

Київський університет імені Тараса Шевченка

На правах рукопису

ВАЖЕНІН Олег Миколайович

УДК 621.43.016.4.001.5

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ
РАДІАЦІЙНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ**

05.13.16 — використання обчислювальної техніки, математичного моделювання та математичних методів у наукових дослідженнях

Автореферат дисертації на здобуття ученого ступеня кандидата технічних наук

Київ 1993



Роботу виконано в Інституті
України.

Наукові керівники: доктор технічних наук, професор
СТРАДОМСЬКИЙ М. В.,
доктор фізико-математичних наук,
професор ХУСАІНОВ Д. Я.

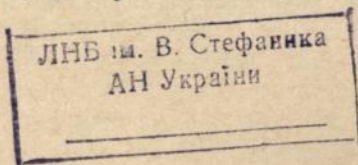
Офіційні опоненти: доктор технічних наук БАБАЄВ А. Е.,
кандидат технічних наук
СТАДНИК О. О.

Провідна організація: Київський політехнічний інститут.

Захист відбудеться 24 червня 1993 р. о 14⁰⁰
годині на засіданні спеціалізованої ради К 068.18.10 при Ки-
ївському університеті імені Тараса Шевченка за адресою:
252127 Київ 127, проспект Академіка Глушкова, 6, факультет
кібернетики, ауд. 40.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці університету.

Автореферат розісланий 21 травня 1993 р.



Учений секретар
спеціалізованої ради

БЕЙКО І. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

В дисертації розглядаються питання математичного моделювання тривимірних температурних полів і ідентифікація процесів радіаційно-конвективного теплообміну в складних деталях енергетичних установ.

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ. Значна частина деталей та вузлів енергетичних пристроїв, двигунів внутрішнього згорання працюють в складних теплофізичних умовах. Процеси теплообміну в реальних умовах надто складні для побудови точних математичних моделей. Експериментальні дані, як правило, знаходяться з похибками, складна геометрія об'єктів заважає одержати точний розв'язок. Тому для дослідження, діагностики та прогнозування тривимірного температурного стану необхідно розробляти спеціальні експериментально-розрахункові методи. Вони повинні складатися з вимірювання температури в технічно-досяжних місцях, розробки простих і ефективних математичних моделей, визначення температурних полів та теплових потоків за допомогою розв'язання граничних обернених задач теплопровідності.

Одержаний розподіл температури та теплового потоку є основою для модернізації або розробки конструкцій вузлів двигунів внутрішнього згорання і побудови моделей радіаційно-конвективного теплообміну в реальних умовах.

МЕТА РОБОТИ

- Розробка простих математичних моделей температурного стану, які враховують особливості експериментально-розрахункової методики. В моделях використовуються дані про розташування контрольних точок, а також апріорна інформація про процеси теплообміну.

- Розробка математичного та програмного забезпечення експериментально-розрахункової методики.

- Розв'язок реальних теплофізичних задач по дослідженню теплового стану найбільш напружених деталей, наприклад деталей циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згорання.

- Надання рекомендацій по оптимізації теплового стану, по модернізації та удосконаленню систем охолодження.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ. При побудові математичних моделей температурних полів та їх дослідженні використовувались:

- методи теорії спеціальних функцій, розв'язок рівняння Лапласа для сферичних оболонок за допомогою поліномів Лежандра,
- методи обчислювальної математики, розв'язок рівняння Лапласа для складних тривимірних областей за допомогою сіткових моделей,
- математичні методи обробки фізичних експериментів,
- методи параметричної ідентифікації.

НАУЧНА ТА ПРАКТИЧНА НОВІЗНА. Розроблені експериментально-розрахункова методика та комплекс програм на ЕОМ дослідження температурного стану областей, геометрія яких близька до сферичної, за допомогою кінцевих сум розкладу по сферичним функціям.

- Розроблені експериментально-розрахункова методика та комплекс програм на ЕОМ дослідження температурного стану на сіткових моделях.

- Розроблен комплексний економічний алгоритм еквівалентних перетворень сіткових моделей.

- Розроблен спеціальний комплекс програм дослідження температурного стану составних областей з геометрією, близькою до циліндричної, за допомогою сіткових моделей.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Всі розроблені алгоритми запрограмовані на мові ФОРТРАН і використані при розв'язку практичних задач дослідження тривимірних температурних полів. Вони були використані при дослідженні теплового стану елементів циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згорання в ПО машинобудування (м.Рибінськ) та ОКЕМ (м.Воронеж). За допомогою одержаних результатів проводилась модернізація існуючих і розробка нових двигунів.

Комплекс програм оформлен у вигляді окремих модулів, що дозволяє використовувати його для розв'язку прямих та обернених граничних задач теплопровідності на ЕОМ.

АПРОБАЦІЯ РАБОТИ. Результати дисертації доповідались і обговорювались на IV Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми нелінійної електротехніки" (Кацівелі, 1984), Сибірській школі по обчислювальній математиці (Новосибірськ, 1988), I та II

Республіканських конференціях "Удосконалення теорії та техніки теплового захисту енергетичних пристроїв" (Київ, 1987, Житомир, 1990), II Всесоюзному науково-технічному семінарі "Удосконалення потужностних, економічних та екологічних показників ДВЗ" (Володимир, 1991), науковій школі "Моделювання та дослідження стійкості фізичних процесів" (Київ, 1991), семінарах Наукової ради України з проблеми "Кібернетика" "Моделювання і оптимізація складних систем" (н.к. чл.-кор. АН України Бублик Б.М., проф. Наконечний О.Г., Київ, 1991, 1993), наукових семінарах ІТФ АН України (Київ, 1984, 1987-1992).

По темі дисертації опубліковано 12 друкованих робіт.

СТРУКТУРА ТА ОБ'ЄМ РОБОТИ. Дисертація складається із вступу, трьох глав, висновку, списку використаної літератури, що складається з 123. назв, та двох додатків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність питань, що розглядаються, необхідність розробки експериментально-розрахункових методик для дослідження задач визначення теплового стану на основі розв'язку граничних обернених задач теплопровідності з використанням ЕОМ. Приводиться обґрунтування необхідності розробки математичного забезпечення чисельного розв'язку теплофізичних задач такого типу. Дається повний огляд результатів, розроблених на цей час з цих питань.

Перша глава присвячена технічному опису та математичній постановці задачі. Розглядаються задачі дослідження температурного стану деталей та вузлів енергетичних установ на прикладі циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згорання. Розглянуті особливості температурних полів і характерна геометрія областей. Формується загальна математична постановка задачі дослідження теплового стану деталей циліндро-поршневої групи за допомогою розв'язку граничної оберненої задачі теплопровідності.

Приймається, що температурне поле $T(x, y, z)$ в досліджуваній області G з границею Γ описується за допомогою рівняння Лапласа

$$\Delta T(x, y, z) = 0,$$

де $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа.

Відомі експериментально виміряні значення температур

$$T_i^{\exists} = T(x_i^{\exists}, y_i^{\exists}, z_i^{\exists}), \quad i = \overline{1, N_{\exists}},$$

в точках з координатами $x_i^{\exists}, y_i^{\exists}, z_i^{\exists}$, де N_{\exists} - число експериментальних точок. Відома похибка експеримента δT_i^{\exists} , $i = \overline{1, N_{\exists}}$.

По цих даним необхідно визначити температурне поле $T(x, y, z)$ в області G , а також визначити на границі Γ температурне поле, тепловий потік і деякі функції від них

$$T(x, y, z)|_{\Gamma}, \quad Q(x, y, z) = -\lambda \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial n} \Big|_{\Gamma};$$

$$d_{\text{конв}} = Q(x, y, z) / (T_2 - T_c).$$

Дається короткий огляд математичних методів розв'язку обернених граничних задач теплопровідності. Розглядаються методи, що використовують особливості розглянутого класу задач, а саме, існування контрольних точок, в яких проводиться вимір температури, а також використовується априорна інформація про поведінку температурного поля на границі.

Вводяться загальні принципи параметризації і будується послідовність класів моделей температурного поля $T^{(k)}$, де k - індекс класу, $X^{(k)}$ - вектор параметрів. Будується вектор температур у контрольних точках

$$\bar{T}_i^{(k)} = T^{(k)}(x_i^{\exists}, y_i^{\exists}, z_i^{\exists}), \quad i = \overline{1, N_{\exists}}.$$

Міра наближення між параметризованим розв'язком в контрольних точках $\bar{T}_i^{(k)}$ та експериментально виміряними температурами T_i^{\exists} , $i = \overline{1, N_{\exists}}$, визначається залежностями

$$\rho_1(\bar{T}^{(k)}, T^{\exists}) = \left\{ \frac{1}{N_{\exists}} \sum_{i=1}^{N_{\exists}} \left[\frac{\bar{T}_i^{(k)} - T_i^{\exists}}{\delta T_i^{\exists}} \right]^2 \right\}^{1/2}.$$

$$\rho_2(\bar{T}^{(k)}, T^3) = \max_{i=1, N_2} \left\{ \left| \frac{\bar{T}_i^{(k)} - T_i^3}{\delta T_i^3} \right| \right\}.$$

Регуляризація за допомогою послідовності моделей проводиться за алгоритмом, що формується таким чином.

Для фіксованого $K=0, K_{\max}$ вектор параметрів $X^{(k)}$ знаходиться з розв'язку задачі мінімізації

$$\min_{X^{(k)}} \left\{ \rho_1^2(\bar{T}^{(k)}, T^3) \right\}.$$

Ця задача розв'язується чисельно за допомогою метода спряжених градієнтів.

Знаходиться модель з мінімальним числом параметрів, тобто з мінімальним індексом K_S , що задовольняє нерівності

$$\rho_1(\bar{T}^{(K_S)}, T^3) \leq 1,$$

якщо достатня збіжність у середньому, або

$$\rho_2(\bar{T}^{(K_S)}, T^3) \leq 1,$$

якщо розглядається збіжність у кожній контрольній точці.

При цьому модель $T^{(K_S)}$ вважається узгодженою за точністю з експериментальними даними.

Регуляризація за допомогою згладжувачих операторів проводиться по такій схемі. Для вибраного класу моделі $T^{(K_S)}$ проводиться перерахунок вектору параметрів $X^{(K_S)}$. Це робиться із розв'язку задачі

$$\min_{X^{(K_S)}} \left\{ \rho_1^2(\bar{T}^{(K_S)}, T^3) + d S(T^{(K_S)}) \right\}.$$

Тут K_S - індекс класу моделі, для якого провадиться згладжування, $S(T^{(K_S)})$ - згладжувачий оператор, d - коефіцієнт регуляризації. Він знаходиться із розв'язку рівняння

$$\rho_1(\bar{T}^{(K_S)}, T^3) = 1,$$

якщо достатня збіжність у середньому, або

$$\rho_2(\bar{T}^{(K_S)}, T^{\rightarrow}) = 1,$$

якщо розглядається збіжність у кожній точці.

Для вибору поверхні згладжування, а також методів побудови згладжувачих операторів використовується априорна інформація про поведінку температурного поля на конкретних поверхнях.

В другій главі дається опис експериментально-розрахункової методики дослідження теплового стану, розглянуті особливості та вимоги до методики для деталей циліндро-поршневої групи.

За допомогою точного розв'язку у вигляді рядів по сферичним функціям визначається індекс класу моделей температурного поля як найбільше число сферичних гармонік у кінцевій сумі ряду. Температурне поле, що відноситься до K -го класу, записується у вигляді

$$T^{(K)}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^K (A_n r^n + B_n r^{-(n+1)}) Y_n(\theta, \varphi);$$

$$Y_n(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\varphi + B_{nm} \sin m\varphi) P_n^m(\cos \theta),$$

де $X^{(K)}$ $P_n^m(\cos \theta)$ - приєднані функції Лежандра. Вектор параметрів - це коефіцієнти розкладу;

$$A_n A_{nm}, B_n A_{nm}, A_n B_{nm}, B_n B_{nm},$$

$$B_{n0} = 0, \quad n = \overline{0, K}, \quad m = \overline{0, n}.$$

Для розглянутої параметризації граничні обернені задачі розв'язувалися за допомогою послідовності моделей з використанням згладжувачих операторів. Оператори, що гарантують гладкість, задавалися у явному вигляді на сітці. Задача мінімізації мала вигляд

$$\min_{X^{(K_S)}} \left\{ \rho_1^2(\bar{T}^{(K_S)}, T^\exists) + \alpha^{(L)} \sum_{i \in \partial \Omega} (SS_i^{(L)})^2 ds_i \right\},$$

де $\alpha^{(L)}$ - коефіцієнт регуляризації,
 $SS_i^{(L)}$, $L=1,2,3$ - локальні сіткові згладжуючі оператори
 в i -й точці:

$$SS_i^{(1)} = \sum_{j \in \partial \Omega_i} g_{ij} T_j - T_i ; -$$

згладжуючий оператор по температурам;

$$SS_i^{(2)} = \sum_{j \in \partial \Omega_i} g_{ij} Q_j - Q ; -$$

згладжуючий оператор по тепловим потокам;

$$SS_i^{(3)} = \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_i -$$

згладжуючий оператор градієнтного типу;

$\partial \Omega$ - множина поверхневих вузлів;

$\partial \Omega_i$ - множина сусідніх з i -м вузлів;

ds_i - площа i -го елемента поверхні;

g_{ij} - функція ваги згладжуючого оператора,

$$\sum_{j \in \partial \Omega_i} g_{ij} = 1, \quad g_{ij} > 0.$$

Визначимо, що для прямокутної рівномірної сітки найпростішим згладжуючим оператором є оператор усереднення

$$g_{ij} = 1/4, \quad j = \overline{1,4}.$$

Описується методика розв'язку задач за допомогою сіткових

моделей. Особливості запропонованої методики продемонстровані розв'язком конкретної задачі дослідження температурного стану циліндра двигуна ІЖ-7.110 з водяним охолодженням. Він являє собою циліндричну область, що складається з чавунної гільзи та рубашки з алюмінієвого сплаву. Для порівняння складності температурного поля приведені оцінки розв'язку задачі в одновимірному наближенні, коли температурне поле залежить лише від координати. z .

З врахуванням очікуваних особливостей температурного поля приведені сіткові моделі різницевого аналога рівняння Лапласа, записаного у дивергентній формі

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T(r, \varphi, z)) = 0.$$

Використовуючи загальний підхід, розроблений у першій главі, будується послідовність моделей температурного поля, що одержується на основі сіткових моделей. Для такого класу моделей індекс має більш складну структуру

$$\{k_e\} = \{Nz_e, N\varphi_e, Nz_e\},$$

де Nz_e , $N\varphi_e$, Nz_e - числа розбиття по відповідним координатам z , φ , z .

Клас моделі визначається цими трьома параметрами, а також способом розбиття по відповідним координатам. Від них залежить точність різницевого розв'язку і об'єм обчислювальних витрат для його одержання.

Позначимо $\chi^{(k_e)}$ - вектор параметрів моделі. У даному випадку параметри моделі - це невідомі температури у граничних вузлах сіткової моделі. Для розв'язку використовуються локальні згладжуючі оператори

$$SS_i^{(L)}; L = \overline{1, 4}.$$

Перші три співпадають з наведеними раніше, а

$$SS_i^{(4)} = Q_i - p_i | Q_i |$$

стабілізує оператор, що узгоджує бажаний напрямок теплового потоку на поверхні нагріву та охолодження, де

$$P_i = \begin{cases} -1, & i \in \partial \Omega^+, \\ +1, & i \in \partial \Omega^-, \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{зона теплопідводу } Q_i < 0; \\ \text{зона тепловідводу } Q_i > 0; \end{array}$$

Q_i - тепловий потік по внутрішній нормалі до досліджуваної області

$$i \in \partial \Omega \quad (\partial \Omega \subset \partial \Omega^+ \cup \partial \Omega^-).$$

Як видно з побудови SS_i при співпаданні знаків одержаного теплового потоку Q_i із знаком P_i очікуваного теплового потоку буде мати місце

$$SS_i = 0.$$

Далі наводяться алгоритми побудови різних початкових наближень, які використовують розв'язок одновимірних граничних задач.

Описується методика перетворення початкової задачі до вигляду, зручного для проведення мінімізації. З використанням еквівалентних перетворень сіткових моделей обчислюються матриці $A^{(ke)}$ та $B^{(ke)}$, які залишаються сталими для всіх процесів мінімізації.

В цьому випадку для будь-якого вектора граничних температур $\chi^{(ke)}$ вектор контрольних температур та вектор теплових потоків на границі області обчислюються за формулами

$$\bar{T}^{(ke)} = A^{(ke)} \chi^{(ke)}, \quad Q^{(ke)} = B^{(ke)} \chi^{(ke)}$$

В наступних параграфах описується комплексний алгоритм еквівалентних перетворень сіткових моделей, що не потребує обчислення обернених матриць. Запропонований економічний алгоритм використовує симетричність і велику розрідженість початкової матриці провідностей сіткової моделі, а також принцип конденсації. Він близький в ідейному плані до фронтального методу, але в даному випадку він використовується не для розв'язку системи рівнянь, як при реалізації метода кінцевих

елементів, а для одержання матриці $B^{(ke)}$.

Ця методика дозволяє суттєво заощаджувати оперативну пам'ять і оцінювати кількість операцій, необхідних для еквівалентних перетворень. А це надає можливість більш точно описати відповідний програмний модуль.

Третя глава присвячена застосуванню експериментально-розрахункової методики, розробленої в другій главі, для дослідження температурного стану деталей енергетичних пристроїв на прикладі деталей циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згорання.

Методика дослідження теплового стану деталей з геометрією, близькою до сферичної, використовувалася для розрахунку теплового стану напівсферичних робочих камер двигунів внутрішнього згорання, для визначення тривимірного температурного поля сферичної частини поршня швидкохідного карбюраторного двигуна, для дослідження теплового стану головки циліндра з рідинною системою охолодження. Експериментально-розрахункова методика дослідження теплового стану на сіткових моделях застосовувалась при дослідженні температурного стану циліндра двигуна ІЖ-7.110 з водяним охолодженням.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ, ОДЕРЖАНІ В ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

1. Розроблена експериментально-розрахункова методика дослідження теплового стану об'єктів із складною тривимірною геометрією за допомогою системи моделей для сферичних оболонок.
2. Розроблена експериментально-розрахункова методика дослідження теплового стану за допомогою розв'язку задач на сіткових моделях.
3. Розроблен комплексний економічний алгоритм еквівалентних перетворень сіткових моделей.
4. За допомогою розроблених методик і алгоритмів розв'язані практичні задачі дослідження теплового стану елементів циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згорання.
5. Одержані результати знайшли застосування при модернізації існуючих і розробці нових двигунів внутрішнього згорання, що дозволило підняти їх економічність, надійність та ресурс.

Основні результати достатньо повно викладені в наступних публікаціях.

1. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Важенин О.Н. Численный метод определения коэффициентов теплоотдачи по измеренным температурам в деталях сложной формы // Проблемы машиностроения. - 1984. - Вып.22. - С. 36-40.
2. Страдомский М.В., Максимов Е.А., Важенин О.Н. Применение эквивалентных преобразований для решения задач теплопроводности // Проблемы нелинейной электротехники: Тез. докл. IV Всесоюз. научн.-техн. конф. (Кацивели, 1984). - Киев : Наук. думка. - 1984. - Ч.II. - С. 37-38.
3. Важенин О.Н. Экономичный алгоритм эквивалентных преобразований сеточных моделей // Кибернетика. - 1985. - № 6. - С 24-27.
4. Важенин О.Н. Применение интегральных уравнений для выделения особенностей при идентификации модели сложного теплообмена для многосвязных областей // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств: Тез. докл. Республ. научн.-техн. конф. - Киев : ИТТФ АН УССР. - 1987. - С. 87-88.
5. Расчет теплового состояния полусферических рабочих камер тепловых двигателей / М.В.Страдомский, В.А.Асмаловский, О.Н.Важенин, В.В.Медяновский // Промышл. теплотехника. - 1989. - № 6. - С. 49-53.
6. Страдомский М.В., Асмаловский В.А., Важенин О.Н. Определение трехмерного температурного поля сферической части поршня быстросходного карбюраторного ДВС // Там же. - 1990. - № 2. - С. 43-49.
7. Тепловое состояние головки двигателя цилиндра ДВС с жидкостной системой охлаждения / М.В.Страдомский, В.А.Асмаловский, О.Н.Важенин, В.В.Медяновский // Там же. - 1990. - № 5. - С. 7-12.
8. Полуаналитический метод расчета системы тепловой защиты деталей ДВС / М.В.Страдомский, В.А.Асмаловский, В.В.Медяновский, О.Н.Важенин // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств: Тез. докл. II Республ. конф. (Житомир, 1990). - Киев : НТК ИТТФ АН УССР. - 1990. - С. 107-108.

9. Расчет трехмерного температурного поля теплонапряженных высоко-температурных двигателей / М.В.Страдомский, В.А.Асмаловский, В.В.Медяновский, О.Н.Важенин // Там же. - С. 109-110.
10. Тепловое состояние цилиндра двухтактного двигателя с жидкостной системой охлаждения / А.Т.Баканов, В.А.Асмаловский, В.В.Медяновский, О.Н.Важенин // Совершенствование мощностных экономических и экологических показателей ДВС: Тез. докл. II Всесоюз. научн.-практ. семинара. - Владимир. - 1991. - С. 5-6.
11. Оценка теплового состояния поршней малоразмерных карбюраторов ДВС / А.Т.Баканов, В.А.Асмаловский, В.В.Медяновский, О.Н.Важенин // Там же. - С. 6-7.
12. Важенин О.Н., Хусаинов Д.Я. Идентификация параметров процесса теплообмена в деталях сложной конфигурации // Моделирование и исследование устойчивости физических процессов: Тез. докл. научн. школы-семинара. - Киев. - 1991.- С. 15.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Підп. до друку 18.05.93. Формат 60×84/16. Папір друк. №2. Офс. друк.
Ум. друк. арк. ,70. Ум. фарбо-відб. 0,82. Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100.
Зам. 831.

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова АН України
252207 Київ 207, проспект Академіка Глушкова, 40

465601

AB 27.684

AB 27.684