

Київський політехнічний інститут

На правах рукопису

УДК 536.24, 6С2.99С:4, 639.36:82 (043.3)

Федорова Ольга Володимирівна

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ  
ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В ІЗОЛЯЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

05.14.05- теоретичні основи теплотехніки

А в т о р а ф е р а т  
дисертації на здобуття вченого ступеню  
кандидата технічних наук

Київ - 1993

Робота виконана у Київському торговельно-економічному інституті

Науковий керівник к.т.н., доц. В.М.Пахомов  
Науковий консультант к.т.н., доц. М.В.Боровський

Офіційні опоненти  
1. академік АНУ, Заслужений діяч науки і техніки Угрягі, д.т.н., проф. С.П.Дибаз  
2. к.т.н., доц. В.М.Минаковський

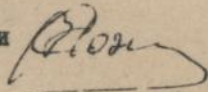
Провідна установа Інститут проблем енергозбереження АН України, м. Київ

Захист відбудеться 15 листопада 1993 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 068.14.07 у Політехнічному інституті за адресою: м. Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 106.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського політехнічного інституту за адресою: м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат роз'яснений "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1993 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

  
Е.П.РОЖАЧІН

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00810654 (0)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРАЦІ

Актуальність теми. Одним з найважливіших умов швидкого становлення України як незалежної демократичної та чужої держави є розв'язання енергетичної проблеми. Чільне місце у цій проблемі займає енергозбереження, особливо за рахунок зменшення теплових потоків через ізоляційні огороження опалювальних та охолоджувальних споруд.

Підвищення вартості енергії практично у всіх країнах, у тому числі високорозвинених, примушує з метою її заощадження підсилити теплозахисні властивості нових житлових, промислових, адміністративних будинків та холодильників, а також реконструювати холодильники, які мають вік більше як 15 - 20 років. Це ж стосується усіх видів транспортних рефрижераторів. Застосування органічних поропластів та пінопластів дає можливість реалізувати облегшені ізоляційні конструкції підвищеної щільності, зменшеної, але не усунутої погіршення теплозахисних властивостей, головним чином за рахунок зволоження та старіння ізоляції. Так, за британськими багаторічними дослідженнями збільшення коефіцієнту теплопередачі через пінопластову конструкцію із ретельною гідро- та пароізоляцією становить не менш 3% на рік. Щодо кучових наземного рефрижераторного транспорту, це погіршення за даними вчених ФРН становить 12% на рік.

Можна стверджувати: Україна має технічну спадщину у енергетичній та інвестиційній політиці, що більш як третина усього палка, яке використовують на її території, викладається на вулицю у буквальному розумінні слова. Із незначним переходом на спалювання місцевих видів палива ця частка буде збільшуватися за рахунок погіршення ККД котельних агрегатів. Тому зменшення теплових потоків через ізоляційні огороження на 2-3% приведе до заощадження 1% палива. Для холодильників зменшення теплопритоків до камер термічної обробки та зберігання харчових продуктів призводить також до зменшення усучування продуктів і збереження їх смакових та поживних властивостей.

Оскільки швидка реконструкція наявних ізоляційних огорожень та побудова нових із поліпшеними теплозахисними властивостями не є можливою із-за нестачі потужностей та коштів, актуальним став удосконалення методів дослідження та прогнозування теплообміну у ізоляційних конструкціях. Ремонт ізоляції треба робити

и вибірливо, тому ці методи повинні бути локальними та еко-пресними. Цим вимогам задовольняє теллометрія – молода галузь теплофізики та метрології, успіхи якої на різноманітних ділянках науки та практики значною мірою створені зусиллями вчених Києва. Участь автора у цих працях дозволила їй визначити нові можливості теллометрії щодо процесів перенесення теплоти та вологи у ізоляційних огородженнях, обґрунтувати їх теоретично та впровадити у практику.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної праці було створення методів одержання нової інформації про тепломасоперенесення у ізоляційних конструкціях за допомогою перфорованих теллометрів.

Для реалізації цієї мети автор розв'язала завдання:

- провела аналіз методів досліджень та прогнозування теплообміру за цих умов;
- формалізувала найбільш поширені математичні в ділі тепломасоперенесення у ізоляції і на їх основі одержала формули для визначення ефективних тепломасообмінних характеристик (ТМХ); перевірила ці формули та відповідні методи експериментально;
- удосконалила стандартний метод теллометрії ізоляційних огорожень;
- розробила методику дослідження компонентів тепломасообміру по товщині ізоляції та з її поверхні,
- теоретично обґрунтувала теллометричний метод визначення вологості ізоляції, провела роботу по оптимізації параметрів телловолометрів;
- розробила та реалізувала методику дослідження динаміки теплоперемішу через зовнішню стіну камери зберігання морожених продуктів;
- розробила та взяла участь у реалізації методики масових випробувань огорожень на розподільних холодильниках;
- пов'язала тепломасообмін через огороження та на поверхні харчових продуктів, що зберігаються при різних температурах, термодинамічним методом;
- обґрунтувала метод проектування ізоляційних конструкцій із однаковою густиною теплового потоку через окремі елементи, складала інші практичні рекомендації.

Методи досліджень. Аналітичні методи використовували для формалізації математичних моделей тепломасоперееносу, розробили та обґрунтували нових методик досліджень. Первинну інформацію про густину теплового потоку, температуру та її перепад одержували за допомогою прецизійних самописних та цифрових приладів. На одній лабораторній установці первинні сигнали за допомогою спеціального пристрою подавалися до ПЕОМ IBM PC/AT. Обчислення ефективних ТМХ проводили на ЕОМ.

#### Нові наукові результати:

- формули для визначення ефективних ТМХ у типових теплових режимах експлуатації ізоляції;
- дослідження Т.Х. за схемою діалога експериментальної установки та ПЕОМ;
- методики досліджень компонентів тепломасообміну по товщині ізоляції та з її поверхні;
- обґрунтування теплотричного методу визначення вологістості ізоляції *in situ*;
- теорема про мінімізацію теплових потоків через різні елементи ізоляційної конструкції;
- пов'язання тепломасообміну через ізоляцію та на поверхні продуктів, що зберігаються, термодинамічним методом.

#### Наукові положення, що їх автор виносить за захист:

1. Застосування перфорованих тепломірів при теплотехнічних випробуваннях ізоляції дає можливість зняти збурення з ході тепломасообміну, досліджувати компоненти теплового потоку.
2. Комінування двох теплотричних елементів із різним ступенем перфорації дозволяє визначити вологістості ізоляційного матеріалу без відбирання проб.
3. Ізоляцію треба розраховувати по окремих елементах конструкції так, щоб густина теплового потоку через них була однаковою.

#### Практична значущість та реалізація результатів досліджень.

- розроблені та реалізовані лабораторні установки по визначення ТМХ ізоляційних матеріалів за схемою діалога із ЕОМ;
- одержані дані про температурні та вологісні залежності  $T_{M, X}$  видів ізоляційних матеріалів;
- розроблені конструкції тепловологімірів, які кваліфіковані як гвіахід;
- проведені масові теплотричні випробування ізоляційних сло-

рождення розподільчих та промислових холодильників, складено практичні рекомендації;

- Науково-дослідним інститутом будівельних конструкцій (м. Київ) використані методи автора при дослідженні тепломагнітообміну та сушіння ізоляційних панелей.

Апробація праці та публікації. Основні положення дисертації були предметом доповідей та обговорення на ХЛП науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів ІІІФ АНУ (1988), наукових конференціях КТЕІ (1989, 1992) та КТЛП (1983), II та III міжреспубліканських школах-семинарах молодих вчених "Актуальні проблеми теплофізики та фізичної гідрогазодинаміки" (Алушта, 1987, 1989), IX Всесоюзній теплофізичній школі (Тамбов, 1988), міжнародному семінарі "Термометричній ізоляції"них споруджень" (Бсххорн, ФРН, 1991).

До матеріалів дисертації в 10 наукових публікацій та одне авторське свідоцтво на винахід.

Обсяг та структура праці. Дисертаційна праця складається із вступу, чотирьох глав, висновків, бібліографії та додатків. Основний матеріал викладено на 139 сторінках машинописного тексту, ілюстровано рисунками та таблицями. Бібліографія містить 105 найменувань вітчизняних та зарубіжних авторів.

## ЗМІСТ ПРАЦІ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження. Наведені нові наукові результати та основні наукові положення, що їх автор вносить на захист. Доказана практична значущість праці, результати її впровадження у дослідну та виробничу практику.

Перша глава присвячена аналізу методів досліджень та розрахунку тепломасопереносу в ізоляційних конструкціях опалюваних та охолоджуваних промислових будівель. Механізм чергування субстанції (теплота та волога) розглянуто із залученням класичних праць Ж.Б. Фур'є, К.-Л. Бертолле, В.Маха та ін. Математичні моделі процесів тепломагнітообміну всередині ізоляції на їх сучасному рівні обґрунтовані працями Г.Карслоу, О.Б.Ліковс, Ю.О. Михайлов, М.М.Беляєва, А.О.Рячко. Головна теза, що є на озброєнні дослідників та проектувальників ізоляційних конструкцій -

процеса перенесення теплоти та вологи можна розглядати окремо, а вплив масопереносу на теплоперенос урахувати через вплив в'язковості на ефективні теплофізичні характеристики (ТФХ), ізоляції - дозволяє спрощувати дуже складні математичні моделі сукупного тепломасоперенесення до рівня форми інженерних розрахунків та обчислень на ЕОМ. Аналіз результатів використання цих формул показує прийнятність цієї тези.

Експериментальне вивчення процесів перенесення в ізоляції найдоцільніше робити шляхом прямого вимірювання потенціалів та потоків. Ідея допміської стінки, що її запропонував для вимірювання теплових потоків К.Христіансен ще у XIX с., для обстеження ізоляції впровадив Е.Шмідт 70 років тому, а у 1949 році К.Ф. Фокін застосував її визначенні опору теплопередачі у сучасних огороженнях будинків. Широкого розвитку ця ідея набула за останні 30 років в зв'язку із розробкою О.А.Герашенко та його учнями у Академії наук України малогабаритних малоенергійних тепломірів, на базі яких з теплофізики та метрології була виділена окрема наука теплометрія. Її методи та прилади широко застосовуються у різних галузях науки та життя, серед них і при випробуванні ізоляційних огорожень. У 1982 році "Метод вимірювання густини теплових потоків, що проходять через захисні конструкції" був затверджений як ГОСТ 25380-82, тобто як обов'язковий для виконання.

Для визначення вологоємності ізоляції та парціального тиску водяної пари у її порах є кілька непрямих методів, для потоків вологи через ізоляційну конструкцію - донедавна майже не було. Праці В.Г.Федорова у галузі теплометрії харківських інженерів показали можливість визначати густину потоку маси теплометричними засобами, якщо у місці вимірювань відбувається фізичне перетворення вологи. Ці роботи можуть бути основою для створення методик вимірювання масообмінних характеристик ізоляції та густини потоку вологи за допомогою тепломірів з великою дифузійною проникністю.

В.М.Пахомов запропонував поєднати теплометричні методи із методами термодинаміки, зокрема методикою К.Шейделга визначення зон дифузії та конденсації водяної пари в ізоляційних конструкціях. Таким чином, у Києві створені умови для вирішення наукової проблеми, яку можна назвати "Тепловологометрія ізоляції".

лінійні конструкції". Над цією проблемою працюють також Л.Р.Декуша, В.О.Вінogradов-Салтиков, А.О.Глуздань, Л.П.Ікач, Р.Б.Іванов, О.В.Ковалцов, за допомогу "словом і ділом" автор висловлює їм щире подяку.

У другій главі наведені результати удосконалення автором методів дослідження тепломасообмінних характеристик ізоляційних огорожень. Відповідно згаданій вище тезі наголошено зроблено на комплексному вимірюванні транспортних ТТХ - теплопровідності  $\lambda$ , об'ємній теплоємності  $c_0$ , температуропровідності  $a$  та теплової активності  $b$  - в умовах експлуатації ізоляційних огорожень або максимально до них наближених. Теоретичною основою цього удосконалення є формулізація математичних моделей тепломасопереносу в огороженнях, тобто рішення диференціальних рівнянь з умовами однозначності, що є найбільш ймовірними, з метою виведення розрахункових формул для ефективних ТТХ ізоляції.

Ці формули одержані для монотонних режимів перенесення теплоти при діянні на стіну постійного джерела теплоти, а також таких випадків діяння джерела температури: постійна температура поверхні ізоляції, постійна температура оточуючого повітря та лінійне зміння оточуючої із часом. Наведено формули для монотонних збурень в узагальненому вигляді:

$$\lambda = \frac{q_2 t}{2\Delta T} \Psi_m \quad (1)$$

$$c_0 = \frac{q_2 - q_1}{v \lambda} \Psi_m \quad (2)$$

Поправки  $\Psi_m$  та  $\Psi_m'$  у випадках діяння джерел теплоти, а також якщо температура повітря змінюється лінійно:

$$\Psi_m = 1 + \frac{q_1}{q_2}; \quad \Psi_m' = 1 \quad (3)$$

При постійних температурах на поверхні ізоляції або оточуючого повітря за межами пристінного шару

$$\Psi_m = 1 - \frac{x_1 x_2}{1 - \frac{6a}{m} - (x_1^2 - x_1 x_2 + x_2^2)}; \quad \Psi_m' = \frac{1}{1 + \frac{m t^2}{12a}} \quad (4)$$

Температуропровідність  $a$  та теплову активність  $b$  зручніше обчислювати з вихідних формул  $a = (\lambda c_0)^{-1}$ ;  $b = (\lambda c_0)^{1/2}$ , та оскільки  $\lambda$  входить до формул (4), для неї отержена формула

$$a = \frac{m(q_2 x_1^3 - q_1 x_2^3)}{6(q_2 x_1 - q_1 x_2)} \quad (5)$$

У формулах (1)–(5)  $q_1$  та  $q_2$  – точні значення густини теплового потоку в обох поверхнях досліджуваного шару ізоляції;  $t_1$  та  $t_2$  – відповідні температури,  $\Delta t = t_2 - t_1$ ;  $v = \partial t / \partial x$  – швидкість змінення середньої температури шару з часом;  $x_1$  та  $x_2$  – координати початку шару,  $l = x_2 - x_1$ . Темп охолодження (чи нагрівання)  $m$  визначається для двох близьких моментів часу  $t'$  та  $t''$  вимірюванням відповідних  $t$  або  $q$ :

$$m = \frac{\ln \frac{(t_2 - t_1)'}{(t_2 - t_1)''}}{t' - t''} = \frac{\ln \frac{q_1'}{q_1''}}{t' - t''} = \frac{\ln \frac{q_2'}{q_2''}}{t' - t''} \quad (6)$$

Формалізацію рівень диференційного рівняння проведено також для гармонічних збурень з боку джерела теплоти ( $q_1$  на поверхні стінки) або температури оточуючого повітря. Узагальнені формули:

$$\lambda = \frac{v}{\varepsilon_q \Delta t} \Psi_r, \quad c\varphi = \frac{\varepsilon_q}{\omega \tau \Delta t} \Psi_r \quad (7)$$

де поправка для джерела температури

$$\Psi_r = \frac{q_1}{\operatorname{tg} \beta_1 - 1} - \frac{q_2}{\operatorname{tg} \beta_2 - 1}; \quad \Psi_r = 2 \Psi_r \quad (8)$$

а для джерела теплоти

$$\Psi_r = \frac{1}{2} (a_{12} \operatorname{ctg} C_1 - q_1 \operatorname{ctg} C_1), \quad \Psi_r = 2 \Psi \quad (9)$$

У формулах (7)–(9)  $\varepsilon_q$  – зсув по фазі коливань густини теплового потоку між поверхнями  $x_1$  та  $x_2$ ;  $\varepsilon_q = \sqrt{c\varphi / 2\lambda}$ ;  $\omega = 2\pi / \tau_0$  – кругова частота,  $\tau_0$  – період коливань. Кут  $\beta$  та  $C$  знаходять з рівнянь

$$B = \omega \tau - \varepsilon_0 \frac{x \varepsilon_q}{\lambda^2}; \quad C = B - \frac{\pi}{4} \quad (10)$$

де  $\varepsilon_0$  – зсув по фазі коливань температури поверхні стінки із  $\varepsilon_0 = 0$  (на цю поверхню діє гармонічне збурення)

$$\varepsilon_0 = \arctg \left( 1 + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{a \tau_0}{3}} \right)^{-1} \quad (11)$$

Той факт, що у формулах для  $\varepsilon_q$  та  $\varepsilon_0$  входять шукані ТЕМ  $\lambda$  та  $c\varphi$ , не мусять провадити до ітерацій при обчисленні  $\lambda$  чи  $c\varphi$ , бо обидва зсуви по фазі визначаються експериментально,

скільки  $\psi$  та  $t$  вимірюються безперервно. Зручніше це робити для максимів функцій чи при переході їх через нуль.

При гармонічних збуреннях особливе значення набувають теплова активність  $b$  та коефіцієнт теплозасвоєння досліджуваного прошарку ізоляції  $S = b\sqrt{t}$ , тому була одержана формула для їх визначення, виходячи з дії будь-якого з джерел

$$b = \frac{1}{\Delta t \omega \sqrt{2}} \varphi_r \quad (12)$$

Для визначення ефективних ТФХ та їх залежностей від температури чи вологості найзручнішим є монотонний режим, коли діє гостієне джерело тепла або температура оточуючого середовища змінюється лінійно з часом, бо за цих умов густина тепловото потоку на будь-якій ізотермі шару є постійною, а температура є лінійною функцією часу. Це дає можливість не лише найгостіше обчислювати ТФХ, але й автоматизувати лабораторні установки.

За участю автора було створено три лабораторних установки по вимірюванню ТФХ ізоляційних матеріалів, одну з них було автоматизовано шляхом сполучення із персональною ЕОМ IBM PC/AT. На цих установках було досліджено залежність ТФХ від  $t$  та вологості  $\psi$  для кількох видів теплової ізоляції, для двох нових пінопластів в роботі наведені результати дослідів за ітерполяційні формули основних ТФХ.

Е натуральних умовах залежності  $t(\tau)$  та  $q(\tau)$  змінюються інакше, ніж маємо за умов однозначності, що є основою формул (11)–(12). Тому в роботі досліджено вплив відхилення від ідеалізованих умов на помилку обчислення ТФХ. Як базу порівняння було взято режим  $q_i = \text{const}$ , де  $l$  – висота прошарку. Відносна похибка вимірювання  $\gamma$  із часом  $\frac{\partial q_i / \partial \tau}{q_i} = \dot{q}_i / q_i$  правила за аргумент, відносна похибка в обчисленні  $\lambda$ , тобто  $\varepsilon_\lambda = (\lambda' - \lambda) / \lambda$ , де  $\lambda$  та  $\lambda'$  – точне та наближене значення – за функцію. За верхню межу  $\varepsilon_\lambda$  було прийнято  $\pm 0,4$ , одержано симетричний функціональний зв'язок між  $\dot{q}_i / q_i$  та  $\varepsilon_\lambda$ . Для  $\dot{q}_i / q_i = \pm 5 \cdot 10^{-5} \text{ I/c}$  відносна похибка складає 3,5%, при додержанні стабільного температурного режиму в зольованому приміщенні  $\dot{q}_i / q_i$  повинно бути меншим за цю величину.

Третя глава присвячена розробці та вдосконаленню методів дослідження полів та потенціалів теплопереносу в ізоляції.

Наведено результати удосконалення стандартного методу вимірювання теплового потоку через оподвоєння на замкненні фірми *Feinwerk- und Messtechnik* (ФРН): змінені конструкція та параметри тепломірів, збільшена їх кількість у одному приладі.

Розроблено методики дослідження компонентів тепломасообміну по товщині та з поверхні ізоляції. Основою цих методик є застосування тепломірів із великою дифузійною проникністю (так званих перфорованих), показана стабільність їх роботи у різних тепловологічних умовах. Комбінування двох тепломірів на одній ізофермі дало можливість розробити метод теплотемпературного визначення дуже великої ТМХ – вологовмісту  $u$ , який є потегціалом масопереносу. Цей метод було визнано як винахід (а.с.1578616). Теоретичні основи методу наведено для найпростішого тепловологоміру, коли поруч із тепломіром за допоміжну стінку правити прошарок ізоляції, на поверхнях якого вимірюють  $\Delta t$  за допомогою диференційної термобатареї. Її сигнал є пропорційним теплопровідності матеріалу  $\lambda_m$ , яка в свою чергу однозначно зв'язана із вологовмістом ізоляції  $u_r$ .

Відношення сигналів тепломіра  $\epsilon_q$  та термобатареї  $\epsilon_{\Delta t}$ , тобто  $k_\lambda = \frac{\epsilon_q}{\epsilon_{\Delta t}}$  можна вважати загальною градувальною характеристикою цього вимірювального блоку, оскільки для певних параметрів обох секцій маємо  $k_\lambda = f(\lambda_m)$ . Врахування залежності  $\lambda_m = \Psi(u_m)$  дає можливість перейти до часткової градувальної характеристики  $k_u = \Psi(u_m)$ , тобто для конкретного ізоляційного матеріалу. В дисертації є графіки загальних характеристик для різних параметрів тепломірів і батарей, та часткові – для різних ізоляційних матеріалів.

Незручність практичного використання такого тепловологоміра у тому, що чутливість термобатареї є значно менша, ніж тепломіра. Підвищити її можна, якщо замість батареї взяти стрічки гіпертермоелементів, з яких виготовляють шаруваті, спіралі чи перфоровані тепломіри (на кордогій стрічці товщиною 0,1 мм навивають константановий дріт  $\varnothing$  0,1 мм, який з одного боку стрічки вкривають міддю). З цих стрічок висотою 1...3 мм можна зробити решітку, щільно якої заповнити ізоляційним матеріалом. Теплопровідність ребра  $\lambda_p$  (тепломірної стрічки) решітки значно більша за  $\lambda_m$ , тому лінії теплового потоку будуть стягуватися з матеріалу ізоляції на ребро (ефект теплової лінзи), сигнал

трички, де залежить від  $\lambda_p / \lambda_p$ , тобт. знов від  $u_n$ .

теоретичних міркувань одержано формулу для  $k_{\lambda}$  циліндричного теплового міру

$$k_{\lambda} = A \left[ a' + \frac{b'}{2} (1 + B \lambda_n) \right] \quad (13),$$

де  $a' = \frac{\lambda}{a+b}$ ;  $b' = \frac{b}{a+b}$  - відносні ширини ребер та щільна,  $A$  та  $B$  - константи, що залежать лише від параметрів тепломіру та в'стогомірної секції.

Зарівняння  $A$ ,  $B$ ,  $a'$  та  $b'$  змінює кут нахилу чині  $k_{\lambda} = f(\lambda_p)$  що доз. має під'ярти гідраду чинність приладу, себтє не в'язувати шільності теплового міру. виготовлення та градування приладів н.дт. зробило математичну модель теплопереносу у "системі з включенням".

Історично та експериментальне дослідження теплового міру в'язалося з'ясувати "дея В.М.Наховова" поспаданні методів теплометрії та тепловологісної рівноваги, що була розроблені інженером О.В.Дж. Для в'стогомірної секції формується така сама геометрія міра, як для тепломірної секції, але замість електричного нагуду, великий простір міромом неї заповнюється пористим скляним матеріалом.

Якщо приклад привесити у контакт із ізольцією, яку дослідкуємо, це секція міра стає в'язкою. Змілення  $u_e$  приводять до відношення "міромом"  $\lambda_e$ , тобтє знову приходять до тепловологісному, але твір терь віддалє в'дпочення  $u_e / u_n = \frac{c_{me}}{c_{m+n}}$ , де  $c_{m+n}$  - теплоемність сполуки чи матеріалу. За цих умов складна формула для в'стогоміру  $k_{\lambda}$

$$k_{\lambda} = A B_n \left[ \lambda_0 + \left( u_n \frac{c_{me}}{c_{m+n}} \right)^{1-m} \right] \quad (14),$$

де  $A$ ,  $B_n$  - характеристики секції;  $n$ ,  $m$  - матеріалів;  $\lambda_0$  - тепловологісність сухої ізоляції. На основі (14) можна градувати та одержати  $k_{\lambda} = f(u_n)$  або  $k_{\lambda} = f(r_n)$  з залежності від того, що переважає досліджувані - матеріал  $u_n$  чи  $c_{m+n}$ .

Досліджені почали бути одержані функції  $k_{\lambda} = f(u_n)$  для циліндричних та гірсу як скляних матеріалів.

В заключній главі наведено результати використання нових тепловологісних методик у досліджу та виробничу практику, а також результати створення та використання методів теплометрії

і технічної термодинаміки для удосконалення досліджень та прогнозування тепломасопереносу в ізоляційних конструкціях

Методику дослідження компонентів тепломасообміну по товщині ізоляції було використано у лабораторних умовах при випробуванні фрагментів двошарової об'єднаної конструкції із сталевих листа та пінопласту ПСФ товщиною 80 мм без пароізоляції. Від'ємні температури творились за рахунок переважності роботи компресора холодильної установки, змінчати частоти включень компресора було встановлено обернену до неї залежність глибини проникнення теплового збурення. Тепломіри мають значно більшу чутливість до збурень ніж термометри, звідси рекомендація будувати системи регулювання термостатів, приладів нагрівання чи охолодження не за температурою, а за її градієнтом чи густиною теплового потоку.

Методика визначення "сухої" та "вологої" складової теплового потоку із поверхні істицяції дала можливість при випробуваннях у НДІБК грашарової (метал-пінопласт-деревоплита) стіжки обчислити таксі густину потоку маси й швидкість сушіння ізоляції у "літній" період її експлуатації. Ці дослідження можуть бути підставою до поширення можливостей тепловологометрії, бо чутливі елементи реагують на потік вологи не лише внаслідок її випаровування у шарах, що відокремлюють ці елементи від оточуючого повітря, а ще й у значно глибших шарах ізоляції.

Для випробувань стігових панелей у натурних умовах співробітниками КТІХП за участю автора було створено шість вимірювальних блоків, що мали по товщині по сім тепломірів та по 22 термометри, тому для обробки дослідних даних довелося скласти програму на стаціонарну ЕОМ, що дозволяє обчислювати показові  $t, q, \lambda, \epsilon$  також вологовміст  $u$ .

При підготовці до масових випробувань єдині ізоляційних конструкцій розподільних та промислових холодильників стіна однієї морозильної камери (цегла, мінеральна вата) була оснащена двома вимірювальними блоками по сім тепломірів з термометрами. Стабільного режиму тепломасопереносу по товщині стіни не вдалось досягти у зимовий, весняний та літній періоди роботи із-за безперервного змінення температури повітря у камері на потреби виробництва від  $-30$  до  $-4^{\circ}\text{C}$ . За цих умов поверхневі вимірювання  $q$  не дають уяви про рівень  $q$  по товщині ізоляції.

тому було рекомендовано при часових випробуваннях суворо дотримувати постійної температури повітря у камерах.

Обстеження КТЕІ за участю автора несли холодильників у різних регіонах України показало, що опори теплопередачі для них нижче нормативних у 1,5...2 рази. Встановлено причини відхилення цих проектів відносно товщини ізоляції, її  $\rho$  та  $\lambda$ , низька якість пароізоляції, механічне руйнування. Складено відповідні рекомендації по сумішню ізоляції, накладанню додаткового шару чи погій заміні тепло- і пароізоляції. При цьому досягнуто істотного економічного ефекту за рахунок зменшення витрат на виробництво гелоду та усунування м'яса.

Досвід дослідження тепломасообміну у ізоляційних конструкціях дозволив опрацювати деякі практичні рекомендації. На проектній стадії для опалюваних та охолоджуваних приміщень доцільніше виходити з умов однакової густини теплового потоку через елементи конструкції, для яких температурний напір та граничні умови можна вважати однаковими. Для підтвердження цієї тези було складено і доведено теорему про мінімальну витрату ізоляційного матеріалу на замкнену конструкцію.

Якщо граничні умови різні, пропонується змінити розраховану формулу для теплового навантаження конструкції в установленому режимі, скільки її треба розглядати як суму  $m$  ділянок, кожна з яких складається із  $n$  шарів з різними властивостями

$$Q = \sum_{i=1}^m q_{Wj} F_j = \Delta t \sum_{j=1}^m k_j F_j = \Delta t \sum_{j=1}^m \frac{F_j}{\frac{1}{\alpha_j} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_b}} \quad (15)$$

Ефективна теплопровідність  $\lambda_i$  залежить від  $t_i$ , парціального тиску пари  $p_i$ , вологовмісту  $u_i$  чи льодовмісту  $\Lambda_i$ . Тому запропоновано поєднати поширений у судівельній теплофізиці ітераційний метод елементарних балансів із термодинамічними прийомами визначення зон фазових перетворень у стіні.

На кожному кроці ітерації треба визначити  $t_i$ , відповідний їй  $p_i$ , за критерієм сорбції-десорбції -  $u_i$ , за відомою функцією  $\lambda_i = f(t_i; u_i)$  - визначити  $\lambda_i$ , а також обчислювати  $(c\varphi)_i$ :

$$(c\varphi)_i = [c_i + u_i c_b + (u_i - u_i) \frac{r}{t_i - t_i}] \rho_i \quad (16)$$

де  $C_a$  - теплоємність води (або льоду, тоді замість  $\rho$  треба ставити  $\rho_{\text{льоду}}$ );  $r$  - теплота конденсації або сублімації пари; штрихом позначені величини для наступного кроку.

Методи термодинаміки було використано також для пояснення впливу теплових лотоків через ізоляцію холодильних камер на природні втрати харчових продуктів в процесі їх холодильної обробки чи зберігання. Побудовано в  $T$ - $Q$ -діаграмі цикл зміни станів охолоджувачого повітря у камері, отержеч зв'язок між усушкою  $D$  та теплопритоком  $Q$ .

$$D = Q \frac{\Delta d}{\Delta T} \quad (17).$$

Підраховано, що для усіх обстежених холодильників відношення  $Q/D$  коливається у дуже вузьких границях  $27,7 \dots 27,8$  МДж/кг. Оскільки теплота пароутворення для цих умов дорівнює  $2,5$  МДж/кг, маємо, що не менш як 3% теплопритокив через огороження витрачається на усушку, ця величина, треба враховувати при обчисленнях холодильних установок.

Лабораторну установку для комплексного вимірювання ТФХ ізоляційних матеріалів було використано разом із КІТХЛ та Квтенською вищею технічною школою (ФРН) для обґрунтування експрес-методу визначення кількості жиру у вершках на їх шляху від течка до маслозирочної машини. Встановлено єдиний функціональний зв'язок між жирністю  $X$  вершків, що були одержані із ГМЗ № 1 м. Київ та із заводу "Бітерфельд" (ФРН), та їх  $\lambda$ . Цей зв'язок відповідає моделі Л.П.Філіппова для рідких органічних сумішей

$$\lambda = (0,525 + 0,00135 t) (1 - 0,72X) (1 - X) + (0,174 - 0,000155 t) (1,72 - 0,72X) X \quad (18).$$

Середнє квадратичне відхилення для  $\lambda$  з цієї формули не перевищує 3%, тому її можна покласти в основу експрес-методу контролю жирності молока та вершків у виробничих умовах.

#### ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних даних дав можливість обрати як базисну модель сукупного тепломасопереносу в ізоляційних конструкціях із розділним віденням рівнянь перенесення теплоти та вологи (І.2.І), доцільність чого було підтверджено в дослідках.

2. Формалізація річниць теплопереносу із найбільш поширеними для ізоляційних огорожень умовами однозначності дозволила одержати формули для визначення ефект. вих. теплофізичних характеристик ізоляції при її експлуатації та на лабораторних установках (2.1, узагальні формули 2.54, 2.69, 2.70, 2.75, 2.76, 2.80).
3. Удосконалення стандартного теплометричного методу визначення теплопровідності ізоляції привело до можливості одночасно вимірювати основні теплофізичні характеристики матеріалів, вести дослідження у діапазі із  $\theta_{\text{пл}}$  (2.2.2, 2.2.4).
4. Удосконалення стандартного методу теплометрії ізоляційних конструкцій забезпечує підвищення інформативності та надійності випробувань (3.1).
5. Застосування перфорованих тепломірів при тепло-технічних випробуваннях ізоляції дає можливість з'ясувати збурення у одні теплопереносу, досліджувати компоненти теплового потоку (3.2).
6. Комбінування двох теплометричних елементів із різним ступенем перфорації дозволяє визначити вологовміст ізоляційного матеріалу без відбору проби (3.3, а.с.1578616).
7. Ізоляцію треба розподіляти по окремих елементах конструкції так, щоб густина теплового потоку через них була однаковою (3.4.1).
8. Удосконалена конструкція тепломасоміру була введена при визначенні густини потоку маси із п.верхні ізоляції та швидкості її сушіння у літній період експлуатації (4.1.2).
9. Дослідження динаміч. температур та теплових потоків у зовнішній стіні морозильної камери допомогло скласти та запровадити рекомендації при масових випробуваннях розподільчих та промислових холодильників (4.3).
10. Комбінування методів технічної термодинаміки та тепломасообміну дозволяє прогнозувати виникнення і розширення зон фазових перетворень та накопичення вологи в ізоляційних конструкціях (4.4.2).
11. Якщо зміна внастану вологості повітря в  $h_d$ -діаграмі може бути основою зв'язку процесів тепломасообміну в ізоляції та продуктах, що обробляються чи зберігаються у камері, то також прогнозування їх усунює (4.4.3).

12. Удосконалення комп'ютерного методу визначення ефективних теплофізичних характеристик спричинилося до його впровадження при дослідженнях лабільних продуктів у науковій та учбовій практиці (2.2., 4.5).

#### ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

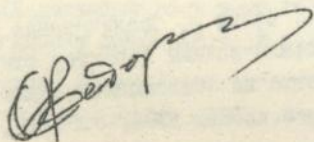
1. Пахомов В.Н., Федорова О.В. Теплоемкость в изоляции холодильников. У зб.: Тепло- и массообменные процессы в пищевой промышленности. - К.: УМК ВО, 1990, с. 29-34.
2. Федорова О.В., Пахомов В.Н., Боровський М.В. Вплив тепловологісного стану огорожень на ефективність експлуатації промислових холодильників. - Харчова та переробна промисловість, 1993, № 6.
3. Пахомов В.Н., Федорова О.В. Расчеты и прогнозирование теплозащитных свойств ограждений для производственных холодильников. У зб.: Проблемы энергосбережения. Вып.4. - К.: Наукова думка, 1990, с.48-50.
4. Федорова О.В., Пахомов В.Н., Фрède M. Исследование связи между технологическими и теплофизическими характеристиками лабильных продуктов. У зб.: Развитие общественного питания в условиях рыночных отношений. - К.: КТЕІ, 1990, с.93-101.
5. Некоторые вопросы снижения потерь мясopодуKтов и сокращения эксплуатационных расходов на распределительных холодильниках оптовой торговли / Н.В.Горовский, Д.В.Алексеенко, Г.С.Терехин, О.В.Федорова. У зб.: Пути сохранения качества и снижения потерь товаров в торговле. К.: КТЕІ, 1990, с.25-31.
6. Приборы для комплексного определения теплофизических характеристик лабильных материалов. - У кн.: Приборы для теплофизических измерений. Каталог /Ред. А.А.Долинский.- К.: Реклама, 1986, с.42-43.
7. Теплоеммер. - У кн.: Приборы для теплофизических измерений. Каталог. /Ред. А.А.Долинский. - К.: Реклама, 1986, с.32. Перэдруковано у кн.: Приборы для теплофизических измерений. Каталог. /Укн. О.А.Герашенко, Т.Г.Грищенко.- К.: Час, 1991, с.38.

8. Пахомов Э.Н., Федорова О.В. та і... Установка для комплексного определения теплофизических характеристик влажных материалов. - Инф. листок о научно-техническом достижении № 89-151. - К.: Украининти, 1969, - 4 с.

9. Федорова С.В., Ткач Л.П. Калориметр для градуировки термометров при низких температурах. - Инф. листок. - К.: Реклама, 1985. - 2 с.

10. Ткач Л. П. Федорова С.В., Сафонов В.С. Определение эффективных теплофизических характеристик изоляции низкотемпературных объектов в процессе эксплуатации. У кн.: Невейшие исследования в области теплофизических свойств (течи доп.). - Тамбов, ТИХМ, 1988, с.70.

11. Способ определения влажности капиллярно-пористых материалов в процессе теплообмена. - А.с. № 1578616 / О.В.Федорова, А.В.Ковалев, В.Н.Пахомов, Э.И.Теличкун, С.Д.Дудко, А.А.Глузель. - Опубл. в Б.И., 1990, № 26.



ФЕДОРОВА Ольга Володимирівна

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ  
ТЕПЛОМАСОПЕГЕНОСУ В ІЗОЛЯЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Підп. до друку 07.10.93. Формат 60 x 84/16. Папір друк. Офс. друк.  
Ум. друк. арк. 0,99. Ум. фарбо-відб. I, I2. Обл.-вид. арк. I, 0.  
Тираж 100 пр. Зам. 381.

---

РВВ КІЇ Дільниця оперативного друку  
253156, Київ-156, вул.Кіото, 19

AB 28.239