщину), а коефіцієнти тепловіддачі в усіх елементах (контурах) теплообмінника однакові, то процес фазового перетворення ТАМ у всіх контурах ТА буде відбуватися практично синхронно. Це означає, що поле температур усередині ТАМ, температура стінок контурів і густина теплового потоку в кожний момент  $\tau$  часу передбачаються однаковими для всіх капсул;

- у початковий момент часу ( $\tau = 0$ ) у період заряджання ТА ТАМ знаходиться у твердому стані, а в період розряджання - у рідкому, при цьому його температура вирівняна за обсягом ТА і дорівнює температурі  $T$ ;

- у зворотних процесах фазового переходу ТАМ плавлення-кристалізація-плавлення межі фаз сформовані, температурне поле ТАМ у зростаючій фазі лінійно, а температура зникаючої фази дорівнює температурі фазового переходу;

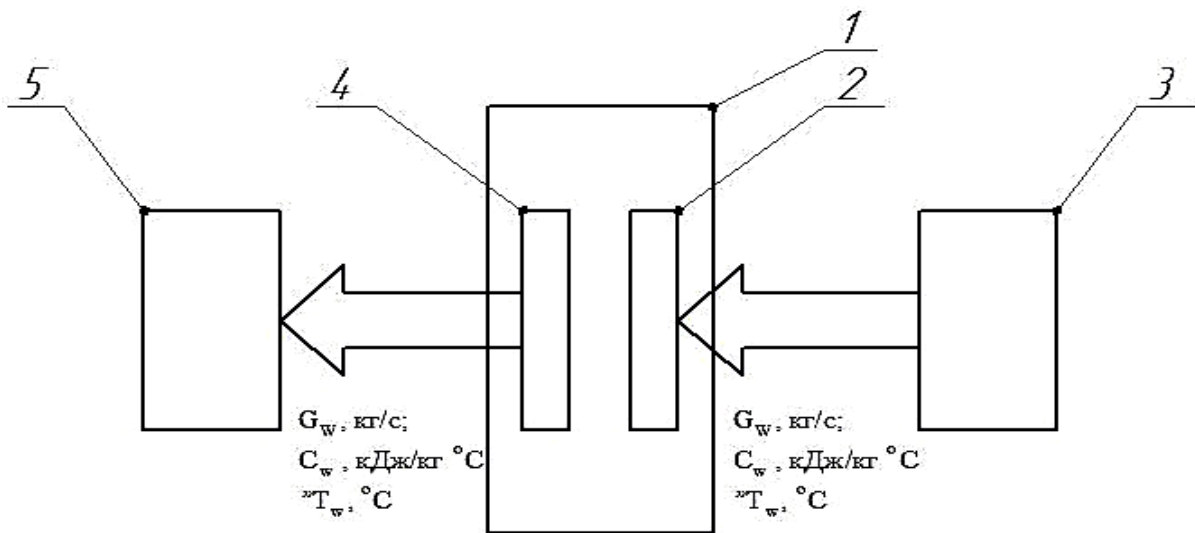


Рис. 3.1. Принципова схема функціонування теплового акумулятора фазового переходу системи комбінованого прогріву ДВЗ: 1 – тепловий акумулятор; 2 – теплообмінник заряджання ТА; 3 – джерело теплової енергії (теплообмінник у системі випуску відпрацьованих газів ДВЗ); 4 – теплообмінник розряджання ТА; 5 – об’єкт, до якого відводиться тепла енергія, що акумульована в ТА, - система охолодження ДВЗ

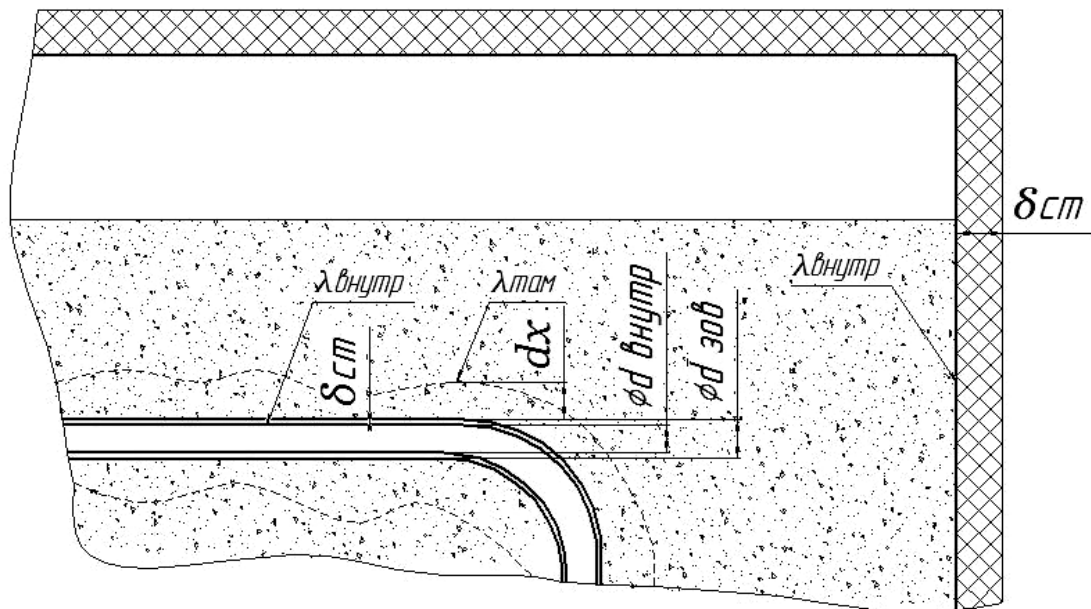


Рис. 3.2. Схема процесу плавлення ТАМ в ТА

- теплопровідність ТАМ в поздовжньому напрямку ТА відсутня;
- процес фазового перетворення ТАМ приймається одномірним. При цьому межі розділу фаз незмінні за формою і в кожний момент часу являють собою циліндричні поверхні, розташовані концентрично відносно стінок теплообмінників;
- коефіцієнти перенесення (тепловіддачі, теплопередачі, теплопровідності) і питомі теплоємності постійні і не залежать від температури, а коефіцієнти тепловіддачі ОР в різних контурах теплообмінника рівні між собою;
- кожний контур теплообмінника ТА можна розглядати у вигляді так званої тонкої стінки, товщина якої мала порівняно з діаметром. У цьому випадку допускається процес теплообміну розраховувати відносно плоскої стінки;
- термічний опір стінки теплообмінника ТА не враховується.

### **3.2. Модель роботи ТА фазового переходу ДВЗ у режимі заряджання**

Процес заряджання ТА полягає в передачі теплової енергії теплоносія, який циркулює в теплообміннику заряджання ТА. Під впливом отриманої теплової енергії, збільшується температура ТАМ і при досягненні температури фазового переходу в матеріалі відбувається його плавлення. Отримана тепла енергія в даному випадку йде на подальше плавлення речовини акумулятора в квазіізотермічному режимі. Після повного розплавлення ТАМ відбувається подальше накопичення теплової енергії, але вже за рахунок явища фізичного накопичення (тобто підвищення температури ТАМ без подальших змін агрегатного стану).

Теплова енергія, яку отримує ТА від утилізаційного теплообмінника:

$$Q_{ТА} = \eta_{ТА} \cdot Q_{ТО}, \quad (3.1)$$

де  $Q_{TO}$  – теплота, що отримується від ВГ утилізаційним теплообмінником, Дж;

$\eta_{TA}$  – коефіцієнт втрат теплової енергії на шляху від утилізаційного теплообмінника до ТА.

Процес передачі теплової енергії, отриманої ТА, до ТАМ являє собою процес теплопередачі від одного середовища до іншого через теплообмінник і зводиться до розрахунку коефіцієнта теплопередачі  $K_{TA}$ . З іншого боку, тепловий потік, який отримує ТАМ від утилізаційного теплообмінника, може бути описано рівнянням

$$q_{TA} = K_{TA} \cdot \Delta T_{TA} \cdot F_{TA}, \quad (3.2)$$

де  $\Delta T_{TA}$  - середній температурний напір (перепад) у ТА, К;

$F_{TA}$  - площа теплообміну в ТА, м<sup>2</sup>.

Середній температурний напір  $\Delta T_{TA}$  в ТА розраховується за такою залежністю, К:

$$\Delta T_{TA} = \frac{(T_{ж1} - T_{ТАМ2}) - (T_{ТАМ1} - T_{ж2})}{\ln \frac{(T_{ж1} - T_{ТАМ2})}{(T_{ТАМ1} - T_{ж2})}}, \quad (3.3)$$

де  $T_{ТАМ1}, T_{ТАМ2}$  – кінцева та початкова температури ТАМ;

$T_{W1}, T_{W2}$  – початкова та кінцева температури рідини.

Коефіцієнт теплопередачі  $K_{TA}$  отримуємо з такої залежності, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K_{TA} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{TA}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_W}}, \quad (3.4)$$

де  $\alpha_{TA}$  - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до ТАМ, Вт / (м<sup>2</sup> · К);

$\alpha_W$  - коефіцієнт тепловіддачі від рідини до стінки, Вт / (м<sup>2</sup> · К);

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу трубок, Вт / (м<sup>2</sup> · К);

$\delta$  – товщина стінок, м.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до ТАМ, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_{\text{ТА}} = \frac{2\lambda_{\text{ТАМ}}}{d_{\text{нар}} \ln \frac{dx}{d_{\text{нар}}}}, \quad (3.5)$$

де  $\lambda_{\text{ТАМ}}$  - коефіцієнт теплопровідності ТАМ, Вт / (м<sup>2</sup> · К);  
 $d_{\text{нар}}$  – зовнішній діаметр трубки теплообмінника, м;  
 $dx$  – зона фазового переходу, м.

Коефіцієнт тепловіддачі від рідини до стінки, Вт/(м<sup>2</sup>·к):

$$\alpha_{\text{Ж}} = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{d_{\text{в}}}, \quad (3.6)$$

де  $\lambda_w$  – кінематична в'язкість рідини, Вт · с<sup>2</sup> / кг;  
 $Nu_w$  – число Нусельта;  
 $d_{\text{в}}$  – внутрішній діаметр трубки теплообмінника, м.

Число Нусельта

$$Nu_w = \begin{cases} 3,66, & Re_w \leq 2300, \\ (-6,55 + 0,0046 \cdot Re_w) \cdot Pr_w^{0,4}, & 2300 < Re_w \leq 5000, \\ (-3 + 0,0039 \cdot Re_w) \cdot Pr_w^{0,4}, & 5000 < Re_w \leq 10000, \\ 0,023 \cdot Re_w^{0,8} \cdot Pr_w^{0,4}, & 10000 < Re_w, \end{cases} \quad (3.7)$$

де  $Re_w$  - число Рейнольдса для рідкого теплоносія,

$$Re_w = \frac{V_w d_{\text{в}}}{\nu_w}, \quad (3.8)$$

де  $V_w$  – швидкість циркуляції рідини, м/с;  
 $Pr_w$  - число Прандтля для рідкого теплоносія,

$$Pr_w = \frac{\rho_w v_w c_w}{\lambda_w} = \frac{\mu_w c_w}{\lambda_w}, \quad (3.9)$$

де  $\rho_w$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$c_w$  – теплоємність рідини, кДж/кг · К;

$\lambda_w$  – теплопровідність рідини, Вт / (м<sup>2</sup> · К);

$\mu_w$  – динамічна в'язкість рідини, Па · с;

Середній температурний напір  $\Delta T$  в тепловому акумуляторі визначався з залежності, К,

$$\Delta T = \frac{\Delta T_B - \Delta T_M}{\ln \frac{\Delta T_B}{\Delta T_M}}, \quad (3.10)$$

де  $\Delta T_B$  – більша різниця температур ТАМ і рідини;

$\Delta T_M$  – менша різниця температур ТАМ і рідини.

Тепловий потік, який проходить крізь ТА при заряджанні визначається з залежності, Вт,

$$q_{TA} = K_{TA} \cdot F \cdot \Delta T, \quad (3.11)$$

де  $F$  – площа теплообмінника заряджання.

Теплова енергія, необхідна для заряджання ТА, складається з теплової енергії явища - фізичного нагріву ТАМ і теплової енергії – фазового переходу, Дж:

$$Q_{TA} = m_{TA} \cdot c_{TA} \cdot \Delta T + m_{TA} \cdot L, \quad (3.12)$$

де  $m_{TA}$  – вага ТАМ, кг;

$c_{TA}$  – теплоємність ТАМ, Дж/кг · К;

$L$  – питома теплова енергія фазового переходу ТАМ, Дж/кг.

Час заряджання ТА можна визначити від витрати теплоносія, який заряджає ТА, с:

$$\tau_{\text{зар}} = \frac{m_{\text{ТА}} \cdot c_{\text{ТА}} \cdot \Delta T + m_{\text{ТА}} \cdot L}{G_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot \Delta T_{\text{W}}}, \quad (3.13)$$

де  $G_{\text{W}}$ - витрата рідкого теплоносія, кг/с;

$c_{\text{W}}$  – теплоємність рідкого теплоносія, Дж/(кг · К);

$\Delta T_{\text{W}}$  – різниця температур рідкого теплоносія на вході і виході з ТА, К.

### 3.3. Модель роботи ТА фазового переходу ДВЗ у режимі зберігання теплової енергії

Процес зберігання теплової енергії в ТА полягає в тому, щоб він якомога більший час зберігав накопичену в ньому теплову енергію та був готовий для використання у складі СКП ДВЗ. Зберігання теплової енергії в ТА відбувається за допомогою максимальної ізоляції ТАМ від навколишнього середовища, а в деяких випадках – вакуумної ізоляції ТА. Але в будь-якому випадку втрати теплової енергії ТА мають місце. Визначити їх можна зробивши для простоти розрахунків деякі припущення: теплообмін між ТАМ і капсулою, у якій він зберігається, однаковий по всій поверхні; те саме спостерігається з зовнішньою ізоляцією та навколишнім середовищем; втрати через з'єднання є неістотними. Враховуючи це стає можливим розрахувати коефіцієнт теплопередачі ТАМ навколишньому середовищу, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K_{\text{ТАМ}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{ТАМ}}} + \sum_{i=0}^n \frac{\delta i}{\lambda i} + \frac{1}{\alpha_{\text{СТ}}}}, \quad (3.14)$$

де  $\alpha_{\text{ТАМ}}$  – коефіцієнт тепловіддачі від ТАМ до стінки, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\delta i$  – товщина  $i$ -го шару теплоізоляції ТА, м;

$\lambda i$  – коефіцієнт теплопровідності  $i$ -го шару теплоізоляції ТА, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\alpha_{\text{СТ}}$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до навколишнього середовища, Вт/(м<sup>2</sup> · К).



Теплота, яку буде втрачати ТА в одиницю часу, складатиме, Вт,

$$q_{BT}(t) = K_{ТАМ} \cdot F_{ПОВ} \cdot (T(t) - T_{Поч}), \quad (3.15)$$

де  $F_{ПОВ}$  – площа поверхні ТА, м<sup>2</sup>;

$T_{Поч}$  – початкова температура ТАМ, К;

$T(t)$  – температура ТАМ через відрізок часу  $t$  з початку зберігання теплової енергії, К,

$$T(t) = T_0 + (T_{Поч} - T_0) \cdot \exp\left[-\frac{K_{ТАМ} \cdot F_{ПОВ}}{c_{ТА}} \cdot t\right], \quad (3.16)$$

де  $T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C} = 273 \text{ К}$ .

Виходячи з вищевикладеного час, за який температура ТАМ в ТА знизиться до якогось заданого значення, становить, с,

$$\tau = \frac{6c_{ТА}}{K_{ТАМ} \cdot F_{ПОВ}} \ln \frac{T_{Поч} - T_0}{T_{кін} - T_0}, \quad (3.17)$$

де  $T_{кін}$  – задане кінцеве значення температури ТАМ, К.

### 3.4. Модель роботи ТА фазового переходу СКП ДВЗ у режимі розряджання

Розрахунок ТА в режимі розряджання є зворотною задачею розрахунку заряджання ТА. Процес передачі теплової енергії накопиченого ТАМ до ОР також являє собою процес теплопередачі від одного середовища до іншого через теплообмінник і також зводиться до розрахунку коефіцієнта теплопередачі  $K_{ТА}$ . Теплова енергія, яку отримує охолоджуюча рідина від ТА в одиницю часу, може бути описана рівнянням

$$q_{ТА} = K_{ТА} \cdot \Delta T_{ТА} \cdot F_{ТА}; \quad (3.18)$$

де  $\Delta T_{ТА}$  – середній температурний напір, К;

$F_{ТА}$  – площа теплообміну, м<sup>2</sup>.

Середній температурний напір розраховується за такою залежністю:

$$\Delta T_{TA} = \frac{(T_{TAM1} - T_{w1}) - (T_{TAM2} - T_{w2})}{\ln \frac{(T_{TAM1} - T_{w1})}{(T_{TAM2} - T_{w2})}}, \quad (3.19)$$

де  $T_{TAM1}, T_{TAM2}$  – кінцева та початкова температури ТАМ, К;

$T_{w1}, T_{w2}$  – початкова та кінцева температури охолоджуючої рідини, К.

Коефіцієнт теплопередачі  $K_{TA}$  отримуємо з такої залежності, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K_{TA} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{TA}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_w}}, \quad (3.20)$$

де  $\alpha_{TA}$  - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до ТАМ, Вт / (м<sup>2</sup> · К);

$\alpha_w$  - коефіцієнт тепловіддачі від охолоджуючої рідини до стінки, Вт / (м<sup>2</sup> · К);

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу трубок, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\delta$  – товщина стінок, м.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до ТАМ:

$$\alpha_{TA} = \frac{2\lambda_{TAM}}{d_{нар} \ln \frac{dx}{d_{нар}}}, \quad (3.21)$$

де  $\lambda_{TAM}$  - коефіцієнт теплопровідності ТАМ, Вт/(м · К);

$d_{нар}$  – зовнішній діаметр трубки теплообмінника, м;

$dx$  – зона фазового переходу, м.

Коефіцієнт тепловіддачі від рідини до стінки:

$$\alpha_w = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{d_B}, \quad (3.22)$$

де  $\lambda_w$  – кінематична в'язкість рідини,  $\text{Вт} \cdot \text{с}^2 / \text{кг}$ ;

$Nu_w$  – число Нусельта;

$d_B$  – внутрішній діаметр трубки теплообмінника, м.

Середній температурний напір у тепловому акумуляторі визначався з залежності (3.19). Тепловий потік, який проходить крізь ТА при розряджанні, визначається аналогічно до залежності (3.20). Теплова енергія, яку ТА може віддати при розряджанні, також складається з теплової енергії фізичного охолодження ТАМ та теплової енергії фазового переходу і має вигляд, як і в формулі (3.21). Час розряджання ТА можна визначити від витрати теплоносія, який розряджає ТА, аналогічно до залежності (3.22).

За допомогою розроблених математичних моделей функціонування ТА фазового переходу було розраховано його роботу у складі дослідної СКП ДВЗ (на прикладі дизеля К461М1 і газового двигуна К159М2). Результати розрахункового перехідного процесу в ТА фазового переходу представлено на рис. 3.3, а на рис. 3.4 подано отримані контрольні точки фазового переходу ТА.

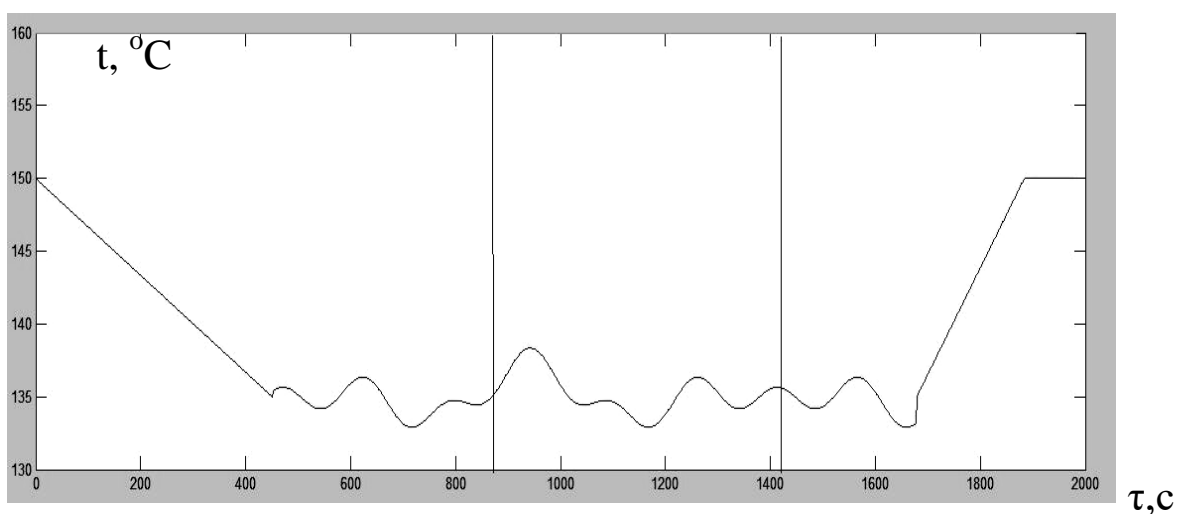


Рис. 3.3. Результати розрахункового перехідного процесу в ТА фазового переходу в процесі повного циклу розряджання – заряджання ТА

З аналізу отриманих результатів добре видно, що в початковий момент часу  $\tau = 0$  речовина ТА нагріта до  $T_0 = 150\text{ }^\circ\text{C}$  і знаходиться в рідкому стані. Далі вмикається система теплообміну, і речовина теплоносія починає відбирати теплову енергію ТАМ і віддає її СОД, яка знаходиться в цей час при температурі  $T_{oc} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ . Як видно з графіка, протягом часу  $\tau_{охол} = 450\text{ с}$  температура ТАМ знижується до  $T = 135\text{ }^\circ\text{C}$  і далі характер графіка охолодження змінюється: відбувається процес кристалізації в квазіізотермічному режимі. Коливання температури ТАМ відбуваються відносно температури  $T_{фп} = 135\text{ }^\circ\text{C}$ .

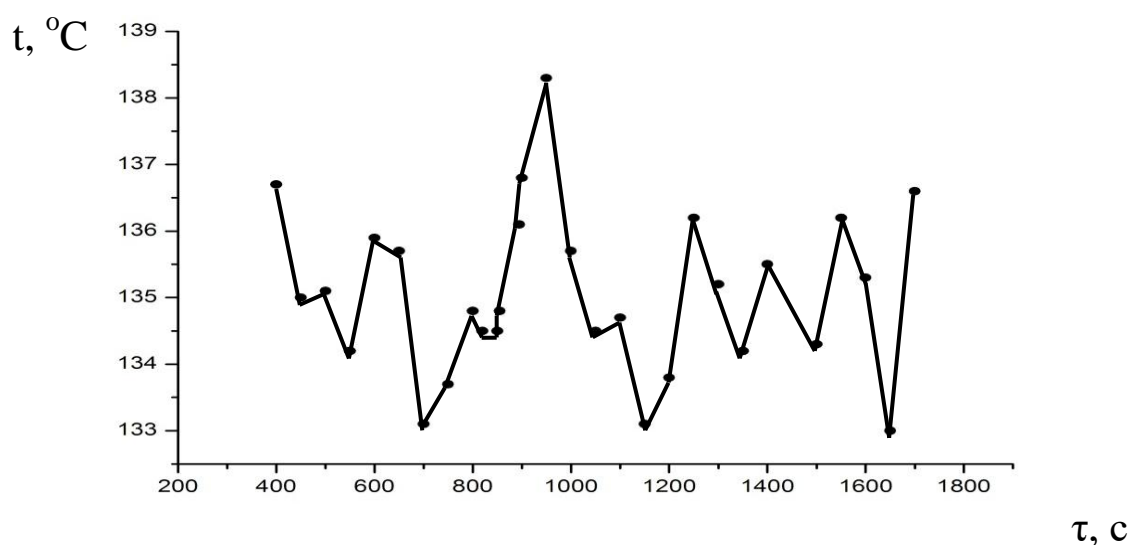


Рис. 3.4. Отримані контрольні точки фазового переходу ТА в процесі повного циклу розрядження – зарядження ТА

Стандартне відхилення температури на дослідній ділянці в процесі повного циклу розрядження – зарядження ТА відносно  $T_{фп}$  складає  $\sigma = 1,2\text{ К}$ , що повністю достатньо для подібних задач. Співставлення розрахункових даних з отриманими результатами експериментальних даних підтверджує достатню адекватність моделей. У даному навчальному посібнику для скорочення об'єму наведено тільки результати розрахункових досліджень для одного варіанта температур. Коливання температури на ділянці фазового переходу в процесі повного циклу розрядження – зарядження ТА пов'язані з неоднорідним температурним полем всередині ТА, а також із випадковим характером процесу утворення центрів кристалізації.

Розроблено математичні моделі функціонування ТА фазового переходу СКП ДВЗ, які з достатньою достовірністю описують процес його роботи, можуть бути легко адаптовані до будь-якої подібної конструкції ТА.

### **3.5. Моделювання параметрів роботи теплонакопичувача керованої передпускової системи мащення двигуна внутрішнього згорання**

При здійсненні пуску й прогріву холодного двигуна штатний масляний насос не забезпечує необхідного тиску в масляній магістралі, з'єднання двигуна працюють у режимі граничного тертя, що призводить до значної інтенсифікації їх зношування, а також не забезпечується ефективний передпусковий прогрів найбільш відповідальних елементів циліндро-поршневої групи (ЦПГ) двигуна.

Особливість СКП, подана в цьому підрозділі, полягає в тому, що до її складу, крім вже описаних раніше теплового акумулятора (ТА) фазового переходу і елементів прискореного прогріву для забезпечення ефективної передпускової теплової підготовки системи охолодження (СОД) ДВЗ і його прискореного прогріву після пуску в умовах низьких температур, включено додатково тепловий акумулятор, теплонакопичувач й елементи керування передпусковою системою мащення (ПСМД) ДВЗ. ТА дозволяють накопичувати теплову енергію відпрацьованих газів (ВГ). Кількість теплової енергії, яку накопичує ТА, відповідає необхідній кількості теплової енергії, яка потрібна для попереднього прогріву двигуна від максимально низької температури навколишнього середовища (задається при проектуванні системи) до температури «гарячого» пуску ДВЗ. Елементи прискореного прогріву СОД включають електроклапани і рідинний насос, який дозволяє модулювати циркуляцію охолоджуючої рідини (ОР) залежно від її температури, для забезпечення ефективного прогріву ДВЗ. Елементи керованої передпускової системи мащення двигуна (КПСМД) включають електроклапани, реле, датчики температури і тиску і рідинний насос, який дозволяє модулювати

циркуляцію оливи ПСМД залежно від її температури і для забезпечення ефективного прогріву ДВЗ. Ці функції КПСМД виконує спільно з теплонакопичувачем, у який зливається прогріта олива двигуна в період його зберігання.

Умови роботи двигунів у період пуску-прогріву значно відрізняються від умов роботи на номінальних навантажувальних і швидкісних режимах і впливають на довговічність і безвідмовність основних деталей. Особливо це актуально при експлуатації двигуна в умовах низьких температур, коли відбувається значне збільшення в'язкості оливи, зниження ефективності роботи масляного насоса й фільтруючих елементів. У таких умовах час подачі мастильного матеріалу до вузлів тертя зростає в кілька разів.

Вивченню закономірностей передпускового прогріву оливи і зношування рухомих деталей двигуна в умовах низькотемпературних пусків присвячено роботи багатьох вчених: Р.І. Альмеєва, М.А. Григор'єва, А.А. Гурєєва, Д.П. Великанова, Д.І. Висоцького, Л.А. Дем'янова, О.С. Денисова, В.А. Долецького, О.В. Дибова, М. Калиновського, В.В. Карницького, Ю.М. Копилова, Р.В. Кугеля, Г.С. Лосавіо, Д.М. Левіна, Ю.В. Микуліна, В.Я. Моїсеєва, Р. Нейдля, А.І. Нисневича, А.Н. Покровського, Н.Н. Пономарьова, С.Ф. Рубінштейна, Г.В. Рутенбурга, Е.Г. Семенидо, Н.В. Семенова, М.С. Смирнова, Л.А. Сорокіна, Г.І. Суранова, А.І. Туркевича, Е.А. Чудакова, Б.А. Енгліна тощо.

Питання підвищення показників теплового стану і довговічності двигунів шляхом забезпечення оптимальних параметрів змащування в підшипниках колінчастого вала на режимі пуску у складі систем комбінованого прогріву з тепловими акумуляторами в літературних джерелах представлені не достатньо і тому потребують поглибленого розгляду.

Для забезпечення ефективної передпускової теплової підготовки системи мащення ДВЗ в умовах низьких температур розроблено ПСМД, яка включає в себе тепловий акумулятор, теплонакопичувач і елементи керування. Для урахування особливостей математичного моделювання параметрів роботи одного з елементів системи - теплонакопичувача керованої ПСМД у складі СКП - розглянемо опис процесу теплообміну

рідини в теплоізолюваному теплонакопичувачі з навколишнім середовищем. На рис. 3.5 подана схема теплообміну робочої рідини – оливи - з системи мащення в теплонакопичувачі (ТН) довільної форми. Такий варіант прийнято для того, щоб урахувати можливість виготовлення різних варіантів форм ТН в умовах експлуатації ДВЗ транспортних засобів і енергетичних установок.

Встановлюємо основні припущення, які спрощують вирішення поставленого завдання:

а) питома теплоємність робочої рідини в ТН дуже мало залежить від її температури;

б) теплообмін через теплоізолювану стінку подібний до перенесення теплоти через плоску стінку, тобто не враховуємо циліндричність ТН;

в) нехтуємо нерівномірністю температур робочої рідини (оливи) за її об'ємом.

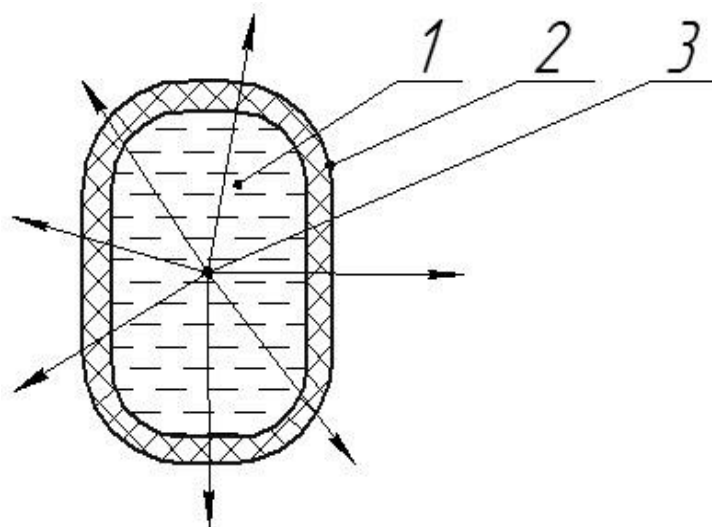


Рис. 3.5. Схема теплообміну робочої рідини в посудині довільної форми: 1 – рідина в ємності; 2 – шар теплоізоляції; 3 – напрямок потоку

Вибираємо основні фізичні величини, що використовуються в процесі розрахунків і їх розмірності:

$G$  - маса робочої рідини (оливи), кг;

$c$  - питома теплоємність робочої рідини, Дж/ (кг · К);

$F$  - зовнішня поверхня теплонакопичувача (ТН), м<sup>2</sup>;

$\delta$  - товщина шару теплоізоляції, мм;

$\lambda$ - коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\alpha_{вн}$  - коефіцієнт тепловіддачі від робочої рідини в теплонакопичувачі до стінки ТН, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\alpha_{нар}$  - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні в навколишнє середовище, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$t_p$  - поточне значення температури робочої рідини в ТН, °С;

$t_{p0}$  - початкове значення температури робочої рідини в ТН, °С;

$t_0$  - температура навколишнього середовища, °С;

$\tau$  - поточний час, с;

$k$  - коефіцієнт теплопередачі від робочої рідини в ТН в навколишнє середовище, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$Q$  - кількість теплоти, переданої від рідини в ТН в навколишнє середовище за деякий інтервал часу  $\tau$ , Дж.

З урахуванням роботи СКП двигуна транспортних засобів і енергетичних установок, яка полягає в накопиченні теплової енергії в ТН тільки шляхом зливу з картера ДВЗ оливи масляної системи в процесі довготривалої стоянки транспортних засобів і енергетичних установок, кількість теплоти, що передається від робочої рідини в ТН у навколишнє середовище через стінку ТН за час  $dt$ , виражається співвідношенням

$$dQ_1 = kF(t_p - t_0)dt. \quad (3.23)$$

За цей час робоча рідина втратить теплоту в кількості

$$dQ_2 = Gcdt_{ж}. \quad (3.24)$$

У зв'язку з тим, що нема інших джерел надходження теплоти, крім вже визначених, ліві частини рівнянь (3.22) і (3.24) повинні дорівнювати одна одній за абсолютною величиною. Оскільки при додатному значенні  $(t_p - t_0)$  у процесі теплообміну буде відбуватися охолодження рідини в ТН, то зміна температури  $dt_p$  буде величиною від'ємною. Для прирівнювання правих



частин рівнянь (3.22) і (3.24) перед однією зі складових рівнянь необхідно поставити знак «-», тобто

$$kF(t_p - t_0)d\tau = -Gc dt_p. \quad (3.25)$$

Рівняння (3.25) є диференціальним рівнянням зі змінними, що розділяються. Це рівняння подамо як

$$k \frac{dt_p}{(t_{ж} - t_0)} = - \frac{kF}{Gc} d\tau. \quad (3.26)$$

Розв'язання диференціального рівняння (3.26) дозволяє одержати залежність зміни температури робочої рідини в ТН  $t_p$  від часу в процесі теплообміну  $\tau$ :

$$t_p = t_0 + (t_{p0} - t_0) \exp\left(-\frac{kF}{Gc} \tau\right). \quad (3.27)$$

З рівняння (3.27) можна одержати залежність тривалості процесу теплообміну  $\tau$ , за яку температура робочої рідини в посудині знизиться до заданого рівня  $t_p$ :

$$\tau = \frac{Gc}{kF} [\ln(t_{ж0} - t_0) - \ln(t_{ж} - t_0)]. \quad (3.28)$$

У формулах (3.27) і (3.28) коефіцієнт теплопередачі  $k$  визначається з виразу

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{1}{\alpha_{нар}} + \frac{\delta}{\lambda}}. \quad (3.29)$$

Зупинимось на особливостях визначення значень величин, що входять у формулу (3.29). Коефіцієнт (конвективної) теплопередачі від робочої рідини в ТН до його стінки, враховуючи достатню в'язкість робочої рідини й порівняно невеликий об'єм ТН, можливо прийняти в межах 20...70 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коефіцієнт (конвективної) тепловіддачі від зовнішньої поверхні ТН в навколишнє середовище за відсутності інтенсивного охолодження ТН можливо приймати в межах  $3 \dots 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Коефіцієнт теплопровідності шару теплоізоляції стінки ТН в загальному випадку визначається типом ізоляційного матеріалу. Відомо, що чим вище густина матеріалу, тим вище коефіцієнт його теплопровідності. Вважається, що матеріал належить до ізоляційних, якщо його коефіцієнт теплопровідності нижче  $0,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а коефіцієнт теплопровідності вакуумно-багатошарової теплоізоляції, що використовується для зберігання криогенних рідин, становить  $1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Якщо прийняти в якості найбільш імовірних значень наведених вище величин

$$\alpha_{\text{вн}} = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \alpha_{\text{зовн}} = 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \lambda = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \delta = 30 \text{ мм},$$

то значення коефіцієнта теплопередачі  $k$  складає,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,

$$k = \frac{1}{\frac{1}{50} + \frac{1}{7} + \frac{0,03}{0,2}} = 3,2.$$

Проведемо оцінку прийнятих припущень.

1. Щодо нехтування залежності питомої теплоємності робочої рідини в ТН, то для більшості робочих рідин питома теплоємність зі збільшенням температури збільшується. З формул (3.26) і (3.27) випливає, що нехтування цією величиною призведе до того, що розрахункова швидкість, наприклад, охолодження рідини в ТН буде вище, ніж з урахуванням впливу температури на питому теплоємність.

2. Щодо неврахування циліндричності ТН з робочою рідиною, то з порівняння інтенсивності теплопередачі через плоску й циліндричну стінку випливає, що якщо в якості розрахункової величини поверхні  $F$  у формулах (3.26) і (3.27) використовувати зовнішню поверхню ТН, то, наприклад, швидкість охолодження рідини в ТН за рахунок прийнятого допущення буде більшою з урахуванням циліндричності ТН.

3. Щодо урахування нерівномірності температури робочої рідини в ТН, то в реальних умовах буде мати місце деяка нерівномірність температур у ТН, тому що при охолодженні робочої рідини температура рідини біля стінки ТН буде більш низькою, ніж у середній частині ТН. Це призведе до деякого зменшення теплопередачі, і тоді при використанні допущення розрахункова температура робочої рідини за формулою (3.26) буде нижчою, ніж при реальному процесі теплообміну, а розрахунковий час теплообміну буде меншим, ніж для реального процесу.

Таким чином, прийняті припущення призводять до того, що розрахункова температура за формулою (3.26) буде завищеною й час досягнення заданої температури рідини в посудині за рахунок цих припущень буде заниженим. Орієнтовно попередньо можливо оцінити, що похибка прийнятих припущень сумарно складатиме 10-15 %.

### **3.6. Моделювання параметрів роботи контактної теплової акумулятора фазового переходу системи регулювання температури охолоджуючої рідини й моторної оливи ДВЗ**

У Донецькому інституті залізничного транспорту УкрДАЗТ на кафедрі «Рухомий склад залізниць» спільно з УкрДАЗТ, ІГ НАНУ (м. Київ) і НТУ (м. Київ) проведено дослідження щодо застосування системи комбінованого прогріву (СКП) при здійсненні передпускового підгріву і системи регулювання температури охолоджуючої рідини й оливи при здійсненні міжзмінної стоянки двигунів внутрішнього згорання К461М1 (6ЧН 12/14) і К159М2 (6Ч 12/14). Особливість системи комбінованого прогріву полягає в тому, що вона включає в себе тепловий акумулятор (ТА) фазового переходу і елементи прискореного прогріву для забезпечення ефективної передпускової теплової підготовки системи охолодження (СОД) ДВЗ і його прискореного прогріву після пуску в умовах низьких температур, а крім того, у неї включено тепловий акумулятор, теплонакопичувач й елементи керування передпусковою

системою мащення (ПСМД) ДВЗ. ТА дозволяють накопичувати теплову енергію відпрацьованих газів (ВГ). Кількість теплової енергії, яку накопичує ТА, відповідає необхідній кількості теплової енергії, яка потрібна для попереднього прогріву двигуна від максимально низької температури навколишнього середовища (задається при проектуванні системи) до температури 40 °С «гарячого» пуску ДВЗ. Елементи прискореного прогріву СОД включають електроклапани і рідинний насос, який дозволяє модулювати циркуляцію охолоджуючої рідини (ОР) залежно від її температури для забезпечення ефективного прогріву ДВЗ. Елементи керованої передпускової системи мащення двигуна (КПСМД) включають електроклапани, реле, датчики температури і тиску й рідинний насос, який дозволяє модулювати циркуляцію оливи ПСМД залежно від її температури для забезпечення ефективного прогріву й довговічності ДВЗ. Ці функції КПСМД виконує спільно з теплонакопичувачем, у який зливається прогріта олива двигуна в період його зберігання.

Система регулювання температури охолоджуючої рідини ДВЗ, крім вже описаних елементів, містить ще й додатковий контактний блочний тепловий акумулятор ДВЗ. Додатковий контактний блочний тепловий акумулятор ДВЗ являє собою багатошаровий чохол, закріплений на сорочці й піддоні двигуна з зовнішньої поверхні. Робота його заснована на виділенні й поглинанні теплоти при зміні фазового стану теплоакумулюючого матеріалу, який входить до складу його конструкції. Секції додаткового контактного блочного теплового акумулятора ДВЗ закріплюються на поверхні блока циліндрів і масляного піддона двигуна, так щоб забезпечити щільне прилягання. Застосування додаткового контактного блочного теплового акумулятора ДВЗ не вимагає внесення яких-небудь істотних змін у конструкцію двигуна й інших систем машини, він легко монтується, простий в обслуговуванні і не вимагає додаткового джерела енергії. Конструкція додаткового контактного блочного теплового акумулятора ДВЗ являє собою декілька секцій-контейнерів з теплоакумулюючим матеріалом фазового переходу, закріплених на поверхні блока циліндрів і піддона ДВЗ, зверху закритих теплоізоляційним чохлом, що

складається з декількох шарів. Завдяки використанню додаткового контактного блочного теплового акумулятора ДВЗ досягається мінімальна втрата тепла, що виділяється двигуном протягом часу його роботи, оскільки він виконує теплоізолюючу функцію. У результаті використання запропонованого додаткового контактного блочного теплового акумулятора ДВЗ вдається уникнути появи термічних напруг у ДВЗ, тому що його робочий процес полягає в довготривалій підтримці температури моторної оливи і охолоджуючої рідини ДВЗ, на відміну від відомих теплових акумуляторів, де здійснюється нагрівання ДВЗ після зупинки.

Метою роботи контактного теплового акумулятора є формування ефективного регулювання температури охолоджуючої рідини ДВЗ під час зупинки двигуна за рахунок використання розробленого додаткового контактного блочного теплового акумулятора ДВЗ. Основним завданням при створенні математичної моделі є визначення температури оливи й часу, за який температура оливи в картері двигуна знизиться до заданого значення.

Для цього необхідно вирішити такі завдання:

- обґрунтувати і визначити залежності зміни температури в теплоакumuлюючому матеріалі контактного теплового акумулятора при його заряджанні – віддачі теплоти від двигуна теплому акумулятору при його роботі;

- обґрунтувати і визначити залежності зміни температури в теплоакumuлюючому матеріалі контактного теплового акумулятора при його зберіганні – при взаємодії з навколишнім середовищем;

- обґрунтувати і визначити залежності зміни температури в теплоакumuлюючому матеріалі контактного теплового акумулятора при його розряджанні – віддачі теплоти від теплового акумулятора двигуна при його зупинці.

Для забезпечення ефективного регулювання температури охолоджуючої рідини ДВЗ під час зупинки двигуна розроблено додатковий контактний блочний тепловий акумулятор ДВЗ, що являє собою багатошаровий чохол, закріплений на сорочці й піддоні двигуна ззовні. Для урахування особливостей математичного моделювання параметрів роботи контактного

теплового акумулятора розглянемо опис процесу теплообміну в теплоізолюваному теплонакопичувачі з навколишнім середовищем. На рис. 3.6 наведена схема теплообміну в досліджуваній системі.

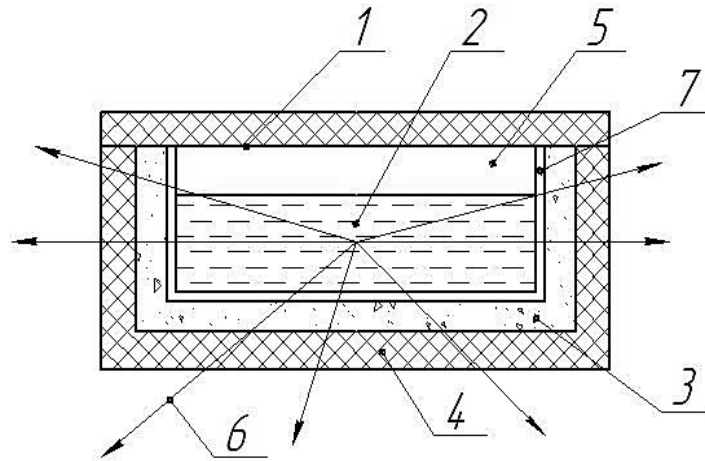


Рис. 3.6. Схема теплообміну в системі: 1 – порожнина картера двигуна внутрішнього згорання; 2 – олива в картері; 3 – шар ТАМ; 4 – шар теплоізоляції; 5 – повітряний прошарок між оливою і елементами двигуна; 6 – напрямки стоку теплоти; 7 – повітряний прошарок між поверхнею картера шару ТАМ та оливою в картері

Встановлюємо основні припущення, які спрощують вирішення поставленого завдання:

- а) температура оливи й двигуна однакові;
- б) нехтуємо стоком теплоти через верхню частину двигуна, що рівноцінно тому, що вона покрита товстим шаром теплової ізоляції;
- в) приймаємо умову, що двигун з картером, покритим шаром теплоакумулюючої речовини й шаром теплоізоляції, у цілому утворюють теплообмінну систему.

Вибираємо основні фізичні величини, що використовуються в процесі розрахунків і їх розмірності:

- $G_{дв}$  - маса елемента конструкції двигуна, кг;
- $G_o$  - маса оливи, кг;
- $c_{дв}$  - питома теплоємність елемента конструкції двигуна, Дж / (кг·К);
- $c_o$  - питома теплоємність оливи, Дж / (кг·К);

$F$  - поверхня теплообміну,  $m^2$ ;  
 $\delta_{iz}$  - товщина шару теплоізоляції,  $mm$ ;  
 $\delta_{TAM}$  - товщина шару ТАМ,  $mm$ ;  
 $\delta_{нов}$  - товщина шару повітряного прошарку,  $mm$ ;  
 $\lambda_{iz}$  - коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу,  $Вт / (m^2 \cdot K)$ ;  
 $\lambda_{нов}$  - коефіцієнт теплопровідності повітряного прошарку,  $Вт / (m^2 \cdot K)$ ;  
 $\lambda_{TAMp}$  - коефіцієнт теплопровідності ТАМ, що знаходиться в рідкій фазі,  $Вт / (m^2 \cdot K)$ ;  
 $\lambda_{TAMT}$  - коефіцієнт теплопровідності ТАМ, що знаходиться у твердій фазі,  $Вт / (m^2 \cdot K)$ ;  
 $\alpha_{вн}$  - коефіцієнт тепловіддачі від рідини в ємності піддона картера двигуна до стінки піддона картера,  $Дж / (m^2 \cdot K \cdot c)$ ,  $Вт / (m^2 \cdot K)$ ;  
 $\alpha_{зовн}$  - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні піддона картера до навколишнього середовища;  
 $t_{ов}$  - поточне значення температури елемента конструкції двигуна й оливи,  $^{\circ}C$ ;  
 $t_{ово}$  - початкове значення температури елемента конструкції двигуна й оливи,  $^{\circ}C$ ;  
 $t_{TAMo}$  - початкове значення температури ТАМ,  $^{\circ}C$ ;  
 $t_o$  - температура навколишнього середовища,  $^{\circ}C$ ;  
 $\tau$  - поточне значення часу,  $c$ ;  
 $k$  - коефіцієнт теплопередачі від оливи в піддоні картера до навколишнього середовища,  $Вт / (m^2 \cdot K)$ ;  
 $q$  - питома теплота фазового переходу ТАМ,  $Дж/кг$ .

Особливість протікання теплообмінних процесів у виділеній системі характеризується тим, що на початку теплообмінних процесів ТАМ перебуває в рідкому стані, а потім, при здійсненні поступового охолодження системи, температура ТАМ досягає температури кристалізації. Після цього протягом деякого відрізка часу температура ТАМ залишається незмінною, а вже потім, після закінчення процесу кристалізації ТАМ, починається охолодження теплообмінної системи зі зміною температури ТАМ, що знаходиться у твердому стані.

Таким чином, поставлене завдання можливо розглядати у вигляді трьох окремих етапів. При цьому кінцеві значення температур у першому етапі є початковими для другого етапу, а кінцеві другого етапу – початковими для третього. Розглянемо виділені три етапи роботи контактного теплового акумулятора при їх вирішенні послідовно.

Етап 1. Основне завдання – визначити час, через який речовина ТАМ почне кристалізуватися.

Складаємо рівняння теплового балансу в диференціальній формі. Кількість теплоти, яку втрачає маса елемента конструкції двигуна й оливи в картері,

$$dQ = (G_o c_o + G_{дв} c_{дв}) dt_{дв}. \quad (3.30)$$

Кількість теплоти, яка проходить від піддона двигуна через шари повітряного прошарку, ТАМ, теплоізоляції,

$$dQ = k_1 F (t_{дв} - t_o) dt. \quad (3.31)$$

Ліві частини рівнянь (3.30) і (3.31) дорівнюють одна одній за абсолютною величиною, однак вони мають різні знаки, оскільки при додатному значенні  $dt$  величина  $dt_{дв}$  від'ємна, бо має місце охолодження системи протягом відповідного часу.

З урахуванням зазначеного вище прирівнюємо праві частини рівняння (3.30) і (3.31):

$$(G_o c_o + G_{дв} c_{дв}) dt_{дв} = -k_1 F (t_{дв} - t_o) dt. \quad (3.32)$$

Рівняння (3.32) є диференціальним рівнянням зі змінними, що розділяються:

$$\frac{dt_{дв}}{t_{дв,1} - t_o} = -\frac{k_1 F}{G_o c_o + G_{дв} c_{дв}} dt. \quad (3.33)$$

У рівняння (3.33) вводимо позначення:



$$\frac{k_1 F}{G_o c_o + G_{дв} c_{дв}} = A_1. \quad (3.34)$$

Розв'язок рівняння (3.33) з позначенням виразу (3.34) має вигляд

$$t_{дв,1} = t_o + (t_{дв,0} - t_o) \exp(-A_1 \tau_1), \quad (3.35)$$

де

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{зов}} + \frac{\delta_{із}}{\lambda_{із}} + \frac{\delta_{ТАМ}}{\lambda_{ТАМ,р}} + \frac{\delta_{в}}{\lambda_{в}}}; \quad (3.36)$$

$\tau_1$  – поточний час процесу охолодження двигуна, С.

Після цього необхідно знайти вираз для визначення температури рідкого шару ТАМ. Величина  $dQ$  у формулі (3.31) відображує кількість теплоти, що передається через шар площею  $F$  за час  $dt$ .

Густина теплового потоку  $q$ , Дж/(м<sup>2</sup>·с), визначається співвідношенням

$$q = \frac{1}{F} \cdot \frac{dQ}{dt} = k_1 (t_{дв,1} - t_o). \quad (3.37)$$

У формулу (3.37) підставимо значення  $t_{дв}$  згідно зі співвідношенням (3.35):

$$q = k_1 (t_{дв,0} - t_o) \exp(-A_1 \tau_1). \quad (3.38)$$

З іншого боку, значення щільності теплового потоку можна виразити, враховуючи перенесення теплоти через повітряний прошарок:

$$q = (t_{дв,1} - t_{ТАМ}) \frac{\lambda_{в}}{\delta_{в}}. \quad (3.39)$$

Прирівнюємо праві частини рівнянь (3.38) і (3.39):

$$k(t_{\text{дв},0} - t_0) \exp(-A_1 t_1) = (t_{\text{дв},1} - t_{\text{TAM}}) \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_{\text{в}}} . \quad (3.40)$$

З формули (3.40) знаходимо вираз для визначення температури  $t_{\text{TAM}}$ :

$$t_{\text{TAM}} = t_{\text{дв},1} - k_1 \frac{\delta_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} (t_{\text{дв},0} - t_0) \exp(-A_1 \tau_1). \quad (3.41)$$

Після підстановки у формулу (3.41) значення  $t_{\text{дв},1}$  у відповідності з залежністю (3.35) отримуємо

$$t_{\text{TAM}} = t_0 + (t_{\text{дв},0} - t_0) \left(1 - k_1 \frac{\delta_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}}\right) \exp(-A_1 \tau_1). \quad (3.42)$$

Якщо у формулі (3.42) значення температури ТАМ прирівняти значенню температури кристалізації ТАМ ( $t_{\text{TAMкр}}$ ), то з цієї формули можливо знайти час  $\tau$ , через який почнеться процес кристалізації ТАМ:

$$\tau = \frac{1}{A_1} \left\{ \ln \left[ (t_{\text{дв},0} - t_0) \left(1 - k_1 \frac{\delta_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}}\right) \right] - \ln(t_{\text{TAMкр}} - t_0) \right\}. \quad (3.43)$$

Етап 2. Основне завдання – визначити час процесу теплообміну, що характеризується закінченням процесу кристалізації речовини ТАМ.

В умовах цього завдання температура двигуна й оливи в ньому буде наближатися до температури кристалізації ТАМ і одночасно з цим має місце теплообмін від шару кристалізації в навколишнє середовище. Для опису залежності температури двигуна й часу процесу кристалізації ТАМ складемо рівняння теплового балансу.

Кількість теплоти, що втрачається масою двигуна й оливи в ньому, описується рівнянням типу (3.30).

Кількість теплоти, що передається через повітряний прошарок (від двигуна до шару ТАМ), записується рівнянням

$$dQ = F \frac{\lambda_B}{\delta_B} (t_{ДВ} - t_{ТАМ\text{ КР}}) d\tau . \quad (3.44)$$

Прирівнюємо праві частини рівнянь (3.30) і (3.44) з урахуванням від'ємного знака  $dt_{ДВ}$ :

$$(G_o c_o + G_{ДВ} c_{ДВ}) dt_{ДВ} = -F \frac{\lambda_B}{\delta_B} (t_{ДВ} - t_{ТАМ\text{ КР}}) d\tau . \quad (3.45)$$

У рівнянні (3.45) ділимо змінні:

$$\frac{dt_{ДВ}}{t_{ДВ} - t_{ТАМ\text{ КР}}} = -\frac{F \frac{\lambda_B}{\delta_B}}{G_o c_o + G_{ДВ} c_{ДВ}} d\tau . \quad (3.46)$$

У рівняння (3.46) вводимо позначення:

$$\frac{F \frac{\lambda_B}{\delta_B}}{G_o c_o + G_{ДВ} c_{ДВ}} = A_2 . \quad (3.47)$$

З урахуванням позначення виразу (3.47) розв'язок рівняння (3.46) має вигляд

$$t_{ДВ,2} = t_{ТАМ\text{ КР}} + (t_{ДВ,1} - t_{ТАМ\text{ КР}}) \exp[-A_2(\tau - \tau_1)] . \quad (3.48)$$

Час закінчення процесу кристалізації ТАМ ( $\tau_2$ ) визначаємо з умови рівності теплоти кристалізації й сумарного ефекту підведення й відведення теплоти від цього шару.

Кількість теплоти, що підводиться до шару ТАМ з боку двигуна, може бути визначена шляхом інтегрування рівняння (3.44), підставляючи в нього замість температури двигуна її значення, що визначається за рівнянням (3.48):

$$dQ = F \frac{\lambda_B}{\delta_B} (t_{ДВ,1} - t_{ТАМ\text{ КР}}) \exp[-A_2(\tau - \tau_1)] d\tau . \quad (3.49)$$

Після інтегрування рівняння (3.49) отримуємо такий вираз:

$$Q_{\text{ДВ}} = -\frac{1}{A_2} F \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_{\text{в}}} (t_{\text{ДВ},1} - t_{\text{ТАМкр}}) \{ \exp[-A_2(\tau - \tau_1) - 1] \} \quad (3.50)$$

Кількість теплоти, що відводиться від шару ТАМ у навколишнє середовище за час  $(\tau - \tau_1)$ , визначаємо за формулою

$$Q_{\text{из}} = K_2 F (t_{\text{ТАМкр}} - t_0) (\tau - \tau_1), \quad (3.51)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт теплопередачі від шару ТАМ до навколишнього середовища, Дж / (м<sup>2</sup>·с·К),

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{зов}}} + \frac{\delta_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}}} \quad (3.52)$$

Кількість теплоти, що генерується у шарі ТАМ за час його кристалізації, визначається за рівнянням

$$Q_{\text{кр}} = M_{\text{ТАМ}} q_{\text{ТАМ}} \quad (3.53)$$

Очевидно, що кількість теплоти, що генерується у процесі кристалізації, буде дорівнювати кількості теплоти, яка відводиться в навколишнє середовище через шар ізоляції, за винятком теплоти, що підводиться до цієї речовини від двигуна, тобто

$$Q_{\text{кр}} = Q_{\text{из}} - Q_{\text{ДВ}} \quad (3.54)$$

Розкриваємо члени рівняння (3.54) з урахуванням рівнянь (3.50) і (3.51) і (3.53):

$$M_{\text{ТАМ}} q_{\text{ТАМ}} = K_2 F (t_{\text{ТАМкр}} - t_0) (\tau - \tau_1) + \frac{1}{A_2} F \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_{\text{в}}} (t_{\text{ДВ},1} - t_{\text{ТАМкр}}) \{ \exp[-A_2(\tau - \tau_1) - 1] \} \quad (3.55)$$

Для спрощення записів у рівняння (3.55) вводимо позначення:

$$K_2 F(t_{\text{TAMкр}} - t_0) = B_1, \quad (3.56)$$

$$\frac{1}{A_2} F \frac{\lambda_B}{\delta_B} (t_{\text{ДВ,1}} - t_{\text{TAM,кр}}) = B_2, \quad (3.57)$$

тоді рівняння (3.55) можливо переписати як

$$M_{\text{TAM}} q_{\text{TAM}} = B_1(\tau - \tau_1) + B_2 \{ \exp[-A_2(\tau - \tau_1) - 1] \}. \quad (3.58)$$

Рівняння теплового балансу (3.54) припускає, що час  $\tau$  в рівнянні (3.55) відповідає часу закінчення кристалізації ТАМ. Позначивши цей час як  $\tau_2$ , рівняння (3.58) набуде вигляду

$$M_{\text{TAM}} q_{\text{TAM}} = B_1(\tau_2 - \tau_1) + B_2 \{ \exp[-A_2(\tau_2 - \tau_1) - 1] \}. \quad (3.59)$$

Відносно пошуку часу закінчення кристалізації ТАМ  $\tau_2$  рівняння (3.59) є трансцендентним рівнянням. Цей час ( $\tau_2$ ) можливо визначити лише одним з методів численного розв'язання такого рівняння.

Етап 3. Основне завдання – знайти залежність для визначення температури оливи в картері й маси двигуна за заданий час після закінчення кристалізації ТАМ.

Після закінчення кристалізації шар ТАМ стає опором для проходження теплоти від маси двигуна й оливи в ньому в навколишнє середовище. Спосіб вирішення завдання, як і в попередніх випадках, полягає в складанні рівняння теплового балансу в диференціальній формі й у подальшому розв'язанні цього диференціального рівняння.

Кількість теплоти, що втрачається масою двигуна й оливи в ньому, виражається рівнянням

$$dQ = (G_o c_o + G_{\text{ДВ}} c_{\text{ДВ}}) dt_{\text{ДВ}}. \quad (3.60)$$

Кількість теплоти, що проходить через шари: повітряний прошарок, шар ГАМ, шар теплової ізоляції:

$$dQ = k_3 F (t_{\text{ДВ}} - t_0) d\tau, \quad (3.61)$$

де

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{зов}}} + \frac{\delta_{\text{В}}}{\lambda_{\text{В}}} + \frac{\delta_{\text{ТАМ}}}{\lambda_{\text{ТАМ},1}} + \frac{\delta_{\text{ІЗ}}}{\lambda_{\text{ІЗ}}}}. \quad (3.62)$$

Праві частини рівнянь (3.60) і (3.61) прирівнюємо за умови, що вони мають різні знаки:

$$-(G_0 c_0 + G_{\text{ДВ}} c_{\text{ДВ}}) dt_{\text{ДВ}} = k_3 F (t_{\text{ДВ}} - t_0) d\tau. \quad (3.63)$$

Перетворюємо рівняння (3.63), як це робилося раніше, при вирішенні першого етапу:

$$\frac{dt_{\text{ДВ}}}{t_{\text{ДВ}} - t_0} = -A_3 d\tau, \quad (3.64)$$

де

$$A_3 = \frac{k_3 F}{G_0 c_0 + G_{\text{ДВ}} c_{\text{ДВ}}}. \quad (3.65)$$

При розв'язанні рівняння (3.64) поточне значення часу позначаємо  $\tau_3$ , а поточне значення температури оливи в картері й температури оливи двигуна  $t_{\text{ДВЗ},3}$ .

З розв'язання рівняння (3.64) отримуємо

$$t_{\text{ДВЗ},3} = t_0 + (t_{\text{ДВ},2} - t_0) \exp[-A(\tau_3 - \tau_2)]. \quad (3.66)$$

З формули (3.66) можливо отримати залежність для визначення загального часу теплообміну  $\tau_3$ , на момент якого температура оливи в картері й маси двигуна дорівнюватимуть заданому значенню  $t_{\text{ДВЗ},3}$ :

$$\tau_3 = \tau_2 + \frac{1}{A_3} [\ln(t_{\text{ДВ},2} - t_0) - \ln(t_{\text{ДВЗ},3} - t_0)]. \quad (3.67)$$

На основі вищевикладеного можливо зробити висновок, що враховано особливості застосування контактного теплового акумулятора для випадку, коли теплообмін від двигуна внутрішнього згорання здійснюється через установлені з боків й знизу двигуна шарів ТАМ і шарів ізоляційного матеріалу. Отримано розрахункові залежності для визначення температури оливи й часу досягнення заданої його температури роздільно для трьох етапів процесу теплообміну:

- перший етап, що характеризується температурою ТАМ вище температури кристалізації;
- другий етап, що характеризується незмінною температурою шару ТАМ в процесі його кристалізації;
- третій етап, що характеризується станом ТАМ у твердому стані.

### **Контрольні запитання**

1. Назвіть основні припущення і модельні подання, необхідні для побудови математичної моделі функціонування ДВЗ з ТА прийнятої конструкції.

2. Опишіть основні особливості математичної моделі ТА фазового переходу ДВЗ у режимі заряджання.

3. Назвіть основні особливості математичної моделі ТА фазового переходу ДВЗ у режимі зберігання теплової енергії.

4. Назвіть основні особливості математичної моделі ТА фазового переходу ДВЗ у режимі розряджання.

5. Поясніть особливості перехідного процесу в ТА фазового переходу в процесі повного циклу розряджання – заряджання.

6. Назвіть особливості моделювання параметрів роботи теплонакопичувача керованої передпускової системи мащення двигуна внутрішнього згорання.

7. Назвіть особливості моделювання параметрів роботи контактного теплового акумулятора фазового переходу системи регулювання температури охолоджуючої рідини й моторної оливи ДВЗ.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОТИ НА ОСНОВІ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ У МАТЕРІАЛАХ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ ТРАНСПОРТНИХ ТЕПЛОСИЛОВИХ УСТАНОВОК

#### 4.1. Дослідження процесів акумулювання теплоти на основі фазових переходів у матеріалах для використання в пристроях формування комфортного мікроклімату на залізничному транспорті для роботи локомотивних бригад

Останнім часом дуже важко переоцінити важливість розвитку енергозберігаючих технологій. У широкому колі завдань цього напрямку більшу актуальність має розроблення технології теплоакумулювання на основі прихованої теплоти  $\Delta H_L$  фазового переходу рідина  $\leftrightarrow$  тверде тіло в матеріалах.

Основними вимогами, що висуваються до теплоакумулюючих матеріалів (ТАМ), є наявність досить високого значення ентальпії плавлення  $\Delta H_L$ , стійкість і повторюваність ендо- та екзотермічних ефектів при численному термоциклюванні відносно температури плавлення  $T_L$ , керуваність величиною переохолодження  $\Delta T^-$  рідкої фази відносно  $T_L$ , норми екологічної безпеки, доступність і низька вартість матеріалу. Даний напрямок є дуже доцільним при створенні та дослідженні механізмів формування комфортного мікроклімату на транспорті і в першу чергу на залізничному транспорті.

Робота локомотивних бригад характеризується специфічним режимом праці та відпочинку: початок і закінчення роботи в різні години доби, наявність нічної роботи, частий відпочинок поза домом, тривале перебування на локомотиві при обмеженій рухливості тощо. Тенденції розвитку залізничного транспорту пов'язані з підвищенням швидкості руху, при цьому зросло нервово-емоційне напруження членів бригади, збільшився потік інформації - більш часте миготіння сигналів (колійних знаків), набігання шпал тощо. Такі фактори, як шум, вібрація, мікроклімат та інші, шкідливі для організму людини і можуть також бути причиною передчасного втомлення.



Професія машиніста локомотива належить до групи професій операторського типу. Даний вид діяльності з фізіологічної точки зору характеризується вираженою нервово-емоційною напругою і в той же час малорухомістю, що вимагає високого рівня комфортності. Результати численних випробувань у реальних умовах експлуатації та заводами-виробниками локомотивів показали, що температура і відносна вологість повітря в поєднанні з температурами внутрішніх поверхонь огорожень кабіни не завжди відповідають вимогам, що висуваються до мікроклімату на робочих місцях машиністів локомотивів.

Дані лабораторних і натурних випробувань, які отримані в розрахункових кліматичних умовах, показують, що мікроклімат у кабінах всіх локомотивів не відповідає поставленим вимогам у повному обсязі. При роботі в подібних умовах організм відчуває значне напруження терморегуляторних функцій, що впливає на сталість його внутрішнього середовища та нормальний перебіг фізіологічних процесів, тобто має негативний вплив на стан здоров'я людини. Це підтверджується високим рівнем захворювань органів дихання в локомотивних бригадах.

Підтримання необхідного стану мікроклімату на робочих місцях локомотивної бригади висуває підвищені вимоги до системи забезпечення мікроклімату кабіни локомотива (теплоізоляція огорожень і кліматичні установки).

Мікроклімат у кабіні машиніста також має важливе значення для здоров'я членів локомотивної бригади. За санітарними нормами, середня температура повітря в кабіні машиніста при закритих вікнах навесні, взимку і восени має бути 16 - 18 °С, при цьому перепад температури на рівнях 50-100 мм і 1,5-2 м від підлоги не повинен перевищувати 3-5 °С. При великих перепадах температури з'являється стан дискомфорту. Пристрій бічних вікон у кабіні машиніста має забезпечувати відсутність протягів, а також надмірного перепаду тисків у кабіні при їх відкритті, що викликає больові відчуття у вухах.

Для створення нормального мікроклімату в перехідну і холодну пору року повинна бути передбачена система опалення з забезпеченням можливо більшої рівномірності температури повітря у всьому об'ємі кабіни. Цьому сприяє хороша

герметизація підлоги, вікон, дверей кабіни. Повітря до опалювально-вентиляційної установки має надходити ззовні очищеним від пилу. Використання установки влітку в якості вентиляційної дозволяє знижувати температуру в кабіні на 3-6 °С, однак в умовах жаркого клімату вентиляційна установка не вирішує проблеми створення оптимального мікроклімату в кабіні. Тому радикальним заходом для поліпшення умов праці локомотивних бригад при високих температурах зовнішнього повітря є обладнання кабіни машиніста установкою для кондиціонування, що дозволяє знизити температуру повітря у всьому об'ємі кабіни, очистити його від пилу і забезпечити подачу свіжого повітря.

При експлуатації локомотивів в умовах низьких температур навколишнього середовища і цілорічного зберігання їх на відкритому повітрі, окрім проблеми пуску двигуна локомотива, виникає ще одна проблема - забезпечення необхідного теплового режиму в кабіні машиніста при непрацюючому двигуні.

Ця проблема обумовлена складністю, яка формується в самій постановці завдання. Температура повітря в кабіні машиніста є одним з основних фізичних параметрів, що формують комфортний мікроклімат. Під комфортним мікрокліматом розуміють такі мікрокліматичні умови, за яких теплообмін машиніста з навколишнім середовищем відбувається при мінімальній напрузі системи терморегуляції тіла. За даними В.П. Хохрякова, комфортний мікроклімат у кабіні транспортного засобу характеризується оптимальними температурами, наведеними в табл. 4.1.

Узагальнені відомості про основні нормовані мікрокліматичні параметри в кабінах мобільних (будівельних, дорожніх, сільськогосподарських, гірничодобувних) машин наведено в роботі [24]. Актуальність даної проблеми безпосередньо пов'язана з полегшенням безпеки праці на залізничному транспорті. Так, наприклад, у роботі [74] зазначається, що низька температура повітря в кабіні обумовлює охолодження і швидку стомлюваність машиніста або водія, яка виявляється в зростанні помилкових дій приблизно на 10-20 %. Особливої актуальності ця проблема набуває при тривалих рейсах і при тривалих прогрівах локомотивів перед зрушенням з місця.

Таблиця 4.1

### Оптимальні температури комфортного мікроклімату в кабіні транспортного засобу

Оптимальна температура в кабіні, °С	Зона контролю параметра на рівні частин тіла людини	Температура $t_0$ зовнішнього повітря, °С	
		<+10	>+10
Повітря	Голова	+15 (+10)	+25 (+26)
	Поперек	+17(+12)	+26 (+28)
	Ноги	+19(+13)	+28 (+31)
Внутрішні поверхні	Голова	+10 (+5)	+28 (+33)
Огорожі	Поперек	+15 (+10)	+33 (+35)

Примітка. У дужках дано значення оптимальних температур відповідно до зниження температури зовнішнього повітря до -40 °С або при її підвищенні до +40 °С.

Колективом авторів навчального посібника пропонується в якості засобу прогріву кабіні машиніста при прогріванні тепловоза використовувати теплові акумулятори (ТА) фазового переходу. При моделюванні системи прогріву тепловоза на базі теплового акумулятора необхідно мати змогу варіювати параметр і динамічні властивості її ланок. Авторами з використанням даних у результаті попереднього опрацювання конструкції і матеріалів ТА були визначені основні параметри системи охолодження деяких тепловозів, які широко застосовуються на Донецькій залізниці. Так, тепла потужність, що передається водяній системі охолодження з боку двигуна, для тепловозів ТЕМ2, ЧМЕ3 і дизель-поїзда Д1 складає 43,6; 57,8; і 107 кВт відповідно (розрахунок зроблено для випадку стовідсоткового забору теплової енергії). На підставі отриманих даних у реальних умовах для створення оптимального підтримання температури в кабіні машиніста цілком припустимо при прогріві використовувати в якості основного теплоносія ТА системи охолодження тепловоза.

Процесам дослідження і підбору матеріалів для ТА фазового переходу, що планується до використання в процесі прогрівання кабіни машиніста, і присвячено даний розділ.

З метою вивчення закономірностей поведінки ТАМ у процесі плавлення і кристалізації в умовах, наближених до реальних, а також з'ясування оптимальних умов експлуатації енергокомплексу запропоновано і реалізовано схему експериментальної теплової установки з ТА (рис. 4.1).

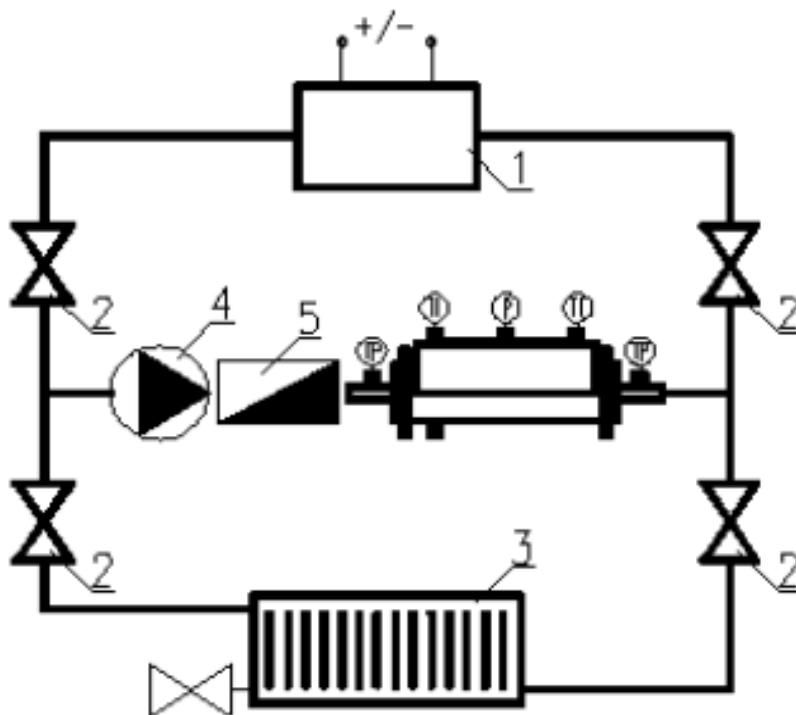


Рис. 4.1. Схема експериментальної теплової установки з ТА  
(пояснення в тексті)

Конструктивно схема поділяється на два контури - контур генератора теплоти і контур споживача. В умовах реальної системи необхідно передбачити перемички для постачання теплоти споживачу в режимі акумуляції. Загальною частиною двох контурів є розглянутий теплообмінний апарат, на лінії з якими передбачено циркуляційний насос 4 (тришвидкісний для зміни швидкісних режимів теплоносія) і лічильник гарячої води 5 для визначення витрати теплоносія, а в рамках системи і кількості теплоти спожитої або відданого акумулюючого завантаження. Відмінність же контурів полягає лише в тому, що в

контурі споживача генератор 1 замінено на споживача 3 (опалювальний прилад - панельний радіатор). Перемикання режимів здійснюється кранами 2.

На рис. 4.2 подано схему теплообмінника для ГА. Тут міжтрубний простір теплообмінного апарата заповнюється твердим теплоакумулюючим матеріалом (ТАМ), при цьому у верхній частині конструкції залишається вільний простір, що дає можливість для теплового розширення завантаження при зміні агрегатного стану. У верхню і нижню частину бункера поміщаються два датчики температури для спостереження за станом матеріалу. Також передбачається встановлення манометра для вимірювання масштабів зміни тиску в ємності. У ході експерименту планується спостереження за матеріалом різного хімічного складу, тому що передбачено отвори для завантаження ТАМ і його зливу. Отвір для завантаження матеріалу закривається прозорою кришкою з оргскла. Спорожнення проводиться в стані розплаву ТАМ. У трубній решітці протікає гріючий або такий, що нагрівається, теплоносій (залежно від циклу роботи). На вході і виході теплоносія встановлено термометри для фіксації його температур.

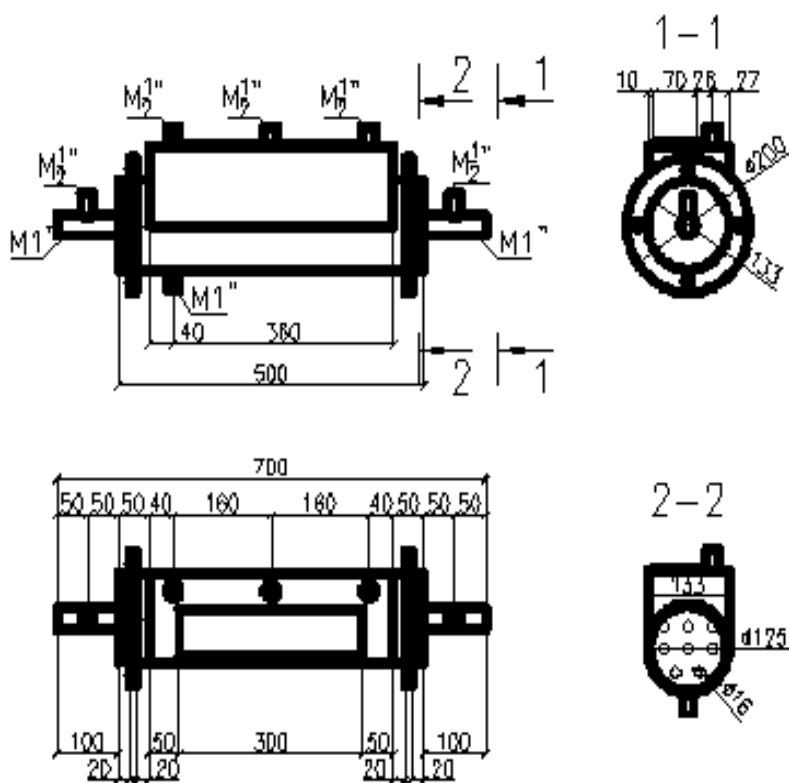
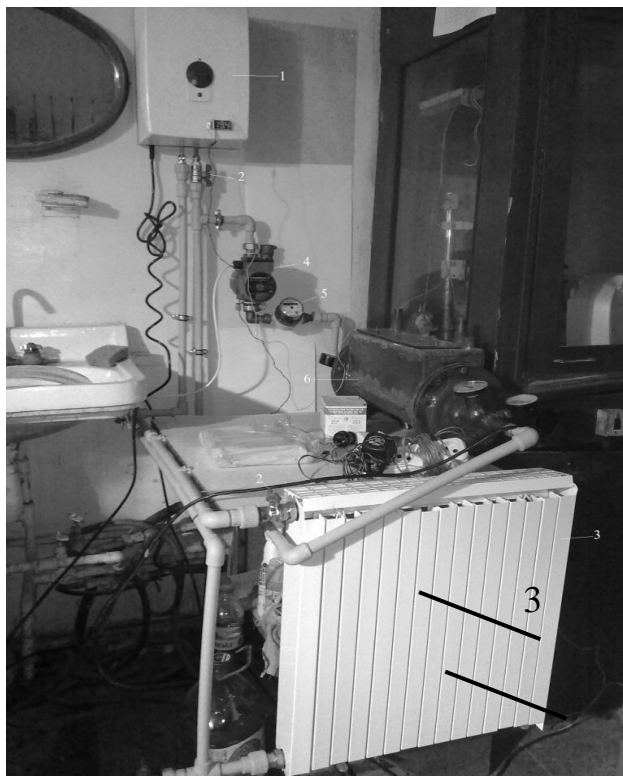


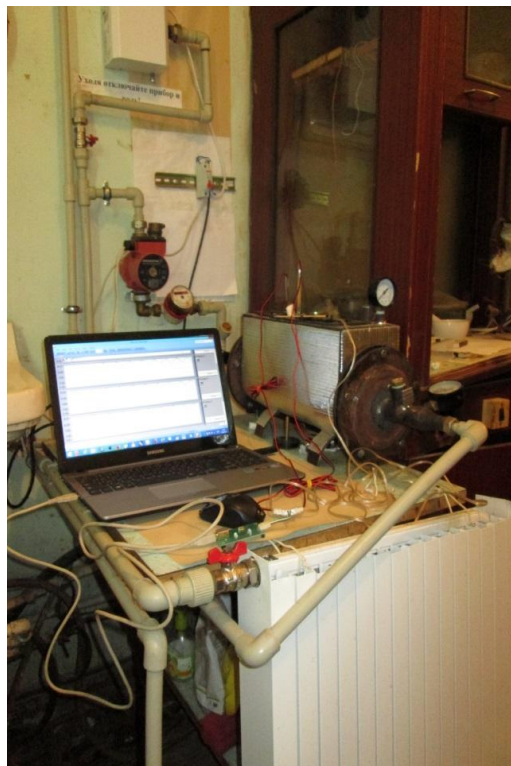
Рис. 4.2. Схема теплообмінника

Теплообмінний апарат з ТА є складовою частиною установки, емітує спрощену схему системи тепlopостачання, що включає генератор теплоти і споживача.

На рис. 4.3 наведена фотографія експериментальної установки.



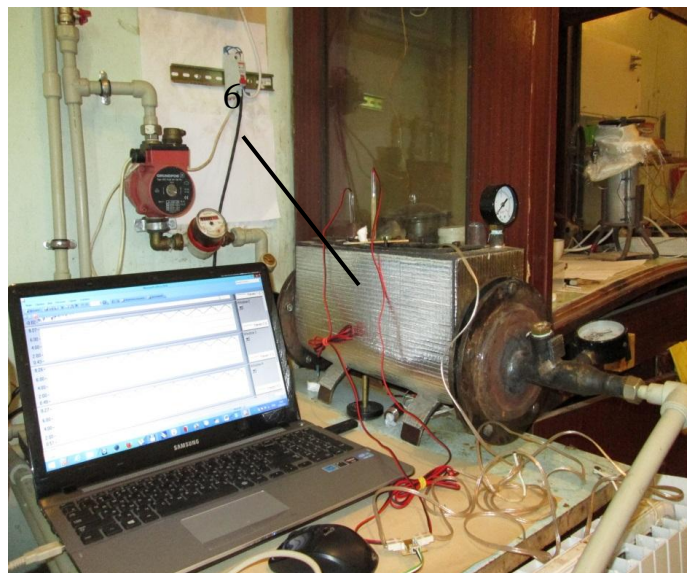
а



б



в



д

Рис. 4.3. Загальний вигляд експериментальної теплової установки з ТА (а - д): 1 – генератор; 2 – кран; 3 - споживач (панельний радіатор); 4 - циркуляційний насос; 5 – витратомір; 6 - теплообмінник

Особливо важливим завданням є підбір теплоакумуючих матеріалів з необхідними фізико-хімічними властивостями. Від вдалого вирішення цього питання залежить вартість дослідної установки і надійність її роботи. На практиці в якості ТАМ найчастіше застосовуються гідрати солей і органічні матеріали, у тому числі парафіни. З солей можливо використовувати  $NaCl$ ,  $NaBO_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $KF$ ,  $NaF$ ,  $MgF_2$ ,  $LiF$ , які мають велику питому ентальпію фазового переходу -  $\Delta H_{\phi} \sim 10$  кДж/кг, що є позитивним моментом для використання їх у ТА фазового переходу. Температури плавлення у них знаходяться в межах від 900 до 1100 °С.

Можуть застосовуватися й інші органічні речовини, наприклад ефективним виявляється застосування воску або інших органічних матеріалів з близькими властивостями. На сьогодні найбільш придатними для ТА фазового переходу для зазначеного призначення вважаються парафіни, що являють собою суміш аліфатичних вуглеводнів ряду  $C_nH_{2n+2}$ , які також називають граничними вуглеводнями. Розглянемо деякі переваги парафінів як матеріалів, що можуть використовуватись у ТА з фазовим переходом.

Парафіни мають велику теплоту фазового переходу і низький коефіцієнт в'язкості, у них відсутній ефект переохолодження. Парафін у рідкому стані – це неполярна рідина і тому не змішується з полярними, такими, як вода і спирт. Це важливо при використанні їх як теплоносіїв при прямому контакті з ТАМ. Парафіни мають низьку електропровідність, через яку їх відносять до добрих електроізоляторів. Густина термічних парафінів у рідкому стані коливається від 750 до 850 кг/м<sup>3</sup>, у твердому від 800 до 900 кг/м<sup>3</sup>. Основні фізичні властивості парафінів різного типу наведено в табл. 4.2.

Порівняно з кристалогідратами вони мають меншу питому теплоту плавлення, але є стійкими що до термоциклювання. В'язкість рідкої фази низька, що призводить до більш інтенсивної конвекції в рідкій фазі, отже й до більш інтенсивного теплообміну при плавленні. У процесі роботи ТА фазового переходу на парафінах не відбувається хімічних реакцій, тому теплова потужність ТА фазового переходу залишається на високому рівні протягом усього терміну служби.

**Фізичні властивості парафінів**

Тип парафіну	Температура фазового переходу (замерзання) $T_f$ , °C	Питома теплота фазового переходу $Q_f^{num}$ , кДж / кг
6106	42-44	189
P116	45-48	210
5838	48-50	189
6035	58-60	189
6403	62-64	189
6499	66-68	189

Ще одна властивість парафінів, що робить їх привабливими для цілей теплової акумуляції, - це наявність ряду граничних вуглеводнів, сумішшю яких вони є самі. Зі збільшенням довжини ланцюжка атомів вуглецю температура фазового переходу збільшується, при цьому теплота фазового переходу в усіх речовин ряду залишається приблизно однаковою. Властивості парафінів залежно від кількості атомів вуглецю наведено в табл. 4.3.

Також парафіни хімічно інертні відносно багатьох матеріалів, корозійно-стійкі, довговічні і стабільні при циклічній зміні агрегатного стану; стабільні при нагріванні до 250 °C; не киплять; нема небезпеки виникнення високого тиску пари навіть при високих робочих температурах; екологічно нешкідливі; не мають несприятливого впливу на людину, тварин і мікроорганізми (парафіни класифікуються як речовини нульового рівня шкоди воді і 100 % регенеровані), не є токсичними і шкідливими для здоров'я.

Перераховані властивості парафіну роблять його ідеальним матеріалом для різних видів використання, пов'язаних з низькотемпературною акумуляцією теплоти. Однак у парафінів, як і в багатьох органічних ТАМ, є один істотний недолік - низький коефіцієнт теплопровідності (приблизно 0,15 Вт/(м<sup>2</sup>·К)).



Таблиця 4.3

**Властивості парафінів залежно від кількості атомів вуглецю**

Кількість атомів вуглецю	Температура фазового переходу $T_f$ , °C	Питома теплота фазового переходу $Q_f^{num}$ , кДж/кг	Група
14	5,5	228	1
15	10	205	2
16	16,7	237	1
17	21,7	213	2
18	28,0	244	1
19	32,0	222	2
20	36,7	246	1
21	40,2	200	2
22	44,0	249	2
23	47,5	232	2
24	50,6	255	2
25	49,4	238	2
26	56,3	256	2
27	58,8	236	2
29	61,6	253	2
30	65,4	251	2
31	68,0	242	2
32	69,5	170	2
33	73,9	268	2
34	75,9	269	2

До недоліків парафінів як ТАМ також належать:

- зміна щільності при фазовому переході, оскільки призводить до необхідності компенсації зміни об'єму, наприклад забезпечення порожнин у теплоакумуючих елементах або інших способів;

- низька теплопередавальна здатність, яка призводить до ускладнення конструкції, оскільки виникає необхідність передбачення заходів щодо поліпшення теплообміну між ТАМ і теплоносієм.

Виходячи з проведеного аналізу можна зробити висновок, що найбільш перспективним матеріалом з фазовим переходом для використання їх за вказаним призначенням є парафін.

Речовини з групи парафінів задовольняють багато вимог, що висуваються до ТАМ, однак для кожної марки речовини цієї групи мають місце індивідуальні теплофізичні характеристики ( $T_L$ ,  $\Delta H_L$ ,  $\Delta T^-$  тощо), що недостатньо відображено в довідковій літературі. Крім того, у літературі майже відсутні дані про дослідження впливу кількості термоциклів на деградацію цих матеріалів.

Методами циклічного термічного (ЦТА) і диференціально-термічного (ДТА) аналізів для парафіну марки Т-3 (очищений технічний) проведені дослідження температури плавлення  $T_L$ , питомої ентальпії плавлення  $\Delta H_L$  і величини передкристалізаційного переохолодження  $\Delta T^-$ , а також стійкості цих параметрів відносно тривалого термоциклювання відносно  $T_L$ . За ГОСТ 23683-89, парафін Т-3 не містить токсичних домішок і має температуру плавлення  $T_L = 50 \div 56$  °С. У літературі практично відсутні дані за величиною  $\Delta H_L$ . Для тривалого термоциклювання використовували зразок парафіну масою 1,00 г, який було вміщено в скляну пробірку, герметизовану пробкою з простягнутою крізь неї термопарою. Для вимірювання температури використовували ХА-термопари діаметром 0,2 мм. Термоциклювання проводили в інтервалі температур від 30 до 80 °С з середньою швидкістю нагріву-охолодження 0,05 К/с. Для запису диференціально-термічних кривих використовували спеціально розроблену малоінерційну піч. Маса зразків для ДТА становила 0,30 мг. У якості еталона використовували технічну оливу. Запис температури і диференціальної температури здійснювався за допомогою цифрового мультиметра Pro'sKit MT-1860 і цифрового термометра UNI-T UT325 через інтерфейс RS-232 на ПК. Калібрування термовимірювань проводили за плавленням нафталіну і бензойної кислоти. Помилка у вимірюванні температури не перевищувала 0,5 К. Всього було зроблено понад 600 термоциклів плавлення і кристалізації.

На рис. 4.4 наведено експериментальні криві нагрівання і охолодження (ЦТА) спільно з ДТА-кривими, що характеризують плавлення і кристалізацію зразка масою 0,30 мг у другому (а) і в шістсот двадцятому (б) термоциклах. Як видно з цього рис. 4.4, для зазначених термоциклів діапазони плавлення і кристалізації практично збігаються і лежать в інтервалах  $49\div 56\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $54\div 49\text{ }^{\circ}\text{C}$  відповідно. У термоциклі № 620 (рис. 4.4, б) було проведено витримку рідкого парафіну при температурі  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 20 хв.

З рис. 4.4 видно, що більше шістсот термоциклів плавлення і кристалізації практично не вплинули на температури фазових переходів.

За стандартною методикою визначено питому теплоту  $\Delta H_L$  плавлення парафіну на початку і в кінці термоциклювання. Дані температурних параметрів плавлення і кристалізації, а також величини  $\Delta H_L$  для 2-го і 620-го термоциклів наведено в табл. 4.4. Як видно з цієї таблиці, різниця в температурах і питомих теплових енергіях фазового переходу на початку і в кінці термоциклювання незначна. Зокрема відносна зміна величини  $\Delta H_L$  позитивна і не перевищує 3 %.

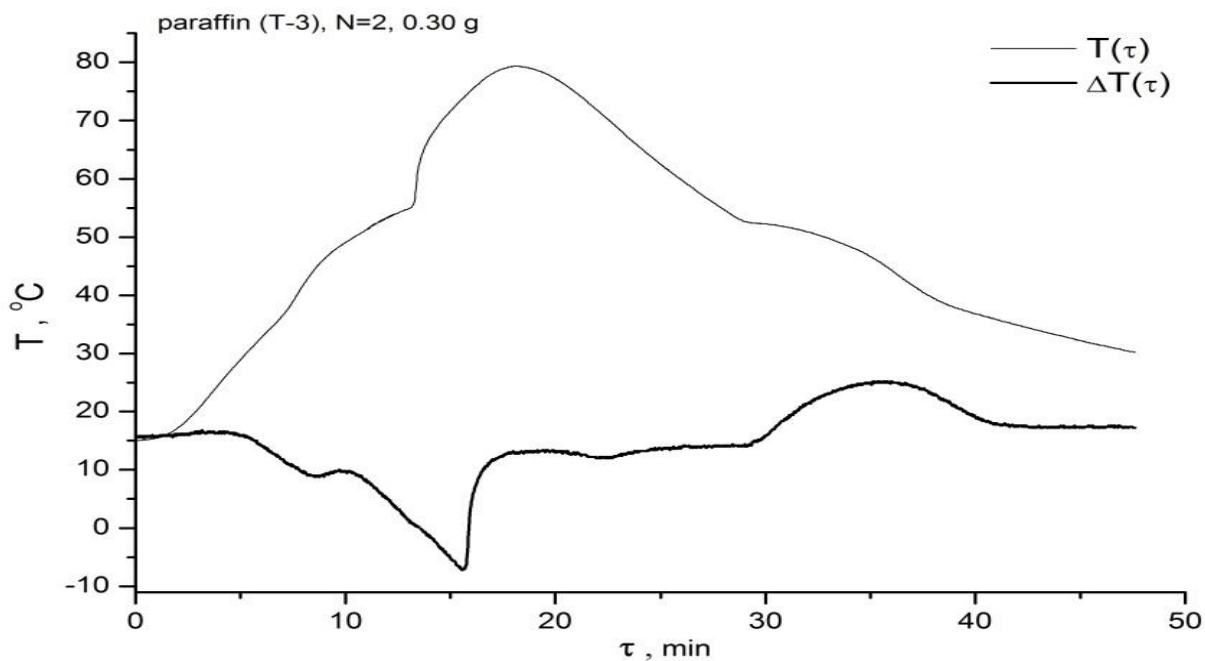
Таблиця 4.4

**Параметри плавлення і кристалізації парафіну марки Т-3,  
встановлені методом ДТА**

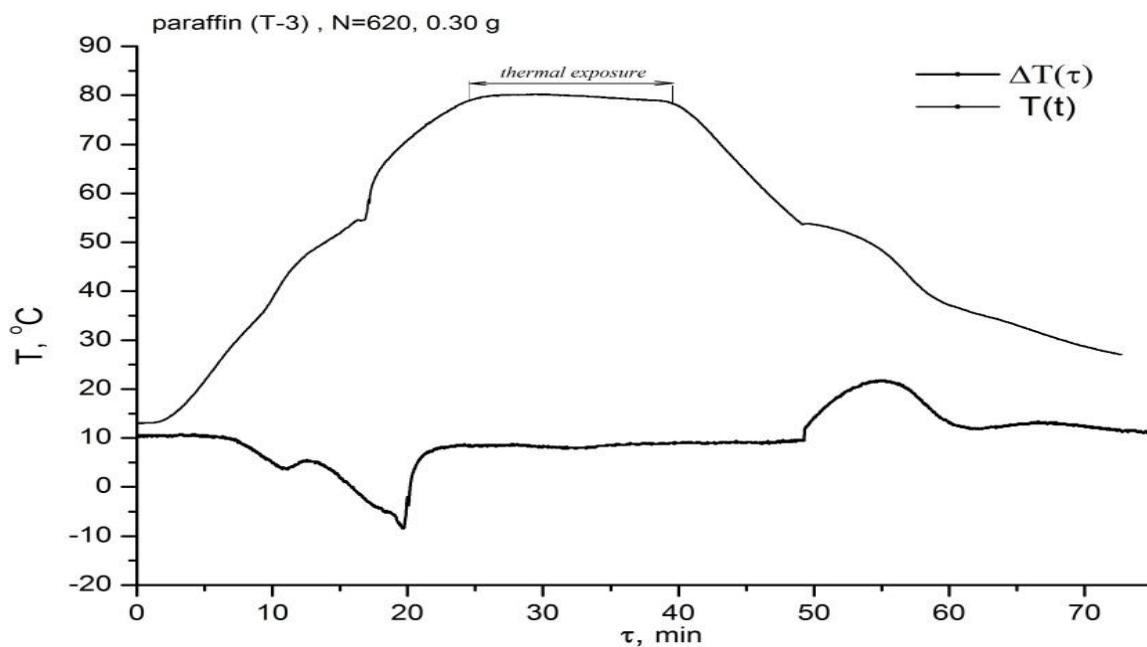
Номер термоциклу	Температура першого піку ендоефекту перед плавленням $T_x, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Температура плавлення $T_L, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Температура початку кристалізації $T_S, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Температура піку кристалізації $T_{Sm}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Переохолодження рідкої фази відносно $T_L$ при кристалізації ( $\Delta T = T_L - T_m$ , $T_m$ – мінімальна температура переохолодженої рідкої фази) $\Delta T, \text{ K}$	Питома теплота плавлення $\Delta H_L, \text{ кДж/кг}$
2	33,0	55,5	53,0	50,0	2,5	130
620	35,0	54,5	52,5	49,0	2,0	134

Таким чином у процесі дослідження було визначено:

1. Для створення оптимального мікроклімату в кабінах машиністів при прогріві теплового двигона можливе використання теплових акумуляторів фазового переходу.



а



б

Рис. 4.4. Криві ЦТА і ДТА, що характеризують плавлення і кристалізацію парафіну марки Т-3 в 2-му (а) і 620-му (б) термоциклах

2. Запропоновано і реалізовано експериментальну установку з теплоаккумулятором, призначену для вивчення поведінки теплоакumuлюючого матеріалу в умовах, близьких до реальних, а також з'ясування оптимальних умов експлуатації.

3. У якості ТАМ запропоновано парафін марки Т-3, для якого термічними методами аналізу встановлено таке:

- повне розплавлення відбувається в середньому при температурі  $T_L = 55$  °С, що відповідає даним, заявленим ГОСТ, а кристалізація відбувається в інтервалі  $53 \div 49$  °С з незначним переохолодженням рідкої фази ( $1,5 \div 2,5$  К) відносно  $T_L$ ;

- питома теплота плавлення  $\Delta H_L \approx 130$  кДж/кг;

- більше шестисот термоциклів плавлення і кристалізації не мають помітного впливу на параметри  $T_L$ ,  $T_S$  і  $\Delta H_L$ .

#### **4.2. Дослідження процесів акумулювання теплоти на основі фазових переходів у матеріалах для використання в багатосекційному тепловому аккумуляторі капсульного типу при прогріві ДВЗ тягового рухомого складу**

Після пуску двигуну внутрішнього згорання (ДВЗ) потрібен деякий час на прогрів до температур початку його роботи під навантаженням. На це витрачається значна кількість пального, що погіршує економічні показники його експлуатації і викликає суттєве забруднення навколишнього середовища. На сьогодні відомі системи передпускового прогріву двигуна внутрішнього згорання від зовнішнього джерела енергії, коли теплоносій нагрівається поза тепловозом, а потім подається в систему охолодження двигуна, або картер двигуна прогривається за рахунок зовнішнього джерела електричної енергії. Такий спосіб прогріву хоча й економить пальне, але для прогріву використовується додаткова енергія. Окрім того, такий передпусковий прогрів можливий тільки при встановленні засобів тягового рухомого складу біля джерел зовнішньої енергії. Якщо тепловоз або дизель-поїзд розташований на відстані, його необхідно транспортувати до місця енергозаряджання.

У зв'язку з цим доцільною є реалізація системи рекуперації, яка передбачає наявність бортового акумулятора теплової енергії, де теплота накопичується за рахунок теплообміну з відпрацьованими газами під час роботи ДВЗ, зберігається під час зупинки з непрацюючим ДВЗ і реалізується перед пусковим режимом. Така схема більш ефективна, оскільки не вимагає додаткової енергії і палива на прогрів двигуна.

Необхідна кількість теплової енергії, що підводиться в циклі прогріву, залежить від маси елементів, що прогриваються, температурного діапазону прогріву, тривалості режиму і ККД використовуваного джерела тепла. У циклі охолодження енергія витрачається лише на привод циркуляційних насосів. Знизити втрати палива можливо за рахунок зменшення часу роботи дизеля в режимі прогріву. При цьому застосовуються теплоізоляція, додаткові циркуляційні електричні насоси, додатковий електричний водогрійний котел, який живлять від головного або допоміжного генератора працюючої секції тепловоза, що прогривається.

Використання багатосекційного теплового акумулятора (БТА) як джерела теплової енергії дозволяє створити широкий клас енергетичних установок різного типу і цільового призначення. Оскільки БТА є пристроєм, що дозволяє накопичувати, консервувати і віддавати теплову енергію, то очевидно, що типи БТА також можуть бути різними. Особливий інтерес представляють установки утилізації теплоти на базі БТА з подальшим її перерозподілом на різні технічні потреби.

Найбільшого поширення в конструктивних схемах теплових акумуляторів для передпускової підготовки двигунів транспортних засобів отримали конструкції капсульного типу. Важливим аспектом ефективної роботи багатосекційного теплоакумулятора є правильний вибір складу і кількості теплоакумуляуючого матеріалу його секцій. Дослідження проводили в умовах лабораторії кафедри «Рухомий склад залізниць» ДонІЗТ з використанням існуючого технологічного обладнання. Для перевірки і обґрунтування вибору теплоакумуляуючих матеріалів для наповнення секцій БТА були проведені дослідження, що поєднують аналіз деяких речовин, які можливо використовувати в якості наповнювача його секцій, дослідним шляхом визначено їх питому тепломісткість у робочому діапазоні температур.

Оскільки діапазон робочих температур досить значний (від  $-40$  до  $+500$  °С (до  $600$  °С) - від мінімальної температури взимку до робочої температури відпрацьованих газів двигуна тепловоза при його роботі), вирішено температурний діапазон розділити не менш ніж на 2 піддіапазони:  $-40$  до  $+200$  °С і  $+200$  до  $+500$  °С, а теплоаккумулятор зробити секційним і обладнати теплообмінником. Секція першого діапазону матиме тепловий контакт безпосередньо з теплоносіями ДВЗ, а друга секція – з відпрацьованими газами. Тепло, що витрачається першою секцією на прогрів ДВЗ, буде компенсуватися тепловим потоком з другої секції.

Для показаних температурних діапазонів були обрані теплоакмулюючі речовини з таким розрахунком, щоб у показаному діапазоні температур вони мали температури фазових переходів і були хімічно стійкими. Це гідрокінон і їдкий натр (див. табл. 4.5).

Для дослідження їх теплоенергетичних характеристик було виготовлено фізичну модель теплового акумулятора, виготовлено та повірено термопари, підбрано нагрівальне і вимірювальне обладнання, здійснено їх опробування. Фізична модель являє собою герметичну капсулу трубчастого типу, куди поміщали теплоакмулюючу речовину, температуру якої вимірювали термопарою, яка поміщається в оболонку, що має безпосередній тепловий контакт з теплоакмулюючою речовиною. Капсула в зборі з термопарою зображена на рис. 4.5.

Збирали капсулу таким чином. Спочатку ємність капсули заповнювали теплоакмулюючим матеріалом (на весь об'єм ємності). Потім матеріал висипали та зважували; відбирали від розважування 10 % за масою; залишок засипали до капсули. Така методика дозволяє залишити після герметизації прошарок повітря для зменшення тиску при нагріві. Після цього різьби змазували герметизуючим матеріалом (розчин рідкого скла і тальку у співвідношенні 1:1 за масою) і формували різьбові з'єднання з натягом. Для додаткової герметизації між оболонкою термопари та кришкою капсули закладали мідну шайбу.

**Основні властивості обраних теплоакумулюючих речовин**

Параметр	Теплоакумулююча речовина	
	Гідрохінон	Їдкий натр
Діапазон робочих температур, °С	- 40 ... + 200	+ 200 ... + 500
Хімічна формула	$C_6H_4(OH)_2$	NaOH
Молярна маса, г/моль	110	39,997
Густина, г/м <sup>3</sup>	1,3	1,59
Температура плавлення, °С	172	323
Температура кипіння, °С	287	1403

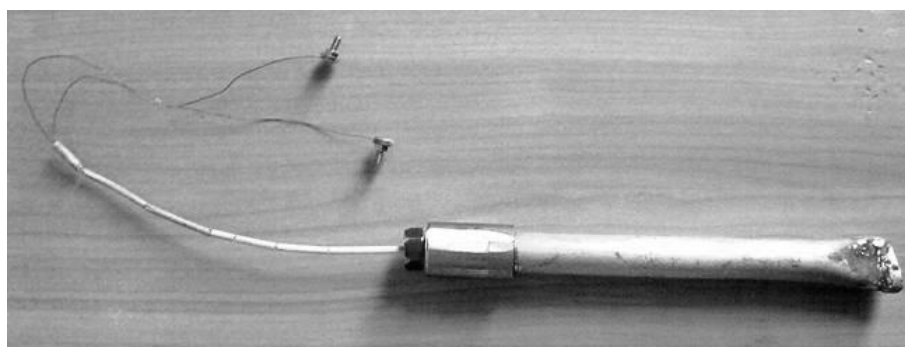


Рис. 4.5. Зовнішній вигляд фізичної моделі теплового акумулятора з термопарою

Після збирання та герметизації капсула з теплоакумулюючою речовиною розміщувалась у нагрівальній печі. Схема розміщення фізичної моделі та термопар у нагрівальній печі наведена на рис. 4.6. Для відокремлення характеристик теплоакумулюючої речовини здійснювали порівняльний нагрів цієї ж пустої капсули (без речовини).

Нагрів проводили до температури, вищої за температуру плавлення теплоакумулюючих матеріалів. Після набуття капсулою необхідної температури капсулу з термопарою виймали з печі та охолоджували в умовах спокійного повітря на спеціальній керамічній підставці.



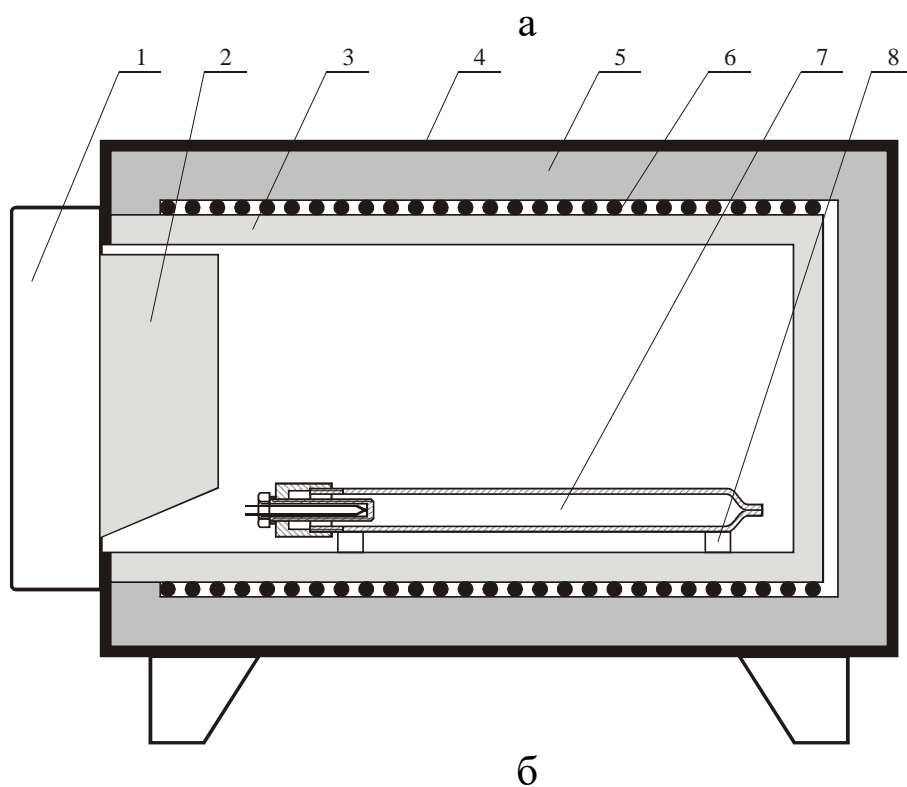
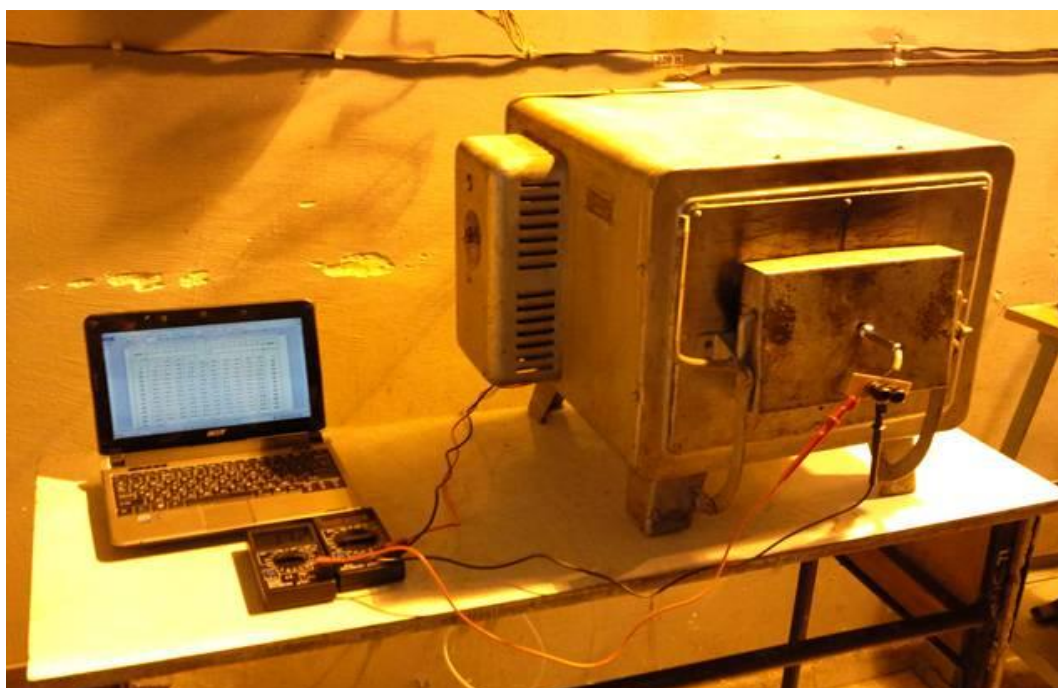


Рис. 4.6. Лабораторний комплекс для проведення експериментальних досліджень: а – зовнішній вигляд лабораторного комплексу для проведення експерименту; б – схема розташування капсули в робочому просторі печі: 1 – кришка печі; 2 – теплоізолююча вставка кришки; 3 – муфель; 4 – сталевий корпус; 5 – утеплювач; 6 – дровий нагрівач; 7 – капсула; 8 – керамічні підставки

Після перевірки апаратного забезпечення визначали теплові параметри капсули без теплоакумулюючих речовин.

Головною метою проведення експериментів є визначення даних про кількість теплової енергії, що отримують теплоакумулюючі речовини при нагріві й охолодженні. Безпосередньо виміряти кількісні показники теплової енергії в умовах проведення запланованих експериментів не є можливим, ці параметри знаходили розрахунковим шляхом на основі графіків нагріву та охолодження капсул з теплоакумулюючою речовиною. Для проведення розрахунків накопиченої капсулою енергії була обрана залежність

$$Q = N_T \cdot \tau, \quad (4.1)$$

де  $N_T$  – потужність теплового потоку, Вт;

$\tau$  – час дії теплового потоку, с.

У свою чергу потужність теплового потоку можливо розрахувати за формулою

$$N_T = q \cdot S, \quad (4.2)$$

де  $q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$S$  – площа теплопередачі між поверхнею капсули та зовнішнім повітряним простором, м<sup>2</sup>.

Густина теплового потоку в конкретний момент часу визначається за формулою

$$q = \alpha \cdot (t_K - t_{\Pi}), \quad (4.3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні капсули до навколишнього повітря (з довідника)  $\alpha = 62,4$  Вт/(м<sup>2</sup>· К);

$t_K$  – температура капсули, °С;

$t_{\Pi}$  – температура навколишнього повітря, °С.

Оскільки в процесі охолодження температура капсули постійно змінюється нелінійно, вирішено розрахунки вести для умовно дискретного процесу, замінюючи монотонну криву на ступінчасту залежність.

Спочатку визначали температурно-годинні параметри капсули без теплоакумулюючої речовини, для того щоб у наступних дослідженнях капсули з речовиною можливо було відокремити теплоенергетичні показники капсули та залишити тільки параметри речовини.

У рамках цього експерименту здійснено спробу створити постійну температуру навколишнього середовища (повітря) як при нагріві, так і при охолодженні капсули. Для цього термічну піч спочатку прогрівали до температури  $500^{\circ}\text{C}$ , виконували ізотермічну витримку та розміщували в печі капсулу з термопарою. Постійна температура підтримувалась за рахунок штатного регулятора релейного типу, що працює на основі термодформації біметалевої пластини. Після досягнення заданої температури ( $510^{\circ}\text{C}$ ) капсулу виймали з печі та охолоджували на спеціальній підставці в умовах спокійного повітря. Температура навколишнього повітря була постійною та складала  $19^{\circ}\text{C}$ .

Результати вимірювання температур подано в графічному вигляді на рис. 4.7.

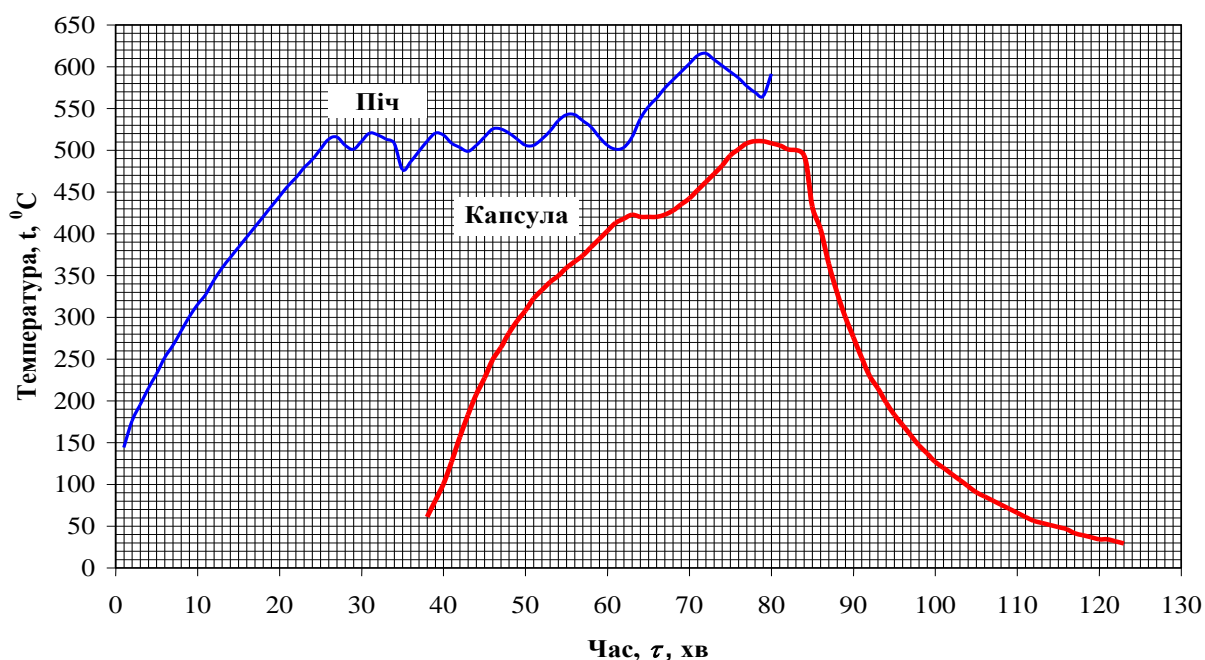


Рис. 4.7. Зміни температури печі та капсули без термоакумулюючої речовини

Як впливає з отриманих даних, спроба створити ізотермічні умови в робочому просторі печі не дали бажаного результату: коливання температури через температурну інерційність і низьку точність штатного регулятора доволі значні. Це позначилось на графіку нагріву капсули, на якому наявні проміжки, де крива нагріву переходить з монотонної на немонотонну. Але вони дозволили зімітувати, як може вести себе речовина БТА при коливаннях температур в умовах експлуатації двигуна.

Зважаючи на цю обставину, до розрахунків теплових параметрів брали тільки ту частину даних, що стосуються процесу охолодження капсули, температура якої на усьому проміжку монотонно знижується. Розрахунки проводили відповідно до методики, наданої в роботах [84-92].

Площу поверхні капсули,  $m^2$ , розраховували за формулою

$$S_K = S_{TP} + S_{KP1} + S_{KP2} + S_{KP3} + S_{GB}, \quad (4.4)$$

де  $S_{TP}$  – площа поверхні трубчастої частини тіла капсули;

$S_{KP1}$  – площа торцевої поверхні кришки, що спрямована до трубчастої частини тіла капсули;

$S_{KP2}$  – площа бокової поверхні кришки;

$S_{KP3}$  – площа торцевої поверхні кришки, що спрямована від трубчастої частини тіла капсули;

$S_{GB}$  – площа бокової поверхні головки кришки.

З урахуванням геометричних параметрів капсули площа її поверхні становила  $0,0156 m^2$ . Таким чином, за формулами (4.1) ... (4.3) енергія, що віддана капсулою без теплоакumuлюючої речовини при її охолодженні від температури  $508^\circ C$  до температури  $30^\circ C$ , дорівнює  $412,5 kJ$ .

При проведенні експерименту з гідрохіноном капсулу з цією речовиною нагрівали разом з пичю. Оскільки верхня температура нагріву гідрохінону обмежувалася відносно низькою температурою кипіння ( $287^\circ C$ ) (див. табл. 4.5), для запобігання перегріву нагрів печі здійснювали східчасто з відносно великими перервами між циклами нагріву. Охолодження проводили аналогічно попередньому експерименту. Температура

навколишнього повітря становила  $t_{\text{п}} = 19^{\circ}\text{C}$ . Маса гідрохінону, що розмістили в капсулі, становила  $M_{\text{г}} = 18\text{ г}$ . Результати вимірювання температур подано в графічному вигляді на рис. 4.8.

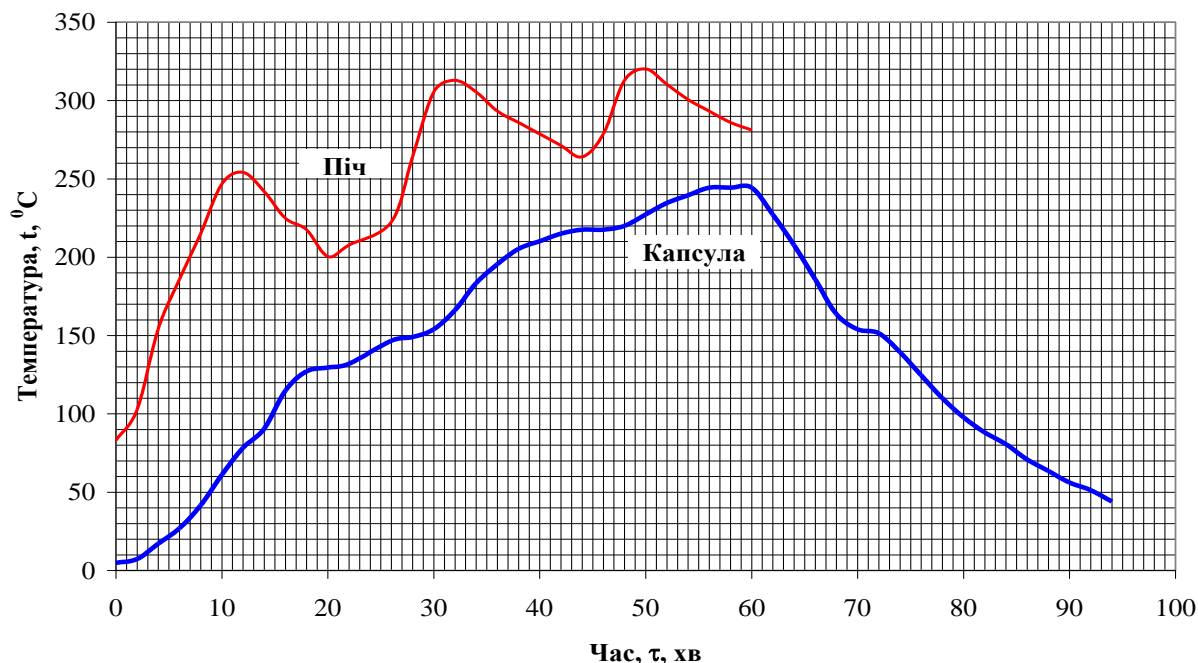


Рис. 4.8. Зміни температури печі та капсули з гідрохіноном

Як впливає з наведеного графіка, ступінчастий характер нагріву термічної печі суттєво позначився на характері зміни температури капсули, що підтверджує правильність вибору розрахунку енергетичних параметрів тільки при охолодженні на повітрі з приблизно стаціонарною температурою зовнішнього середовища.

На графіку як при нагріві, так й при охолодженні виразно можна побачити площадки, що співпадають з фазоагрегатним перетворенням (плавлення при нагріві та кристалізація при охолодженні).

Як впливає з наведених даних, температурний інтервал охолодження капсули з гідрохіноном, що був зареєстрований, становить від  $244$  до  $44^{\circ}\text{C}$ . Для того щоб оцінити внесок гідрохінону в загальний енергетичний баланс, треба відокремити від енергетичних показників тепловий ефект самої капсули.

Це можна зробити на підставі даних, що стосуються охолодження капсули без теплоакумуючої речовини для аналогічного температурного інтервалу. Ці дані наведено на рис. 4.7. Еквівалентну енергію пустої капсули знаходимо зі співвідношення

$$Q_E = Q_{T_k} - Q_{T_n}, \quad (4.5)$$

де  $Q_{T_k}$  – теплова енергія, віддана капсулою при охолодженні до кінцевої температури обраного діапазону;

$Q_{T_n}$  – теплова енергія, віддана капсулою при охолодженні до початкової температури обраного діапазону.

Підставляючи у формулу (4.5) дані експерименту, знаходимо, Дж:

$$Q_E = 405,89 - 283,06 = 122,8. \quad (4.6)$$

Звідси випливає, що теплова енергія, накопичена гідрохіноном, буде дорівнювати для даного діапазону температур, Дж:

$$Q_G = Q_{K_k} - Q_E = 222,03 - 122,8 = 99,2. \quad (4.7)$$

Оскільки відома маса теплоакумуючої речовини, можна знайти питому енергію гідрохінону для роботи в обраному інтервалі температур, МДж/кг:

$$q_G = \frac{Q_G}{m_G} = \frac{99,2}{0,018} = 5,5, \quad (4.8)$$

де  $m_G$  - маса гідрохінону, що була задіяна в експерименті, кг.

Ідентичні методики застосовували для визначення енергетичних параметрів теплоакумуючої речовини для високотемпературного акумулятора теплової енергії – NaOH. Маса їдконого натру в капсулі склала 16 г.

Результати нагріву й охолодження капсули з їдким натром надані в графічному вигляді на рис. 4.9. Для даних результатів характерна наявність чітко виражених площадок як на графіку нагріву, так і на графіку охолодження, що пов'язані з плавленням і кристалізацією відповідно. Обраний температурний діапазон охолодження для капсули з їдким натром становить від 533 до 49 °С. При охолодженні у спокійному повітрі капсула віддала в навколишній простір 508,9 кДж теплової енергії. У свою чергу капсула без теплоакумулюючої речовини віддала в тому самому температурному діапазоні 404,2 кДж. Підставляючи в формулу (4.7) ці дані, отримуємо, кДж:

$$Q_{\Gamma} = Q_{Kk} - Q_E = 508,9 - 404,2 = 104,7. \quad (4.9)$$

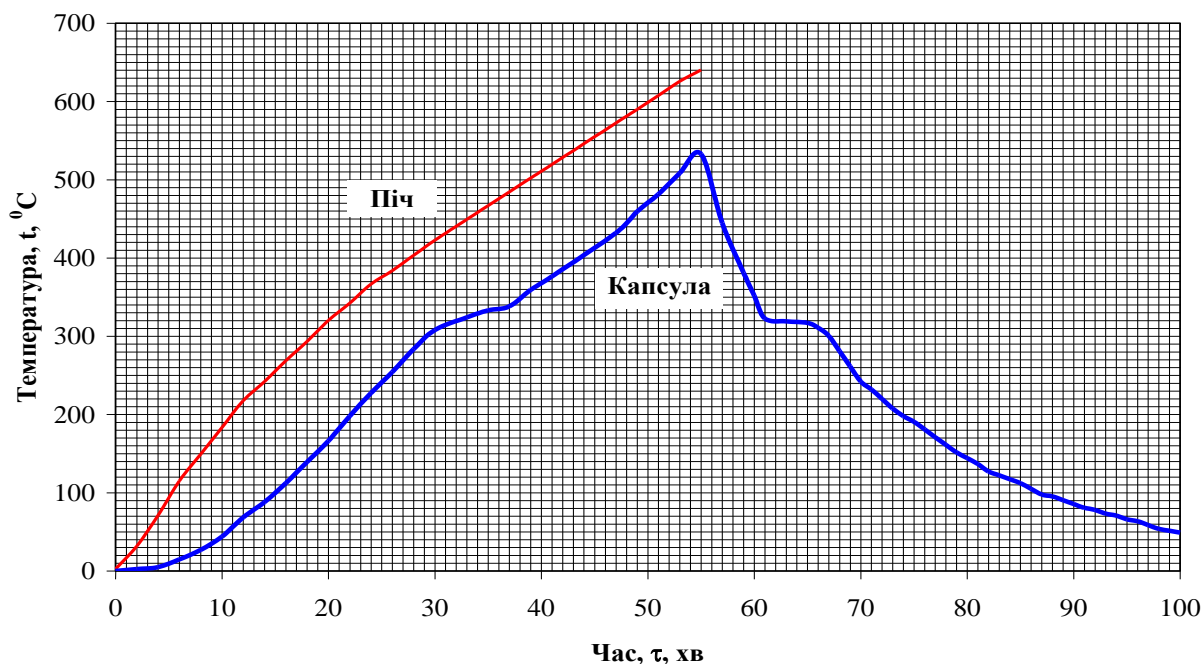


Рис. 4.9. Зміна температури печі та капсули з їдким натром

За формулою (4.8) питома енергія, що її накопичує їдкий натр при нагріві, становить, МДж/кг,

$$q_{\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma}}{m_{\Gamma}} = \frac{104,6}{0,016} = 6,54.$$

Таким чином, для розрахунку необхідної кількості теплоакumuлюючого матеріалу необхідно знати, яку енергію слід витратити для прогріву конкретного двигуна внутрішнього згорання у холодний період року до температур початку роботи одразу після пуску. Розрахунок необхідної маси речовини здійснюється за формулою

$$M_p = \frac{Q_{\text{нп}}}{q_p \cdot \eta_T}, \quad (4.10)$$

де  $Q_{\text{нп}}$  - енергія, яку необхідно витратити для прогріву конкретного двигуна внутрішнього згорання у холодний період року до температур початку роботи ДВЗ, Дж;

$q_p$  - питома енергія теплоакumuлюючого матеріалу, Дж/кг;

$\eta_T$  - ККД системи рекуперації теплової енергії в режимі прогріву двигуна внутрішнього згорання.

Запропонована методика може бути використана при визначенні технологічних параметрів багатосекційних теплових акумуляторів при формуванні їх секцій виходячи з параметрів матеріалів, що плануються для використання. Результати, отримані при визначенні необхідної кількості теплоакumuлюючого матеріалу, добре погоджуються з результатами, отриманими іншими способами.

### **4.3. Дослідження процесів акумулювання теплоти на основі фазових переходів у матеріалах для використання в тепловому акумуляторі при передпусковому прогріві стаціонарного двигуна в умовах низьких температур**

На сьогодні розвиток двигунобудування здійснюється в умовах екологічних і економічних вимог, що постійно підсилюються та призводять до підвищення складності конструкції дизелів, зокрема систем охолодження і мащення. Це накладає специфічні вимоги до процесу експлуатації двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), особливо в умовах несталих температурних і навантажувальних режимів роботи. При



експлуатації ДВЗ в умовах низьких температур виникає проблема їх стійкого і безаварійного пуску, а також підготовки до прийняття навантаження при виконанні штатних режимів, тобто прогріві їх до відповідної температури. Тому виробники сучасних енергетичних установок рекомендують комплектувати ДВЗ агрегатами, що забезпечують теплову підготовку їх двигунів.

Ефективність встановлення і використання подібної техніки значною мірою залежить від часу, що витрачається на допоміжні операції. Однією з таких операцій є передпускова підготовка ДВЗ, особливо для дизелів і двигунів із використанням альтернативних палив, яка включає в себе комплекс заходів, що забезпечують упевнений і безпечний пуск двигуна і підготовку його до прийняття навантаження. Так, особливістю сучасних дизелів, що задовольняють вимоги EURO II і вище, є те, що їх експлуатація без передпускової підготовки при температурах навколишнього середовища  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  і нижче заборонена заводами, де вони виготовляються. Пов'язано це з тим, що тільки при такій мінімальній температурі двигуна, і особливо моторного масла в картері, забезпечується належна робота всіх систем, зокрема системи мащення.

Засоби теплової підготовки, що застосовують у нашій країні, не забезпечують виконання таких жорстких вимог за часом розігрівання двигуна до приймання навантаження. При використанні традиційних методів передпускової підготовки не надається належна увага рівномірності розігріву картерного масла, що врешті-решт призводить до обмеження його перетікання через з'єднання двигуна при запуску і прогріві до відповідної температури. Все це дуже суттєво погіршує експлуатаційні якості ДВЗ і перешкоджає реалізації закладених заводом показників їх надійності.

Дизельні двигуни залізничного, річкового, морського транспорту, приводні двигуни стаціонарних енергетичних установок згідно з організацією їхньої роботи у великій кількості щодоби виводяться в 6-12-годинний «гарячий відстій». Організація роботи вище названих двигунів пов'язана з періодичним виділенням їх у режим «гарячого відстою». Для забезпечення цього при температурах повітря нижче  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  довгострокове підтримання додатної температури води в системі

охолодження ДВЗ досягається, як правило, його роботою на холостому ході. При цьому витрачається значна кількість палива, яке на сьогодні вже має високу вартість, а в подальшому стає все більш дорогим і дефіцитним.

Пуск двигуна - необхідна умова роботи будь-якої енергетичної установки. Організація пуску завжди вимагає додаткового устаткування, ускладнення і удорожчання двигуна, додаткового технічного обслуговування його, а проведення пуску завжди супроводжується скороченням моторесурсу, перевитратою палива, підвищеними викидами токсичних компонентів. Особливо складним, таким, що супроводжується не тільки зниженням моторесурсу, але й небезпекою аварії, є «холодний» пуск, тобто пуск непрогрітого двигуна в умовах знижених температур навколишнього повітря. Пускові якості двигунів оцінюються граничною температурою надійного пуску і часом, необхідним для підготовки ДВЗ до прийняття навантаження. При знижених температурах самого двигуна і навколишнього середовища пуск ускладнюється, надійність пуску істотно знижується, а час підготовки до прийняття навантаження зростає. Ці характеристики залежать від конструктивних і експлуатаційних показників ДВЗ: ступеня стиску, параметрів подачі палива при пуску, моменту опору обертанню вала двигуна, потужності електропускової системи, марок застосовуваних палив і олів тощо. Гранична температура надійного пуску суттєво залежить від пускових обертів - частоти прокручування колінчастого вала. Ця частота у «холодного» двигуна знижується, тому що зростає опір прокручуванню вала, знижується ємність акумуляторних батарей, знижуються тиск і температура повітря в циліндрі наприкінці стиску. У цих умовах виникають проблеми з запалюванням і, особливо, з самозапалюванням горючої суміші.

Метою роботи [69] було підвищення ефективності пуску стаціонарного двигуна в умовах низьких температур за допомогою теплового акумулятора (ТА) фазового переходу, що працює у складі системи регулювання температури охолоджуючої рідини поршневого двигуна електроагрегату з утилізацією теплоти, розроблення установки для експериментальних досліджень теплових акумуляторів з різними

теплоакумуючими матеріалами і самого теплового акумулятора фазового переходу, а також отримання експериментальних даних щодо часу заряджання теплового акумулятору залежно від зміни температури самого теплоносія та часу розряджання залежно від швидкості циркуляції теплоносія в контурі ТА при відбиранні теплоти.

Найбільш ефективним способом підвищення показників ефективності пуску, а саме систем теплової підготовки ДВЗ, є вдосконалення способу підведення теплового потоку до двигуна в комплексі з утилізацією теплової енергії відпрацьованих газів. Використовувати температуру відпрацьованих газів (ВГ) ДВЗ перед її потраплянням у систему охолодження й мащення двигуна за допомогою утилізаційної системи, і тим самим підвищити ефективність його пуску, можливо при використанні принципів акумулювання теплоти. Найбільш доцільним для досягнення зазначеної мети є застосування теплового акумулятора (ТА) з прихованою теплотою фазового переходу (плавлення-затвердіння) теплоакумуючих матеріалів. Такий спосіб забезпечує високу густину енергії, що запасується, при невеликих перепадах температур на виході з ТА.

Для підтвердження викладених вище положень на кафедрі „Рухомий склад залізниць” Донецького інституту залізничного транспорту (ДонІЗТ) були проведені відповідні експериментальні дослідження. Насамперед була розроблена система регулювання температури охолоджуючої рідини газопоршневого електроагрегату з утилізацією теплоти з тепловим акумулятором, удосконалена схема системи охолодження двигуна внутрішнього згорання для цієї системи, було розроблено конструкцію теплового акумулятора (ТА).

Так, тепловий акумулятор із ТАМ фазового переходу було розроблено і виготовлено на кафедрі „Рухомий склад залізниць” ДонІЗТ і проведено його дослідження у складі моторної установки з дизелем К461М1 в лабораторії рухомого складу ДонІЗТ і у складі моторної установки з газовим двигуном К159М2 в ІГ НАНУ (рис. 4.10). Корпус ТА виконано з нержавіючої сталі й він має одну основну секцію з теплообмінником, що виготовлено з латуні. У корпусі ТА є два патрубки, з'єднані з компенсаторами теплового розширення ТАМ

і входом термопар. Для зменшення газодинамічного опору потоку газів вхідні і вихідні патрубки мають конічні перехідники. З метою зниження втрат теплової енергії в процесі випробувань зовнішня поверхня ТА була теплоізольована подвійним шаром спіненого поліетилену, покритим із двох боків шарами алюмінієвої фольги (рис. 4.10). Загальний вигляд дослідного ТА фазового переходу, що встановлений в СКП на дослідних ДВЗ, показано на рис. 4.11.

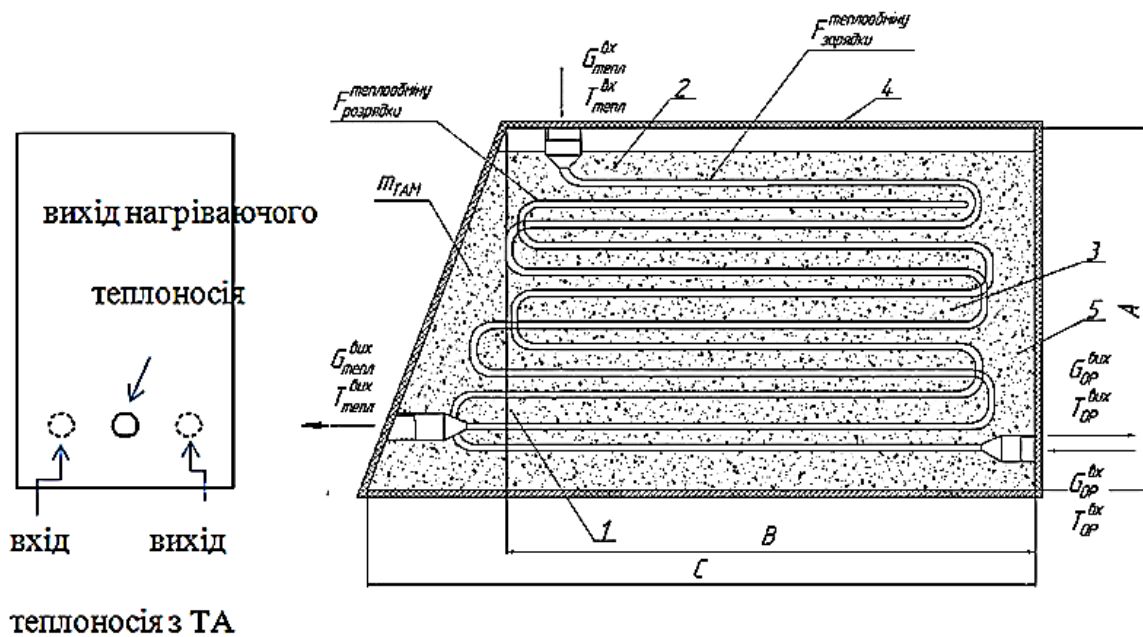


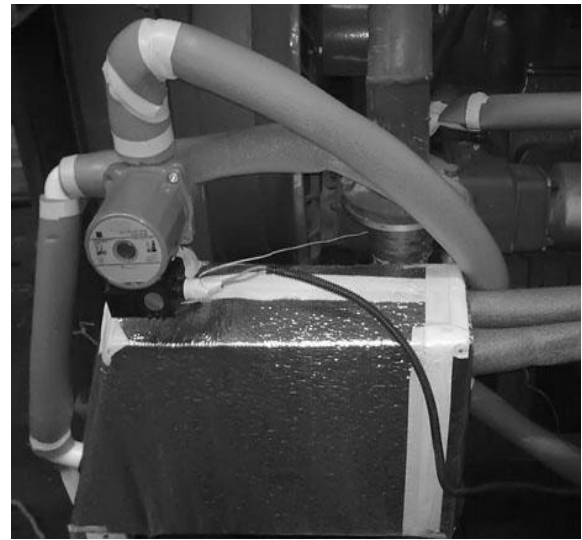
Рис. 4.10. Принципова схема ТА: 1, 2, 3 – місця встановлення термопар; 4 – шар теплової ізоляції ТА; 5 - теплоакumuлюючий матеріал

Теплоакumuлюючим матеріалом ТА було обрано поліетилен високої густини. Це було виконано з наступних міркувань.

По-перше, при формуванні ТА і виборі ТАМ для нього користувались досвідом, відомим з попередніх досліджень Н.Н. Карнаухова, В.В. Шульгіна, В.С. Кукіса, Л.А. Ніколаєва, П.А. Крамаренка, Є.І. Гуліна, С.Д. Гуліна, В.Д. Александрова, І.О. Вашуркіна, В.А. Романова, В.М. Ложкіна тощо.



а



б

Рис. 4.11. Загальний вигляд теплового акумулятора, встановленого в СКП на дослідних ДВЗ: а – дизель К461М1; б – газовий двигун К159М2

По-друге, розроблення і виготовлення ТА викликає труднощі, обумовлені їхніми великими масогабаритними показниками через прагнення одержати великий енергетичний потенціал теплоакumuлюючих засобів, що розрахований на низькотемпературні умови охолоджуючої рідини й оливи двигуна. Результати проведених досліджень показують, що такий підхід до створення ТА і відповідних СКП не є виправданим.

Характеристики умов експлуатації, і насамперед температура навколишнього середовища, змінюючись випадково, можуть досягати низьких значень, але ймовірність їх появи протягом зимового періоду невелика. Прагнення за будь-яку ціну забезпечити нормальний пуск і роботу двигуна в таких умовах призводить до того, що розроблювана СКП орієнтується на малоїмовірні досить жорсткі кліматичні впливи (низькі температури, тривалі міжзмінні зупинки тощо). Цим і визначається великий і не часто затребуваний тепловий потенціал теплоакumuлюючих засобів ВГ ДВЗ в СКП. Спроби зменшити масогабаритні показники системи утилізації теплової енергії (СУТТА) ВГ і ТА без прийняття додаткових конструктивних рішень можуть призвести до зниження надійності підготовки двигуна до пуску й не вирішують проблеми теплової підготовки у важких кліматичних умовах і потребують використання

високоєфективних і надійних матеріалів (враховуючи основні вимоги до ТАМ). При виборі ТАМ аналізували не тільки будову ТА, принцип його дії, але й технологію процесу накопичення й витрати теплової енергії, етапи прогріву ДВЗ. Також були регламентовані температурні межі застосування в СКП води й антифризу. Запропоновано початкові значення температури рідкого теплоносія (води або антифризу), що засновані на досвіді попередніх розробників. Зокрема початкова температура води або антифризу в СОД перед прогрівом ДВЗ за умови подачі гарячого теплоносія з СКП на вхід системи охолодження ДВЗ повинна становити  $\sim 110$  °С. Менші значення призведуть до не виправданого збільшення габаритів і маси ТА, а більші – недопустимі, тому що можуть пошкодити ДВЗ. Кінцеві температури рідини в СКП при заряджанні ТА обмежені відповідною конструкцією теплознімача ВГ, режимами роботи ДВЗ, температурою кипіння теплоносія - етиленгліколю в антифризі (197 °С) і робочим тиском у системі.

У досліджуваному тепловому акумуляторі фазового переходу в якості ТАМ було використано поліетилен низького тиску (високої густини). Залежно від способу одержання розрізняють поліетилен високого тиску, або низької густини (мол. маса  $3 \cdot 10^4$ - $4 \cdot 10^5$  а.о.м.), і низького тиску, або високої густини (мол. маса  $5 \cdot 10^4$ - $1 \cdot 10^6$  а.о.м.). Вони відрізняються один від одного структурою макромолекул (наявністю в поліетилені високого тиску довголанцюжкових відгалужень), а отже, і властивостями (див. табл. 4.6). Ступінь кристалічності поліетилену високого тиску – 60 %, а поліетилену низького тиску – 70-90 %. Поліетилен має низькі значення газо- і паропроникнення (найменші - для сильно полярних речовин, найбільші - для вуглеводнів). Хімічна стійкість в основному залежить від молекулярної маси й густини. Поліетилен не реагує з лугами будь-якої концентрації, з розчинами будь-яких солей, у т.ч. і солей-окисників, карбонівими, концентрованою соляною і плавиковою кислотами. Він руйнується 50 – відсотковою азотною кислотою ( $\text{HNO}_3$ ), а також рідкими й газоподібними  $\text{Cl}_2$  і  $\text{F}_2$ . Бром і йод через поліетилен дифундують. Поліетилен не розчинний в органічних розчинниках при кімнатній температурі й обмежено набухає в них.

Поліетилен стійкий при нагріванні у вакуумі й атмосфері інертного газу; руйнується при нагріванні на повітрі вже при 80 °С. Під дією сонячної радіації, особливо ультрафіолетових променів, зазнає фотостаріння. Поліетилен практично нешкідливий. З нього не виділяються в навколишнє середовище небезпечні для здоров'я людини речовини.

Таблиця 4.6

**Фізико-механічні й електричні властивості поліетилену**

Показник	Поліетилен низького тиску	Поліетилен високого тиску
Густина, г/см <sup>3</sup>	0,913-0,930	0,910-0,968*
Температура плавлення, °С	103-110	124-137
Теплопровідність, Вт / (м <sup>2</sup> ·К)	0,33-0,36	0,42-0,52
$\sigma_{\text{розтягу}}$ , МПа	10-17	18-45
Границя текучості при розтягу, МПа	9-16	10-30
Відносне подовження, %	100-800	50-1200
Ударна в'язкість з надрізом, кДж/м <sup>2</sup>	Не зламується	2,0-45
Твердість, за Брінелем, МПа	17-25	49-68
Газопроникнення, м <sup>2</sup> ·с·Па:		
Н <sub>2</sub>	19,4 · 10 <sup>-10</sup>	19,9 · 10 <sup>-10</sup>
СО <sub>2</sub>	122,0 · 10 <sup>-10</sup>	21,4 · 10 <sup>-10</sup>
О <sub>2</sub>	27,6 · 10 <sup>-10</sup>	6,9 · 10 <sup>-10</sup>
$\epsilon$ при 1 МГц	2,2-2,3	2,2-2,4
$tg \delta$ при 1 МГц	(2-3) · 10 <sup>-10</sup>	(2-4) · 10 <sup>-10</sup>
$\rho$ , Ом·см	10 <sup>16</sup> - 10 <sup>17</sup>	10 <sup>16</sup> - 10 <sup>17</sup>

\* Нижня межа густини може бути знижена до 0,88, але при цьому поліетилен стає каучукоподібним.

Відомості про використання поліетилену в якості ТАМ зокрема наводяться в роботі [51], де йдеться про поліетилену з поперечними зв'язками, приводяться температура й питома тепла енергія плавлення поліетилену з поперечними зв'язками:  $T_L=110-115$  °С,  $\Delta H_L=125-146$  кДж/кг. Дана речовина є більш стабільною, ніж рідинно-тверді ТАМ, і може бути використана без капсулювання.

Технічна характеристика ТА фазового переходу наведена в табл. 4.7, а властивості теплоакумулюючого матеріалу - у табл. 4.8.

Більш детально роботу ТА фазового переходу можна подати у вигляді зміни ентропії і температури, використовуючи термодинамічні координати  $T-S$  (рис. 4.12, 4.13). У цьому випадку будь-яка точка на графічній площині відповідає певному стану робочого тіла, а лінії відображують якийсь термодинамічний процес. Особливістю  $T-S$  координат є те, що площа під лінією процесу відповідає кількості енергії, відданої або отриманої робочим тілом.

Таблиця 4.7

**Технічна характеристика ТА системи регулювання температури охолоджуючої рідини ДВЗ для привода дизель-електричного агрегату з утилізацією теплоти**

Найменування	Характеристика
Теплоакумулюючий матеріал	поліетилен високої густини (табл. 4.8)
Маса теплоакумулюючого матеріалу, кг	18,5
Маса теплового акумулятора з ТАМ, кг	32,75
Габаритні розміри ТА, мм	164x280x480
Теплоізолюючий матеріал	Подвійний спінений поліетилен, покритий з обох сторін двома шарами алюмінієвої фольги
Матеріал корпусу ТА	Нержавіюча сталь
Матеріал теплообмінника ТА	Латунь
Теплова ємність ТА, кДж/К	46,25



## Властивості ТАМ

Параметр	Характеристика
Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$ , $\rho_{тв} / \rho_p$	925 / 800
Температура фазового переходу, $\text{К} / ^\circ\text{C}$	408 / 135
Питома тепла енергія фазового переходу, $\text{кДж}/\text{кг}$	230
Питома теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , $c_{тв} / c_p$	2,5 / 3,3
Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , $\lambda_{тв} / \lambda_p$	0,25 / 0,04

Досліджувався процес передачі теплової енергії від теплоносія до ТАМ (режим заряджання ТА) і навпаки (режим розряджання ТА), використовуючи визначену систему координат. Розглянемо спочатку режим заряджання ТА (рис. 4.12). У цьому випадку теплоносієм, що потрапляє в ТА з теплообмінника ВГ, має температуру  $T^{II}_{ТЕП}$  (відповідну точці *a* на діаграмі), що перевищує температуру ТАМ -  $T^{II}_{ТАМ}$  (точка 1). Зауважимо, що при вказаній температурі ТАМ знаходиться у твердому стані ( $T_{там} < T_{там}^{нл}$ ). Весь запас теплової енергії, який теоретично можливо отримати від теплоносія у формі теплової енергії при його охолодженні від  $T^{II}_{ТЕП}$  до температури навколишнього середовища ( $T_{oc}$ ) при незмінному тиску (тобто за ізобарою *a-b*), відповідає (еквівалентний) на рис. 4.12 площі фігури *a-b-d-e-a*.

При проходженні потоку теплоносія через ТА фазового переходу деяка частина теплової енергії буде передаватися від теплоносія до теплоакумулюючого матеріалу ТА. На рис. 4.12 ця частина теплової енергії еквівалентна площі фігури *a-c-f-e-a*. При цьому температура теплоносія знизиться до  $T^K_{ТЕП}$  (точка *c*). У першому наближенні можна припустити, що вся тепла енергія, віддана теплоносієм, буде отримана ТАМ. У результаті цього теплоакумулюючий матеріал ТА буде нагріватися. Спочатку при практично незмінному обсязі ТАМ відбуватиметься нагрівання до початку плавлення (точка 2 на рис. 4.12). Це відповідає витраті

теплової енергії, що еквівалентна площі фігури, обмеженої точками 1-2-6-5-1 на рис. 4.12. Потім у результаті продовження підведення теплової енергії від теплоносія, весь ТАМ при незмінній температурі, що дорівнює температурі його плавлення, розширюючись, перейде в рідкий стан (точка 3).

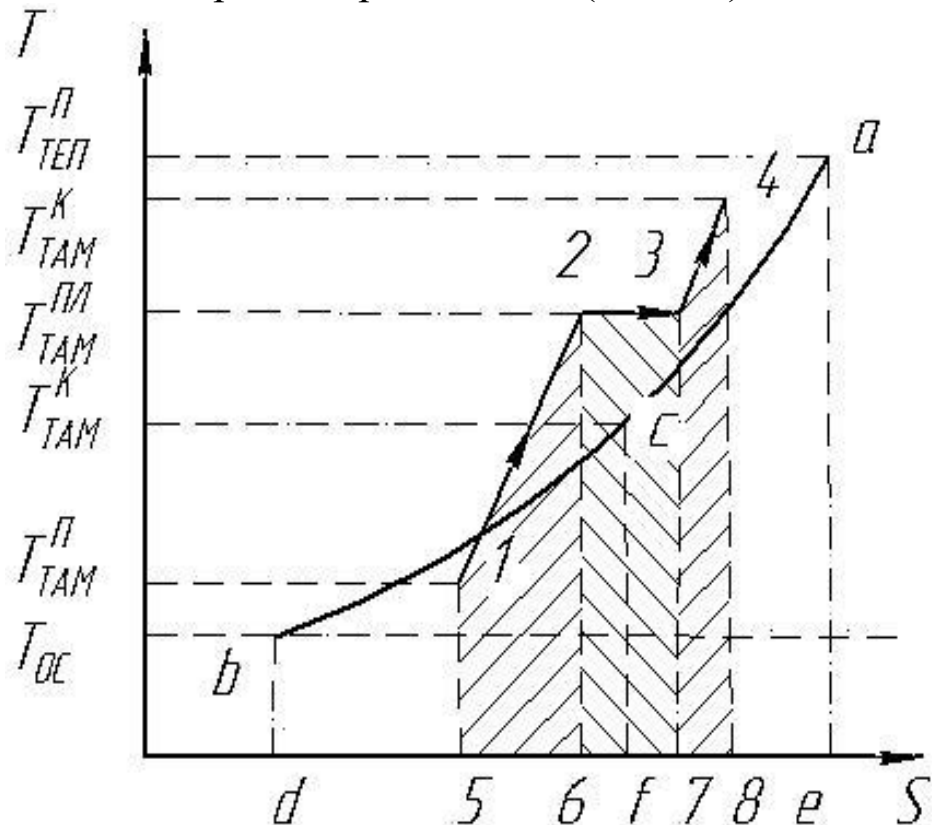


Рис. 4.12. Процес заряджання ТА фазового переходу в координатах  $T$ - $S$

На це витрачається тепла енергія, еквівалентна площі фігури 2-3-7-6-2. Далі ТАМ, отримуючи теплову енергію, еквівалентну площі фігури 3-4-8-7-3, при незмінному об'ємі нагрівається в рідкій фазі до кінцевої температури  $T_{ТАМ}^K$  (точка 4). Загальна кількість теплової енергії, яку отримує ТАМ в процесі накопичення, стає еквівалентною площі фігури 1-2-3-4-8-5-1 на діаграмі. При цьому рівняння  $Q_{ТАМ}^3 = Q_{ВГ}^3$  обумовлює рівність площ фігур 1-2-3-4-8-5-1 і  $a$ - $c$ - $f$ - $e$ - $a$ .

Розглянемо тепер режим розряджання теплового акумулятора (рис. 4.13). Охолоджуюча рідина надходить у ТА з температурою  $T_{ОР}^П$ , що відповідає точці  $a$  на рис. 4.13. Весь запас

енергії, який теоретично можливо отримати від ТАМ у формі теплової енергії при його охолодженні від  $T_{ТАМ}^П$  до температури навколишнього середовища  $T_{oc}$  при незмінному тиску (тобто за ізобарою  $a-b$ ), відповідає (еквівалентний) площі фігури  $a-c-d-f-a$  на рис. 4.13. Потрапляючи в ТА, охолоджуюча рідина нагрівається. Цей нагрів відбувається в результаті передачі їй відповідної кількості теплової енергії, яка на рисунку еквівалентна площі фігури 1-2-3-4-5-8-1. Частина цієї теплової енергії буде віддана охолоджуючій рідині двигуна (ОР) при охолодженні ТАМ від початкової температури  $T_{ТАМ}^П$  (точка 1) до початку твердіння (точка 2). Теплова енергія, відведена на ділянці 1-2, еквівалентна площі фігури 1-2-7-8-1 на рис. 4.13. Теплова енергія, відведена на ділянці 2-3, що відповідає площі фігури 2-3-6-7-2, виділяється при твердінні ТАМ. При охолодженні від точки 3 до точки 4 від ТАМ відводиться ще деяка кількість теплової енергії, яка еквівалентна площі фігури 3-4-5-6-3.

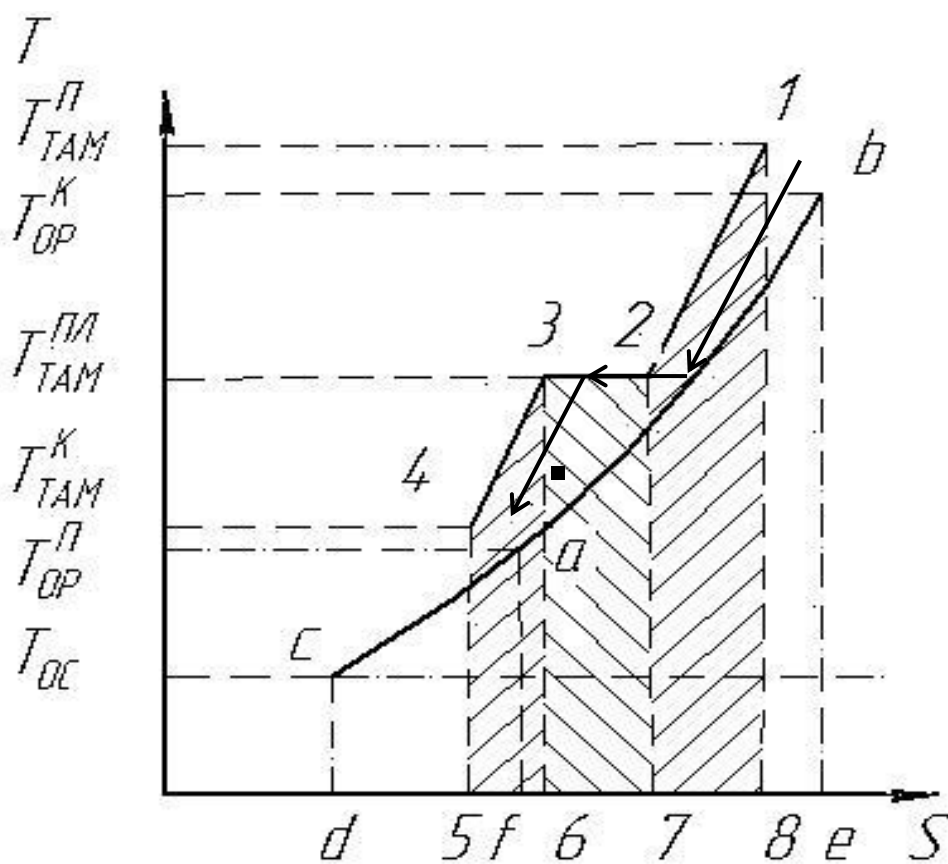


Рис. 4.13. Процес розрядження ТА фазового переходу в координатах  $T-S$

Можна припустити, що всю віддану ТАМ теплову енергію отримує ОР ( $Q_{\text{там}}^P = Q_{\text{ор}}^P$  – площа, що визначається за площею фігури, яка обмежена точками  $a-b-e-f-a$ ). У результаті підведення цієї теплової енергії температура ОР підвищується до  $T_{\text{ОР}}^K$ , а її стан буде відповідати точці  $b$ .

Тепер охолоджуюча рідина виходячи з теплового акумулятора має запас теплової енергії, який представлений площею фігури  $c-b-e-d-c$  на рис. 4.13.

При вивченні впливу ТА на ефективність передпускового прогріву, а отже, і пуску ДВЗ об'єктом дослідження служила стаціонарна моторна установка з тепловим акумулятором, укомплектована в одному випадку системою, аналогічною системі випуску ВГ у режимі заряджання ТА, в іншому - тим самим ТА в режимі віддачі теплоти ДВЗ, тобто розряджання.

Для попереднього вивчення процесів теплообміну при заряджання й розряджання ТА й апроксимації отриманих залежностей, оцінки адекватності математичної моделі процесів, що відбуваються в ньому, і підтвердження працездатності досліджуваного варіанта ТА в системі охолодження ДВЗ для підвищення ефективності його пуску в умовах низьких температур було створено спеціальний стенд для вивчення процесів теплообміну в тепловому акумуляторі. До складу стенда ввійшли тепловий генератор із системою керування, ТА й вимірвальна апаратура (рис. 4.14 і 4.15).

Тепловий генератор (ТГ), що використовувався для імітації теплових процесів у водяній сорочці ДВЗ, являє собою циліндричну порожнину, з одного боку якої здійснюється підведення повітря від нагнітача, з іншого боку - вихід гарячих газів. У бічній циліндричній стінці корпусу ТГ є радіальний отвір із встановленим у ній керованим електронагрівачем. У якості нагнітача повітря було використано блок електронагрівачів електроповітрянагнітача. Регулювання його продуктивності здійснювалось за рахунок зміни опору в електричному колі за допомогою лабораторного реостата.

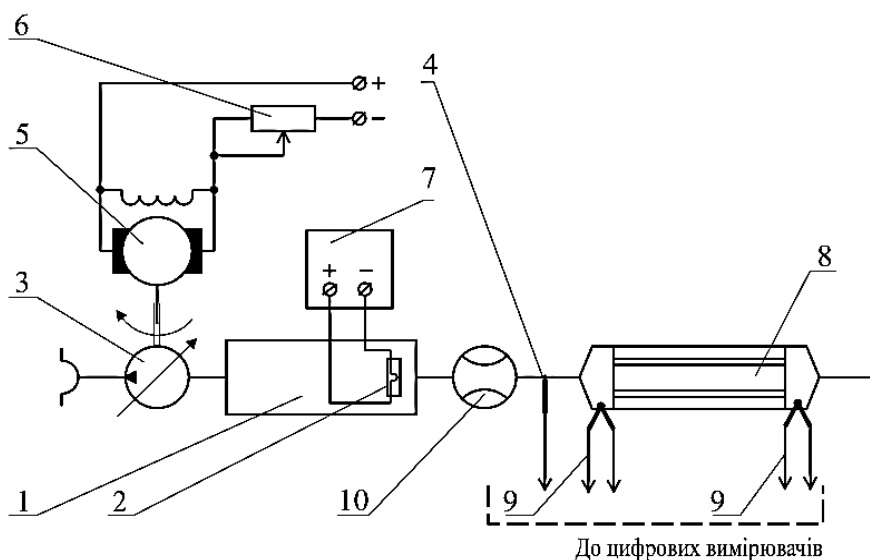


Рис. 4.14. Принципова схема випробувального стенда для дослідження процесів у тепловому акумуляторі: 1 – тепловий генератор; 2 – нагрівальний елемент; 3 – повітряний нагнітач; 4 – термопара; 5 – двигун постійного струму; 6 – змінний опір; 7 – система регулювання нагрівального елемента; 8 – тепловий акумулятор; 9 – термопари; 10 – газовий витратомір G6

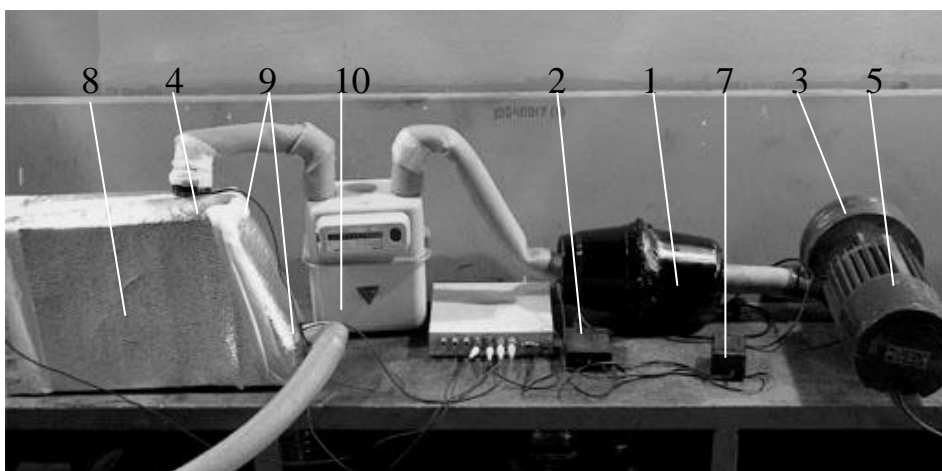


Рис. 4.15. Загальний вигляд стенда для дослідження процесів у тепловому акумуляторі (позначення позицій на рис. 4.13; позиція 6 умовно не показана)

Керування витратою й температурою нагрівача на вході в ТА здійснювалося шляхом зміни подачі повітря. Визначення витрати потоку повітря через ТА здійснювалось ротаційним газовим лічильником G6 фірми UGI Meters LTD, London. Час прогріву фіксувався секундоміром.

Для оцінки тиску на вході в ТА було застосовано водяний п'єзометр, а для визначення температури потоку повітря і ТАМ - мультиметр DT 838 з термопарами ХА. Крім того, температура повітря після витратоміра повітря 10 (рис. 4.14) у повітряному патрубку вимірювалась за допомогою термопари типу ХК з діапазоном виміру  $-200...600^{\circ}\text{C}$  і реєструвалась комп'ютером через аналого-цифровий перетворювач, температуру ТАМ фіксували за допомогою трьох хромель-алюмелевих термопар з діапазоном виміру температур  $200...1200^{\circ}\text{C}$ . Вимірювання температури ТАМ проводилось трьох фіксованих місцях ТА: на вході, посередині й на виході з ТА (рис. 4.10, 4.11). Контроль температури навколишнього повітря здійснювався за показниками лабораторного термометра, а атмосферного тиску - барометром.

На розглянутому етапі експериментальних досліджень насамперед було досліджено роботу ТА. У ході експерименту оцінювались у першому випадку - вплив часу заряджання ТА залежно від температури теплоносія, а в іншому - часу розряджання ТА залежно від швидкості теплоносія. Мета випробувань - отримання експериментальних даних щодо часу заряджання теплового акумулятора залежно від зміни температури самого теплоносія та часу розряджання залежно від швидкості циркуляції теплоносія в контурі ТА при відбиранні теплоти. В умовах спеціалізованої лабораторії було проведено випробування теплового акумулятора системи утилізації та накопичення теплоти відпрацьованих газів і системи охолодження в режимі заряджання і розряджання з метою визначення часу заряджання при різній температурі заряджаючого теплоносія.

В основу стендових досліджень ТА було покладено температурні режими ВГ і системи охолодження з урахуванням розподілу навантажень реального двигуна в умовах експлуатації. В експерименті на створеній установці відтворювались режими роботи реального двигуна за температурою вхідних і вихідних параметрів стосовно ТА, який розташовано в системі охолодження ДВЗ. Випробування полягали в тому, що було здійснено заряджання розробленого теплового акумулятора до температури фазового переходу теплоакumuлюючого матеріалу

(ТАМ), тобто  $135^{\circ}\text{C}$ . При дослідженнях заряджання акумулятора виконувалась сім разів з різними температурами теплоносія, який заряджав тепловий акумулятор до відповідної встановленої температури ТАМ. Після кожного заряджання здійснювалось розряджання теплового акумулятора до температури ТАМ  $20^{\circ}\text{C}$  із різною швидкістю циркуляції теплоносія, після чого здійснювалось нове заряджання, але з іншою температурою теплоносія.

Параметр, зміна якого досліджувалась, - час заряджання та розряджання теплового акумулятора 8 (рис. 4.14, 4.15). Зміна температури теплоносія відбувалась за рахунок регулювання нагрівом елемента 2 теплогенератора 1. Зміна швидкості потоку здійснювалась шляхом регулювання 6 опору двигуна постійного струму 5 нагнітача 3. Проводились випробування для 7 точок, які охоплюють з рівним інтервалом експлуатаційні режими заряджання теплового акумулятора. Аналогічно проводили випробування для 8 точок розряджання ТА, які охоплюють режими роботи циркуляційного насоса системи охолодження двигуна внутрішнього згорання. Тривалість роботи на кожному режимі становила 1 хв, перехід з одного режиму на інший здійснювали протягом 30 с.

Випробування проводились так: за допомогою системи керування елементом нагріву теплогенератора встановлювалась фіксована температура теплоносія, після чого теплоносієм примусово за допомогою нагнітача 3 подавався до ТА 8. Відлік часу вівся з початку заряджання ТА, тобто від температури ТАМ  $20^{\circ}\text{C}$ , і фіксувався кожні  $10^{\circ}\text{C}$  до заданої температури ТАМ –  $135^{\circ}\text{C}$ .

Розряджання ТА відбувалося так: після заряджання ТА до початку відбору теплоти підключався нагнітач 3, фіксувалась швидкість, з якою він подає теплоносієм, і виконувалась фіксація часу розряджання кожні  $10^{\circ}\text{C}$  падіння температури ТАМ.

Результати вимірювання часу заряджання й розряджання ТА залежно від температури теплоносія наведено в табл. 4.9 і 4.10, а також на рис. 4.16 і 4.17.

Виконані дослідження в повному обсязі підтверджують доцільність використання ТА в якості засобу полегшення пуску ДВЗ в умовах низьких температур.

Так, з рис. 4.16 видно, що час заряджання ТА, який працює у складі спеціальної системи попереднього прогріву двигуна з застосуванням системи прискореного прогріву, до температури 125 °С, на яку відрегульовано ТА системи утилізації теплоти, складає 1850 с або 30,8 хв для температури теплоносія 170 °С, а при температурі теплоносія 110 °С – 3650 с або 60,8 хв. Температура 80 °С, тобто температура, наближена до оптимальної для системи охолодження ДВЗ, досягається за 1100 с або за 18,3 хв. При всіх проміжних значеннях температури теплоносія значення часу заряджання ТА знаходяться також у наведених вище межах.

Таблиця 4.9

### Залежність часу заряджання ТА від температури теплоносія

Час заряджання, с	Температура ТАМ, °С												
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	125	
Температура теплоносія, °С	110	0	336	650	985	1150	1389	1715	2145	2456	2815	3156	3698
	120	0	276	536	796	1006	1303	1530	1790	2015	2315	2645	3087
	130	0	231	465	685	904	1085	1245	1454	1708	1950	2258	2798
	140	0	215	454	645	854	998	1280	1520	1680	1883	2204	2435
	150	0	185	365	528	756	954	1064	1258	1502	1696	1940	2138
	160	0	184	339	504	701	904	1085	1204	1379	1604	1849	2034
	170	0	171	304	506	608	806	1022	1184	1307	1548	1715	1895

Таблиця 4.10

### Залежність часу розрядки ТА від швидкості теплоносія

Час розряджання, с	Температура ТАМ, °С												
	125	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	
Швидкість теплоносія, м/с	0,08	0	36	65	99	123	168	234	336	443	518	596	723
	0,1	0	29	61	93	115	145	173	225	335	426	547	671
	0,12	0	25	56	75	104	135	156	198	285	385	495	615
	0,14	0	21	43	69	85	129	139	181	245	332	421	564
	0,16	0	19	39	61	81	109	125	173	215	291	368	522
	0,18	0	17	35	48	75	101	116	156	198	256	345	455
	0,2	0	16	31	45	60	86	102	143	168	223	301	415
	0,22	0	14	26	42	55	75	96	124	142	192	259	368

Характер зміни часу розрядки (відбирання теплоти) ТА від швидкості теплоносія в його контурі має аналогічний характер (рис. 4.17). Так, зі 125 °С до 20 °С ТА розряджається з 380 с або 6,3 хв при швидкості теплоносія 0,22 м/с до 720 с або 12 хв



відповідно. Діапазон швидкостей було вибрано в межах, які в повному обсязі може забезпечувати розроблена система прискореного нагріву двигуна, а також його штатна система охолодження.

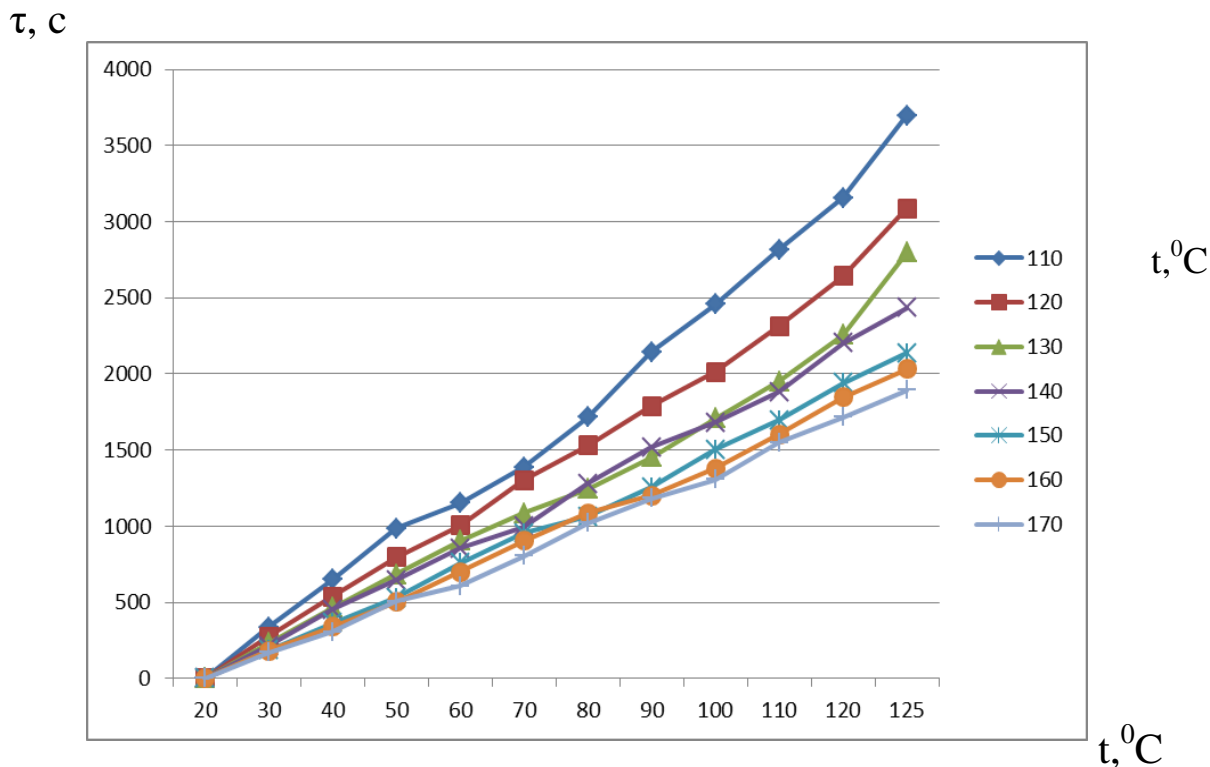


Рис. 4.16. Залежність часу заряджання ТА від температури теплоносія

Аналіз отриманих результатів показав таке:

1. Розроблена установка для експериментальних досліджень теплових акумуляторів з різними теплоакумулюючими матеріалами показала високу працездатність і надійність у процесі експлуатації.

2. Розроблений тепловий акумулятор (ТА) фазового переходу з теплоакумулюючим матеріалом - поліетилен високої густини - показав свою працездатність при випробуваннях на спеціальному стенді як при заряджанні, так і при розряджанні.

3. ТА даної конструкції можливо встановлювати в систему охолодження стаціонарного двигуна внутрішнього згорання для підвищення пускової температури його в холодних кліматичних умовах і підвищення ефективності його пуску. ТА забезпечує необхідні характеристики при розряджанні і заряджанні, які в повному обсязі відповідають потребам досліджуваної системи прискореного нагріву.

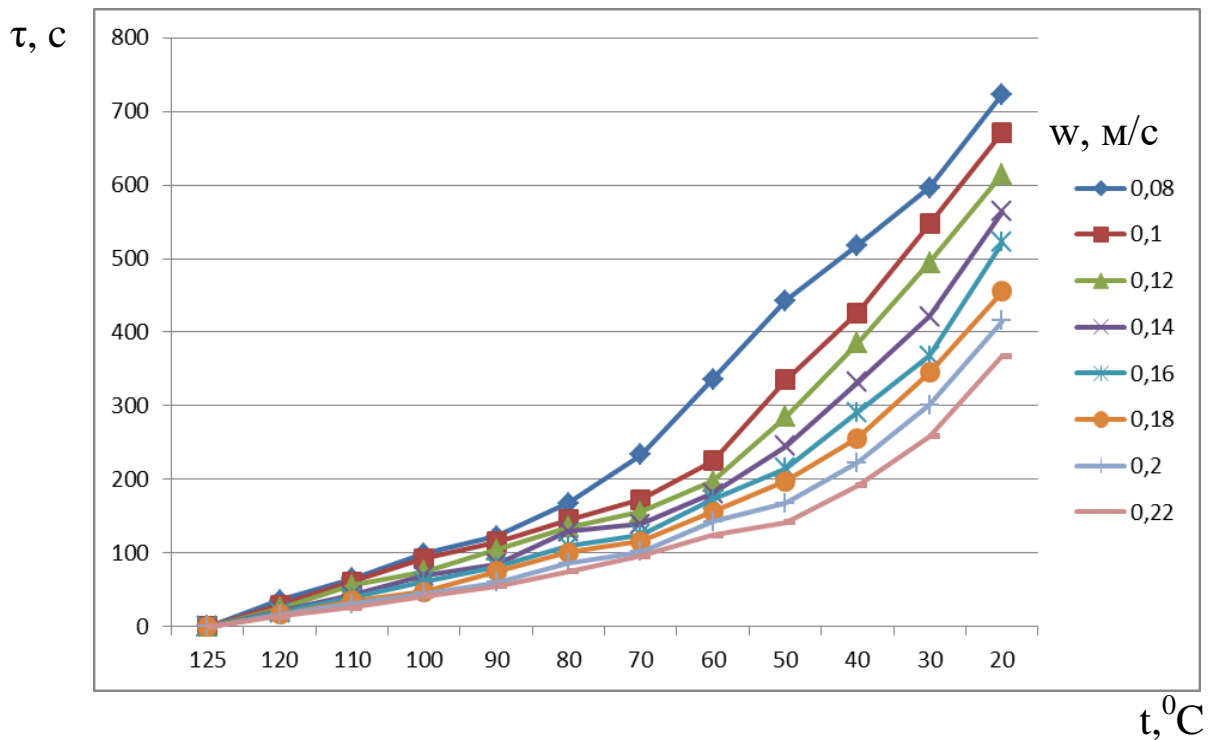


Рис. 4.17. Залежність часу розрядження ТА від швидкості теплоносія

Наведені матеріали свідчать про доцільність використання ТА в системі охолодження ДВС для підвищення його температури перед пуском.

## Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте особливості мікроклімату в кабіні машиніста (кабіні транспортного засобу).
2. Наведіть схему теплової установки для дослідження матеріалів у ТА і поясніть особливості обладнання, що використовується.
3. Охарактеризуйте фізичні властивостей парафіну як ТАМ для ТА.
4. Поясніть параметри плавлення і кристалізації парафіну марки Т-3, що встановлено методом ДТА.
5. Поясніть особливості підбору ТАМ для використання в багатосекційних ТА фазового переходу.
6. Особливості використання ТА фазового переходу в системі передпускового прогріву двигуна транспортного засобу і енергетичної установки.
7. Поясніть основні фізико-механічні властивості поліетилену як ТАМ для ТА.
8. Поясніть процес передачі теплової енергії при заряджанні ТА фазового переходу в координатах  $T-S$ .
9. Поясніть процес передачі теплової енергії при розряджанні ТА фазового переходу в координатах  $T-S$ .
10. Поясніть особливості процесу заряджання ТА фазового переходу від температури теплоносія і розряджання - від швидкості теплоносія.

## РОЗДІЛ 5

### ПЕРСПЕКТИВИ ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ПРОГРІВУ ДВЗ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПРИ ФОРМУВАННІ КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ

#### 5.1. Класифікація теплових акумуляторів фазового переходу

Виконаний аналіз наведених вище ТА фазового переходу і проведені дослідження дозволяють розробити їхню класифікацію. Це потрібно для того, щоб у процесі подальших досліджень і проектування ТА були визначені можливі перспективи розвитку їх схем і конструктивних рішень і використання ТАМ. Нижче наведено удосконалену класифікацію ТА, за основу якої була прийнято бачення класифікації теплових акумуляторів В.В. Шульгіна, розроблена на основі відомих і перспективних конструкцій ТА. Удосконалена класифікація має ще перспективу всебічного розвитку, її можна ще змінювати і доповнювати, оскільки розвиток теорії теплового акумулявання дозволить у подальшому доповнити її новими конструкціями, розширити сферу застосування ТА з різними ТАМ тощо.

Класифікація ТА фазового переходу, що застосовуються на мобільних машинах (транспортних засобах (ТЗ)) і стаціонарних енергетичних установках (ЕУ) з ДВЗ, виконана за такими ознаками:

- за видом фазового переходу: ТА, що працюють на основі:
  - а) фазового переходу плавлення-кристалізація;
  - б) поліморфного перетворення у твердій фазі;
- різновидом теплоносіїв, що використовуються для накопичення теплової енергії: ТА, які для накопичення теплової енергії використовують такі теплоносії:
  - а) охолоджуючі рідини ДВЗ;
  - б) відпрацьовані гази ДВЗ;
  - в) електричний струм;
  - г) повітря;
  - д) спеціальні експлуатаційні рідини ТЗ і ЕУ;

- різновидом теплоносіїв (тіл), яким віддається накопичена теплова енергія: ТА, які віддають накопичену теплову енергію безпосередньо:

а) охолоджуючій рідині ДВЗ;

б) відпрацьованим газам ДВЗ;

в) повітряному потоку при впусканні його в ДВЗ;

г) спеціальним рідким і газоподібним теплоносіям, наприклад рідкому натрію;

д) металоконструкціям транспортного засобу (каталітичний реактор, елементи конструкції, системи і механізми);

- *типом теплообмінника*: ТА, що можуть мати у своєму складі:

а) капсульний теплообмінник:

1) теплообмінник, що складається з капсул з нерухомою жорсткою стінкою;

2) теплообмінник, що складається з капсул з еластичною пружною стінкою;

б) трубний або кожухотрубний теплообмінник:

1) теплообмінник з нерухомо жорсткою стінкою з гладких труб;

2) теплообмінник з нерухомою жорсткою стінкою з оребрених труб;

в) із скребковим видаленням ТАМ;

г) ультразвуковим видаленням або електрогідравлічним руйнуванням затверділого ТАМ;

д) прямим контактом і прокачуванням ТАМ;

е) випарувально-конвективним перенесенням теплової енергії при безпосередньому контакті ТАМ і теплоносія;

- *кількістю різних теплоакумулюючих матеріалів в одному тепловому акумуляторі (секції)*:

а) один матеріал;

б) декілька теплоакумулюючих матеріалів в одному акумуляторі (секції);

- *розташуванням (взаємним положенням) теплових акумуляторів (теплообмінників)*:

а) паралельне розташування теплових акумуляторів (теплообмінників);

б) послідовне розташування теплових акумуляторів (теплообмінників);

в) комбіноване розташування теплових акумуляторів (теплообмінників);

- *кількістю секцій у тепловому акумуляторі:*

а) односекційні;

б) багатосекційні теплові акумулятори;

- *складом теплообмінників і способом передачі теплової енергії: ТА, що можуть мати у своєму складі:*

а) один теплообмінник, за допомогою якого здійснюються як накопичення, так і віддача накопиченої теплової енергії однієї температури;

б) два і більше теплообмінників, при цьому накопичення і віддача накопиченої теплової енергії здійснюються за допомогою різних теплообмінників з однією температурою;

в) два і більше теплообмінників, при цьому накопичення і віддача накопиченої теплової енергії здійснюється за допомогою різних теплообмінників з різними температурами;

г) два і більше теплообмінників, при цьому накопичення здійснюються за допомогою різних теплообмінників, а віддача накопиченої теплової енергії здійснюється за допомогою тільки одного теплообмінника, температура якого адаптована для об'єкта застосування утилізованої теплоти (має місце віддача і передача теплоти всередині самого акумулятора);

- *типом теплоакуюючого матеріалу: у якості ТАМ можуть застосовуватись:*

а) кристалогідрати солей та основ;

б) органічні речовини;

в) солі та основи;

г) метали і сплави;

д) композиційні матеріали - різні суміші названих вище речовин;

- *типом теплової ізоляції: ТА, що мають:*

а) вакуумну (вакуумно-порошкову) теплову ізоляцію;

б) теплову ізоляцію, виконану з теплоізоляційних матеріалів;

в) комбіновану теплову ізоляцію, що складається з вакуумного прошарку будь-яких теплоізоляційних матеріалів;  
- *призначенням ТА у мобільних машинах можуть застосовуватись:*

а) для передпускового розігріву (підігріву) ДВЗ та його агрегатів; агрегатів трансмісії (силових передач), елементів систем і механізмів транспортного засобу і опалювання салонів (кабін) при непрацюючих ДВЗ на мобільних машинах і стаціонарних енергетичних установках з ДВЗ в умовах низьких температур навколишнього середовища;

б) оптимізації теплового навантаження (каталітичних нейтралізаторів, турбін тощо);

в) охолодження повітря в салонах (кабінах) машин в умовах жаркого клімату, у технологічних приміщеннях (спеціальних порожнинах, акумуляторних тощо);

г) приводів агрегатів машин;

д) побутових потреб екіпажів;

е) для забезпечення працездатності елементів на мобільних машинах і стаціонарних енергетичних установках з ДВЗ у визначених місцях;

- *способом віддачі теплоти від теплового акумулятора до теплоносія:*

а) активні, коли тепла енергія віддається примусово від акумулятора до теплоносія за рахунок зовнішніх впливів;

б) пасивні, коли тепла енергія віддається природним шляхом, тобто від найбільш нагрітого тіла до найменш нагрітого (шляхом теплоперенесення, конвекцією тощо).

## **5.2. Покращення параметрів робочих процесів прогріву ДВЗ при формуванні і проектуванні теплових акумуляторів фазового переходу**

Для покращення параметрів робочих процесів прогріву двигуна внутрішнього згорання ТЗ і ЕУ при формуванні і проектуванні теплових акумуляторів фазового переходу можна використовувати різні технічні рішення. Основні можливі рішення порівняно з уже відомими, які автори вважають доцільними в порядку перспектив розвитку систем прогріву як самого ДВЗ, так і ТЗ і ЕУ:

- керування температурним впливом у фіксованих межах при здійсненні процесу передпускового і післяпускового прогріву ДВЗ, ТЗ і ЕУ в багатосекційному ТА;

- використання зовнішніх джерел енергії в ТЗ і ЕУ для підігріву двигуна й підтримання властивостей БТА;

- використання зовнішніх джерел енергії або рекуперація енергії в ТЗ і ЕУ для підігріву двигуна й підтримання властивостей ТА.

У напрямку створення і реалізації можливих рішень, які автори вважають доцільними в порядку перспектив розвитку систем прогріву ДВЗ, а саме *конструкції їх теплових акумуляторів фазового переходу*, можна запропонувати такі:

1. Тепловий акумулятор фазового переходу (патент № 70814 UA) складається з вакуумованого корпусу 1 (рис. 5.1), знімної кришки 2, що має вхідні 3, 4, 5, 6 і вихідні 7, 8, 9, 10 отвори, у які встановлено впускний трубопровід газоподібного теплоносія 11, впускні 12, 13 і випускні 15, 16, 17 трубопроводи блоків, впускний 14 і випускний 18 трубопроводи рідинного теплоносія. До впускного трубопроводу газоподібного теплоносія 11 примикає повітряний трубопровід 51, який забезпечений нагнітальним насосом 47 і запірним клапаном 41. Усередині корпусу знаходяться блоки секцій 19, 20, 21, що складаються з циліндричних коаксіально розташованих капсул, заповнених фазоперехідним теплоакumuлюючим матеріалом 22 з кільцевими зазорами 23 для проходження газоподібного теплоносія (відпрацьовані гази ДВЗ). Крім того, у блоці секції 21 встановлено нагрівальні елементи 24 рідинного теплоносія блока секції з більш низьким діапазоном робочих температур. Вся конструкція теплообмінника змонтована на знімній кришці 2, яка закріплена за допомогою болтових з'єднань 25 до елементів кріплення корпусу 26, встановлених на самому корпусі. Випускний трубопровід газоподібного теплоносія 50 з датчиком 45 робочої температури приєднано до змішувальної камери 44, до якої підходять випускні трубопроводи блоків 15, 16, 17 і повітряний трубопровід 51. Випускний трубопровід 18 рідинного теплоносія з датчиком робочої температури 46 приєднано до нагрівальних елементів 24 рідинного теплоносія блока секції з



більш низьким діапазоном робочих температур, встановленим у блоці секції 21, які приєднані до впускного трубопроводу рідинного теплоносія 14 із нагнітальним насосом 49 і запірним клапаном 37 (встановлення нагрівальних елементів всередині циліндричних капсул умовно не показано). Регулювати кількість тепла, що подається, у змішувальну камеру 44 і відповідно до впускного трубопроводу газоподібного теплоносія 50 дозволяє наявність на перепускових трубопроводах запірних клапанів 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 39, 40, 41, 42, 43, а автономно здійснювати перезарядження (власний підігрів) блока секції 21 з більш низьким діапазоном робочих температур від блоків секцій 19, 20 з більш високим діапазоном робочих температур дозволяє наявність перепускового 52 трубопроводу з нагнітальним насосом 48 і запірних клапанів 34 і 36.

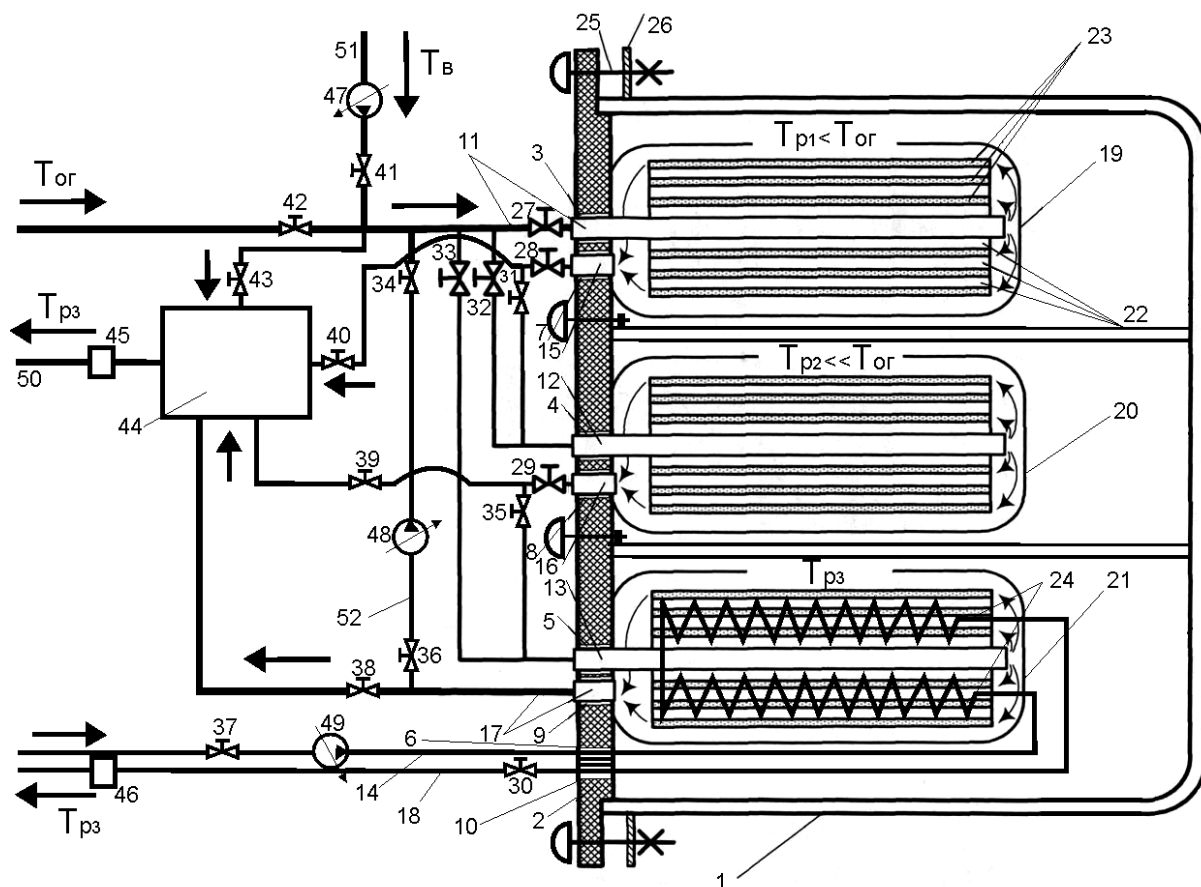


Рис. 5.1. Тепловий акумулятор фазового переходу  
(патент № 70814 UA)

Мета запропонованої моделі - підвищити ефективність використання палива та утилізації відпрацьованих газів у більш широкому температурному діапазоні, підтримання температури охолоджуючої рідини в системі охолодження при заглушеному ДВЗ в межах температур «гарячого прогріву» (50 – 70 °С залежно від експлуатаційних вимог і заводської інструкції) при низьких температурах навколишнього повітря або якщо температура охолоджуючої рідини (оливи і палива) двигуна не відповідає встановленим вище вимогам, а також одночасне підтримання температури теплоносія, що надходить у ДВЗ паралельно двома потоками, як газоповітряним, так і рідинним, причому з фіксованою однаковою температурою потоків з більш вузьким діапазоном робочих температур, наближених до робочої температури ДВЗ.

Застосування даного ТА дозволить:

а) зменшити витрати палива на прогрів ДВЗ в холодну пору року, тим самим підвищуючи ефективність його використання;

б) досягти більшої зручності в утилізації відпрацьованих газів у більш широкому температурному діапазоні;

в) підтримувати температуру охолоджуючої рідини в системі охолодження при заглушеному ДВЗ в межах температур «гарячого прогріву» (50 – 70 °С залежно від експлуатаційних вимог і заводської інструкції) при низьких температурах навколишнього повітря або якщо температура охолоджуючої рідини (оливи і палива) двигуна не відповідає встановленим вище вимогам;

г) одночасно підтримувати температури теплоносія, що надходить у ДВЗ паралельно двома потоками, як газоповітряним, так і рідинним, причому з фіксованою однаковою температурою потоків з більш низьким діапазоном робочих температур, наближених до робочої температури ДВЗ;

д) автономно здійснювати перезарядження (власний підігрів) секції блока з більш низьким діапазоном робочих температур від секцій блока з більш високим діапазоном робочих температур.

2. Тепловий акумулятор фазового переходу (патент № 75299 UA) складається з вакуумованого корпусу 1 (рис. 5.2), знімної кришки 2, що має вхідні 3, 4, 5, 6 і вихідні 7, 8, 9, 10

отвори, у які встановлено впускний трубопровід газоподібного теплоносія 11, впускні 12, 13 і випускні 15, 16, 17 трубопроводи блоків, впускний 14 і випускний 18 трубопроводи рідинного теплоносія. До впускного трубопроводу газоподібного теплоносія 11 примикає повітряний трубопровід 51, який забезпечено нагнітальним насосом 47 і запірним клапаном 41. У середині корпусу знаходяться блоки секцій 19, 20, 21, що складаються з циліндричних коаксіально розташованих капсул, заповнених фазоперехідним теплоакumuлюючим матеріалом 22 з кільцевими зазорами 23 для проходження газоподібного теплоносія (відпрацьовані гази ДВЗ), зі встановленими в блоках секцій відповідно

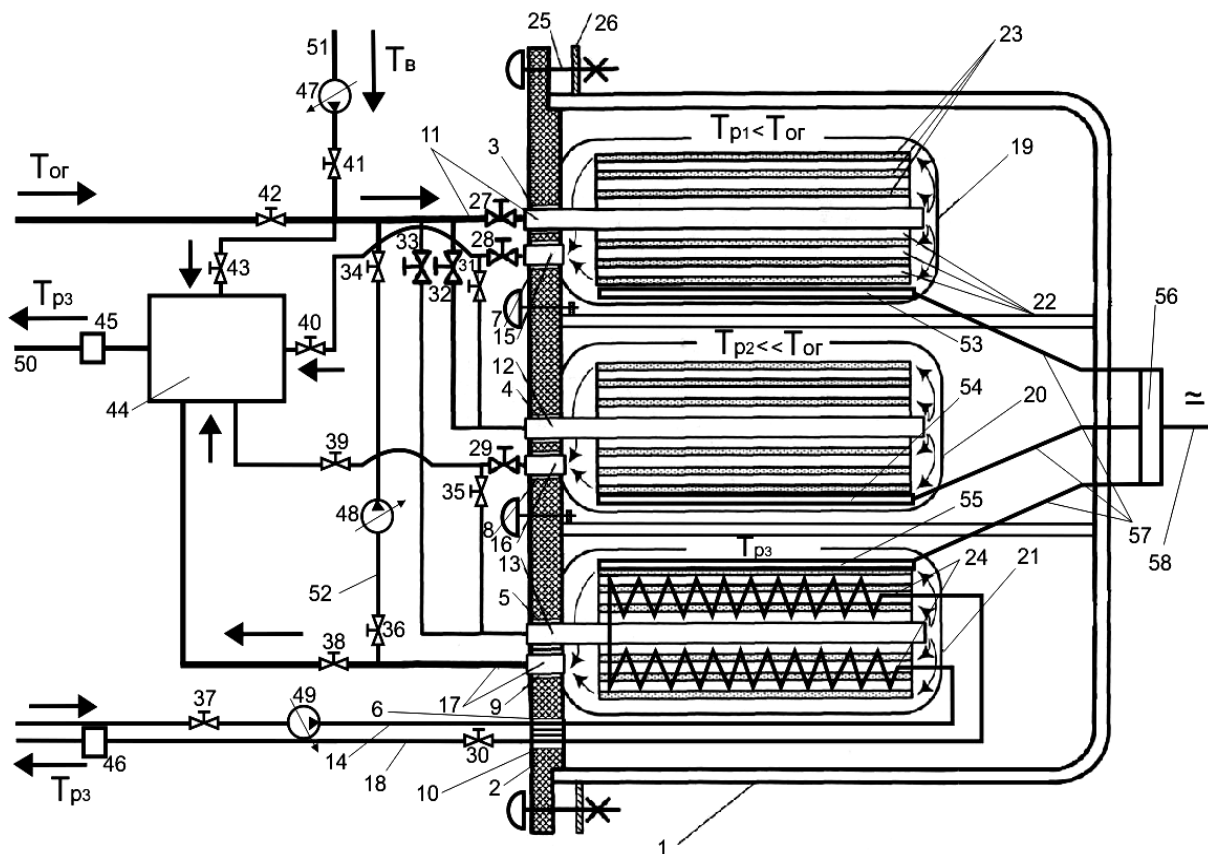


Рис. 5.2. Тепловий акумулятор фазового переходу  
(патент № 75299 UA)

електронагрівальними елементами секцій теплового акумулятора 53, 54, 55, з'єднаного з джерелом електроенергії 58 за допомогою блока керування і розподілу напруг електронагрівачів 56 і силового електрокабелю 57. Крім того, у блоці секції 21

встановлено нагрівальні елементи 24 рідинного теплоносія блока секції з більш низьким діапазоном робочих температур. Вся конструкція теплообмінника змонтована на знімній кришці 2, яка закріплена за допомогою болтових з'єднань 25 до елементів кріплення корпусу 26, встановлених на самому корпусі. Випускний трубопровід газоподібного теплоносія 50 з датчиком 45 робочої температури приєднано до змішувальної камері 44, до якої підходять випускні трубопроводи блоків 15, 16, 17 і повітряний трубопровід 51. Випускний трубопровід 18 рідинного теплоносія з датчиком робочої температури 46 приєднано до нагрівальних елементів 24 рідинного теплоносія блока секції з більш низьким діапазоном робочих температур, встановленим у блоці секції 21, які приєднані до впускного трубопроводу рідинного теплоносія 14 із нагнітальним насосом 49 і запірним клапаном 37 (встановлення нагрівальних елементів всередині циліндричних капсул умовно не показано).

Регулювати кількість теплоти, що подається, у змішувальну камеру 44 і відповідно до впускного трубопроводу газоподібного теплоносія 50 дозволяє наявність на перепускних трубопроводах запірних клапанів 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 39, 40, 41, 42, 43, а автономно здійснювати перезаряджання (власний підігрів) блока секції 21 з більш низьким діапазоном робочих температур від блоків секцій 19, 20 з більш високим діапазоном робочих температур дозволяє наявність перепускного 52 трубопроводу з нагнітальним насосом 48 і запірних клапанів 34 і 36.

Мета запропонованої моделі - підвищити ефективність використання палива та утилізації відпрацьованих газів у більш широкому температурному діапазоні, підтримання температури охолоджуючої рідини в системі охолодження при заглушеному ДВЗ в межах температур «гарячого прогріву» (50 – 70 °С залежно від експлуатаційних вимог і заводської інструкції) при низьких температурах навколишнього повітря або якщо температура охолоджуючої рідини (оливи і палива) двигуна не відповідає встановленим вище вимогам, а також одночасне підтримання температури теплоносіїв, що надходить у ДВЗ паралельно двома потоками, як газоповітряним, так і рідинним, причому з фіксованою однаковою температурою потоків з більш вузьким

діапазоном робочих температур, наближених до робочої температури ДВЗ, і додаткове заряджання теплового акумулятора електронагрівальними елементами секцій теплового акумулятора, які дають змогу заряджати його від електричної мережі чи стаціонарного джерела електроенергії, електрогенератора або рекуперативної системи транспортного засобу через блок керування і розподілу напруг електронагрівачів за допомогою силового електрокабелю від вказаного джерела електроенергії.

Для додаткового заряджання теплового акумулятора його оснащено електронагрівальними елементами секцій теплового акумулятора 53, 54, 55, які дають змогу заряджати його від джерела електроенергії 58 за допомогою блока керування і розподілу напруг електронагрівачів 56 і силового електрокабелю 57. У якості джерела електроенергії 58 може бути використана електрична мережа або стаціонарне джерело електроенергії, електрогенератор або рекуперативна система транспортного засобу.

Застосування даного ТА дозволить:

а) зменшити витрати палива на прогрів ДВЗ в холодну пору року, тим самим підвищуючи ефективність його використання;

б) досягти більшої зручності в утилізації відпрацьованих газів у більш широкому температурному діапазоні;

в) підтримувати температуру охолоджуючої рідини в системі охолодження при заглушеному ДВЗ в межах температур «гарячого прогріву» (50 – 70 С в залежно від експлуатаційних вимог і заводської інструкції) при низьких температурах навколишнього повітря або якщо температура охолоджуючої рідини (оливи і пального) двигуна не відповідає встановленим вище вимогам;

г) одночасно підтримувати температури теплоносіїв, що надходять у ДВЗ паралельно двома потоками, як газоповітряним, так і рідинним, причому з фіксованою однаковою температурою потоків з більш низьким діапазоном робочих температур, наближених до робочої температури ДВЗ;

д) автономно здійснювати перезаряджання (власний підігрів) секції блока з більш низьким діапазоном робочих температур від секцій блока з більш високим діапазоном робочих температур;

е) додаткове заряджання теплового акумулятора при його оснащенні електронагрівальними елементами секцій теплового акумулятора, які дають змогу заряджати його від електричної мережі, стаціонарного джерела електроенергії, електрогенератора або рекуперативної системи транспортного засобу.

3. Тепловий акумулятор фазового переходу (патент № 78985 UA) складається з вакуумованого корпусу 1 (рис. 5.3), знімної кришки 2, що має вхідні 3, 4, 5, 6 і вихідні 7, 8, 9, 10 отвори, у які встановлено впускний трубопровід газоподібного теплоносія 11, впускні 12, 13 і випускні 15, 16, 17 трубопроводи блоків, впускний 14 і випускний 18 трубопроводи рідинного теплоносія. До впускного трубопроводу газоподібного теплоносія 11 примикає повітряний трубопровід 51, який забезпечено нагнітальним насосом 47 і запірним клапаном 41. Усередині корпусу знаходяться блоки секцій 19, 20, 21, що складаються з циліндричних коаксіально розташованих капсул, заповнених фазоперехідним теплоакumuлюючим матеріалом 22 з кільцевими зазорами 23 для проходження газоподібного теплоносія (відпрацьовані гази ДВЗ), зі встановленими в блоках секцій відповідно електронагрівальними елементами секцій теплового акумулятора 53, 54, 55, що з'єднані з джерелом електроенергії 58 за допомогою блока керування і розподілу напруг електронагрівачів 56, силових електрокабелів 57 і 59 з підсилювачем 60, перетворювачем електроенергії 62, блоком накопичувачів електроенергії конденсаторного типу 61, ШІМ контролером (контролером широтноімпульсної модуляції) 63 і блоком керування системою рекуперації 64. Крім того, у блоці секції 21 встановлено нагрівальні елементи 24 рідинного теплоносія блока секції з більш низьким діапазоном робочих температур. Вся конструкція теплообмінника змонтована на знімній кришці 2, яка закріплена за допомогою болтових з'єднань 25 до елементів кріплення корпусу 26, встановлених на самому корпусі. Випускний трубопровід газоподібного теплоносія 50 з датчиком 45 робочої температури приєднано до змішувальної камері 44, у яку підходять випускні трубопроводи блоків 15, 16, 17 і повітряний трубопровід 51. Випускний трубопровід 18 рідинного теплоносія з датчиком робочої температури 46 приєднано до нагрівальних елементів 24 рідинного теплоносія

блока секції з більш низьким діапазоном робочих температур, встановленим у блоці секції 21, які приєднані до впускного трубопроводу рідинного теплоносія 14 із нагнітальним насосом 49 і запірним клапаном 37 (встановлення нагрівальних елементів всередині циліндричних капсул умовно не показано). Регулювати кількість теплоти, що

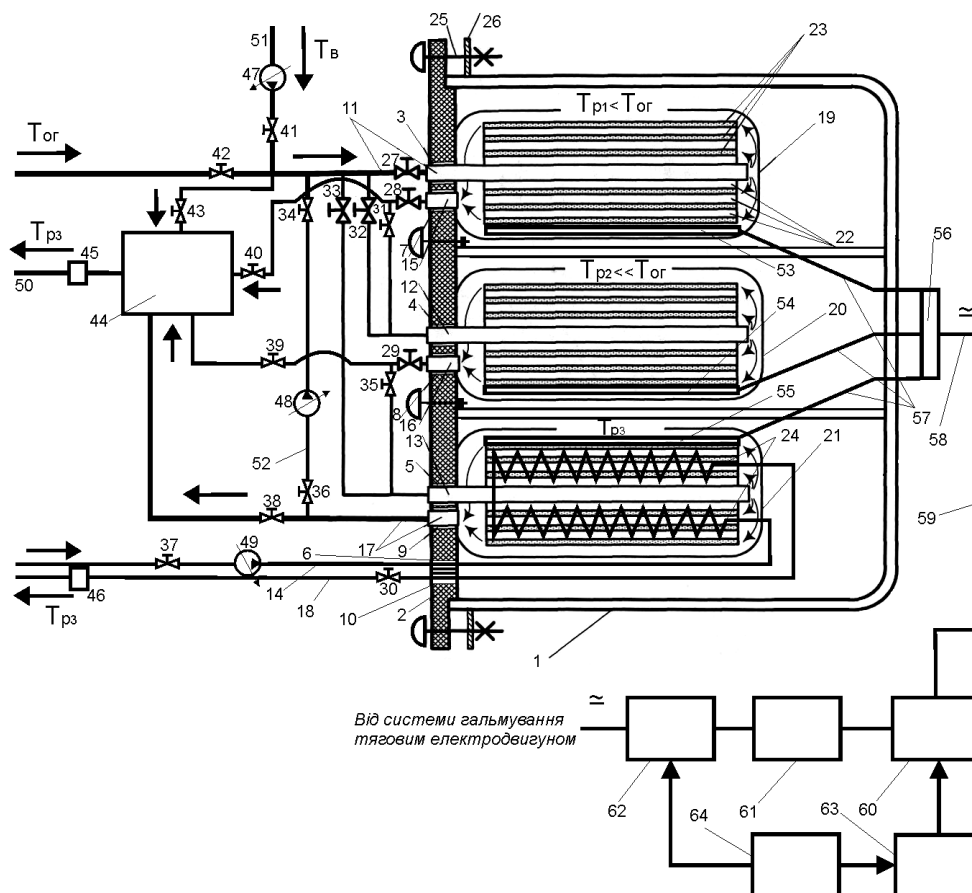


Рис. 5.3. Тепловий акумулятор фазового переходу (патент № 78985 UA)

подається, у змішувальну камеру 44 і відповідно до випускного трубопроводу газоподібного теплоносія 50 дозволяє наявність на перепускних трубопроводах запірних клапанів 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 39, 40, 41, 42, 43, а автономно здійснювати перезарядку (власний підігрів) блока секції 21 з більш низьким діапазоном робочих температур від блоків секцій 19, 20 з більш високим діапазоном робочих температур дозволяє наявність перепускного 52 трубопроводу з нагнітальним насосом 48 і запірних клапанів 34 і 36.

Метою запропонованої моделі є підвищення ефективності використання палива та утилізації відпрацьованих газів у більш широкому температурному діапазоні, підтримання температури охолоджуючої рідини в системі охолодження при заглушеному ДВЗ в межах температур «гарячого прогріву» (50 – 70 °С залежно від експлуатаційних вимог і заводської інструкції) при низьких температурах навколишнього повітря або якщо температура охолоджуючої рідини (оливи і палива) двигуна не відповідає встановленим вище вимогам, а також одночасне підтримання температури теплоносія, що надходить у ДВЗ паралельно двома потоками, як газоповітряним, так і рідинним, причому з фіксованою однаковою температурою потоків з більш вузьким діапазоном робочих температур, наближених до робочої температури ДВЗ, а також додаткове заряджання теплового акумулятора електронагрівальними елементами секцій теплового акумулятора, які дають змогу заряджати його від електричної мережі чи стаціонарного джерела електроенергії, електрогенератора або рекуперативної системи транспортного засобу через блок керування і розподілу напруг електронагрівачів за допомогою силового електрокабелю від вказаного джерела електроенергії. У якості джерела електроенергії транспортного засобу, оснащеного системою рекуперації електричної енергії (наприкладі тепловоза або іншого транспортного засобу з електричною тягою), для додаткового заряджання теплового акумулятора за допомогою електронагрівача теплового акумулятора і силового електрокабелю використовується рекуперативна система транспортного засобу, яка складається з підсилювача, перетворювача електроенергії, блока накопичувачів електроенергії конденсаторного типу, ШІМ контролера (контролера широтної імпульсної модуляції) і блока керування системою рекуперації.

Для додаткового заряджання теплового акумулятора його оснащено електронагрівальними елементами секцій теплового акумулятора 53, 54, 55, які дають змогу заряджати його від джерела електроенергії 58 за допомогою блока керування і розподілу напруг електронагрівачів 56 і силових електрокабелів 57 і 59. У якості джерела електроенергії 58 може бути використана електрична мережа або стаціонарне джерело



електроенергії, електрогенератор або рекуперативна система транспортного засобу при його гальмуванні. У рекуперативну систему транспортного засобу (наприкладі тепловоза або іншого транспортного засобу з електричною тягою) входить підсилювач 60, перетворювач електроенергії 62, блок накопичувачів електроенергії конденсаторного типу 61, ШІМ контролер (контролер широтноімпульсної модуляції) 63 і блок керування системою рекуперації 64. Перетворювач електроенергії 62 при гальмуванні тягового електродвигуна узгоджує напруги тягового електродвигуна, працюючого в режимі гальмування, і напругу у блоці накопичувачів електроенергії конденсаторного типу 61. Блок накопичувачів електроенергії конденсаторного типу 61 здійснює накопичення електричної енергії і утворює гальмівний момент на тяговому електродвигуні за рахунок величини струму від перетворювача електричної енергії 62 до блока накопичувачів електроенергії конденсаторного типу. ШІМ контролер (контролер широтноімпульсної модуляції) 63 здійснює формування імпульсів відповідної частоти і зміну їх шпаруватості для регулювання потужності, що подається на електронагрівальні елементи секцій теплового акумулятора 53, 54, 55. Підсилювач 60 підсилює за потужністю сигнали ШІМ контролера (контролера широтноімпульсної модуляції) 63. Блок керування системою рекуперації 64 керує роботою перетворювача електроенергії 62 і ШІМ контролера (контролера широтноімпульсної модуляції) 63. Елементи теплового акумулятора фазового переходу, призначені для додаткового заряджання його від накопичувача рекуперативної системи електричної енергії, вводяться в дію у випадку, коли накопиченої теплової енергії теплового акумулятора фазового переходу недостатньо для прогріву ДВЗ до відповідної температури (якщо дуже низька температура навколишнього середовища або якщо може мати місце вимушене довготривале простоювання без реалізації повторно – короткочасного прогрівального режиму роботи ДВЗ).

Застосування даного ТА фазового переходу дозволить:

а) зменшити витрати палива на прогрів ДВЗ в холодну пору року, тим самим підвищуючи ефективність його використання;

б) досягти більшої зручності в утилізації відпрацьованих газів у більш широкому температурному діапазоні;

в) підтримувати температуру охолоджуючої рідини в системі охолодження при заглушеному ДВЗ в межах температур «гарячого прогріву» (50 – 70 °С залежно від експлуатаційних вимог й заводської інструкції) при низьких температурах навколишнього повітря або якщо температура охолоджуючої рідини (оливи і пального) двигуна не відповідає встановленим вище вимогам;

г) одночасно підтримувати температуру теплоносія, що надходить в ДВЗ паралельно двома потоками, як газоповітряним, так і рідинним, причому з фіксованою однаковою температурою потоків з більш низьким діапазоном робочих температур, наближених до робочої температури ДВЗ;

д) автономно здійснювати перезарядження (власний підігрів) секції блока з більш низьким діапазоном робочих температур від секцій блока з більш високим діапазоном робочих температур;

е) додаткове зарядження теплового акумулятора фазового переходу при його оснащенні електронагрівальними елементами секцій теплового акумулятора, які дають змогу заряджати його від електричної мережі, стаціонарного джерела електроенергії, електрогенератора або рекуперативної системи транспортного засобу при його гальмуванні, до якої входить підсилювач, перетворювач електроенергії, блок накопичувачів електроенергії конденсаторного типу, ШІМ контролер (контролер широтної імпульсної модуляції) і блок керування системою рекуперації.

### **5.3. Основні співвідношення для визначення параметрів акумуляування за допомогою використання теплоти фазового переходу**

**5.3.1. Загальні положення.** Ємність теплового акумуляування за допомогою використання теплоти фазового переходу визначається зміною не температури, а агрегатного стану середовища, яке накопичує енергію при постійній температурі.

Під акумулюванням на основі теплоти фазового переходу здебільшого розуміється акумулювання теплоти плавлення, що відбувається зазвичай з невеликими змінами об'єму.

При виготовленні й експлуатації теплоакумуючих установок необхідні відповідні розрахунки теплопередачі від робочого тіла (теплоакумуючого матеріалу) до теплоаккумулятора, тому перелічимо деякі базові поняття теплообміну.

**5.3.2. Розрахунки теплообмінників і різні методи складання теплового балансу.** При розрахунку теплообмінників можуть використовуватися внутрішній і зовнішній методи складання теплового балансу. При внутрішньому методі використовуються величини теплоємностей. При зовнішньому методі використовуються величини питомих ентальпій. При застосуванні внутрішнього методу теплове навантаження розраховується за різними формулами залежно від характеру протікання теплообмінних процесів. Якщо теплообмін відбувається без яких-небудь фазових перетворень, а відповідно й без виділення або поглинання теплоти, то теплове навантаження розраховується за формулою

$$Q = M_1 \bar{c}_1 (t_{1н} - t_{1х}) = M_2 \bar{c}_2 (t_{2н} - t_{2х}). \quad (5.1)$$

Якщо в процесі теплообміну відбуваються фазові перетворення, то використовується інша форма для розрахунку теплового балансу:

$$Q = M_1 \bar{c}_1 (t_{1н} - t_{1пр}) + \Delta H_{LS} m + (M_1 - m) \bar{c}_1 (t_{1пр} - t_{1х}) + m \bar{c}_{пр} (t_{1пр} - t_{1х}) = M_2 \bar{c}_2 (t_{2н} - t_{2пр}), \quad (5.2)$$

де  $\bar{c}_1$  – середня теплоємність, обчислювана в заданому температурному інтервалі;

$m$  – маса теплоакумуючого матеріалу;

$M_1, M_2$  – маси першого й другого середовища відповідно;

$t_{1н}, t_{1х}$  – початкові температури нагрівача (н) і холодильника (х);

$t_{2н}, t_{2х}$  – кінцеві температури нагрівача й холодильника;

$H_{1н}, H_{2н}$  – ентальпії речовин, які входять в агрегат;

$H_{1x}, H_{2x}$  – ентальпії речовин, які виходять із агрегату;

$\Delta H_{LS}$  – ентальпія плавлення.

Індекси 1 і 2 ставляться відповідно до входу й виходу з агрегату.

При використанні зовнішнього методу розрахунок теплового балансу ведеться на підставі того, що в теплообмінний апарат за якусь одиницю часу надходить і виходить рівна кількість теплоти. Якщо при внутрішньому методі використовуються дані про теплообмінні процеси в самому агрегаті, то при зовнішньому методі використовуються дані зовнішніх показників.

Для розрахунків теплового балансу за зовнішнім методом використовується формула

$$Q_1 = M_1 H_{1n} + M_2 H_{2n} = M_1 H_{1x} + M_2 H_{2x}, \quad (5.3)$$

де індекси: n – нагрівач, x – холодильник.

Під  $Q_1$  розуміється та кількість тепла, яка надходить в агрегат і виходить із нього за одиницю часу. Під  $H_{1n}, H_{2n}$  і  $H_{1x}, H_{2x}$  розуміється ентальпія речовин, які входять в агрегат і виходять із нього.

Можна також обчислити різницю ентальпій для того, щоб установити ту кількість тепла, яку було передано між різними середовищами. Для цього використовується формула  $Q_1 = M_1 \Delta H_1 = M_2 \Delta H_2$ .

Якщо ж у процесі теплообміну відбувалися які-небудь хімічні або фазові перетворення, використовується формула

$$Q = (M_1 - m) \Delta H_1 + \Delta H_{LS} m + m \Delta H_2 = M_2 \Delta H_2. \quad (5.4)$$

**5.3.3. Механізми теплопередачі в розрахунках теплообмінників.** Теплообмін здійснюється за допомогою трьох основних видів теплопередачі: конвекція, теплопровідність і променевість. При проведенні розрахунків параметрів передачі тепла за принципом теплопровідності використовується закон Фур'є:

$$dQ_x = -\lambda \frac{dt}{dl} dF d\tau. \quad (5.5)$$

Для обчислення кількості тепла використовуються дані про час проходження потоку, площі поверхні, градієнти температури, а також про коефіцієнт теплопровідності. Під градієнтом температури розуміється її зміна в напрямку теплопередачі на одиницю довжини.

При розрахунках теплообмінників, де передача тепла від одного середовища до іншого йде через стінку, також використовується рівняння Фур'є для одержання даних про кількість переданого тепла. Воно обчислюється як кількість тепла, яке проходить через площину з нескінченно малою товщиною:

$$\frac{dQ_x}{d\tau} = Q = -\lambda \frac{dt}{dx} F, \quad (5.6)$$

де  $F$  – площа перетину;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$dt/dx$  – градієнт температури.

Якщо проінтегрувати показники температурних змін за товщиною стінки, отримаємо

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F (t_{cm1} - t_{cm2}), \quad (5.7)$$

де  $t_{cm1}$ ,  $t_{cm2}$  – температури стінок на вході й виході з агрегату.

**5.3.4. Конвекційний механізм передачі теплоти: розрахунки.** Ще один механізм передачі тепла – конвекція, при якій використовується закон Ньютона:

$$Q = \alpha F (t_1 - t_{cm}), \quad (5.8)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі.

**5.3.5. Коефіцієнт тепловіддачі в розрахунках теплообмінників.** При обміні теплової енергії між двома текучими середовищами через відокремлювальну стінку, коли теплообмінний процес проходить через три стадії, проводиться розрахунок теплового потоку, що проходить від першого робочого середовища до стінки, потім через стінку поверхні, що передає теплоту, і потім від стінки до другого робочого середовища.

Відповідно для проведення розрахунків використовуються три формули:

$$Q = \alpha_1 F(t_1 - t_{cm1}), Q = \frac{\lambda}{\delta} F(t_{cm1} - t_{cm2}), Q = \alpha_2 F(t_2 - t_{cm2}). \quad (5.9)$$

У результаті спільного розв'язання рівнянь одержуємо

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} F(t_1 - t_2) = KF(t_1 - t_2). \quad (5.10)$$

Величина  $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$  і є коефіцієнтом теплопередачі.

**5.3.6. Розрахунок середньої різниці температур.** Коли за допомогою теплового балансу визначено необхідну кількість теплоти, слід провести розрахунок поверхні теплообміну ( $F$ ).

При розрахунку необхідної теплообмінної поверхні використовується те саме рівняння, що й при попередніх розрахунках:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} F(t_1 - t_2) = KF(t_1 - t_2). \quad (5.11)$$

У більшості випадків температура робочих середовищ буде змінюватися в процесі протікання теплообмінних процесів. Отже уздовж теплообмінної поверхні буде змінюватися різниця температур. Тому проводиться розрахунок середньої різниці температур. А у зв'язку з тим, що зміна температур не лінійна, розраховують логарифмічну різницю:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\ln \frac{t_{1H} - t_{2H}}{t_{1X} - t_{2X}}}{\ln \frac{\Delta t_H}{\Delta t_X}} \quad (5.12)$$

На відміну від прототечійного потоку, при протитечійному русі робочих середовищ необхідна площа теплообмінної поверхні повинна бути менше. Якщо в тому самому ході теплообмінника використовується й прототечійний, і протитечійний потоки, різниця температур визначається виходячи зі співвідношення  $\Delta t_{cp} = \varepsilon \Delta t_{cp}$ .

**5.3.7. Ємність і ККД теплового акумулятора.** Акумулятор на основі теплоти фазового переходу належить до систем з постійними тиском і масою. Збільшення ентальпії системи тверде тіло – рідина від  $T_1 < T_L$  до  $T_2 > T_L$  описується рівнянням

$$\Delta H = c_p^{m6} (T_L - T_1) + \Delta H_{LS} + c_p^p (T_2 - T_L), \quad (5.13)$$

де  $c_p^{m6}$  – питома теплоємність твердої фази ( $p = \text{const}$ );

$\Delta H_{LS}$  – ентальпія фазового переходу (плавлення при  $T_L = \text{const}$ );

$c_p^p$  – питома теплоємність рідкої фази ( $p = \text{const}$ ).

Перший член рівняння (5.13) визначає зміну внутрішньої енергії твердої фази, другий - теплоту фазового переходу, третій - зміну внутрішньої енергії рідкої фази.

Ексергетична ємність акумулятора визначається як:

$$\Delta E / m_{ак} = c_p^{m6} (T_L - T_1 - T_{окр} \ln T_L / T_1) + \Delta H_{LS} (1 - T_{окр} / T_L) + c_p^{жс} (T_2 - T_L - T_{окр} \ln T_2 / T_1). \quad (5.14)$$

Важливо вміти визначити значення  $\Delta H_{LS}$ .

При більш високих температурах ємність збільшується. У випадку бінарних сумішей (евтектичних) або сумішей з більш ніж двома компонентами відбувається зниження температури плавлення без відчутного зниження ентальпії фазового переходу.

ККД акумулятора визначається як відношення ексергії розрядження до ексергії зарядження, яка потрібна для відновлення початкових умов при зарядженому стані. У спеціальних випадках (наприклад, якщо теплота акумулюється не з метою генерації енергії) ККД може бути визначений як відношення збільшень ентальпій (енергій). Тоді він називається калоричним ККД  $\eta_{ак}$ .

*Повні витрати при акумулюванні*

Повний ККД  $\eta_{ак}$  акумулятора, включаючи його зарядження й розрядження, визначається трьома величинами ККД: зарядження  $\eta_з$ , зарядження зберігання  $\eta_{зб}$  і розрядження  $\eta_{роз}$ :

$$\eta_{ак} = \eta_з \eta_{зб} \eta_{роз}. \quad (5.15)$$

Особливості визначення повного ККД  $\eta_{ак}$  теплового акумулятора фазового переходу розглядаються нижче при формуванні характеристик ефективності ТА фазового переходу.

#### **5.4. Порівняння параметрів теплових акумуляторів фазового переходу, що характеризують ефективність їх використання**

ТА фазового переходу є досить складним теплоенергетичним обладнанням, яке для забезпечення працездатності може в процесі зарядження використовувати різні джерела енергії: теплові потоки ДВЗ енергетичних установок і транспортних засобів, у тому числі теплову енергію відпрацьованих газів. Також можуть використовуватись додаткові джерела енергії ТА (див. підрозділ 5.2), такі як теплова енергія гальмування транспортного засобу, що може бути отримана шляхом перетворення в електричну енергію (явище рекуперації) безпосередньо на борту ТЗ. Може використовуватись додаткова електрична енергія у вигляді підігрівачів ТАМ від стаціонарної мережі для зарядження ТА, яка додатково до основних джерел теплової енергії функціонує в системі зарядження ТА фазового переходу. Продукт, що накопичує ТА фазового переходу в результаті роботи, – теплова енергія, яка також може використовуватись для отримання кінцевого продукту в результаті роботи двигунів внутрішнього згорання ЕУ і ТЗ на відповідних режимах.



Виходячи з вище викладеного перед формуванням показників для оцінки ефективності використання ТА фазового переходу зупинимось на основних теоретичних положеннях і підходах, що використовуються в теплоенергетиці для визначення показників ефективності енергетичного устаткування. Крім того, потрібно звернути увагу на те, що, використовуючи ці положення і показники, автори навчального посібника ставлять за мету адаптувати їх і вибрати найбільш доцільні для формування критеріїв оцінки ефективності використання ТА фазового переходу.

Перші наукові відомості в галузі теорії теплоти (перший і другий закони термодинаміки) були висловлені М.В. Ломоносовим і отримали подальший розвиток у роботах С. Карно, Р. Майєра і Р. Клаузіуса. У цих роботах розвинено ідеї та розроблено питання, пов'язані з другим законом термодинаміки, введено поняття термодинамічної функції (надалі «ентропії») і сформульовано принцип зростання ентропії в незворотних процесах перетворення енергії. Клаузіусом для кількісної оцінки незворотності кругових процесів було введено вираз  $T_0 \cdot \Sigma \Delta S$ , де  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $\Sigma \Delta S$  – сумарний приріст ентропії системи, який він назвав «втратою працездатності». Завданням визначення максимальної роботи речовини в замкненій системі займався М. Гюї. Наступний крок зробив А. Стодола, який на практиці вивів методичку аналізу за межі суто термодинамічної постановки завдання, розповсюдивши її на технічну систему. Вираз для визначення втрати працездатності унаслідок зовнішньої і внутрішньої незворотності будь-яких дійсних термодинамічних процесів, аналогічний виразу Клаузіуса, відомий як теорема Гюї-Стодоли. У подальший розвиток термодинаміки в кінці ХІХ століття і першій половині ХХ століття великий внесок зробили роботи В. Нерста, який обґрунтував третє начало термодинаміки, і М. Планка, що дозволив розробити принципи та методи аналізу енергетичних установок.

Метою термодинамічного аналізу будь-якої установки є оцінка її досконалості і визначення шляхів зниження енергетичних витрат на виробництво енергетичної продукції. Спочатку методи аналізу ґрунтувалися тільки на першому законі

термодинаміки, а відсутність урахування другого закону термодинаміки при визначенні досконалості енергетичних процесів призводила до введення великої кількості різноманітних коефіцієнтів, що оцінюють ступінь використання теплової енергії.

Ефективність будь-якої енергоперетворюючої установки, що використовує органічне паливо та виробляє один вид енергетичної продукції, відповідно до першого закону термодинаміки оцінюється коефіцієнтом корисної дії

$$\eta = \frac{E_i}{B \cdot Q_n^p}, \quad (5.16)$$

де  $E_i$  – електроенергія, тепла енергія або інший вид енергетичної продукції, що виробляються установкою;

$B$  – витрата палива;

$Q_n^p$  – нижча теплота згорання палива.

У світовій практиці при аналізі ефективності теплових установок прийнято використання вищої теплоти згорання палива  $Q_g^p$ , що дає об'єктивнішу оцінку потенціалу підвищення її ККД, особливо при утилізації теплової енергії паротворення продуктів горіння, до яких належать теплові потоки і ВГ двигунів ЕУ і ТЗ. При одночасному виробництві стаціонарною енергетичною установкою електроенергії і теплової енергії ступінь досконалості процесу оцінюється роздільними показниками виробництва електроенергії і теплової енергії:

$$\eta^E = \frac{E}{B^E \cdot Q_H^p}; \quad \eta^T = \frac{Q_T}{B^T \cdot Q_H^p}, \quad (5.17)$$

де  $B^E$  і  $B^T$  – відповідно витрати палива на виробництво електроенергії  $E$  і теплоти  $Q_T$ .

Метод „рівноцінності теплоти і роботи” є різновидом методу енергетичного балансу, відповідно до якого оцінка ефективності подібних установок визначається за виразом

$$\eta_{TE} = \frac{E + Q_T}{B^E \cdot Q_H^P} \quad (5.18)$$

Для оцінки ефективності сучасних когенераційних установок малої потужності широко використовуються методи, які також засновані на енергетичному балансі і характеризуються значенням коефіцієнта використання теплоти палива

$$\eta_{КВП} = \frac{E + Q_T}{B \cdot Q_H^P} \quad (5.19)$$

Для систем енергозабезпечення, що характеризуються використанням додаткових джерел теплоти на вході в систему і наявністю декількох енергетичних продуктів на виході, оцінка ефективності за методом енергетичного балансу визначається виразом

$$\eta_{IE} = \frac{\sum E_i}{\sum \Pi_i}, \quad (5.20)$$

де  $\Pi_i$  –  $i$ -й енергетичний потік на вході в систему – органічне паливо або інший організований потік енергії, *кВт*.

Наведена балансова характеристика (5.20) системи не є величиною, що визначає термодинамічну досконалість процесів у системі, а може служити тільки суто експлуатаційною характеристикою, що визначає ступінь використання енергії, що виробляється системою. Проте Г.А. Баласанян використовує цей показник для комплексної оцінки енергетичної ефективності теплотехнічних систем, оскільки виробники енергетичних систем і установок поки ще, на жаль, не виконують термодинамічну оцінку всіх енергетичних продуктів, що генеруються ними. Такі показники, засновані тільки на першому законі термодинаміки, мають для енергетичних установок з отриманням роботи або виробленням електроенергії такі недоліки:

- використані показники мають слабкий взаємозв'язок і не дають можливості визначити термодинамічну досконалість енергоперетворюючої системи в цілому;

- кількісна оцінка вироблюваної енергетичної продукції і витрат енергії на неї не дає можливості провести порівняльну ефективність різних процесів і систем та дає викривлене уявлення про ступінь їх досконалості;

- відсутність в аналізі урахування другого начала термодинаміки не дозволяє вказати шляхи і засоби підвищення ефективності енергоустановок.

Вказані недоліки зумовили розвиток термодинамічних методів аналізу, що враховують обидва начала термодинаміки і мають назву ексергетичних. Термін «ексергія» був вперше введений З. Рантом у 1953 році. На сьогоднішній день поняття «ексергія» розглядається набагато ширше, ніж за часів його введення Рантом. Існує досить багато формулювань, що визначають поняття «ексергія», проте для вирішення завдань у галузі теплотехніки, холодильної техніки і теплових насосів достатньо використовувати тільки поняття фізичної і хімічної ексергії. *Ексергія* – це максимально можлива корисна робота (працездатність) деякої речовини, яка за хімічним складом відрізняється від навколишнього середовища ( $\mu \neq \mu_0$ ), знаходиться при тиском і температурою, відмінними від аналогічних характеристик навколишнього середовища ( $p \neq p_0$  і  $T \neq T_0$ ), якщо дану робочу речовину повністю обернено перевести з початкового стану ( $\mu$ ,  $T$  і  $p$ ) до кінцевого, який знаходиться в рівновазі з навколишнім середовищем ( $\mu_0$ ,  $T_0$  і  $p_0$ ).

Термодинамічні основи ексергетичного методу розглянуто в роботах П. Гросмана, В.М. Бродянського, В.С. Мартиновського, А.І. Андрющенко, Г.М. Костенко, Я. Шаргута, Д.П. Гохштейна, Г.А. Баласаняна та багатьох інших.

Досконалість будь-якого реального процесу оцінюється за його відхиленням від оборотного процесу, що проходить у тих самих умовах. Існує два підходи до термодинамічного аналізу, заснованому на ексергії, що враховують всі наслідки другого закону термодинаміки. Перший з них – метод потоків ексергії, особливістю якого є визначення всіх потоків ексергії. Аналіз технічних систем з використанням методу потоків ексергії

зводиться до розгляду або всієї системи, або її частини, відокремленої замкнутою контрольною поверхнею від інших систем або об'єктів (або інших частин цієї ж системи), і визначення всіх потоків ексергії, що проходять через цю поверхню.

Відповідно до методу потоків ексергії для будь-якої технічної системи можливо записати рівність

$$\sum E_{вх,i} = \sum E_{вих,i} + D, \quad (5.21)$$

де  $E_{вх,i}$  і  $E_{вих,i}$  – відповідно ексергія  $i$ -го потоку робочого тіла на вході і виході системи;

$D$  – втрати ексергії в системі.

Ступінь термодинамічної досконалості системи характеризується ексергетичним ККД

$$\eta_e = \frac{\sum E_{вих,i}}{\sum E_{вх,i} + D}. \quad (5.22)$$

При використанні ексергетичного методу необхідно визначати всі потоки ексергії на вході і виході системи, що не завжди є можливим.

Ентропійний метод, розроблений В.П. Гохштейном, дозволяє визначати ексергію тільки на вході в систему і, використовуючи принцип адитивності ентропії і втрат ексергії, віднімати всі ексергетичні втрати, внаслідок чого одержати ексергію, що відводиться з системи:

$$E_{вих,i} = E_{вх,i} - D_i, \quad (5.23)$$

де  $D_i$  – втрати ексергії в  $i$ -му елементі системи.

Ентропійний метод дає можливість кількісно врахувати ексергетичні втрати в кожному окремо взятому елементі системи за допомогою коефіцієнта ексергетичної втрати:

$$\Omega_i = D_i / E_{ex,i} . \quad (5.24)$$

Сумарна ексергетична втрата всієї системи завжди дорівнює сумі втрат її елементів, а повний коефіцієнт ексергетичних втрат є сумою всіх окремо взятих коефіцієнтів:

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{E_{ex}} = \Omega_1 + \Omega_2 + \dots + \Omega_i = \sum_{i=1}^n \Omega_i . \quad (5.25)$$

Коефіцієнт термодинамічної досконалості енергетичної системи відповідно до запропонованого методу визначається виразом

$$\eta_e = \frac{\sum E_{ex,i} - \sum_{i=1}^n D_i}{\sum E_{ex,i}} = 1 - \Omega . \quad (5.26)$$

У цілому ексергетичні методи термодинамічного аналізу – ексергетичного балансу і ентропійний – базуються на двох началах термодинаміки з урахуванням всіх їх наслідків. Метод ексергетичного балансу застосовується для більш широкого класу задач і дозволяє оцінювати та співставляти енергетичні ресурси різного вигляду, тому використовується для аналізу систем, у яких можливі не тільки перетворення енергії, але і матерії, що характерно для різних технологічних процесів і виробництв.

Наявність на виході енергетичних систем енергетичних продуктів різної ексергетичної цінності (електроенергії і тепла) вимагає при оцінці термодинамічної ефективності системи використовувати їх ексергетичний потенціал як єдиний об'єктивний показник їх енергетичної цінності. Для енергетичних систем з урахуванням використання додаткових джерел теплової енергії на вході в систему коефіцієнт перетворення енергії можливо подати як

$$\eta_{ен} = \frac{\sum E_i}{\sum Q_i}, \quad (5.27)$$

де  $\sum E_i$  – сума електричної енергії і ексергії теплових продуктів, що виробляються енергетичною системою;

$\sum Q_i$  – сумарна теплова енергія, що підводиться до системи.

Якщо чисельник і знаменник виразу (5.27) помножити на ексергію теплоти, що підводиться до системи  $\sum E_Q$ , то одержимо

$$\eta_{ен} = \frac{\sum E_Q}{\sum Q_i} \cdot \frac{\sum E_i}{\sum E_Q}, \quad (5.28)$$

де перший співмножник виражає відносну ексергетичну цінність теплоти, що підводиться до системи (температурний коефіцієнт Карно  $\eta_t^k$ ); другий співмножник – коефіцієнт термодинамічної досконалості циклу (ексергетичний ККД  $\eta_e$ ).

Таким чином, коефіцієнт перетворення енергії  $\eta_{ен}$  може бути визначений для оцінювання ефективності енергоперетворюючої системи як добуток температурного коефіцієнта Карно і значення коефіцієнта термодинамічної досконалості системи:

$$\eta_{ен} = \eta_t^k \cdot \eta_e. \quad (5.29)$$

## **5.5. Показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу**

**5.5.1. Загальні положення.** При проектуванні та експлуатації ТА фазового переходу, які використовуються за енергетичним призначенням і можуть бути використані в стаціонарній енергетиці і на транспорті, виникає потреба в розробленні системи показників для оцінювання їх конструктивних особливостей та їх ефективності. Така система показників дозволяє не тільки порівнювати різні за конструкцією

і призначенням ТА фазового переходу, визначати їх показники ефективності, а й систематизувати їх за одними або декількома класифікаційними ознаками.

Аналіз літературних джерел показує, що існує безліч різних кількісних і якісних показників для оцінювання. Вони характеризують ті або інші відмінні конструктивні особливості та особливості функціонування ТА фазового переходу тощо. Ці показники являють собою часто вживані характеристичні параметри і фізичні величини. У зв'язку з цим доцільно розділити оцінні показники на групи і надалі представляти їх стосовно кожної конкретної групи показників:

- а) часові (термінові) або температурно-часові показники;
- б) енергетичні показники;
- в) ексергетичні показники;
- г) ексергоекономічні показники;
- д) масогабаритні показники;
- е) показники, визначені за структурою складних схем;
- ж) показники, визначені за режимом навантаження;
- и) показники надійності.

Вибрані групи показників повинні відображувати найбільш загальні і суттєві для всіх ТА фазового переходу функціональні характеристики [3, 95]. Надалі будемо розглядати особливості показників кожної групи.

**5.5.2. Часові (термінові) або температурно-часові показники** характеризують функціонування ТА фазового переходу з точки зору тривалості і температурних параметрів окремих процесів. Часові (термінові) або температурно-часові показники при проведенні оцінки ТА фазового переходу можуть представлятися в реальних (розмірних) значеннях (величини реального часу, температури) і у відносних (безрозмірних) значеннях (безрозмірних величинах).

До часових (термінових) належать такі показники:

- тривалість (час, інтервал часу) зарядки ТА фазового переходу  $\tau_{зар}$  - проміжок часу, протягом якого ТА фазового переходу накопичує теплову енергію від якого-небудь теплоносія чи джерела;



- тривалість (час, інтервал часу) зберігання теплової енергії  $\tau_{збер}$  - проміжок часу, протягом якого здійснюється теплообмін накопичувача теплової енергії ТА фазового переходу тільки з навколишнім середовищем;

- тривалість (час, інтервал часу) розрядження ТА фазового переходу  $\tau_{роз}$  - проміжок часу, протягом якого ТА фазового переходу віддасть раніше накопичену теплову енергію якомусь теплоносію.

Тривалість (час) одного циклу функціонування ТА фазового переходу  $\tau_{ц}$  являє собою суму вищеназваних показників:

$$\tau_{ц} = \tau_{зар} + \tau_{збер} + \tau_{роз} . \quad (5.30)$$

До температурно-часових належать такі показники:

- характерні температури  $t_{зар,i}$  і інтервал часу  $\tau_{зар,i}$  за який досягається відповідна характерна температура в процесі зарядження ТА фазового переходу - проміжок часу, протягом якого ТА фазового переходу накопичує теплову енергію від якого-небудь теплоносія чи джерела і досягає характерної температури;

- характерні температури  $t_{збер,i}$  і інтервал часу  $\tau_{збер,i}$  зберігання теплової енергії - проміжок часу, протягом якого здійснюється теплообмін накопичувача теплової енергії ТА фазового переходу тільки з навколишнім середовищем і досягає характерної температури;

- характерні температури  $t_{роз,i}$  і інтервал часу  $\tau_{роз,i}$ , за який досягається відповідна характерна температура в процесі розрядження ТА фазового переходу, - проміжок часу, протягом якого ТА фазового переходу віддасть раніше накопичену теплову енергію якомусь теплоносію і досягне характерної температури.

Особливість застосування безрозмірних величин полягає в такому: їх використання бажано в тих випадках, коли проводиться оцінка показників роботи ТА фазового переходу без урахування його зв'язків із споживачем і постачальником теплової енергії, а досліджуються тільки безпосередньо фазоперехідні процеси в теплоакумуючих матеріалах.

Часові (термінові) показники ТА фазового переходу можуть бути також представлені і безрозмірними величинами:

- відносна тривалість (час, інтервал часу) заряджання ТА фазового переходу  $\bar{\tau}_{зар}$  :

$$\bar{\tau}_{зар} = \frac{\tau_{зар}}{\tau_{ц}} ; \quad (5.31)$$

- відносна тривалість (час, інтервал часу) зберігання теплоти  $\bar{\tau}_{збер}$  :

$$\bar{\tau}_{збер} = \frac{\tau_{збер}}{\tau_{ц}} ; \quad (5.32)$$

- відносна тривалість (час, інтервал часу) розряджання ТА фазового переходу  $\bar{\tau}_{роз}$  :

$$\bar{\tau}_{роз} = \frac{\tau_{роз}}{\tau_{ц}} . \quad (5.33)$$

Залежність між введеними (представленими) безрозмірними величинами являє собою суму вищеназваних показників і виражається такою формулою:

$$\bar{\tau}_{зар} + \bar{\tau}_{збер} + \bar{\tau}_{роз} = 1. \quad (5.34)$$

**5.5.3. Енергетичні показники** характеризують функціонування ТА фазового переходу з точки зору його енергетичного досконалості в циклі роботи ТА, а саме в процесах заряджання, зберігання теплової енергії та розряджання. Прийнято розрізняти інтегральні і потужнісні параметри. Інтегральні показники оцінюють кількість теплової енергії в процесі повного циклу роботи ТА фазового переходу або в процесах заряджання, зберігання теплової енергії та розряджання. Показники потужності ТА фазового переходу

використовують для характеристики інтенсивності зазначених процесів у часі, оскільки процеси накопичення, зберігання і віддачі накопиченої теплової енергії мають нестационарний характер.

До інтегральних енергетичних показників належать такі величини:

- кількість теплової енергії, яку акумулює ТА фазового переходу в процесі заряджання  $Q_{зар}$ ;
- теплові втрати в процесі зберігання теплової енергії  $Q_{збер}$ ;
- кількість теплової енергії, яку віддає ТА фазового переходу в процесі розряджання  $Q_{роз}$ .

За умови, що в процесі заряджання ТА фазового переходу його ТАМ з початковою температурою  $T_1$  нагрівається у твердій фазі до температури фазового переходу  $T_\phi$ , плавиться при цій же температурі і далі нагрівається в рідкій фазі до деякої температури  $T_2$ , при якій настає тепла рівновага між ним і утилізованим теплоносієм, величина  $Q_{зар}$  дорівнюватиме величині  $Q_{АКК}$ . Кількість акумульованої теплової енергії  $Q_{АКК}$  в процесі фазового перетворення теплоакumuлюючого матеріалу плавлення-кристалізація визначається такимим рівнянням:

$$Q_{АКК} = m_T \cdot \int_{T_1}^{T_\phi} C_{ТВ}(T) dT + m_T \cdot r_T + m_T \cdot \int_{T_\phi}^{T_2} C_p(T) dT = Q_{зар}, \quad (5.35)$$

де  $m_T$  - маса ТАМ, що зазнає фазового переходу плавлення-кристалізація, кг;

$C_{ТВ}(T)$ ,  $C_p(T)$  - питомі масові теплоємності ТАМ залежно від його температури відповідно у твердій і рідкій фазах, Дж/(кг·К);

$r_T$  - питома тепла енергія фазового переходу плавлення-кристалізація, Дж/кг;

$T$ ,  $T_2$ ,  $T_\phi$  - відповідно початкова, кінцева і фазового переходу температури ТАМ, К.

Слід зазначити, що в науково-технічній літературі широко використовується термін «теплова ємність ТА фазового переходу». По суті він ідентичний введеним вище показникам і

являє собою або кількість теплоти, яку акумулює ТА фазового переходу в процесі заряджання  $Q_{зар}$ , або кількість теплової енергії, яку він віддає споживачеві в процесі розряджання  $Q_{роз}$ .

Крім інтегральних значень  $Q_{роз}$ ,  $Q_{збер}$ ,  $Q_{зар}$ , що характеризують функціонування конкретного ТА фазового переходу у відповідних умовах, доцільним є використання питомих енергетичних показників, які одержуються шляхом ділення інтегральних показників на масу ТАМ  $m_T$  або його об'єм  $V_T$ . Так, важливе практичне значення має раніше введена для характеристики ТАМ щільність акумулювання теплової енергії  $q_{АКК}$ , що є одночасно показником не тільки ТАМ, але і ТА фазового переходу і розраховується за формулою:

$$q_{АКК} = \rho_{ТВ} \cdot \int_{T_1}^{T_\phi} C_{ТВ}(T) dT + \rho_p \cdot r_T + \rho_T \cdot \int_{T_\phi}^{T_2} C_p(T) dT, \quad (5.36)$$

де  $q_{АКК}$  - щільність акумулювання теплової енергії, кДж/м<sup>3</sup>;

$\rho_{ТВ}$ ,  $\rho_p$  - густина ТАМ відповідно у твердій і рідкій фазах, кг/м<sup>3</sup>;

$r_T$  - питома тепла енергія фазового переходу плавлення-кристалізація, кДж/кг;

$c_{ТВ}(T)$ ,  $c_p(T)$  - питомі масові теплоємності ТАМ залежно від його температури відповідно у твердій і рідкій фазах, кДж/(кг·К);

$T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_\phi$  - відповідно початкова і кінцева температури ТАМ, К.

Оскільки процеси накопичення, зберігання і віддачі накопиченої теплової енергії мають нестационарний характер, то для характеристики інтенсивності цих процесів у часі доцільно прийняти такі показники потужності ТА фазового переходу:

- тепла потужність ТА фазового переходу в процесі заряджання  $P_{зар}$ :

$$P_{зар} = \frac{dQ_{зар}(\tau)}{d\tau}; \quad (5.37)$$

- тепла потужність в процесі зберігання теплоти (потужність теплових втрат)  $P_{збер}$ :

$$P_{\text{збер}} = \frac{dQ_{\text{збер}}(\tau)}{d\tau}; \quad (5.38)$$

- теплова потужність ТА фазового переходу в процесі розряджання  $P_{\text{роз}}$ :

$$P_{\text{роз}} = \frac{dQ_{\text{роз}}(\tau)}{d\tau}. \quad (5.39)$$

Теплові потужності, що розраховуються за формулами (5.37) – (5.39), являють собою миттєві величини, що змінюються в часі. Практичне значення, як правило, мають середні теплові потужності ТА фазового переходу:

- у процесі заряджання  $P_{\text{зар}}^{\text{сер}}$ :

$$P_{\text{зар}}^{\text{сер}} = \frac{Q_{\text{зар}}}{\tau_{\text{зар}}}; \quad (5.40)$$

- у процесі зберігання теплової потужності (потужність теплових втрат)  $P_{\text{збер}}^{\text{сер}}$ :

$$P_{\text{збер}}^{\text{сер}} = \frac{Q_{\text{збер}}}{\tau_{\text{збер}}}; \quad (5.41)$$

- у процесі розряджання  $P_{\text{роз}}^{\text{сер}}$ :

$$P_{\text{роз}}^{\text{сер}} = \frac{Q_{\text{роз}}}{\tau_{\text{роз}}}, \quad (5.42)$$

а також пікова теплова потужність у процесі розряджання ТА фазового переходу  $P_{\text{роз}}^{\text{пik}}$ :

$$P_{\text{роз}}^{\text{пik}} = \left( \frac{dQ_{\text{роз}}}{d\tau_{\text{роз}}} \right)_{\text{max}}. \quad (5.43)$$

Енергетичні показники ТА фазового переходу можуть бути представлені у вигляді безрозмірних величин - енергетичних ККД, що характеризують ступінь енергетичної досконалості здійснення процесів накопичення, зберігання і віддачі накопиченої теплової енергії:

- сумарний енергетичний ККД ТА фазового переходу  $\eta_{\Sigma}$ :

$$\eta_{\Sigma} = \frac{Q_{\text{роз}}}{Q_{\text{під}}}, \quad (5.44)$$

де  $Q_{\text{під}}$  – енергія, що підводиться при заряджанні ТА фазового переходу, кДж;

- енергетичний ККД процесу заряджання ТА фазового переходу  $\eta_{\text{зар}}$ :

$$\eta_{\text{зар}} = \frac{Q_{\text{зар}}}{Q_{\text{під}}}; \quad (5.45)$$

- енергетичний ККД процесу зберігання теплової енергії  $\eta_{\text{збер}}$  (частка енергії, що залишилась у ТА):

$$\eta_{\text{збер}} = \frac{Q_{\text{зал}}}{Q_{\text{зар}}}, \quad (5.46)$$

де  $Q_{\text{зал}}$  - кількість залишкової теплової енергії в ТА фазового переходу після періоду зберігання, кДж;

- енергетичний ККД процесу розряджання ТА фазового переходу  $\eta_{\text{роз}}$ :

$$\eta_{\text{роз}} = \frac{Q_{\text{роз}}}{Q_{\text{зал}}}. \quad (5.47)$$

Залежність між введеними вище енергетичними ККД, у вигляді сумарного енергетичного ККД ТА фазового переходу виражається такою формулою:

$$\eta_{\Sigma} = \prod_{i=1}^{i=3} \eta_i = \eta_{\text{зар}} \cdot \eta_{\text{збер}} \cdot \eta_{\text{роз}} \quad (5.48)$$

**5.5.4. Ексергетичні показники** характеризують функціонування ТА фазового переходу з точки зору збереження здатності теплової енергії здійснювати корисну роботу в процесі повного циклу роботи ТА фазового переходу, а саме в процесах заряджання, зберігання і розряджання [3]. З термодинаміки відомо, що теплову енергію можливо розділити на дві частини: доступну і недоступну для перетворення в корисну роботу. Ексергія визначається як частина енергії, яка піддається перетворенню в корисну роботу за допомогою ідеальної машини, що відводить теплову енергію при температурі навколишнього середовища. Таким чином, ексергетичні показники застосовуються лише в тих випадках, коли ТА фазового переходу, будучи елементом термодинамічної системи, використовуються для перетворення теплової енергії в роботу.

Теорія ексергетичного аналізу розглянутих процесів теплового акумулювання у фазоперехідних матеріалах розроблена в роботах М.А. Rosen, F.C. Hooper, L.N. Barbaris (Канада), А. Vejan, M.De Lucia (США), М.І. Куколева (Росія), В.В. Шульгіна та інших. Необхідність проведення ексергетичного аналізу викликана тим, що чисто енергетичний підхід не дозволяє врахувати ряд аспектів, пов'язаних з необоротністю процесів, що реально протікають.

До інтегральних ексергетичних показників належать такі величини:

- кількість ексергії, підведеної до ТА фазового переходу в процесі заряджання  $\mathcal{E}_{\text{під}}$ :

$$\mathcal{E}_{\text{під}} = Q_{\text{під}} \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{під}}} \right), \quad (5.49)$$

де  $T_{\text{під}}$  - температура підведення в ТА фазового переходу теплової енергії, К;

- кількість ексергії, яку акумулює ТА фазового переходу в процесі заряджання  $\mathcal{E}_{\text{зар}}$  :

$$\mathcal{E}_{\text{зар}} = Q_{\text{зар}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\Phi}}\right); \quad (5.50)$$

- кількість ексергії після періоду зберігання енергії  $\mathcal{E}_{\text{збер}}$  :

$$\mathcal{E}_{\text{збер}} = Q_{\text{зал}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\Phi}}\right); \quad (5.51)$$

- кількість ексергії, що відводиться з ТА фазового переходу в процесі розряджання  $\mathcal{E}_{\text{роз}}$  :

$$\mathcal{E}_{\text{роз}} = Q_{\text{роз}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{відв}}}\right), \quad (5.52)$$

де  $T_{\text{відв}}$  - температура тепловідведення з ТА фазового переходу, К.

Ексергетичні показники, як і енергетичні, можуть бути представлені у вигляді безрозмірних величин - ексергетичних ККД, що характеризують ступінь ексергетичної досконалості процесів накопичення, зберігання і віддачі накопиченої теплової енергії:

- сумарний ексергетичний ККД ТА фазового переходу  $\Psi_{\Sigma}$  :

$$\Psi_{\Sigma} = \frac{\mathcal{E}_{\text{роз}}}{\mathcal{E}_{\text{під}}} = \eta_{\Sigma} \cdot \frac{1 - \frac{T_0}{T_{\text{відв}}}}{1 - \frac{T_0}{T_{\text{під}}}}; \quad (5.53)$$

- ексергетичний ККД процесу заряджання ТА фазового переходу  $\Psi_{\text{зар}}$  :

$$\Psi_{\text{зар}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{зар}}}{\mathcal{E}_{\text{під}}} = \eta_{\text{зар}} \cdot \frac{1 - \frac{T_0}{T_{\Phi}}}{1 - \frac{T_0}{T_{\text{під}}}}; \quad (5.54)$$



- ексергетичний ККД процесу зберігання теплової енергії в ТА  $\Psi_{\text{збер}}$ :

$$\Psi_{\text{збер}} = \frac{\varepsilon_{\text{збер}}}{\varepsilon_{\text{зар}}} = \frac{Q_{\text{зал}}}{Q_{\text{зар}}} = \eta_{\text{збер}}; \quad (5.55)$$

- ексергетичний ККД процесу розрядження ТА фазового переходу  $\Psi_{\text{роз}}$ :

$$\Psi_{\text{роз}} = \frac{\varepsilon_{\text{роз}}}{\varepsilon_{\text{збер}}} = \eta_{\text{роз}} \cdot \frac{1 - \frac{T_0}{T_{\text{відв}}}}{1 - \frac{T_0}{T_{\text{ф}}}}. \quad (5.56)$$

Залежність між введеними вище енергетичними та ексергетичними ККД виражається такою формулою:

$$\Psi_{\Sigma} = \prod_{j=1}^{j=3} \Psi_j = \Psi_{\text{зар}} \cdot \Psi_{\text{збер}} \cdot \Psi_{\text{роз}} = \eta_{\Sigma} \cdot \frac{1 - \frac{T_0}{T_{\text{відв}}}}{1 - \frac{T_0}{T_{\text{під}}}}. \quad (5.57)$$

**5.5.5. Ексергоекономічні показники.** Будь-який аналіз і оптимізація технічних систем, що засновані на методах класичної термодинаміки, пов'язані з певними обмеженнями, які обумовлені тим, що термодинамічний аналіз оперує поняттями «витрати енергії (ексергії)» у той час, як для остаточної оцінки будь-якого технічного рішення необхідно враховувати всі види витрат. Отже будь-який аналіз і оптимізація енергетичних систем повинні ґрунтуватися на суспільно необхідних витратах і врешті-решт вести до економії природних ресурсів і людської праці.

Основне завдання ексергетичного аналізу – дослідження ступеня досконалості процесів і визначення можливих меж її підвищення. У цій сфері ексергія значно полегшує пояснення впливу незворотностей. При аналізі, синтезі і оптимізації конструкції ТА фазового переходу транспортних засобів і енергетичних установок ексергетичний метод не може дати результатів, принципово відмінних від класичних

термодинамічних. З 1960-х років, починаючи з робіт американських вчених Р. Гаджіолі, М. Трейбуса, Р. Еванса, Е. Ель-Саєда, Я. Шаргута, почався новий період у розвитку класичної термодинаміки – термoeкономіка, як напрям у прикладній термодинаміці в застосуванні до енергоперетворюючих систем.

Термoeкономіка – це наука про раціональне використання енергетичних ресурсів у контексті поєднання другого закону термодинаміки і економічного аналізу. Термoeкономічний (ексергoeкономічний) аналіз є досить вдалим порівняно з іншими способами визначення ефективності енергетичних систем. Методи термoeкономіки є також найкоротшим шляхом до вирішення складних завдань оптимізації.

Ексергoeкономічна оцінка, що проводиться на рівні компонентів системи, використовує такі критерії для  $k$ -го компонента.

Критерії ексергетичного аналізу:  
- абсолютна деструкція ексергії

$$E_{D,k} = E_{F,k} - E_{P,k}, \quad (5.58)$$

де  $E_{F,k}$  – ексергія «палива»;

$E_{P,k}$  – ексергія «продукту»;

- ексергетична ефективність

$$\varepsilon_k = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}}. \quad (5.59)$$

Критерії ексергoeкономічного аналізу:

- ціна ексергії «палива»

$$c_{F,k} = \frac{C_{F,k}}{E_{F,k}}; \quad (5.60)$$

- ціна ексергії «продукту»

$$c_{P,k} = \frac{C_{P,k}}{E_{P,k}}; \quad (5.61)$$

- вартість, пов'язана з деструкцією ексергії,

$$C_{D,k} = c_{F,k} \cdot E_{D,k}; \quad (5.62)$$

- вартість капітальних та експлуатаційних витрат

$$Z_k = Z_k^{CI} + Z_k^{OM}, \quad (5.63)$$

де  $Z_k^{CI}, Z_k^{OM}$  – відповідно вартості капітальних витрат або інвестицій та експлуатаційних витрат;

- ексергоекономічний фактор

$$f_k = \frac{Z_k}{Z_k + c_{F,k} \cdot E_{D,k}}; \quad (5.64)$$

- оптимальна ексергетична ефективність

$$\varepsilon_k^{OPT} = \frac{1}{1 + F_k} \quad (5.65)$$

при

$$F_k = \left( \frac{(\beta_{вк} + \gamma_k) \cdot B_k \cdot n_k}{\tau_{ек} \cdot c_{f,k} E_{P,k}^{1-m_k}} \right)^{\frac{1}{n_k+1}}, \quad (5.66)$$

де  $\beta_{вк}$  – фактор відновлення капіталу;

$\gamma_k$  – коефіцієнт, що враховує постійну частину експлуатаційних витрат і витрат на обслуговування, залежних від загальних капітальних інвестицій, що асоційовані з  $k$ -м компонентом ( $TCl_k$ );

$B_k \cdot n_k, m_k$  – сталі, що використовуються при визначенні  $TCl_k$  як функції від  $\varepsilon_k$  і  $E_{p,k}$ ;

$\tau_{ек}$  – середньорічний час експлуатації системи при номінальній продуктивності.

Підходи, що використовують рівняння (5.58)-(5.66), знаходяться у стадії розвитку і вдосконалення.

В ексергоекономічному аналізі поняття ексергії  $E$  використовується як основа для формування витрат в енергоперетворюючих системах, тобто для визначення ексергетичної вартості  $C = c \cdot E$ . Ексергетична вартість входить до балансів вартості, що формуються для кожного компонента. Баланс вартості для окремого енергоперетворюючого компонента показує, що сума вартостей, пов'язаних з процесом транспорту ексергії, дорівнює сумі вартостей всіх видів ексергії плюс відповідна вартість капітальних інвестицій  $Z_k^{CI}$  і витрат на обслуговування  $Z_k^{OM}$

$$\sum_e C_{e,k} + C_{w,k} = C_{q,k} + \sum_i C_{i,k} + Z_k, \quad (5.67)$$

де  $C_{e,k}, C_{i,k}$  – відповідно вхідна і вихідна вартості потоків ексергії в  $k$ -му компоненті;

$C_{w,k}$  – вартість потоку ексергії, що пов'язана з витратою роботи в компоненті;

$C_{q,k}$  – вартість потоку ексергії, що пов'язана з виведенням тепла з компонента.

Для кожного компонента системи вартість потоків ексергії на вході  $C_{i,k}$  – відома величина. Отже невідомі, які повинні бути розраховані за допомогою балансу вартості  $k$ -го компонента, – вартості потоків ексергії  $C_{e,k}$ , що виходять з компонента.

Як правило, кількість рівнянь балансів вартості компонентів системи менше від кількості потоків ексергії  $C_{e,k}$ , які виходять з компонента, що зумовлює необхідність включення до системи

додаткових рівнянь для отримання єдиного розв'язку системи лінійних рівнянь, при якому кількість невідомих дорівнює кількості рівнянь у системі.

Для формування додаткових рівнянь вартості, що характеризують взаємозв'язок між компонентами, для безперервних ексергетичних потоків кожного компонента системи вводиться поняття «паливо» (будь-яке зменшення ексергії потоку між входом і виходом компонента) і «продукту» (будь-яке збільшення ексергії потоку між входом і виходом компонента). Для ексергетичних потоків, що уриваються, ексергія на вході в компонент є «паливом», а ексергія на виході компонента – є частиною «продукту».

Для «палива» застосовується правило **F**, засноване на тому, що видалення вартості з потоку при проходженні через  $k$ -й компонент має дорівнювати останній вартості, за якою видалена ексергія була передана цьому потоку. Для безперервних ексергетичних потоків правило **F** можна записати як

$$c_{F,k}^X \cdot \sum_{y=1}^{NS} (E_{in,k,y}^X - E_{out,k,y}^X) = \sum_{y=1}^{NS} c_{in,k,y}^X \cdot (E_{in,k,y}^X - E_{out,k,y}^X), \quad (5.68)$$

де  $X$  – форма ексергії;

$y$  – номер ексергетичного потоку;

$NS$  – загальна кількість ексергетичних потоків в  $X$  формах, що проходять через  $k$ -й компонент.

Середня ціна ексергії «палива» в компоненті  $c_{F,k}^X$  визначається як

$$c_{F,k}^X = \frac{\sum_{y=1}^{NS} (C_{in,k,y}^X - C_{out,k,y}^X)}{\sum_{y=1}^{NS} (E_{in,k,y}^X - E_{out,k,y}^X)}, \quad (5.69)$$

де  $E_{in,k,y}^X, E_{out,k,y}^X, C_{in,k,y}^X, C_{out,k,y}^X$  – відповідно вхідні і вихідні ексергетичні потоки і їх вартості, пов'язані з  $X$ -ю ексергетичною формою  $y$ -го потоку  $k$ -го компонента.

Для «продукту» застосовується правило **P**, яке стверджує, що кожна одиниця ексергії пов'язана з «продуктом»  $k$ -го компонента за однаковою ціною. Для безперервних ексергетичних потоків правило **P** записується як

$$C_{F,k,x} = C_{P,k,x} = C_{P,k}, \quad (5.70)$$

де  $C_{P,k}$  – ціна ексергії «продукту»  $k$ -го компонента.

Наведена методика формування допоміжних рівнянь вартості встановлює залежність між ексергетичною ефективністю компонента і формулюванням допоміжних рівнянь. Баланси вартості для всіх компонентів і допоміжні рівняння вартості утворюють систему лінійних рівнянь, розв'язання якої визначає вартість кожного матеріального і енергетичного потоку в системі. Система рівнянь балансів вартості компонентів і додаткових рівнянь вартості бажано доповнювати математичною моделлю, яка встановлює залежність технологічних параметрів у кожній точці системи від капітальних витрат на усунення термодинамічної неефективності устаткування та експлуатаційних витрат системи.

**5.5.6. Масогабаритні показники** дозволяють оцінити можливість встановлення ТА фазового переходу на конкретний транспортний засіб; впливають на прийняття того чи іншого компонуального рішення, пов'язаного з розміщенням ТА фазового переходу в підкапотному просторі автомобіля (або іншому зручному місці), а також на зміни його експлуатаційних властивостей - ресурсопридатності, соціальної пристосованості, ремонтопридатності, зберігання, транспортабельності тощо.

До масогабаритних показників слід віднести такі:

- повна маса ТА фазового переходу (з урахуванням маси теплоносія, що зберігається в ТА фазового переходу)  $m_{TA}$ :

$$m_{TA} = m_{TAM} + m_K, \quad (5.71)$$

де  $m_{TAM}$  - сумарна маса ТАМ;

$m_K$  - маса конструктивних елементів.

Сумарна маса ТАМ, необхідна для роботи ТА, визначається як

$$m_{ТАМ} = \frac{Q_{H_2}}{L} = \frac{Q_{H_2}}{L + (c_{ТА,мв} \cdot \Delta T_{мв}) + (c_{ТА,мв-жс} \cdot \Delta T_{мв-жс}) + (c_{ТА,жс} \cdot \Delta T_{жс})} = \frac{Q_{H_2}}{L + c_p^3}, \quad (5.72)$$

де  $m_{ТА}$  – маса ТАМ, кг;

$Q_{H_2}$  - кількість енергії в ТА фазового переходу після періоду зберігання (кількість енергії, отриманої з ДВЗ), Дж;

$c_{ТА}$  – теплоємність ТАМ, відповідно у твердій і рідких фазах, Дж/(кг·К);

$L$  – питома теплова енергія фазового переходу ТАМ, Дж/кг;

$\Delta T$  – зміна температури (підвищення температури ТАМ при зарядці), К;

$c_p^3$  - ефективна теплоємність ТАМ;

- конструктивна маса ТА фазового переходу (без урахування маси теплоносія, що зберігається в ТА фазового переходу)  $m'_{ТА}$ .

Маса (вага) корпусу ТА

$$G \approx 2VS\rho_M(2/R+1/H), \quad (5.73)$$

де  $V$  - об'єм ТА, м<sup>3</sup>;

$S$  - товщина стінки, мм;

$\rho_3$  - питома вага металу, кг/м<sup>3</sup>;

$R$  – радіус ТА, мм;

$H$  – висота ТА, мм.

Товщина стінок

$$S = D_B P / (2\sigma_D \varphi - p) + c, \quad (5.74)$$

де  $P$  - розрахунковий тиск, МПа;

$D_B$  - внутрішній діаметр, мм;

$\sigma_D$  - допустиме напруження в металі, МПа;

$\varphi$  - коефіцієнт міцності зварних з'єднань;

$c$  - доданок, який враховує зменшення товщини стінки під час виготовлення та протягом терміну експлуатації, мм (приймається 1 при  $S < 30$  мм та 0 при  $S > 30$  мм).

Допустиме напруження в металі

$$\sigma = K / n, \quad (5.75)$$

де  $K$  - характеристика міцності матеріалу;

$n$  - коефіцієнт запасу міцності,  $n = 1,7$ .

За необхідності збільшення сумарного об'єму акумуляторів здійснюється за рахунок їх кількості або за рахунок висоти ТА;

- об'єм ТА фазового переходу  $V_{ТА}$ . За загальним об'ємом елементів ТА (дорівнює об'єму ТАМ у твердій і рідкій фазах з урахуванням об'єму оболонки та компенсаційної порожнини елементів ТА) з урахуванням простору між ними визначається об'єм робочої частини ТА. Виходячи з особливостей розміщення ТА вибираються розміри його робочої частини і розміри підвідного і відвідного патрубків (дифузора і конфузора). Площа поперечного перерізу акумулятора повинна вибиратися в бік збільшення для зменшення швидкості і відповідно зниження гідродинамічних втрат.

Механічний розрахунок ТА виконується на тиск  $P_3$  з урахуванням висоти корпусу  $H$  на тиск ТАМ у трубопроводі  $p + 0,01H$ ;

- габаритні розміри ТА фазового переходу  $l_{ТА} \times b_{ТА} \times h_{ТА}$ .

Найбільш істотним безрозмірним масогабаритним показником ТА фазового переходу є компактність  $\Omega_{ТА}$ , що характеризує досконалість його конструкції і визначається за формулою

$$\Omega_{ТА} = \frac{V_T}{V_{ТА}}, \quad (5.76)$$

де  $V_T$  - об'єм ТАМ теплового акумулятора, м<sup>3</sup>.



При оцінюванні масогабаритних показників ТА фазового переходу їх потрібно поділяти на основні компоненти, серед яких, щонайменше, проектувальний, експлуатаційний, економічний.

До *проектувального* компонента відносимо:

- уніфікацію основних елементів конструкції ТА фазового переходу:

а) активної частини ТА;

б) неактивної частини;

в) тощо;

- зниження рівня складності інженерних розрахунків:

а) зниження витрат праці;

б) витрати часу;

в) тощо;

- зниження матеріальних витрати на виготовлення ТА фазового переходу:

а) конструкційні сталі;

б) кольорові метали;

в) ізоляція;

г) тощо;

- забезпечення високого рівня параметрів:

а) показники міцності;

б) теплові навантаження;

в) тощо.

До *експлуатаційного* компонента відносимо:

- менші витрати часу, праці на ремонт і діагностику:

а) статичні елементи конструкції;

б) динамічні елементи конструкції;

в) елементи моніторингу, діагностування і керування;

г) тощо;

- простоту монтажних і пуско-налагоджувальних робіт:

а) зварні, болтові та інші з'єднання елементів конструкції;

б) ізоляційні матеріали;

в) струмопровідні елементи;

г) тощо;

- оптимальне використання матеріалів у конструкції ТА фазового переходу;

- безпеку і неперервність отримання теплової енергії:

- а) обслуговуючого персоналу;
- б) ТА фазового переходу (безпосередньо);
- в) сполучених об'єктів до ТА фазового переходу тощо;

До *економічного* компонента відносимо:

- зниження потрібних потужностей на виготовлення конструкції ТА фазового переходу, які враховуються фінансовими витратами:

- а) механічними;
- б) електричними;
- в) тепловими тощо;

- оптимізацію регламенту роботи виробника і кількості працівників при виготовленні ТА фазового переходу, при їх технічному обслуговуванні і ремонті:

- а) заробітна плата;
- б) умови праці тощо;

- раціональне фінансування постачання основними матеріалами при виготовленні ТА фазового переходу, при їх технічному обслуговуванні і ремонті:

- а) метали;
- б) неметали;

- доцільність фінансових витрат щодо вентиляції, охолодження тощо при виготовленні ТА фазового переходу, при їх технічному обслуговуванні і ремонті:

- а) гідравлічні пристрої для теплообмінників;
- б) системи оливозабезпечення;
- в) обладнання для забезпечення необхідного тиску всередині корпусу ТА фазового переходу тощо;

#### **5.5.7. Показники, визначені за структурою складних схем.**

Для схем енергетичних установок і транспортних засобів з ТА фазового переходу загальною частиною є первинний двигун-генератор або приводний транспортний двигун, система утилізації теплової енергії від охолодження двигуна і (або) система утилізації теплової енергії відпрацьованих газів.

Залежно від особливостей споживача теплової енергії енергетичної установки і (або) транспортного засобу, що утилізується, використовується для накопичення теплової енергії в ТА фазового переходу, що зумовлює наявність у тепловій схемі відповідних теплообмінних апаратів і систем. Теплоносієм у таких системах звичайно є охолоджуюча рідина (вода, антифриз, тосол тощо), температура якої на виході системи, як правило, 80–100 С.

Підвищення ефективності систем утилізації теплової енергії за рахунок інтеграції з ТА фазового переходу і з іншими джерелами енергії зумовлює велику різноманітність схемних рішень, порівняння ефективності яких вимагає опрацювання відповідних критеріїв.

Завдання оцінки ефективності безпосередньо пов'язано з завданням оптимізації параметрів і структури теплової схеми, що в загальному випадку включає:

- оптимізацію термодинамічних і витратних параметрів системи;
- оптимізацію конструктивно-компонувальних параметрів елементів устаткування і агрегатів системи;
- оптимізацію виду теплової схеми установки з урахуванням технічних і структурних обмежень.

Загальні методи вирішення завдання оптимізації складу і структури системи до цього часу ще не розроблено, хоча теорія вибору варіантів дозволяє математично формалізувати деякі етапи поставленого завдання.

Стосовно особливостей досліджень теплових схем можливо виділити такі методи їх оптимізації:

- метод, заснований на забезпеченні незмінності структурних умов завдання в процесі оптимізації;
- метод синтезу теплових схем по деяких визначальних параметрах.

У вказаних методах зміни у схемі пов'язані з величиною сумарних мінімізованих приведених витрат, яка доповнюється сумою витрат  $Z_k$ , залежних від зміни схеми,

$$Z_{\Sigma} = Z(Z_H) + \sum_{k=1}^{k_{\max}} Z_k, \quad (5.77)$$

де  $Z(Z_n)$  – приведені витрати, залежні від вектора термодинамічних параметрів теплової схеми  $Z_n$ ;

$k$  – номер елемента або зв'язку в тепловій схемі.

Дані методи ефективні при вирішенні ряду завдань оптимізації теплових схем, для яких характерна наявність груп однорідних елементів, призначених для виконання одного процесу (система утилізації теплової енергії тощо), кількість яких і зв'язки між якими підлягають оптимізації.

Для схем енергетичних установок і транспортних засобів з ТА фазового переходу більш характерна широка різноманітність окремих елементів, які відрізняються варіантами зв'язків між ними.

Для порівняльного аналізу і оптимізації схем енергетичних установок і транспортних засобів з ТА фазового переходу доцільніше застосувати ексергоекономічний метод, перевага якого виявляється при аналізі та оптимізації складних і комплексних енергоперетворюючих систем.

Цільова функція, значення якої мінімізується, дорівнює сумарній вартості енергетичних «продуктів» на виході системи (електроенергія, гаряча вода, тепла енергія на опалювання тощо) і визначається виразом

$$C_{\Sigma} = c_w \cdot N_{ел} + C_{ГВП} + C_{опал} \rightarrow \min, \quad (5.78)$$

де  $c_w$  – вартість 1 кВт·год електроенергії, грн/кВт·год;

$N_{ел}$  – поточна електрична потужність установки з ТА фазового переходу, кВт;

$C_{ГВП}$  – вартість потоку ексергії на ГВП, грн/год;

$C_{опал}$  – вартість потоку ексергії на опалювання, грн/год.

Поставлене завдання оптимізації належить до класу задач нелінійного програмування та розв'язується відповідними методами.

### 5.5.8. Показники, визначені за режимом навантаження.

Режими навантаження енергетичних установок з ТА фазового переходу у вигляді добових графіків електричного і теплового навантажень об'єктів енергозабезпечення характеризуються значною нерівномірністю, низьким коефіцієнтом заповнення та невідповідністю теплової потужності потребі об'єкту в тепловій енергії, що утилізується, що суттєво знижує економічну ефективність використання систем утилізації теплової енергії.

Завдання узгодження графіків електричного і теплового навантажень установки утилізації теплової енергії з ТА фазового переходу, що працює автономно або зв'язана з енергосистемою, вирішується різними методами, кожний з яких має свої технічні та економічні переваги і недоліки, а їх застосування залежить від переважаючого графіка роботи і співвідношення теплової енергії установки, що утилізується, до теплового навантаження споживача. При цьому можливі різні варіанти.

1. Робота утилізаційної установки за електричним графіком навантаження ( $N_i^{спож} = N_i^{ген}$ ):

а) теплове навантаження споживача  $Q_i^{спож}$  значно менше тепла установки, що утилізується,  $Q_i^{ум}$

$$Q_i^{спож} < Q_i^{ум}, i = \overline{0,23}, \quad (5.79)$$

де  $N_i^{спож}$ ,  $N_i^{ген}$  – відповідно електричні потужності, що споживається та генерується в системі,  $кВт$ ;

$i$  – порядковий номер години доби.

Для узгодження теплових навантажень зайва тепла енергія, що утилізується, скидається до навколишнього середовища, що спрощує схему, але є економічно недоцільним;

б) теплове навантаження споживача, сумірне з кількістю теплоти, що утилізується,  $Q_i^{ум} \approx Q_i^{спож}$ ,  $i = \overline{0,23}$ .

Пікові теплові навантаження споживача можуть покриватися:

- водогрійними котлами;  
- за рахунок застосування акумуляції теплової енергії, що утилізується.

Якщо  $Q_i^{ym} > Q_i^{спож}$  – тепловий акумулятор заряджається;

якщо  $Q_i^{ym} < Q_i^{спож}$  – тепловий акумулятор розряджається.

Застосування ТА фазового переходу відповідної місткості суттєво впливає на техніко-економічні показники установки, зокрема припускає зниження її номінальної електричної  $N_{ел}^{ном}$  і теплової  $Q_{теп}^{ном}$  потужностей;

в) теплове навантаження споживача значно більше за теплову енергію, що утилізується,  $Q_i^{спож} > Q_i^{ym}$ ,  $i = \overline{0,23}$ .

Покриття дефіциту теплової енергії здійснюється за рахунок додаткового джерела. Застосування акумуляції теплової енергії не знижує номінальну потужність утилізаційної установки, але дозволяє знизити номінальну потужність додаткового джерела теплоти. Економічна ефективність акумуляції буде вища при низькому коефіцієнті заповнення графіка теплового навантаження, проте загальна ефективність даного режиму невисока, оскільки значна частина теплової енергії виробляється при роздільній генерації.

*2. Робота утилізаційної установки за тепловим графіком навантаження ( $Q_i^{ym} = Q_i^{спож}$ ).*

Даний режим не є автономним, оскільки припускає синхронізацію утилізаційної установки і споживача з енергосистемою:

а) електричне навантаження споживача менше за електричну потужність утилізаційної установки, що генерується, на тепловому споживанні  $N_i^{спож} < N_i^{ген}$ .

Надлишок електричної потужності, що генерується, продається до мережі. Номінальна електрична потужність установки визначається за піковим тепловим навантаженням добового графіка теплового навантаження споживача  $N_{ел}^{ном} = N(Q_{i,спож}^{max})$ .

Підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності утилізаційної установки і відповідне зниження  $N_{ел}^{ном}$  можливе за рахунок заміщення пікових теплових навантажень тепловою енергією, що була акумульована;

б) електричне навантаження споживача орієнтовно дорівнює електричній потужності утилізаційної установки, що її генерує на тепловому споживанні  $N_i^{спож} \approx N_i^{ген}$ .

При такому режимі, якщо  $N_i^{спож} < N_i^{ген}$ , надлишок електроенергії продається до мережі, інакше ( $N_i^{спож} > N_i^{ген}$ ) для покриття пікових електричних навантажень електроенергія купується з мережі.

Номінальна електрична потужність установки визначається за піковим тепловим навантаженням добового графіка навантаження споживача  $N_{ел}^{ном} = N(Q_{i,спож}^{max})$ .

Якщо не існує обмежень з продажу або купівлі електроенергії з мережі, то застосування акумуляції теплової енергії дозволить знизити номінальну потужність установки;

в) електричне навантаження споживача більше за електричну потужність утилізаційної установки, що генерується, на тепловому споживанні  $N_i^{номп} > N_i^{ген}$ .

Дефіцит електричної потужності покривається за рахунок купівлі електроенергії з мережі. Використання акумуляції теплової енергії дозволяє знизити номінальну потужність установки, проте даний режим неефективний, оскільки допускає вироблення значної частини електроенергії при роздільній генерації.

**5.5.9. Показники надійності.** Надійність – це властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники продуктивності, економічності та інші в заданих межах протягом необхідного проміжку часу або необхідного напрацювання.

Енергетичні установки і транспортні засоби з ТА фазового переходу на базі установок утилізації теплової установки характеризуються високою складністю конструкцій устаткування і технологічних схем, що вимагає великої уваги до питань їх надійності. Порушення режиму роботи енергетичної установки і

(або) транспортного засобу з ТА фазового переходу може призвести до її (його) зупинки або зниження генерованої електричної або теплової потужності, що призводить до додаткових капітальних вкладень і експлуатаційних витрат.

До основних властивостей, що визначають надійність енергетичної установки і (або) транспортного засобу з ТА фазового переходу можливо віднести такі: безвідмовність, довговічність, ремонтоздатність.

До основних кількісних показників надійності енергетичної установки і (або) транспортного засобу з ТА фазового переходу та елементів, що входять до неї (нього), належать:

- коефіцієнт готовності  $K_2$ ;
- коефіцієнт технічного використання  $K_{mv}$ ;
- параметр потоків відмов, середній час відновлення;
- вірогідність безвідмовної роботи.

Коефіцієнти  $K_2$  і  $K_{mv}$  враховують тільки повні відмови і не відображують часткових відмов. У той же час енергетичні установки з ТА фазового переходу – це досить гнучкі системи, що використовують декілька різних за принципом дії джерел енергії, що мають акумулюючі місткості та обвідні зв'язки, які дозволяють не переривати робочий цикл при виході з ладу деяких елементів.

Для урахування часткових відмов, що призводять до недовідпущення електричної або теплової енергії, використовується відповідний коефіцієнт

$$K_{\text{част}} = \frac{\Delta E_p}{E_{\text{пл}}} = \frac{\sum_j \Delta W_j \cdot \Delta \tau_j}{W_g \cdot h}, \quad (5.80)$$

де  $\Delta E_p, E_{\text{пл}}$  – відповідно річний недовиробіток електричної та теплової енергії через часткові відмови та їх річний плановий виробіток;

$\Delta W_j, \Delta \tau_j$  – відповідно зниження сумарної теплової і електричної потужності та тривалість часткової  $j$ -ї відмови установки;



$h$  – планова кількість годин використання встановленої потужності на рік, год;

$W_e$  – сумарна електрична і теплова встановлена потужність утилізаційної установки, кВт.

Зниження техніко-економічних показників установки в результаті часткових відмов характеризується коефіцієнтом

$$K_{\text{част}} = \frac{\Delta B}{B_{\text{пл}}} = \frac{\sum_j \Delta \tau_j \cdot (b_j - b_{\text{пл}})}{b_{\text{пл}} \cdot h}, \quad (5.81)$$

де  $\Delta B, B_{\text{пл}}$  – відповідно перевитрата палива при  $j$ -й частковій відмові та планова витрата палива, кг/с;

$b_j, b_{\text{пл}}$  – відповідно питома витрата палива при  $j$ -й частковій відмові та планова питома витрата палива, кг/кВт·год.

Відносна тривалість роботи енергетичної установки з ТА фазового переходу за наявності часткових відмов визначається коефіцієнтом

$$\bar{K}_{\text{част}} = \frac{\tau_{\text{ч}}}{\tau_{\text{від}} + \tau_{\text{г}} + \tau_{\text{ч}}}, \quad (5.82)$$

де  $\tau_{\text{ч}}, \tau_{\text{г}}, \tau_{\text{від}}$  – відповідно тривалість часткової відмови, час відновлення системи і час напрацювання на відмову, год.

Тоді вірогідність того, що енергетична установка з ТА фазового переходу працюватиме з необхідною продуктивністю і матиме відповідні техніко-економічні показники в довільний момент часу, визначається коефіцієнтом потрібної готовності

$$K_{\text{нз}} = K_{\text{з}} \cdot (1 - \bar{K}_{\text{ч}}). \quad (5.83)$$

Для забезпечення визначення показників надійності при накладенні потоків повних і часткових відмов приймається, що розрахункова схема енергетичної установки з ТА фазового переходу має змінну структуру залежно від глибини відмови.

Протягом періоду експлуатації енергетична установка з ТА фазового переходу може знаходитись в одному з таких станів:  $s_0$  – справний стан;  $s_1$  – повна відмова;  $s_2$  – стан часткової відмови в результаті виходу з ладу якого-небудь елемента або їх групи;  $s_3$  – профілактичний ремонт.

Перехід з одного стану до іншого здійснюється у вигляді пуасонівських потоків подій з параметрами потоків відмов і відновлень:  $\omega(\tau), \mu(\tau)$ . Вірогідність  $P_0, P_1, P_2, P_3$  знаходження системи в одному з перерахованих станів визначається за відповідною методикою.

Значення вірогідності станів енергетичної установки з ТА фазового переходу для певного режиму експлуатації відповідають показникам надійності:

- коефіцієнт готовності

$$K_z = (P_0 + \sum P_2) \cdot (1 - P_3); \quad (5.84)$$

- коефіцієнт технічного використання

$$K_{mv} = P_0 + \sum P_2; \quad (5.85)$$

- коефіцієнт потрібної готовності

$$K_{nz} = P_0 \cdot (1 - P_3); \quad (5.86)$$

- коефіцієнт готовності при часткових відмовах

$$K_{част} = 1 - (1 - P_3 - P_1) \cdot \sum P_2. \quad (5.87)$$

Описані показники надійності енергетичної установки з ТА фазового переходу можуть бути використані для порівняння різних варіантів енергетичних установок з ТА фазового переходу, проте остаточний вибір варіанта слід робити на основі приведених витрат, пов'язаних з цими показниками, а також для раціонального розподілу витрат між способами забезпечення надійності.

**5.5.10. Показники ефективності** теплових акумуляторів фазового переходу на основі розглянутих вище положень зведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

**Показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу**

№ п/п	Показник	Представлення у вигляді	
		реальних (розмірних) значень	відносних (безрозмірних) значень
1	Часові (термінові) або температурно-часові	$\tau_{зар}, \tau_{збер}, \tau_{роз}, \tau_{ц}$ $t_{зар,і}, \tau_{зар,і}, t_{збер,і}, \tau_{збер,і}$ $t_{роз,і}, \tau_{роз,і}$	$\bar{\tau}_{зар}, \bar{\tau}_{збер}, \bar{\tau}_{роз}$
2	Енергетичні	Інтегральні: $Q_{зар}, Q_{збер}, Q_{роз}$ $Q_{АКК}$ . Питомі: $q_{АКК}$ . Потужностей: $P_{зар}, P_{збер}, P_{роз}$ $P_{зар}^{сер}, P_{збер}^{сер}, P_{роз}^{сер}, P_{роз}^{пik}$	$\eta_{\Sigma}, \eta_{зар}, \eta_{збер}, \eta_{роз}$
3	Ексергетичні	$\mathcal{E}_{під}, \mathcal{E}_{зар}, \mathcal{E}_{збер}, \mathcal{E}_{роз}$	$\Psi_{\Sigma}, \Psi_{зар}, \Psi_{збер}, \Psi_{роз}$
4	Ексергооекономічні	$E_{D,k}, c_{F,k}, c_{P,k}, C_{D,k}, Z_k,$ $c_{F,k,x}, c_{F,k}^X, c_{P,k,x}, c_{P,k}$	$\varepsilon_k, \varepsilon_k^{OPT}, f_k$
5	Масогабаритні	$m_{ТА}, m'_{ТА}, G, V_{ТА},$ $l_{ТА} \times \delta_{ТА} \times h_{ТА}$	$\Omega_{ТА}$
6	Визначені за структурою складних схем	$Z_{\Sigma}, C_{\Sigma}$	-
7	Визначені за режимом навантаження	$N_i^{спож}, N_i^{ген},$ $Q_i^{спож}, Q_i^{ум}, Q_i^{спож}$	-
8	Надійності	-	$K_{част}, \bar{K}_{част},$ $K_{част}$ $K_{пг}, K_{г}, K_{тв}$

## 5.6. Загальні рекомендації щодо створення теплових акумуляторів і вибору теплоакumuлюючих матеріалів

При розробленні ТА для використання їх у процесі експлуатації ДВЗ, ТЗ і ЕУ для прогріву треба враховувати широкий спектр зовнішніх і внутрішніх факторів, які впливають на правильну роботу систем, де вони використовуються, точність її роботи, надійність і зручність в експлуатації, а крім того, вимоги безпеки - токсичність, вибухобезпечність і пожежобезпечність, а також радіаційна безпека.

Вибір оптимального теплоакumuлюючого матеріалу завжди являє собою певний компроміс між властивостями речовин, що забезпечують працездатність конструкції ТА ТЗ і ЕУ і сприяють його ефективному функціонуванню, і небажаними його властивостями, які ускладнюють і здорожчують ТА. Крім того, у будь-якому випадку не обійтися без експериментальних досліджень не тільки з метою вивчення теплофізичних і фізико-хімічних характеристик нових перспективних сполук, придатних для акумуляування теплоти в ТА двигунів, ТЗ і ЕУ, а й для уточнення цих характеристик добре відомих матеріалів.

Ефективна акумуляуюче середовище на основі фазового переходу повинно мати такі властивості:

- високу ентальпію фазового переходу і густину;
- зручну для експлуатаційних умов температуру плавлення;
- високу теплоємність у твердій і рідкій фазах;
- високу теплопровідність у твердій і рідкій фазах;
- відсутність тенденції до розшарування теплоакumuлюючого матеріалу і температурну стабільність;
- відсутність можливості переохолодження при затвердінні і перегріві при плавленні;
- низьке термічне розширення і незначну зміну обсягу при плавленні;
- слабку хімічну активність, що дозволяє використовувати недорогі конструкційні матеріали для виготовлення теплових акумуляторів і допоміжного обладнання;
- безпеку (відсутність отруйних парів, а також небезпечних реакцій з робочим або теплообмінним середовищем);

- великі ресурси роботи. Теплоакумуючі матеріали здатні накопичувати теплоту за рахунок фазових переходів і їх основних теплофізичних та енергетичних характеристик. Основні теплофізичні та енергетичні характеристики ТАМ наведені у відповідній таблиці навчального посібника [96]. Вживане поняття «питома енергія» - це питомий показник енергоємності на одиницю маси або об'єму, який враховує теплоту фазового переходу і теплоту, що накопичена за рахунок теплоємності в процесі нагрівання до температури плавлення.

У якості теплоакумуючих матеріалів з фазовим переходом можуть використовуватись як моноскладові, так і поліскладові (у тому числі бінарні) матеріали.

Застосування бінарних систем має деякі переваги:

- точку плавлення можна вибирати зміною кількісного співвідношення солей у суміші;
- висока густина енергії може бути досягнута навіть при низьких температурах плавлення;
- дорогі речовини з високими теплоакумуючими властивостями можуть бути використані разом з дешевими, при цьому теплова ємність залишається майже незмінною. Бінарні системи при їх використанні в акумуляторах повинні плавитися і укріплятися у речовині. Цій умові відповідають два типи спеціальних складів сумішей - евтектичний і дистектичний. Евтектичний склад суміші ТАМ представлений нижньою точкою на діаграмах плавлення; дистектичний склад являє собою суміш, яка поводить себе майже як чиста речовина.

Попередньо виконаний аналіз виконаних теоретичних і експериментальних досліджень деяких класів речовин, що є перспективними ТАМ, переконливо свідчить про те, що вибір ТАМ, що задовольняє всі висунути до нього вимоги, є досить складним завданням. Як правило, реальні речовини та їх суміші одночасно поєднують у собі як позитивні з точки зору теплового акумулювання властивості, так і негативні, небажані, властивості, виключити які або хоча б зменшити чий вплив вдається далеко не завжди. Складність вибору ТАМ обумовлена ще й тією обставиною, що проєктований для ТЗ і ЕУ ТА повинен бути компактним пристроєм, що забезпечує можливість його монтажу на борту автотранспортного засобу або енергетичної установки при «щільному» компонуванні основних вузлів і агрегатів [3].

У спеціальній літературі [79-84] сформульовано ряд термодинамічних, кінетичних, хімічних і економічних критеріїв вибору ТАМ, а також їх застосування в ТА. Цілком очевидно, що на сьогодні практично не існує ТАМ для ТА, що відповідають одночасно всім перерахованим вище вимогам.

Бажано для здійснення поставленої мети використовувати або односекційні ТА, що настроєні на якусь відповідну температуру відповідної ємності, або багатосекційні теплові акумулятори (БСТА), у яких основне завдання теплового акумулювання можна виконати шляхом розбиття всього робочого інтервалу температур ВГ на складові. Кількість складових БСТА може варіюватись залежно від необхідності отримувати відповідні параметри утилізованої теплоти і її кількості, а також конструкційних особливостей ЕУ і ТЗ.

При розробленні методики створення теплових акумуляторів і вибору теплоакумулюючих матеріалів були враховані рекомендації і положення [90-101].

До основних рекомендацій, які базуються на проведених теоретичних і експериментальних дослідженнях, можливо віднести такі:

1. Розроблення СКП має починатися з визначення призначення ТА для використання в ТА або ЕУ. На цьому етапі необхідно визначитись з температурним режимом, який буде потрібен для виконання планованих технологічних операцій, і визначити завдання, що будуть виконуватись при визначених температурах, а саме забезпечення тільки пуску після виконання передпускового прогріву, передпусковий прогрів до температур «гарячого прогріву» для виконання одночасного пуску і прийняття навантаження тощо. Крім того, необхідно визначитись з режимами роботи двигуна енергетичної установки або транспортного засобу (від цього залежать основні технологічні параметри двигуна і його експлуатаційних рідин і газів, у першу чергу відпрацьованих газів), режимами, при яких відбувається робота двигуна та пуск ДВЗ, а також інтервалами між зупинкою та пуском ДВЗ в процесі експлуатації.

2. Визначити основні кліматичні умови навколишнього середовища, на які має бути розрахований ТА, як екстремальні, так і поточні температури, і їх кількість протягом року.

3. Визначити параметри можливої утилізації теплоти, що відводиться охолоджуючою рідиною, моторною оливою та відпрацьованими газами двигуна ТЗ або ЕУ.

4. Після цього необхідно уточнити вихідні параметри - характеристики умов, у яких буде працювати ТА, за п. 1-3, а саме інтервал робочих температур, параметри навколишнього середовища, циклічність фазових перетворень тощо.

5. Визначити основні технологічні параметри ТА, а саме необхідну кількість теплоти, яку повинен накопичувати ТА. При визначенні необхідної кількості теплоти і об'єму ТА слід дотримуватися таких вимог відносно ТАМ: вага ТАМ повинна розраховуватися з умови забезпечення прогріву ДВЗ ТЗ або ЕУ при максимально низькій експлуатаційній температурі навколишнього середовища та максимально тривалому інтервалі між зупинкою та пуском ДВЗ.

6. Розробити можливі варіанти конструктивного виконання ТА фазового переходу для ТЗ або ЕУ відповідно до відомостей про їх можливі конструктивні варіанти виконання і розробленої класифікації ТА у підрозділі 5.1.

7. Виконати попередній відбір декількох варіантів ТАМ, які за своїми температурами фазового переходу, питомою теплотою фазового переходу і питомою масовою теплоємністю відповідають умовам експлуатації ТЗ або ЕУ (п. 1-5). На цьому етапі виконання умов (п. 1-5) дозволяє виключити з розгляду ТАМ, які в рідкій фазі можуть мати значний перегрів, що може призвести до підвищення тиску в теплоакумулюючій ємності ТА. На цьому етапі потрібно проводити оцінювання показників ТА з використанням положень підрозділу 5.3 і табл. 5.2 (для прикладу - кристалогідратів).

8. З попередньо відібраних за умовами (п. 1-7) ТАМ вибираються речовини, що мають найбільшу щільність акумулювання теплоти. Щільність акумулювання теплоти характеризується її кількістю, що запасається одиницею об'єму ТАМ. З урахуванням рівняння щільність акумулювання теплоти  $q_{АКТ}$  визначається при виконанні основної умови для обраних ТАМ таким рівнянням:

$$q_{\text{АКТ}} = \rho_{\text{ТВ}} \cdot \int_{T_1}^{T_{\Phi}} C_{\text{ТВ}}(T) dT + \rho_p \cdot r_T + \rho_p \cdot \int_{T_{\Phi}}^{T_2} C_p(T) dT \left( \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right) \rightarrow \max, \quad (5.88)$$

де  $\rho_{\text{ТВ}}$ ,  $\rho_p$  – густина ТАМ відповідно у твердій і рідкій фазах, кг/м<sup>3</sup>;

$r_T$  – питома теплота фазового переходу плавлення-кристалізація, кДж/кг;

$C_{\text{ТВ}}(T)$ ,  $C_p(T)$  – питомі масові теплоємності ТАМ залежно від його температури відповідно у твердій і рідкій фазах, кДж/(кг·К);

$T_1$ ,  $T_2$  – температури ТАМ відповідно початкова і кінцева, К.

Таблиця 5.2

Характеристики кристалогідратів,  
що використовуються в якості ТАМ [7]

№ п/п	Теплоакуюлюючий матеріал		Густина речовини, кг/м <sup>3</sup>	Температура плавлення, T <sub>L</sub> , °C	Теплота плавлення, кДж/кг
	Речовина	Хімічна формула			
1	Декагідрат натрію сульфат (глауберова сіль)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	1554	32	251,0
2	Тригідрат натрію ацетат	Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O	1450	58	272,4
3	Галуналюмокалієвий	KAl(SO <sub>4</sub> )·12H <sub>2</sub> O	1750	92	254,3
4	Сегнетова сіль	KNaC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1790	70-80	181,4
5	Гептагідрат алюмінію нітрат	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·7H <sub>2</sub> O	-	70	155,03
6	Гексагідрат магнію нітрат	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	1500	95	160,1
7	Бензойна кислота	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> COOH	1266(15°C)	122,4	147
8	Стирол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH=CHCOOH	1247(4°C)	133	153
9	Нафталін	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	1025(20°C)	80,3	147
10	Пальмітинова кислота	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOH	853(62°C)	62,9	212
11	Парафін (білий)	C <sub>24</sub>	800	54-56	187,7
12	Стеринова кислота	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	849(70°C)	69,4	215
13	Пірокатехін	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub>	1149(20°C)	105	207
14	Поліетилен високої густини	-	925/800	135	230
15	Розчин їдкого натру	Na(OH)·H <sub>2</sub> O	1720	65,0	255,0
16	Октагідратбарію-гідроксид	Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	2060	78,0	280,0



9.3 відібраних ТАМ вибираються речовини з найбільш високими теплообмінними властивостями. Теплообмінні властивості ТАМ характеризуються коефіцієнтами теплопровідності у твердій  $\lambda_{тв}$  і рідкій  $\lambda_p$  фазах. На даному етапі методики слід виключити з розгляду ТАМ, що мають найбільш низькі значення ямі  $\lambda_{тв}$  і  $\lambda_p$ . Проте дана вимога не повинна бути жорсткою, тому що низькі теплообмінні властивості ТАМ можливо компенсувати застосуванням спеціальних конструктивних рішень ТА, наприклад оребренням теплообмінних поверхонь ТА фазового переходу.

10. Розгляд параметрів теплоізоляції ТА. Теплоізоляція ТА повинна забезпечувати збереження накопиченої теплової енергії на час, який відповідає максимально тривалому інтервалу між зупинкою та пуском ДВЗ ТА або ЕУ. Це може бути виражено параметрами зменшення температури ТАМ (охолодження) з максимально досягнутої при зарядці до температури фазового переходу ТАМ (подальше охолодження небажане в умовах експлуатації). Вибір параметрів теплоізоляції ТА потрібно виконувати за рекомендаціями відповідних довідників [79-82].

11. Перевірка за показниками безпеки - токсичність, вибухобезпечність і пожежобезпечність, а також радіаційна безпека. На цьому етапі з відібраних за умовами п. 9 ТАМ слід виключити вибухо- і пожежонебезпечні речовини; речовини, що небезпечні в радіаційному відношенні, а також сполуки, здатні виділяти отрутні пари і вступати в небезпечні реакції з теплообмінним середовищем.

12. Теплоносій, який заряджає ТА, повинен відповідати таким вимогам: ефективно виконувати заряджання ТА, бути неагресивним до ТАМ та елементів системи заряджання ТА, бути безпечним на всіх режимах роботи системи.

13. Відбір за показниками економічності полягає в оцінюванні сумарної вартості витрат на створення ТА для ТЗ або ЕУ, яка повинна наближатися до мінімальної.

14. Остаточо ТАМ вибирається з умови впливу багатьох параметрів, до основних з яких належать: термоциклічність, схильність до значних переохолоджень, конгруентність плавлення і ступінь теплового розширення, щільність накопичення теплової енергії, параметри теплоносіїв, які

заряджають і розряджають ТА (температура та витрата теплоносіїв), температура і теплоємність фазового переходу, характеристики теплообміну між ТАМ та елементами системи заряджання-розряджання ТА, безпека в експлуатації, вартість. Якщо на цьому етапі деякі негативні властивості будуть критичними, то необхідно спробувати негативний вплив цих властивостей значно зменшити аж до повного усунення.

Подана методика була апробована і передана для впровадження в службу локомотивного господарства ДП «Донецька залізниця» для впровадження при експлуатації та модернізації існуючих енергетичних установок з двигунами внутрішнього згорання, а також знайшла широке впровадження при виконанні практичних робіт Інститутом газу НАН України з випуску стаціонарних енергетичних установок з двигунами внутрішнього згорання.

### **Контрольні запитання**

1. Наведіть класифікацію теплових акумуляторів фазового переходу.

2. Охарактеризуйте особливості покращення параметрів робочих процесів прогріву двигуна внутрішнього згорання ТЗ і ЕУ при формуванні і проектуванні теплових акумуляторів фазового переходу.

3. Наведіть особливості розрахунків теплообмінників ТА і методів складання теплового балансу.

4. Поясніть залежність для ємності і ККД теплового акумулятора.

5. Поясніть особливості порівняння параметрів теплових акумуляторів фазового переходу, що характеризують ефективність їх використання.

6. Назвіть основні показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу.

7. Охарактеризуйте часові (термінові) або температурно-часові показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу.

8. Охарактеризуйте енергетичні показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу.

9. Охарактеризуйте ексергетичні показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу.

10. Охарактеризуйте масогабаритні показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу.

11. Охарактеризуйте показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу, визначені за структурою складних схем.

12. Охарактеризуйте показники ефективності теплових акумуляторів фазового переходу, визначені за режимом навантаження.

13. Охарактеризуйте показники надійності теплових акумуляторів фазового переходу.

14. Наведіть особливості загальних рекомендацій щодо створення теплових акумуляторів і вибору теплоакумулюючих матеріалів.

## Бібліографічний список

1. Александров, В.Д. Теплові акумулятори фазового переходу для транспортних засобів: параметри робочих процесів [Текст]: монографія / В.Д. Александров, Ю.Ф. Гутаревич, І.В. Грицук [та ін.]. – Донецьк: Вид-во «Ноулідж» (Донецьке відділення), 2014.- 230 с.

2. Шульгин, В.В. Тепловые аккумуляторы автотранспортных средств [Текст] / В.В. Шульгин. – СПб.: Издательство Политех. ун-та, 2005. - 268 с.

3. Александров, В.Д. Теплоаккумулирующие материалы на основе кристаллогидратов [Текст] / В.Д. Александров, О.В. Соболев, С.А. Фролова // Вісник ДонНАБА. – 2009. – № 1 (75). – С. 100-103.

4. Адров, Д.С. Тепловий акумулятор як засіб підвищення ефективності пуску стаціонарного двигуна в умовах низьких температур [Текст] / Д.С. Адров, І.В. Грицук, Ю.В. Прилепський, В.І. Дорошко // Зб. наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2011.– Вип. 27. - С. 117-126.

5. Левенберг, В.Д. Аккумуляция тепла [Текст] / В.Д. Левенберг, М.Р. Ткач, В.А. Гольстрем. – К.: Техника, 1991. - 112 с.

6. Гутаревич, Ю.Ф. До вибору теплоаккумулюючих матеріалів теплового акумулятора збереження теплового стану ДВЗ [Текст] / Ю.Ф. Гутаревич, В.Д. Александров, І.В. Грицук [та ін.] // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2013. – Вип. 26. – С. 127-132.

7. Бекман, Г. Тепловое аккумуляция энергии [Текст] / Г. Бекман. – М.: Мир, 1987. - 256 с.

8. Фазовый переход [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. - Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9\\_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%85%D0%BE%D0%B4](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%85%D0%BE%D0%B4).

9. Куликов, А. «Термос» под капотом [Текст] / А. Куликов // Наука и жизнь.- 1993. - №3. - С. 62-64.

10. Сотникова, О.А. Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения [Текст] / О.А. Сотникова, В.С. Турбин, В.А. Григорьев // АВОК. - 2003. - № 5. – С. 40-46.

11. Мозговой, А.Г. Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов. Кристаллогидраты [Текст] / А.Г. Мозговой, Э.Э. Шпильрайн, М.А. Дибиров [и др.]. - М.: ИВТАН АН СССР, 1990. - № 2 (82). – С. 32-38.

12. Вашуркин, И.О. Тепловая подготовка и пуск ДВС мобильных транспортных и строительных машин зимой [Текст] / И.О. Вашуркин.– СПб.: Наука, 2002. – 145 с.

13. Кукис, В.С. Двигатель Стирлинга как утилизатор теплоты отработавших газов [Текст] / В.С. Кукис // Автомобильная промышленность. - 1988. - № 9. -С. 19-20.

14. Волков, В.П. Системи прогріву двигунів внутрішнього згорання: основи функціонування [Текст]: монографія / В.П. Волков, І.В. Грицук, Ю.Ф. Гутаревич [та ін.]. – Донецьк: Вид-во «Ноулідж» (Донецьке відділення), 2015.- 314 с.

15. Кукис, В.С. Двигатель для утилизации теплоты отработавших газов [Текст] / В.С. Кукис, А.Б. Смолин, А.И. Богданов // Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования. – М., 2000. - Т. 1. – С. 56-57.

16. Грицук, І.В. Наукові проблеми вибору теплоаккумулюючих матеріалів для системи комбінованого прогріву ДВЗ [Текст] // VII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», June 8-15 2012, Varna, Bulgaria, Proceedings, Volume II, Special number International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. – Днепропетровск; Варна, 2012. – С. 55-57.

17. Ложкин, В.Н. Теория и практика применения тепловых аккумуляторов фазового перехода для улучшения экологических и топливно-экономических показателей автотранспортных средств [Текст] / В.Н. Ложкин, В.В. Шульгин // Вопросы охраны атмосферы от загрязнения: Информационный бюллетень - СПб.: НПК «Атмосфера» при ГГО им. Войкова, 2000. - №2 (22). – С. 40-53.

18. Куколев, М.И. Основы проектирования тепловых накопителей энергии [Текст]: монография / М.И. Куколев; Петрозавод. гос. ун-т. - Петрозаводск, 2001. - 240 с.

19. Алексанян, Г. Термос для мотора [Электронный ресурс] // Основные средства. Журнал о спецтехнике и автотранспорте. – Режим доступа:

[http://www.os1.ru/article/service/1998\\_12\\_A\\_2005\\_11\\_18\\_14\\_56\\_20/](http://www.os1.ru/article/service/1998_12_A_2005_11_18_14_56_20/).

20. Меркушева, В. Революционная технология для пуска двигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pressarchive.ru/pyatoe-koleso/1998/12/14/271.html>.

21. Устройство облегчения пуска двигателей (УОПД) [Электронный ресурс] // Техника и технологии. – Режим доступа: <http://technics.rin.ru/index/?a=3&id=441>.

22. Гулин, С.Д. Система разогрева двигателя с помощью теплового аккумулятора [Текст] / С.Д. Гулин, В.В. Шульгин, С.А. Яковлев // Лесная промышленность. - 1996. - № 3. - С. 20-21.

23. Система предпускового разогрева двигателя внутреннего сгорания [Текст]: пат. 2075626 Россия: С1 F02N17/04, F02N17/06 / Гулин С.Д., Шульгин В.В., Яковлев С.А., заявитель и патентообладатель Гулин С.Д. - № RU 93041663/06; заявл. 19.08.1993; опубл. 20.03.1997, Бюл. №33. - 4 с.

24. Карнаухов, Н.Н. Приспособление сторительных машин к условиям Российского Севера и Сибири [Текст] / Н.Н. Карнаухов. – М.: Недра, 1994. – 351 с.

25. Данилин, В.Н. Тепло- и холодоаккумулирующие материалы на основе ацетата натрия [Электронный ресурс] / В.Н. Данилин, А.Г. Долесов; Кубанский гос. техн. ун-т. – Режим доступа: [kubstu.ru/fams/dopoln8.htm](http://kubstu.ru/fams/dopoln8.htm).

26. Куликов, Ю.А. Тепловой аккумулятор для предпускового разогрева двигателя автомобиля / Ю.А. Куликов, В.А. Пыхтя // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2010. - № 6 (148) – С. 1-6.

27. Тепловий акумулятор фазового переходу [Текст]: пат. 70814 Україна: МПК F24H 7/00 / Грицук І.В., Прилепський Ю.В., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Александров В.Д., Постніков В.А., Сергієнко М.І., Поддубняк В.Й., Дорошко В.І., Вербовський В.С., Адров Д.С.; заявник і патентовласник Національний транспортний ун-т. ДНВЗ «Донецький інститут залізничного транспорту УкрДАЗТ». - № u 2012 14659; заявл. 09.12.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.-6 с.

28. Чертыковцева, Н.В. Разработка системы прогрева тепловозного дизеля на основе вторичных энергоносителей [Текст] / Н.В. Чертыковцева, Д.Я. Носырев // Вестник РГУПС. - 2008. - №2. - С. 35-42.

29. Носырев, Д.Я. Повышение ресурса тепловозных дизелей за счет применения нетрадиционных технических средств [Текст] / Д.Я. Носырев, Н.В. Чертыковцева // Известия Самарского научного центра РАН. Специальный выпуск «Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития». - Самара: Издательство СНЦРАН, 2007. - С. 145-149.

30. Автомобили с аккумулярованием теплоты фазового перехода или тепла нагретого теплоносителя [Электронный ресурс] // Мастерская Своего Дела - идеи и оборудование для малого бизнеса. Givology. - Режим доступа: [http://fenkoil.ru/2293/#\\_ftnref3](http://fenkoil.ru/2293/#_ftnref3).

31. Левенберг, В.Д. Энергетические установки без топлива [Текст] / В.Д. Левенберг. – Л.: Судостроение, 1987. – 104 с.

32. Коринчевская, Т.В. Теплоаккумулирующие материалы с фазовым переходом [Текст] / Т.В. Коринчевская // Материалы Конференции молодых ученых СММТ. – К.: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2008. – С. 42-47.

33. Дружинин, П.В. Предпусковая подготовка двигателей внутреннего сгорания и эксплуатации транспортных машин [Текст] / П.В. Дружинин, И.А. Косенков, Е.Ю. Юрчик // Техно-технологические проблемы сервиса. - 2009. - № 10. – С. 59-64.

34. Александров, В.Д. Этапы развития кластерно-коагуляционной теории кристаллизации переохлажденных жидкостей [Текст] / В.Д. Александров, О.В. Александрова, И.В. Грицук [и др.] // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури: зб. наук. праць. - Макіївка: ДонНАБА, 2013.– Вип. 1 (99). - С. 21-28.

35. Александров, В.Д. Кинетика зародышеобразования и массовой кристаллизации переохлажденных жидкостей и аморфных сред. [Текст] / В.Д. Александров. - Донецк: Донбасс, 2011. - 580 с.

36. Чалмерс, Б. Теория затвердевания [Текст] / Б. Чалмерс. – М: Металлургия, 1968. –288 с.

37. Скрипов, В.П. Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей [Текст] / В.П. Скрипов, В.П. Коверда. – М.: Наука 1984. – 298 с.

38. Уббелоде, А.Р. Расплавленное состояние вещества [Текст] : пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 288 с.

39. Александров, В.Д. Анализ влияния скорости охлаждения на предкристаллизационное переохлаждение в металлах [Текст] / В.Д. Александров, Н.А. Володин, А.А. Баранников, С.А. Фролова // Металлофизика и новейшие технологии. – 2001. – Т. 23, № 1. – С. 75-81.

40. Кирядов, Б.И. Кинетика образования кристаллов из жидкой фазы [Текст] / Б.И. Кирядов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 134 с.

41. Флеминг, М. Процессы затвердевания [Текст] / М. Флеминг. - М.: Мир 1977. – 424 с.

42. Соколовская, Е.М. Металлохимия [Текст] / Е.М. Соколовская, Л.С. Гузей. – М.: МГУ, 1986. – 264 с.

43. Коттрел, А.Х. Строение металлов и сплавов [Текст] / А.Х. Коттрел. – М.: Гос. НТИ л-ры по черн. и цв. металлургии, 1961. – 288 с.

44. Александров, В.Д. Модель гомогенного образования зародышей с реальной структурой при кристаллизации из расплава [Текст] / В.Д. Александров // Журн. физ. химии. – 1992. – Т. 66. – С. 567-570.

45. Александров, В.Д. Влияние массы металлов на их переохлаждение при кристаллизации [Текст] / В.Д. Александров, В.А. Постников // Вестник Донецкого национального университета. Серия А. Естественные науки. – 2003. – № 2. – С. 253-257.

46. Хамский, Е.В. Кристаллизации из растворов [Текст] / Е.В. Хамский – Л.: Наука, 1967. – 230 с.

47. Нывлт, Я. Кристаллизация из растворов [Текст] / Я. Нывлт. – М.: Химия, 1974. – 150 с.

48. Тепловой расчет аккумуляторов теплоты на фазовом переходе [Текст] / Ю.М. Лукашов, Б.З. Токарь, Э.В. Котенко, М.Е. Шиленков // Тез. докл. конф. ученых Курского политехнического института. - Курск, 1994. - С. 148-152.



49. Бродянский, В.М. Принципы определения КПД технических систем преобразования энергии и вещества [Текст] / В.М. Бродянский, М.В. Сорин // Изв. вузов. Сер. Энергетика. - 1985. - № 1. - С. 60–65.

50. Гохштейн, Д.П. Энтропийный метод расчета энергетических потерь [Текст] / Д.П. Гохштейн. - М.: Энергия, 1973. - 226 с.

51. Куколев, М.И. Оценка эффективности использования массы теплового аккумулятора [Текст] / М.И. Куколев // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ; Петрозавод. гос. ун-т. - Петрозаводск, 1996. – Вып. 1. - С. 40-42.

52. Энергия и эксергия [Текст] / под. ред В.М. Бродянского. - М.: Мир, 1968. – 189 с.

53. Эксергетический метод и его приложения [Текст] / под ред. В.М. Бродянского. - М.: Мир, 1967. - 248 с.

54. Гроссман, П. К обобщенному определению понятия КПД [Текст] / П. Гроссман // Вопросы термодинамического анализа. - М.: Мир, 1965. - С. 15–27.

55. Шаргут, Я. Эксергия [Текст] / Я. Шаргут, Р. Петела. - М.: Энергия, 1968. - 280 с.

56. Андриющенко, А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов [Текст] / А.И. Андриющенко. - М.: Высшая школа, 1975. - 264 с.

57. Попырин, Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок [Текст] / Л.С. Попырин. - М.: Энергия, 1978. - 416 с.

58. Богословский, В.Н. Эффективность теплообменников-аккумуляторов [Текст] / В.Н. Богословский, Р.Р Манасыпов // Водоснабжение и санитарная техника. - 1992. - № 2. - С. 10-12.

59. Тсатсаронис, Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы [Текст] / под ред. и пер. с англ. Т.В. Морозюк. - Одесса: Студия «Негоциант», 2002. - 152 с.

60. Бродянский, В.М. Эксергетический метод и его приложения [Текст] / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

61. Баласанян, Г.А. Оценка эффективности интегрированных когенерационных систем [Текст] / Г.А. Баласанян // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2006. – № 3. – С. 9–12.

62. Аккумуляирование тепла с использованием фазового перехода [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://naser.ru/novosti-energetiki/alternativnaya-energetika/akkumulirovanie-tepla-s-ispolzovaniem-fazovogo-perexoda.html>.

63. Крамаренко, П.А. Разогрев автотракторных двигателей [Текст] / П.А. Крамаренко, А.С. Улитин // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. - № 1. - С. 38-40.

64. Адров, Д.С. Математичні моделі функціонування теплового акумулятора фазового переходу системи комбінованого прогріву ДВЗ [Текст] / Д.С. Адров, І.В. Грицук, В.А. Постников // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: Укр ДАЗТ, 2012. – Вип. 133. - С. 270-277.

65. Грицук, І.В. Покращення паливної економічності і екологічних показників двигунів внутрішнього згорання застосуванням системи комбінованого прогріву при здійсненні пуску і прогріву [Текст] / І.В. Грицук Д.С. Адров // Тези доп. XVII міжнар. конгресу двигунобудівників. - Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2012. - С. 84.

66. Овчинников, В.М. Экономичные режимы самопрогрева дизелів [Текст] / В.М. Овчинников, В.А. Золотаренко, В.А. Халиманчик [и др.] // Локомотив. - 1996. - № 2. - С. 27.

67. Грищенко, С.Г. Обогрев силовых установок тепловозов [Текст] / С.Г. Грищенко, С.П. Филонов // Железнодорожный транспорт. - 1988. - № 8. – С. 43.

68. Устройство для прогрева тепловозных дизелей перед пуском после длительных стоянок и при работе на холостом ходу в холодное время года на железных дорогах США [Текст] // Железнодорожный транспорт за рубежом. Экспресс-информация. – М., 1983. - Вып. 2. - С. 12.

69. Адров, Д.С. Алгоритм формування оперативної готовності двигуна внутрішнього згорання з системою прискореного прогріву й утилізацією теплової енергії відпрацьованих газів тепловим акумулятором [Текст] / Д.С. Адров, І.В. Грицук, Ю.В. Прилепський, [та ін.] // Зб. наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 29.- С. 143-156.

70. Грицук, І.В. Особливості математичного моделювання параметрів роботи теплонакопичувача керованої передпускової системи мащення двигуна внутрішнього згорання у складі системи комбінованого прогріву [Текст] / І.В. Грицук, А.М. Гущин, Д.С. Адров [та ін.] // Зб. наук. праць Донецького інституту залізнич. трансп. Укр. держ. акад. залізн. трансп. - Донецьк: ДонІЗТ, 2013. – Вип. 36. - С. 156-161.

71. Авдонькин, Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. - М.: Транспорт, 1993. - 350 с.

72. Альмеев, Р.И. Анализ устройств для предпусковой смазки деталей ДВС [Текст] / Р.И. Альмеев // Проблемы транспорта и транспортного строительства: межвуз. науч. сб. - Саратов: СГТУ, 2008.- С. 125-132.

73. Григорьев, М.А. Износ и долговечность автомобильных двигателей [Текст] / М.А. Григорьев, Н.Н. Пономарев. - М.: Машиностроение, 1976. - 248 с.

74. Гурвич, И.Б. Оптимизация теплового состояния автомобильных двигателей [Текст] / И.Б. Гурвич, А.П. Егорова, К.М. Москвин [и др.] // Двигателестроение. - 1982. - №4. - С. 10-12.

75. Лосавио, Г.С. Эксплуатация автомобилей при низких температурах [Текст] / Г.С. Лосавио. - М.: Транспорт, 1973. - 117 с.

76. Семёнов, Н.В. Эксплуатация автомобилей в условиях низких температур [Текст] / Н.В. Семёнов. - М.: Транспорт, 1993. - 190 с.

77. Сердечный, В.Н. Тепловая подготовка лесотранспортных машин при безгаражном содержании [Текст] / В.Н. Сердечный. - М.: Лесная промышленность, 1974. - 124 с.

78. Смирнов, В.Г. Повышение долговечности деталей автомобильных двигателей за счет совершенствования конструкции систем смазки [Текст] / В.Г. Смирнов, Б.Н. Лучинин. - М.: НИИНавтопром, 1980. - 59 с.

79. Псаченко, В.П. Справочник по теплопередаче [Текст] / В.П. Псаченко, В.А. Осипов. - М., 1986. – 456 с.

80. Кутателадзе, С.С. Справочник по теплопередаче [Текст] / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. - М.: Госэнергоиздат, 1958. – 415 с.

81. Жукаускас, А.А. Конвективный перенос в теплообменниках [Текст] / А.А. Жукаускас. - М.: Наука, 1982. - 472 с.

82. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипов, А.С. Сурков. - М.: Энергоиздат, 1981. – 408 с.

83. Система регулювання температури охолоджуючої рідини двигуна внутрішнього згорання з утилізацією теплоти тепловим акумулятором [Текст]: пат. 75809 Україна: МПК (2012.01) F01P 3/00 / Грицук І.В., Краснокутська З.І., Вербовський В.С., Адров Д.С.; заявник і патентовласник Національний транспортний ун-т. - № u2012 07569; заявл. 20.06.2012; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23. - 4 с.

84. Карнаухов, Н.Н. Тепловой аккумулятор для поддержания пусковой температуры ДВС в период межсменной стоянки строительной машины в зимний период [Текст] / Н.Н. Карнаухов, И.А. Пустовалов, А.В. Яркин // Автотранспортное предприятие. - М.: НПП Транснавигация, Минтранс России, 2010. - Ноябрь. - С. 45-48.

85. Маневровые локомотивы. Санитарно-гигиенические требования к кабинам машиниста [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [http://myswitcher.ru/books/pouya/page\\_62.html](http://myswitcher.ru/books/pouya/page_62.html).

86. Набиулин, Ф.А. Микроклимат в кабинах мобильных машин [Текст] / Ф.А. Набиулин, И.Д. Квят, Н.И. Выстороп // Строительные и дорожные машины. - 1989. - № 3. - С. 12-13.

87. Чертыковцева, Н.В. Прогрев тепловозных дизелей с применением вторичных энергоносителей [Текст] / Н.В. Чертыковцева // Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы развития: материалы III Всерос. конференции-семинара (Сызрань 22-23 мая, 2008 г.). - Сызрань: Филиал ГОУ ВПО СамГТУ в г. Сызрани, 2008. – С. 95-98.

88. Александров, В.Д. Аккумуляция тепла на основе фазовых переходов в материалах для использования в устройствах формирования комфортного микроклимата на железнодорожном транспорте для работы локомотивных бригад [Текст] / В.Д. Александров, А.В. Лукьянов, В.А. Постников

[и др.] // Зб. наук. праць Дон. інституту залізнич. трансп. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. - Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. 27. - С. 126-133.

89. Грищук, І.В. Використання безпаливної енергетичної установки на основі багатосекційного теплового акумулятора фазового переходу для прогріву дизель-поїзда Д1 [Текст] / І.В. Грищук [та ін.] // Зб. наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 29. – С. 123-135.

90. Шумков, Е.Б. Работа дизеля в режиме автоматического обогрева тепловоза [Текст] / Е.Б. Шумков, Е.С. Ерилин, И.В. Сычушкин // Вестник ВНИИЖТ, 2004. - № 1. – Режим доступа: <http://www.css-rzd.ru/vestnik-vniizht/v2004-1/v6-8.htm>.

91. Крамаренко, Г.В. Безгаражное хранение автомобилей при низких температурах [Текст] / Г.В. Крамаренко [и др.]. – М.: Транспорт, 1984. – 135 с.

92. Расчет и проектирование аккумуляторов теплоты капсульного типа [Текст]: метод. указания по проектированию аккумуляторов теплоты на фазовых переходах (капсульного типа) / Н.А. Россихин; МГТУ им. Н.Э. Баумана. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 120 с.

93. Микулин, Ю.В. Пуск холодных двигателей при низкой температуре Микулин / Ю.В. Микулин, В.В. Карницкий, Б.А. Энглин. - М.: Машиностроение, 1971. - 216 с.

94. Кукис, В.С. Оценка возможности утилизации энергии отработавших газов ДВС [Текст] / В.С. Кукис // Двигателестроение. - 1990. - № 10. - С. 3-5.

95. Карнаухов, Н.Н. О применении теплоаккумуляторов в конструкции гидрофицированных машин [Текст] / Карнаухов Н.Н. // Проблемы эксплуатации машин в суровых условиях Сибири: межвуз. сб. науч. трудов. - Тюмень: ТИИ, 1991. - С. 69-71.

96. Карнаухов, Н.Н. Повышение приспособленности мобильных строительных машин к суровым условиям эксплуатации [Текст]: учеб. пособие / Н.Н. Карнаухов. - Тюмень: ТюмИИ, 1993. - 223 с.

97. Николаев, Л.А. Системы подогрева тракторных дизелей при пуске [Текст] / Л.А. Николаев, А.П. Сташкевич, И.А. Захаров. - М.: Машиностроение, 1977. - 191 с.

98. Романов, В.А. Повышение мощностных, экономических и экологических показателей поршневых ДВС путем использования систем аккумулирования энергии [Текст] / В.С. Кукис, В.А. Романов // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков, 2007. - № 1. - С. 53-56.

99. Шульгин, В.В. Материалы для тепловых аккумуляторов АТС [Электронный ресурс] / В.В. Шульгин // Автомобильная промышленность. - 2014. - №2.- с. 36 – 40. - Режим доступа: [http://www.mashin.ru/files/stranicy\\_iz\\_avto-pr2\\_14\\_1-40\\_min.pdf](http://www.mashin.ru/files/stranicy_iz_avto-pr2_14_1-40_min.pdf).

100. Ложкин, В.Н. Основы физического и математического моделирования систем очистки отработавших газов ДВС с использованием каталитических конверторов и тепловых аккумуляторов фазового перехода [Текст] / В.Н. Ложкин, В.В. Шульгин // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сб. докл. VI междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 14-15 сентября 2004 г.). - СПб.: СПбГАСУ, 2004. -С. 330-336.

101. Теплоаккумулирующие материалы, разработка и применение [Текст] // Труды науч.-техн. семинара. - Краснодар: КПИ, 1989. - С. 55-60.

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

### А

аккумулятор, с. 18  
аналіз конструкцій теплових аккумуляторів  
фазового переходу, с. 32  
аккумулятори теплоти Centaur, с. 34  
аккумулятори теплоти конструкції O. Schatz, с. 32  
аккумулятори теплоти УОПД, с. 35

### Б

багатосекційний тепловий аккумулятор  
фазового переходу, с. 67, 203  
фізичні властивості, с. 165, 167, 169, 170, 173, 188, 190  
баланс, с. 216, 217

### В

вимоги до теплоакumuлюючих матеріалів, с. 78  
вплив зовнішніх факторів, с. 85

### Д

діаграма стану, с. 19, 108, 109, 120, 121, 124

### Е

енергетичний баланс теплового аккумулятора, с. 20  
енергія Гіббса, с. 81, 82, 85, 95  
експериментальна тепла установка з ТА,  
с. 164, 175, 186, 194, 196  
ексергія, с. 236, 238  
ефективність, с. 221, 229

## Є

ємність теплового акумулювання, с. 216, 220

## З

зарядка ТА, с. 131, 198, 199

зберігання теплової енергії, с. 135

## К

класи ТА фазового переходу, с. 18, 77

класифікація теплоакумулюючих матеріалів, с. 73

класифікація теплових акумуляторів фазового переходу, с. 202

кристалізація, с. 79, 84, 92, 107

криві охолодження, с. 74

кристалогідрат, с. 110

контактний тепловий акумулятор фазового переходу, с. 146

ККД, с. 221, 236

## М

методи аналізу, с. 101, 106

- циклічного термічного аналізу (ЦТА), с. 101, 103, 106, 170

- диференціально-термічного аналізу (ДТА), с. 101, 103, 106, 170

- термогравіметричного аналізу (ТГА), с. 107, 112, 113, 114

- диференціальної скануючої калориметрії (ДСК), с. 106, 112, 113, 114

маса, с. 116, 118, 243

математична модель, с. 127, 131

мікроклімат, с. 158, 160

## О

основне рівняння акумулювання енергії, с. 20

## П

плавлення, с. 107

припущення і модельні уявлення, с. 126, 142, 149



перехідний процес, с. 138  
процес передачі теплової енергії, с. 190  
показники, с. 229, 232

## **Р**

розрядка ТА, с. 136, 198, 199  
рекомендації, с. 255

## **С**

схема функціонування, с. 130

## **Т**

тепловий акумулятор, с. 13, 22, 23, 164, 184, 186  
- капсульного типу, с. 25  
- кожухотрубного типу, с. 26  
- зі скребковим видаленням ТАМ, с. 27  
- з ультразвуковим видаленням ТАМ, с. 27  
- із прямим контактом з ТАМ, с. 29  
- із прокачуванням ТАМ, с. 29  
- із випаровувально-конвективним перенесенням теплової енергії,  
с. 31  
теплове акумулювання, с. 16  
теплоакумулюючий матеріал фазового переходу, с. 19  
термограма охолодження розплавів, с. 92  
теплопередача, с. 132, 137, 219  
тепловий потік, с. 134, 151, 176  
температурний напір, с. 136  
теплонакопичувач, с. 139

## **Х**

характеристики речовин, що використовуються в якості ТАМ, с. 75

## Ц

цикл розрядки – зарядки ТА, с. 138

## Ч

число Прандтля, с. 133

число Рейнольдса, с. 133

число Нусельта, с. 133

