

Автореферат
К 61

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

На правах рукопису

КОЛТУН Павло Семенович

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ФОРМУВАННІ СКЛОВИРОБІВ

Спеціальність 05.14.05 - Теоретичні основи теплотехніки

Автореферат

дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата

технічних наук

Одеса - 1994

Робота виконана в Одеській Державній Академії холоду

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент
Г.В. Дерев'яко

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Л.Г. Катінін,
кандидат технічних наук, професор
В.Х. Кирілов

Провідна організація - НВО "Штурм"

Заявка відбудеться "30" 01 1999р. у 11 годин
на засіданні спеціалізованої ради К.068.27.01 при Одеській Державній Академії холоду за адресою: 270100, м. Одеса, вул. Петра Великого 1/3.

Відруки (завірені печаткою в двох примірниках) просимо надсилати на адресу: 270100, м. Одеса, вул. Петра Великого 1/3, Одеська Державна Академія холоду.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці академії.

Автореферат розісланий "30" 12 1994р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
К.Т.Н., професор

Р.К. Нікульшина

№ 318
№ 318
№ 318

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Важлива роль в інтенсифікації хіміко-технологічних процесів належить створенню та впровадженню високопродуктивних автоматів та енерго- і ресурсозберігаючих технологій. Успішне вирішення задач підвищення ефективності складних хіміко-технологічних процесів та якості продукції значною мірою залежить від раціонального проведення процесу. Експериментальні дослідження таких процесів за допомогою фізичного моделювання та виробничі - на реальних об'єктах, викликають значні труднощі. Розвиток обчислювальної техніки дозволяє нині з успіхом використовувати методи математичного моделювання як для аналізу таких процесів, так і для визначення оптимальних режимів їх проведення. Типовим прикладом таких процесів є високотемпературні технології виготовлення скловолокна. Вибір оптимальних параметрів таких процесів є однією з невирішених до кінця проблем у світовій практиці. Таким чином, існує необхідність створення математичних моделей та розробки, за їх допомогою, теоретичних основ проектування високопродуктивних технологій, які реалізують оптимальні режими виготовлення скловолокна.

Мета роботи. Теоретичне дослідження процесів теплообміну та гідродинаміки скла і теплообміну формового обладнання при виготовленні скловолокна. Розробка алгоритмів для математичного забезпечення АСУТП та САПР, створення теоретичних основ нових склоформуючих технологій і розрахунок оптимальних технологічних параметрів існуючих технологій виготовлення скловолокна.

Основні наукові результати. У результаті теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Розроблено наближений метод розрахунку радіаційно-кондуктивного теплообміну (РКТ) у нерозсіюючих напівпрозорих середовищах, що ґрунтується на суперпозиції наближень оптично товстого та тонкого шарів. Використовуючи запропонований метод, досліджено температурне поле скламиси у момент початку формування.
2. Розроблено чисельний метод розрахунку РКТ у випромінюючих та поглинаючих середовищах, що ґрунтується на використанні методу Монте-Карло та скінченнорізницяного методу, який дає змогу розраховувати РКТ в складних багатомірних випадках, з урахуванням залежності коефіцієнтів поглинання середовища від довжини хвилі та теплофізичних властивостей - від температури.
3. На основі запропонованих методів розрахунку РКТ у поглинаючих та випромінюючих середовищах розроблені математичні моде-

ХВ 12/01
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

лі процесів формування порожнистих та плоских гнутих скловиробів. Розроблені оптимальні циклограми процесів формування для цих виробів.

4. Виконані експериментальні дослідження по визначенню температурних полів формового обладнання та ентальпії скла на різних стадіях процесу формування.

5. Розроблена математична модель для розрахунку основних параметрів електричних нагрівальних печей опору, яка ґрунтується на використанні метода електротеплової аналогії. В межах запропонованої моделі досліджені основні характеристики роботи електричної печі опору періодичної дії.

Наукові положення, які захищаються в роботі.

1. В процесі формування скловиробів необхідно облічувати внесок теплообміну випромінюванням у загальний потік тепла між склою і формовим обладнанням, який може сягати 30% загального теплового потоку.

2. В процесі формування скла необхідно облічувати змінний тепловий контактний опір на межі скло-формове обладнання, бо його величина значно впливає на температурне поле в поверхневому шарі скла.

3. При проектуванні нового склоформового обладнання і нових процесів формування скла необхідно проводити їх дослід за допомогою математичних моделей, які дають змогу розраховувати оптимальні характеристики процесів формування і одержувати якісні вироби при мінімальних витратах енергії.

Практична цінність роботи, пов'язана з можливістю використання одержаних результатів для розрахунку основних технологічних параметрів процесу формування скла на стадії їх проектування та оптимізації параметрів вже існуючих процесів. Розроблені методи розрахунку РКТ в поглинаючих та випромінюючих середовищах, які можуть знайти застосування при дослідженні складного теплообміну у різноманітних технологічних процесах. На основі результатів роботи запропоновано модернізований процес формування порожнистих скловиробів (з. с. N 1255593), який дає змогу підвищити продуктивність і поліпшити якість виробів.

Реалізація результатів досліджень. Одержані результати були використані для оптимізації циклу роботи склоформового автомата ВВ-7 на Одеському скляному заводі, при виготовленні пристроїв для теплового експрес-аналізу оптичних скляних волокон в ДОІ ім. Вавілова (м. Санкт-Петербург), при проектуванні сонячних колекторів

фірмою "Новые технологии" (м. Одеса).

Апробація роботи. Результати роботи доповідалися на восьми всеукраїнських конференціях та семінарах, двічі - на міжнародних конгресах по склу (1-6 липня 1989 р. м. Ленінград, СРСР; 4-9 жовтня, 1992 р. м. Мадрид, Іспанія), на IV Міжнародному симпозіумі по проблемах перенесення в процесах тепло- і масообміну (14-19 липня, 1991 р. м. Сідней, Австралія); робота "Исследования и оптимизация процесса формирования стеклоизделий с помощью математической модели" стала лауреатом Всесоюзного конкурсу на кращу науково-дослідну роботу в галузі хімічної технології за 1986 рік.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, основних підсумків, списку використаної літератури, який включає 146 найменувань, та додатків. Основний зміст роботи викладений на 170 аркушах машинописного тексту, включає 36 рисунків та 9 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність і практичне значення роботи.

У першій главі на основі проведеного аналізу відомих літературних даних з дослідження проблем РКТ в поглинаючих та випромінюючих середовищах і теплообміну та гідродинаміки скла у процесах формування, сформульовано мету роботи і завдання дослідження.

У другій главі виконано дослідження РКТ у склі в діапазоні температур формування. У загальному випадку система рівнянь, що описує нестационарний теплообмін у напівпрозорому нерівномірному середовищі, до якого належить більшість вплив скла має вигляд:

$$\frac{\partial I_{\lambda}}{\partial \tau_{\lambda}} + I_{\lambda}(\tau_{\lambda}) = I_{b\lambda}(\tau_{\lambda}) \quad (1)$$
$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho c_p T) = -4 \int_{\lambda=0}^{\infty} a_{\lambda} e^{-a_{\lambda} \tau} (T) d\lambda + \int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\omega=0}^{4\pi} a_{\lambda} I_{\lambda}(\lambda, \omega) d\omega d\lambda + \nu (k \nabla^2 T)$$

Система рівнянь (1) є нелінійною інтегро-диференціальною системою. Навіть чисельне рішення такої системи рівнянь нашоується на значні математичні труднощі.

У роботі запропоновано наближений метод розрахунку РКТ у склі, який ґрунтується на суперпозиції наближень оптично товсто-

го і тонкого шарів, який дозволяє звести систему (1) до одного диференціального рівняння. Апробація методу, яка була виконана при розрахунках профілей температур напівпрозорої пластини, обмеженої чорними поверхнями, і порівняння їх з результатами, одержаними для даного випадку шляхом точного рішення, і за допомогою наблизження дифузії зі стрибком, показала досить добру точність (при $P=0,1$ одержаний профіль температур практично співпадає з точним рішенням, рис.1.). Пропонований метод дозволяє зменшити похибку розрахунку температурного поля поблизу межі тіла і розраховувати РКТ у випадках, коли тепловий потік є багатомірним.

Запропонований метод, був використаний для дослідження температурного поля каплі скломаси від моменту початку її формування і до моменту початку формування скловиробу. Розрахунки температурного поля каплі виконувались у двохмірному віссиметричному наблизженні. Система рівнянь (1) в цьому випадку має вигляд:

$$\rho_c c \frac{\partial T}{\partial t} = \delta_z \frac{16\sigma T^2}{a_r} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + \left(k_0 + \frac{16\sigma T^2}{3a_r} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \delta_r \frac{16\sigma T^2}{a_r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(k_z + \frac{16\sigma T^2}{3a_r} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(k_0 + \frac{16\sigma T^2}{3a_r} \right) \frac{\partial T}{\partial r} - 2(2-\delta_z-\delta_r)a_k e_b(T) \quad (2)$$

де

$$\delta_r = \begin{cases} \frac{R_0-r}{L}, & \text{при } R_0-r < L \\ 1, & \text{при } R_0-r \geq L \end{cases}; \quad \delta_z = \begin{cases} \frac{z}{L}, & \text{при } z < L \\ \frac{l_0-r}{L}, & \text{при } l_0-r < L \\ 1, & \text{при } z \leq L \leq l_0-r \end{cases} \quad (3)$$

За початковий момент процесу ($t=0$), обирався момент початку створення каплі $V|_{t=0}=0$ і $M|_{t=0}=0$. Температура скломаси на виході з живильника вважалась заданою: $T(r,0,t)=T_0$. При заданні крайових умов не враховувалось випромінювання навколишнього середовища, завдяки малості його температури ($T \approx 300$ К). Задача конвективного теплообміну між каплею і навколишнім середовищем вирішувалась у sprzęженій постановці. Результати розрахунку температурних полів каплі приведені на рис.2. Аналіз отриманих результатів показав, що понад 80% тепловтраг каплі складають тепловтраг за рахунок випромінювання.

В складних випадках РКТ, при необхідності обліку залежності коефіцієнта поглинання середовища від довжини хвилі і неоднорідності взаємодій випромінювання з межами середовища, узагальнюється доцільним використанням методу Монте-Карло, який дозволяє

моделювати теплове джерело в рівняннях (1) випадковим марковським процесом.

При дослідженні РКТ у склі метод Монте-Карло був об'єднаний з чисельним скінченнорізницевим методом. Для апробації пропонуваного об'єднаного методу розрахунку РКТ у напівпрозорих середовищах і встановлення можливих похибок, були виконані дослідження нестационарного РКТ у плоскому шарі поглинаючого середовища. Для встановлення інтенсивності випромінювання моделювався процес емісії теплових фотонів при заданому розподілі температури. Отримані розподілення інтенсивностей випромінювання використовувались для розрахунку температур відповідно з другим рівнянням системи (1). Генерація фотонів розглядалась для двох типів джерел: поверхневих і об'ємних

$$S_{i,j}^k = \varepsilon \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} e_{\lambda} d\lambda = \varepsilon n^2 \sigma T^4 F_{n\tau\lambda_i - n\tau\lambda_{i+1}} \quad (4)$$

$$S_{i,j}^k = 4 \Delta x \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} a_{\lambda} e_{\lambda} d\lambda = 4 \Delta x a_{\lambda} n^2 \sigma (T_{i,j}^k) F_{n\tau\lambda_i - n\tau\lambda_{i+1}}$$

Кількість частинок, емітованих j-тою зоною на k-тому часовому інтервалі, визначається за допомогою двоступінчастої процедури. По-перше, визначається загальна кількість частинок, емітованих в i-тому інтервалі довжин хвилі з співвідношення:

$$N_i^k = E \left[\frac{N(S_i^k + \sum_j S_{i,j}^k)}{\sum_i S_i^k + \sum_j \sum_i S_{i,j}^k} \right] \quad (5)$$

де $E(\dots)$ - ціла частина числа. По-друге, визначається кількість "поверхневих" та "об'ємних" частинок за виразами:

$$N_{i,p}^k = E \left[\frac{N_i^k S_i^k}{S_i^k + \sum_j S_{i,j}^k} \right]; \quad N_{i,j}^k = E \left[\frac{N_i^k + S_{i,j}^k}{S_i^k + \sum_j S_{i,j}^k} \right] \quad (6)$$

Кожна така частина отождествляється з пучком фотонів, енергія якого визначається з виразів:

$$W_{i,p}^k = S_i^k \cdot \Delta t / N_{i,p}^k; \quad W_{i,j}^k = S_{i,j}^k \cdot \Delta t / N_{i,j}^k \quad (7)$$

Оскільки $C \cdot \Delta t \gg \Delta$, то наприкінці кожного часового інтервалу всі згенеровані частинки або поглинаються, або залишають середовище.

Крім енергії частинок обчислюється також положення їх джерел, напрямок польоту і зона, в якій відбувається поглинання, з використанням псевдовипадкових чисел, рівномірно розташованих в інтервалі $(0,1)$. Після розглядання траєкторій усіх частинок визначається баланс енергії в кожній зоні з співвідношення:

$$\Delta W_j^k = \sum_{i=1}^k W_{i,j}^k - \sum_{m=1}^q W_{i,m}^k \quad (8)$$

Температура j -тої зони визначається за рівнянням, яке становить запис другого рівняння системи (1) в скінченнорівнищевій формі:

$$T_j^{k+1} - T_j^k = \frac{\Delta t}{\rho_j^k c_j^k \Delta x} \cdot \Delta W_j^k + \frac{K_j}{\rho_j^k c_j^k \Delta x^2} \left(T_{j-1}^{k+1} - 2T_j^{k+1} + T_{j+1}^{k+1} \right) \quad (9)$$

Похибка запропонованого методу, як і будь-якого статистичного методу оцінювалась за ймовірністю.

На рис.3. приведені результати розрахунку РКТ за допомогою методу Монте-Карло у двовірній скляній пластині. З рисунка видно, що наближений метод, який зазвичай використовується для розрахунку РКТ, дає значну розбіжність порівняно з запропонованим методом.

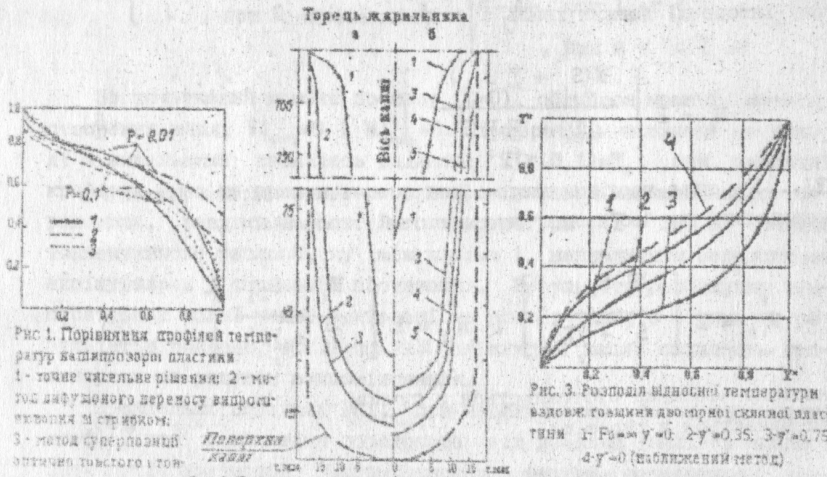


Рис.1. Порівняння профілів температур в гідротермній пластині: 1 - точне чисельне рішення; 2 - метод дифузійного переносу випромінювання зі стрічками; 3 - метод суперпозиції оптичного та теплового іонізаційного впливу.

Рис.2. Температурне поле скла в момент завершення його росту: а) без впливу теплового випромінювання; б) з впливом гідротермічного випромінювання: 1-1100°C; 2-1028; 3-1050; 4-1075; 5-1050.

Рис.3. Розподіл відносної температури вадомже товщині двошарної скляної пластини: 1- $r=0.35$; 2- $y=0.75$; 3- $z=0$ (наближений метод); 4- $z=0$ (статистичний метод).

У главі III приведені математичні моделі процесів формування порожнистих скловиробів. Розроблені моделі описують усі стадії процесу: формування заготовки (пульки) у чорновій формі; передавання її в чистову форму; формування виробу у чистовій формі; охолодження готового виробу після його вилучення з чистової форми.

Для розрахунку процесів перенесення тепла у технології виготовлення скловиробів була прийнята скінченнорівнищова форма рівнянь (2) у одномірному наближенні, спряжена з рівнянням теплової провідності, яке описує поле температур у формі. При цьому вважалося, що у початковий момент формування скло безпосередньо контактує з формою, а потім, внаслідок охолодження, щупиться між ним та формою утворюється кільцевий зазор. Термічна провідність контакту скло-форма α_r визначається з співвідношення:

$$1/\alpha_r = \frac{2bQ}{3\rho c K_G} + 1/\alpha_0 \quad (10)$$

На зовнішній поверхні форми були прийняті крайові умови 3-го роду. Як початкова умова, при вирішенні задачі, приймалося температурне поле каплі скломаси, отримане при вирішенні рівняння (2) та розподіл температур по товщині форми, отриманий в процесі послідовних розрахунків при виході на квазістационарний тепловий режим. Досягнення такого режиму перевіряється виконанням умов теплового балансу форми:

$$\sum_{k=1}^{n_1} \left\{ \alpha_n (\theta_n^k - \theta_s^k) r_n + \alpha_v (\theta_s^k - \theta_s^k) r_s \right\} = \sum_{k=1}^{n_2} \left\{ \alpha_n (\theta_s^k - \theta_m^k) r_m + [\alpha_n (\theta_s^k - \theta_n^k) - \alpha_v^k] r_s \right\} \quad (11)$$

При формуванні виробів відбувається також гідродинамічні процеси, пов'язані з формозміненням скла, які залежать від його в'язкості, розрахованої для кожного елементарного шару скла за рівнянням:

$$\lg \eta^k = \frac{B}{T^k - T_0} + A \quad (12)$$

Визначивши поле в'язкості по товщині скла і вважачи, що течія скломаси у чорновій формі підпорядковується закону Пуазейля, для швидкості переміщення скла під час видування одержуємо вираз:

$$U^k = \frac{R_0}{8\eta^k l^k} \Delta p \quad (13)$$

Після закінчення процесу видування відбувається подальше охолодження скла у чорновій формі до такого температурного стану, у якому деформація заготовки при передаванні її в чистову форму не буде перевищувати величини:

$$H - H_s = \sum_{k=1}^n \frac{M H \Delta t}{6 \eta^k S} \quad (14)$$

На стадії передавання заготовки в чистову форму процеси теплообміну у склі та у формі відбуваються незалежно один від одного. Крайові умови на зовнішній поверхні скла відповідають крайовим умовам на поверхні каллі. Крайові умови на зовнішній та на внутрішній поверхнях форми задаються у вигляді умов 3-го роду. На цій стадії, внаслідок слабкого теплообміну між заготовкою і навколишнім середовищем, відбувається вирівнювання температур у товщі скла ("вторинний розігрів"). Для одержання якісних виробів необхідно, щоб температура зовнішньої поверхні заготовки при чистовому формуванні перевищувала температуру розм'якшення скла.

На стадії чистового формування система рівнянь, які описують теплообмін між склом і формовим обладнанням, залишається без змін. Крайові умови теплообміну при цьому аналогічні крайовим умовам при чорновому формуванні. Проте у даному випадку, при видуванні заготовки між нею і формою існує значний газовий зазор завдяки цьому теплообмін між ними відбувається, значною мірою, шляхом випромінювання. Процес видування заготовки у чистовій формі розглядається як розтягнення порожнистого циліндру під дією надмірного тиску. На основі рівняння дисипації потужності для швидкості змінення внутрішнього радіуса заготовки одержано вираз:

$$U^k = \frac{\Delta p}{\sum_{i=1}^k (\eta_i^k / r_i^3) \Delta l} \quad (15)$$

По закінченні видування відбувається витримка виробу з метою фіксації його форми, за рахунок відведення тепла (твердіння скла). Це відбувається, доки деформація виробу після вилучення його з чистової форми не буде менш ніж припустима. Для чистової форми, так само як і для чорнової, за рівнянням (11) визначається вихід на квазістационарний тепловий режим роботи.

Описані рівняння являють собою повну математичну модель процесу формування порожнистих скловиробів методом подвійного

видування.

Ці модельні зображення були поширені на випадок пресування скла у чорновій формі. Результати моделювання такої задачі надані у дисертації.

При формуванні скловиробів великого об'єму для одержання якісних виробів і підвищення продуктивності необхідно застосувати багатостадійний процес формування (три і більше стадій), в якому використовуються проміжні заготовки. В такому разі у модель впроваджуються стадії формування заготовок у проміжних формах, аналогічні стадії чистового формування.

Розроблені моделі дозволяють вирішувати різні задачі, пов'язані з проектуванням та експлуатацією склоформуючих автоматів.

Перевірка адекватності розроблених моделей була виконана за допомогою експериментів для визначення ентальпії скла і температурних полей склоформуючого обладнання на різних стадіях у реальних процесах формування скловиробів. Для вимірювання температур формового обладнання склоформуючих автоматів була розроблена компактна експериментальна установка, яка монтувалася на каруселі, що безперервно обертається. За допомогою запресованих у тіло форм хромель-алюмелієвих термопар, без порушення технологічного режиму процесу формування, були виконані виміри температур. Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними показало, що розбіжність між ними не перевищує похибки експериментів.

У главі IV приведені математичні моделі процесів формування плоского гнutoго скла в електричних нагрівальних печах безперервної та періодичної дії. Для дослідження процесів формування скла у печах безперервної дії були виділені такі стадії: попередній нагрів заготовок скла до температури розм'якшення; витримка заготовок при наданій температурі з метою їх молірування (згинання при високій температурі під дією сили тяжіння або докладеного навантаження) для одержання заданого геометричного профілю; вирівнювання температур заготовки; відпал скла для усунення внутрішніх залишкових напружень; охолодження скла до кімнатної температури. На кожній, з зазначених вище, стадій відбувається складний радіаційно-кондуктивний теплообмін у склі і радіаційно-конвективний теплообмін між склом та гріючим (охолоджувачим) повітрям і нагрівальними елементами печі. На усіх перерахованих стадіях виникають деформації прогину скла, які мають найбільшу величину на стадії молірування.

У більшості випадків виготовлені вироби мають односпрямовану кривину, внаслідок чого температурне поле вздовж листа скла є еліпсоїдним, тобто задачу розподілу температур і напружень у склі можна вирішувати у двовірній постановці (за товщини та вздовж скла). Вважаючи скло нерозсікчим середовищем, процес теплообміну у склі описується системою рівнянь вигляду:

$$\begin{cases} 2\mu \frac{\partial T}{\partial x} + 2\sqrt{1-\mu} \frac{\partial T}{\partial y} = a_n [n^2 \sigma T(x,y)^4 - \pi \cdot I] \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 4a_n n^2 \sigma T(x,y)^4 + 2\pi a_n \int_{-1}^1 \eta d\eta + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (16)$$

Як крайові умови для системи (16) задатся густина потоку випромінювання нагрівальних елементів печі E_n та їх геометричне розташування. При цьому приймається припущення дифузності процесів емісії та відбиття поверхнь, що оточують скло. На поверхні скла задатся крайові умови 3-го роду.

Система рівнянь (16) вирішувалась на основі запропонованого методу суперпозиції оптично товстого й тонкого шарів. Визначивши температурне поле скла і використовувши наближення в'язко-пружного середовища Максвелла, з обліком термічного розширення скла, для визначення деформацій та напружень у склі одержуємо систему:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} = \frac{1}{E} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial t} - \nu \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} \right) + \frac{3}{2\eta} \sigma_x + \beta \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial t} = \frac{1}{E} \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial t} - \nu \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} \right) + \frac{3}{2\eta} \sigma_y + \beta \frac{\partial T}{\partial t} \end{cases} \quad (17)$$

де величина E у в'язко-пружному стані визначається за виразом:

$$E = \frac{1}{3\eta} \quad (18)$$

Для визначення густини потоків ефективного випромінювання нагрівальних елементів E_n була розроблена модель розрахунку основних характеристик електричних нагрівальних печей опору, яка використовує метод електротеплової аналогії. При цьому нагрівальна піч безперервної дії подається у вигляді пасивного нелінійного неінваріантного двопольника; піч нагріву періодичної дії - пасивного нелінійного інваріантного двопольника (у разі незалежності від температури теплофізичних властивостей піч, які беруть участь у теплообміні). На рис.4 наведено схему, що відповідає

спрощеній моделі печі періодичної дії.

Розроблені моделі дозволяють повністю розраховувати процеси формування плоских гнучих скловиробів. Використання наведених моделей дозволяє також оптимізувати температурні криві процесів, поліпшувати розташування нагрівальних елементів печі та зменшувати споживання електричної енергії. Виконані експерименти по визначенню температур скла та величини його прогинання у печі безперервної дії залежно від місця знаходження скла у печі (від часу) підтвердили адекватність розроблених моделей. На ри.5. приведені залежності від часу температури скла, його напружень та деформації в оптимізованому склі при виготовленні вітрового скла автомобіля "Москвич" у тунельній печі.

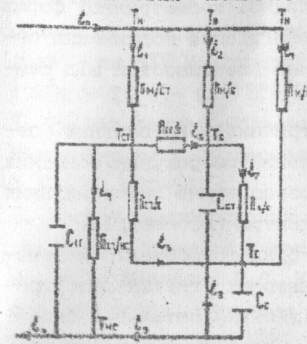


Рис.4. Спрощена електрична модель печі нагріву періодичної дії (с-скло; R-спітка; в-візок; н-наколишнє середовище; к-нагрівальні елементи)

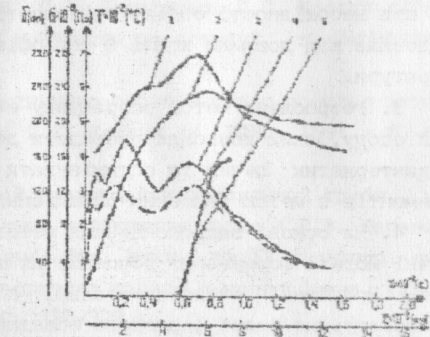


Рис.5. Залежність температури скла, напружень і деформацій від часу 1-шциий простір; 2-скло; 3-напруження стиску; 4-напруження розтягу; 5-прогин

У главі V описана математична модель процесу виготовлення заготовок для витягування оптичних скляних волокон, в якій використовуються запропонований метод розрахунку ЕКТ у склі та метод розрахунку деформацій і напружень у склі, як знаходяться у в'язко-пружному стані. У розробленій моделі скінченнорізницевої метод, який спирається на схему змінних напруг, був дещо модифікований, що обумовлено істотною відмінністю між товщинами заготовки та її довжиною: $\delta \ll l_0$.

У межах розробленої моделі були виконані розрахунки температурних полів заготовки при теплового експрес-аналізу, з метою оптимізації основних технологічних параметрів процесу, та розра-

хунки по встановленню полей напружень і деформацій заготовки під час її виготовлення.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Для розрахунку РКТ у напівпрозорих середовищах запропоновано наближений метод, що ґрунтується на суперпозиції оптично тоншого та товстого шарів. Апробація цього методу показала, що він дозволяє підвищувати точність розрахунку температури поблизу межі середовища порівняно з методом дифузії випромінювання зі стрибком.

2. Застосування розробленого методу розрахунку РКТ на основі методу Монте-Карло спільно з скінченнорізничним методом дає можливість розраховувати РКТ у тілах складної геометричної форми та при необхідності обліку залежності коефіцієнта поглинання середовища від довжини хвилі й теплофізичних властивостей від температури.

3. Розроблено метод розрахунку електричних нагрівальних печей опору, який дозволяє проводити детальний розрахунок основних характеристик печей та оптимізувати розташування нагрівальних елементів з метою зниження споживання електричної енергії.

4. На основі запропонованих методів були розроблені математичні моделі формування порожнистих та плоских гнутих склоцирків. Проведені експериментальні дослідження ентальпії скла і температурних полей формового обладнання, на різних стадіях процесу формування, підтвердили адекватність запропонованих моделей реальним процесам формування.

5. У рамках розроблених моделей виконано дослідження теплових і гідродинамічних процесів формування склоцирків, еквівалентно з опірком РКТ, термічного контактного опору на межі скло-форма, розподілу температур і теплових потоків у склі та формовому обладнанні. Виконані розрахунки елементів часових циклів технологічних процесів, конструктивних і теплових режимів склоформуального інструменту. Встановлені оптимізовані параметри процесів формування показали можливість підвищити продуктивність склоформуальних автоматів на 15-50%.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ВИКЛАДЕНІ У ПРАЦЯХ

1. Расчет температурного поля капли стекломассы / Н.М. Холодов, З.Г. Флам, П.С. Колтун // Физика и химия стекла.- 1982.- Т.8, N 5.- С. 429-432.

2. Расчет радиационно-кондуктивного теплообмена полупрозрачной пластины методом Монте-Карло / Н.М. Холодов, З.Г. Флам, П.С. Колтун // Изв.- 1982.- Т.42, N 3.- С. 455-461.

3. Исследование и оптимизация процесса формирования стекла на основе математической модели / З.Г. Флам, П.С. Колтун // Физика и химия стекла.- 1987.- Т.13, N 2.- С. 272-277.

4. Численное моделирование параметров рабочих процессов и оборудования при автоматическом формировании стекла // З.Г. Флам, П.С. Колтун // Физика и химия стекла.- 1987.- Т. 13, N 2.- С.266-271.

5. Расчет толщины стенок стеклоформ./ З.Г. Флам, П.С. Колтун // Стекло и керамика.- 1988.- N 5.- С. 18-20.

6. Исследование и оптимизация процесса моллирования стекла на основе математической модели / Г.В. Деревянко, П.С. Колтун // Тез. докл. на "XV Международном конгрессе по стеклу", г. Ленинград, 1989г.- Т. 4.- С. 132-133.

7. Расчет радиационно-кондуктивного теплообмена с помощью метода Монте-Карло / Г.В. Деревянко, П.С. Колтун // Изв.- 1991.- Т. 61, N 4.- С. 680-684.

8. Расчет температурных полей вращающейся стеклянной трубы, нагреваемой движущимся локальным источником тепла / Г.В. Деревянко, М.А. Ероньян, П.С. Колтун // Тез. докл. на IV Междунар. симпоз. по пробл. переноса в процессах тепло- и массообмена, Австралия, г. Сидней, 1991 г. С. 327-328.

9. Расчет температурных полей и напряжений кварцевой трубки при CVD-технологии. / Г.В. Деревянко, М.А. Ероньян, П.С. Колтун // Тез. докл. на "XVI Международном конгрессе по стеклу", Испания, г.Мадрид, 1992.- Т. 4.- С. 114-115.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

I_{λ} - спектральна інтензивність випромінювання середовища, Вт/м²; τ - оптична товща середовища; ϵ_{λ} - спектральна густина випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м²; a_{λ} - спектральний коефіцієнт поглинання середовища, м⁻¹; ρ - густина, кг/м³; c - теплоємність, Дж/(кг*К); k - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м*К); λ - довжина хвилі теплового випромінювання, м; ω - тілесний кут; T, θ - абсолютна температура скла та форми, °К; t - час, с; p - показник заломлення; σ - постійна Стефана-Больцмана; a_n - розселендів середній показник поглинання, м⁻¹; $R=(k \cdot a_n / n^2 \sigma T^3)$ - число Планка; η - коефіцієнт динамічної в'язкості, Н*с/м²; Δp - надмірний тиск, Па; M - маса виробу, кг; H - висота виробу, м; F - площа торцевої

поверхні, m^2 ; μ - косинус кута нахилу між напрямком випромінювання та віссю X; E - модуль пружності скла, Па; ϵ_x, ϵ_y - відносні деформації елемента скла; σ_x, σ_y - напруження елемента скла, Па; $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$ - інтервали координатної сітки по осях X, Y, Z, R, м; Δt - крок розбиття часу на інтервали, м; $F_0 = (k \cdot t / \rho \cdot c \cdot \Delta x^2)$ - число Фур'є; C - швидкість електромагнітного випромінювання у тілі, м/с; R_0, l_0 - радіус та довжина скловиробу, м; α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/($m^2 K$); γ - коефіцієнт розширення скла, K^{-1} ; β - лінійний коефіцієнт термічного розширення, K^{-1} .

Індекси

i, j, k - номери інтервалів вздовж координатних осей та осі часу; c - скло; F - силіформа; G - газ; V - повітря; O - початковий момент часу; X, Y, Z, r - проєкції на осі X, Y, Z, R.

АНОТАЦІЯ

Колтун П.С. "Оптимизация тепловых процессов при производстве стеклоизделий". Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 - Теоретические основы теплотехники. Защищается 27 научных работ и 2 авторских свидетельства, в которых изложены, разработанные автором приближенный метод расчета радиационно-кондуктивного теплообмена (РКТ) в полупрозрачных средах; численный метод расчета РКТ, основанный на использовании метода Монте-Карло совместно с методом конечных разностей; метод расчета электрических нагревательных печей сопротивления. Используя предложенные методы, разработаны математические модели процессов формирования стеклоизделий и выполнены исследования и оптимизация этих процессов.

There were developed in the dissertation: the approximate method of calculation radiative-conductive heat transfer (RCHT) in the semitransparent bodies; the numerical method of calculation RCHT based on the Monte-Carlo method act in combination with finite-difference method; method of the calculation of electric heating furnaces. The mathematical models have been developed for processes of glass forming with using of offering methods of calculations. These models have been applied for investigation and optimisation of forming glasswares.

Ключові слова:

теплообмін, скло, моделювання.

Пилип

Підписано до друку 14.11.1994р. Обсяг 1 друк. арк..

Формат 60x84, с. Зам.. 171. Тираж 100

Друк УДАЗ Ім. С.С. Попова. Одеса, Старопортофранківська.

