

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

*В.А. Ващенко, В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик,
І.В. Яценко, М.О. Бондаренко, О.В. Кириченко, М.П. Рудь*

ОСНОВИ ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ В ЕЛЕМЕНТАХ ОПТИЧНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

За редакцією
доктора технічних наук, професора
В.А. Ващенко

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України
як навчальний посібник для студентів
вищих навчальних закладів*

Київ
Політехніка

2012

УДК 536.24:621.9.048 (075.8)
ББК 33.31я7
Т 33

Гриф надано Міністерством освіти і
науки України
(лист від 13.10.2011 р. №1/II-9520)

Автори: В. А. ВАЩЕНКО, д.т.н., професор,
В. С. АНТОНЮК, д.т.н., професор,
Г. С. ТИМЧИК, д.т.н., професор,
І. В. ЯЦЕНКО, к.т.н., доцент,
М. О. БОНДАРЕНКО, к.т.н., доцент,
О. В. КИРИЧЕНКО, к.т.н., доцент,
М. П. РУДЬ, к.т.н., ст. викладач

Рецензенти:

С. О. Воронов, д.т.н., професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»;

А. М. Гусак, д.ф.-м.н., професор кафедри теоретичної фізики Черкаського національного університету ім.Б.Хмельницького, заслужений діяч науки і техніки України;

В. М. Шаранов, д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних технологій в приладобудуванні Черкаського державного технологічного університету, заслужений діяч науки і техніки України

Основи теплоперенесення в елементах оптичного приладобудування [Текст]: навч. посіб. / В.А. Ващенко, В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, І.В. Яценко, М.О. Бондаренко, О.В. Кириченко, М.П. Рудь; За ред. В.А.Ващенко. – Київ: Наукова думка, 2012. – 410 с.

В навчальному посібнику систематизовані та викладені елементи векторного та тензорного аналізу, а також основи теорії теплоперенесення в різних середовищах, які знайшли широке застосування в оптичному приладобудуванні. Розглянуті основні аналітичні методи розв'язку задач теплопровідності для необмежених, напівобмежених та обмежених середовищ. Наведені результати практичного використання методів теорії теплопровідності при розробці сучасних нанотехнологій електронної обробки оптичних матеріалів та експлуатації елементів приладобудування на їх основі: особливості термічної дії потоку електронів на оптичні матеріали, нормативні вимоги до якості оптичних виробів і сучасне електротехнічне обладнання для їхньої поверхневої електронної обробки; моделювання та розрахунків впливу керованих параметрів стрічкового електронного потоку на температурні поля в оброблюваних оптичних матеріалах; моделювання та розрахунків термонапруженого стану поверхні виробів, що працюють в діапазоні інфрачервоного випромінювання.

Для студентів, магістрів та аспірантів технічних спеціальностей вищих закладів освіти України, які вивчають застосування методів теорії теплоперенесення в інженерно-технічних задачах оптичного приладобудування. Навчальний посібник може бути корисним науковим співробітникам та інженерам, що займаються проблемами обробки матеріалів оптичного приладобудування концентрованими потоками енергії, а також фахівцям в області аерогазодинаміки та теорії теплопровідності.

УДК 536.24:621.9.048 (075.8)
ББК 33.31я7

ISBN

© Колектив авторів, 2012

З М І С Т

Передмова	8
Розділ 1 Елементи векторного та тензорного аналізу	11
1.1 Скалярне поле. Похідна за напрямом. Градієнт	11
1.2 Векторне поле. Потік векторного поля. Дивергенція	16
1.3 Теорема Гаусса-Остроградського	23
1.4 Циркуляція векторного поля. Ротор	25
1.5 Теорема Стокса	29
1.6 Диференціальні операції над скалярними та векторними полями	30
1.7 Основні уявлення про тензор	34
1.8 Тензорна алгебра та властивості тензорів	41
1.9 Основи тензорного аналізу	46
Контрольні питання та завдання	50
Розділ 2 Основи теорії теплоперенесення в різних середовищах	51
2.1 Види передачі тепла. Теплопровідність твердих тіл, рідин та газів	51
2.2 Основні поняття та визначення теорії теплопровідності	54
2.3 Диференціальне рівняння теплопровідності для нерухомих тіл ...	59
2.4 Диференціальне рівняння теплопровідності з рухомим джерелом теплової дії	64
2.5 Диференціальне рівняння теплопровідності в деформованому твердому тілі	66
2.6 Диференціальне рівняння теплопровідності для анізотропних твердих тіл	76
2.7 Постановка крайових задач теорії теплопровідності	83
2.7.1 Граничні умови I - IV родів	84
2.7.2 Класифікація крайових задач та методів їх розв'язку	87

Контрольні питання та завдання	91
Розділ 3 Основи конвекційного теплообміну	93
3.1 Основні поняття та визначення	93
3.2 Рівняння конвекційного перенесення	96
3.3 Основи теплообміну при обтіканні газовим потоком поверхні твердого тіла	110
3.4 Зв'язані задачі конвекційного теплообміну між газовим потоком та стінкою	126
3.5 Теплообмін при перебігу газів з великими швидкостями	134
Контрольні питання та завдання	141
Розділ 4 Розв'язок задач теплопровідності методами інтегральних перетворень Фур'є, методом розділення змінних та методом розкладу за власними функціями	142
4.1 Розв'язок одновимірних задач теплопровідності для необмежених та напівобмежених тіл методами інтегральних перетворень Фур'є	142
4.1.1 Розв'язок задач теплопровідності для необмежених тіл	142
4.1.2 Розв'язок задач теплопровідності для напівобмежених тіл	151
4.2 Розв'язок одновимірних задач теплопровідності для обмежених тіл методом розділення змінних	160
4.2.1 Загальні принципи методу розділення змінних	160
4.2.2 Перетворення неоднорідних граничних умов до однорідних при використанні методу розділення змінних	165
4.2.3 Розв'язок складних задач теплопровідності методом розділення змінних	170
4.3 Розв'язок неоднорідних задач теплопровідності методом розкладання за власними функціями	175
4.3.1 Побудова розв'язку методом розкладання за власними	

функціями	176
4.4 Розв'язок двох- та трьохвимірних задач теплопровідності методами інтегральних перетворень Фур'є та розділення змінних	181
4.4.1 Розв'язок двохвимірних задач теплопровідності	181
4.4.2 Розв'язок трьохвимірних задач теплопровідності	196
Контрольні питання та завдання	205
Розділ 5 Сутність методу теплового впливу низькоенергетичного стрічкового електронного потоку на оптичні матеріали	207
5.1 Нормативні вимоги до якості оптичних виробів	207
5.2 Особливості термічного впливу потоку електронів на поверхню неорганічного оптичного діелектрика	217
5.3 Електротехнічне обладнання для поверхневої електронної обробки виробів із оптичних матеріалів	218
5.3.1 Технологічне оснащення обладнання	222
5.3.2 Високовольтні джерела живлення	230
5.3.3 Електровимірювальна техніка для контролю параметрів якості поверхонь оптичних матеріалів при електронній обробці	231
5.3.4 Електротехнічні схеми автоматичного керування технологічним процесом обробки	235
Контрольні питання та завдання	261
Розділ 6 Методи розрахунків теплової дії стрічкових електронних потоків на поверхні виробів з оптичних матеріалів	263
6.1 Загальні принципи моделювання процесів дії концентрованих потоків енергії на матеріали	264
6.2 Математичне моделювання процесу нагрівання елементів із	

оптичних матеріалів різної геометричної форми та розмірів	267
6.2.1 Математична модель процесу нагрівання тонкоплівкового елемента	270
6.2.2 Математична модель процесу нагрівання тонкої пластини великих розмірів	275
6.2.3 Математична модель процесу нагрівання прямокутного бруска великої товщини	278
6.2.4 Математична модель процесу нагрівання прямокутного бруска малої товщини	280
6.2.5 Математична модель процесу нагрівання прямокутного елемента великої товщини	283
6.2.6 Математична модель процесу нагрівання прямокутного елемента малої товщини	286
6.2.7 Розрахунки впливу параметрів стрічкового електронного потоку на температурні поля в елементах із оптичного скла та кераміки, вибір граничних режимів нагрівання, зіставлення їх з експериментальними даними	288
6.3 Математичне моделювання термопружних напружень в оптичних елементах	293
6.3.1 Математична модель термопружних напружень в оптичних пластинках	294
6.3.2 Розрахунки впливу параметрів стрічкового електронного потоку на розподіл термопружних напружень в елементах із оптичної кераміки, вибір граничних режимів поверхневого термічного зміцнення, зіставлення їх з експериментальними даними	298
6.4 Математичне моделювання процесу поверхневого оплавлення оптичних пластин та прямокутних елементів із оптичного скла .	301

6.4.1	Математична модель процесу оплавлення оптичних пластин	302
6.4.2	Математична модель процесу оплавлення оптичних прямокутних елементів	310
6.4.3	Розрахунки впливу параметрів стрічкового електронного потoku на швидкість та глибину оплавлення елементів із оптичного скла, вибір граничних режимів поверхневого оплавлення, зіставлення їх з експериментальними даними	315
	Контрольні питання та завдання	321
Розділ 7	Методи розрахунків нагрівання поверхні виробів з оптичних матеріалів при їхньому надзвуковому обдуванні потоком повітря	323
7.1	Термогазодинамічні процеси на поверхні пластини при її надзвуковому обдуванні потоком повітря	324
7.2	Процеси нагрівання пластини при заданому зовнішньому тепловому потоці з граничного шару	329
7.3	Розрахунки термopужних напружень та визначення критичних умов екстремальних термічних дій на поверхню пластини	336
7.4	Термогазодинамічні процеси на поверхні напівсферичного обтічника при його надзвуковому обдуванні потоком повітря	340
7.5	Математичне моделювання нагрівання напівсферичного обтічника при заданому зовнішньому тепловому потоці з граничного шару	343
7.6	Розрахунок термopужних напружень та визначення критичних умов екстремальних термічних дій на поверхню обтічника	348
	Контрольні питання та завдання	351
	Глосарій	353
	Список літератури	359

Додатки	371
----------------------	------------

ПЕРЕДМОВА

Основу сучасних високоефективних процесів обробки оптичних матеріалів складають високотемпературні технологічні процеси (ВТП), які реалізуються в основному при використанні концентрованих потоків енергії (КПЕ), до яких відносяться сфокусовані в області малих розмірів потоки заряджених часток (електронів, іонів), лазерне випромінювання (імпульсно-періодичне та безперервне) з різною довжиною хвилі, імпульсні та безперервні потоки низькотемпературної плазми, радіаційні теплові потоки, високотемпературні понадзвукові газові потоки, хвилі горіння тощо. Важливість ВТП зумовлена їхнім напрямком на створення оптичних виробів нової техніки (космічна техніка, літальні апарати, інтегральна оптика тощо), що в ряді випадків дозволяє здійснити якісний крок в розвитку відповідної галузі техніки чи намітити рішення важливих практичних задач, вирішувати які іншими методами важко чи взагалі неможливо.

Фізичні та фізико-хімічні процеси, які протікають в зонах дії КПЕ, досить складні, взаємопов'язані та взаємозумовлені, що ускладнює інтерпретацію природних експериментів, їх теоретичне тлумачення і, відповідно, покращення технологічних параметрів та їхньої керованості [26, 29, 114]. Саме тому процеси взаємодії КПЕ з оптичними матеріалами на теперішній час є маловивченими. В зв'язку з цим важливо мати методологію підходу до наукового вивчення процесів взаємодії КПЕ з такими матеріалами, оскільки, наприклад, детальне експериментальне вивчення усіх складових процесів представляє досить трудомісткий та дорогий процес, а в деяких випадках і принципово неможливий. Тому основними методами дослідження таких процесів є методи математичного моделювання, які базуються на спрощених фізичних моделях процесів взаємодії КПЕ з матеріалами та частковою перевіркою адекватності цих моделей експериментальним даним (наприклад, вимірювання температури елементів, які оброблюються, глибини та структури зони дії чи товщини проплавленого шару,

отримання мікроснімків процесів взаємодії та інше). При цьому, як показує більшість експериментальних досліджень, основу ВТП, так званий «фон», складають процеси перенесення тепла, які ускладнюються іншими фізичними процесами: термічним зміцненням, плавленням, випаровуванням, випромінюванням тощо.

Тому, в навчальному посібнику, в першій його частині (розділи 1-4) послідовно та лаконічно викладаються теоретичні основи теплоперенесення в оптично-прозорих тілах різної геометричної форми та розмірів: елементи векторного та тензорного аналізу, види передачі тепла та отримання рівнянь теплопровідності в різних середовищах з нерухомими та рухомими джерелами теплової дії, постановка крайових задач теплоперенесення, аналітичні та чисельні методи їхнього розв'язку; при цьому, при виборі задач особлива увага приділяється на процеси теплоперенесення, що складають основу фізико-технічних методів обробки матеріалів.

В другій його частині (розділи 5-7) розглядаються питання застосування викладених вище методів теорії теплоперенесення для розрахунку процесів електронної обробки оптичних матеріалів та експлуатації виробів на їхній основі: описується сутність процесів термічної дії потоку електронів на оптичні матеріали, а також основи розробленого авторами сучасного електротехнічного обладнання для поверхневої мікрообробки виробів із різних оптичних матеріалів (технологічне оснащення, високовольтні джерела живлення та електротехнічні схеми управління усім процесом обробки); приводяться моделі та розрахунки теплофізичних процесів в зонах дії стрічкових електронних потоків на оптичні матеріали, а також процесів нагрівання поверхні виробів на основі цих матеріалів в умовах їхньої експлуатації (надзвуковому обдуванні потоком повітря). За вказаними напрямками вперше в Україні під керівництвом доктора технічних наук, професора В. А. Ващенка (Черкаський державний технологічний університет) був створений (1985 – 2010 роки) та успішно розвивається новий науковий напрямок з електронно-променевої мікрообробки оптичних матеріалів стрічковими електронними потоками, який

знайшов широке застосування в мікрооптиці, інтегральній та волоконній оптиці, ІЧ-техніці на вітчизняних та закордонних підприємствах, які спеціалізуються в галузі оптичного приладобудування (ВО «завод Арсенал» та ЦКБ «Арсенал» (м.Київ), Науково-дослідний інженерно-впроваджувальний центр пріоритетних технологій оптичної техніки (м.Київ), НВК «Фотоприлад», НВК «Аскенн» та НДІ «Аккорд» (м.Черкаси), Черкаський приладобудівний завод, Черкаський завод телеграфної апаратури та Черкаський державний завод «Хімреактив», а також ДУП МосНВО «Радон» (м.Москва, Росія), ТДВ «Микротестмашины» (м.Гомель, Білорусь), Micro-Optics Laser Systems (LIMO) (м.Дортмунд, Німеччина) та інші).

ГЛОСАРІЙ

Атомно-силова мікроскопія – (від латин. *мікрос* — дрібний, маленький та *скопос* — бачу) — вивчення об'єктів з використанням атомно-силового мікроскопу, тобто скануючого зондового мікроскопу високої роздільної здатності, принцип дії якого оснований на взаємодії зонду кантилевера з поверхнею досліджуваного зразка.

Вектор – елемент лінійного простору, який позначає напрям зміни певних параметрів.

Векторна лінія – (див. Лінія струму, Силова лінія) крива, в кожній точці якої дотична має напрям вектора $\vec{A}(x, y, z)$ поля.

Векторне поле – (див. Поле величин, Скалярне поле) частина простору, в кожній точці M якого відповідно до певного закону заданий деякий вектор $\vec{A}(M)$.

Відхилення від площинності (неплощинність) – δn , найбільша відстань від точок реального профілю (або реальної поверхні) до прилеглої прямої або площини.

Високотемпературні технологічні процеси (ВТП) - послідовність технологічних операцій із застосуванням КПЕ, необхідних для виконання певного виду робіт. ВТП складаються з технологічних (робочих) операцій, які, у свою чергу, складаються з робочих рухів (прийомів).

Геометричні умови – умови однозначності, які задають форму і розміри тіла, в якому протікає процес.

Градiєнт – (від латин. “*gradiens*” – той, що крокує) вектор-функція $\varphi(x, y, z)$:

$$\vec{\text{grad}} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right), \text{ в якій } \vec{i}, \vec{j}, \vec{k} - \text{одиничні вектори}$$

декартових осей.

Девіатор напружень - δ неізотропна частина тензору напружень, що містить дотичні і деякі діагональні члени, в сумі рівні нулю.

Дивергенція (векторного поля $\vec{A}(x, y, z)$) – границя відношення потоку векторного поля по замкнутій поверхні до об'єму всередині цієї поверхні, якщо ця поверхня і об'єм стягуються в точку: $\text{div } \vec{A} = \frac{\partial}{\partial x} A_x + \frac{\partial}{\partial y} A_y + \frac{\partial}{\partial z} A_z$.

Динамічний пограничний шар - тонкий шар газу близько поверхні, в якому швидкість газу змінюється від нуля до швидкості незбуреного потоку U_0 (далеко від поверхні тіла).

Еквіпотенціальна поверхня – поверхні рівня потенціалу $u(M)$.

Електронно-променева гармата – клас електровакуумних електронних пристроїв, які схематично відносяться до тріодних пристроїв і призначені для формування сфокусованих параксіальних потоків електронів, та керування їхньою інтенсивністю та положенням у просторі.

Електронно-променева обробка – сукупність технологічних процесів електронної обробки різноманітних матеріалів сфокусованим параксіальним потоком електронів, який формується у вакуумі за допомогою спеціальних пристроїв – електронно-променевих гармат: зварювання, паяння, термообробка металу (гартування, відпалювання тощо); напилювання різноманітних матеріалів та їхніх з'єднань на поверхню зразка з отриманням покриттів з металевих та неметалевих матеріалів; скрайбування, полірування оптичних матеріалів, тощо.

Коефіцієнт тепловіддачі - α [Вт/(м²·К)], чисельно дорівнює кількості теплоти, що віддається (отримується) одиницею площі поверхні тіла в одиницю часу при різниці температур між поверхнею і середовищем в один градус і характеризує інтенсивність теплової взаємодії середовища з поверхнею тіла.

Конвекційна тепловіддача - конвекційний теплообмін між поверхнею твердого тіла та рідиною.

Конвекція (конвекційний теплообмін) - перенесення теплоти при переміщенні об'ємів рідини або газу в просторі.

Концентровані потоки енергії (КПЕ) - сфокусовані в області малих розмірів потоки заряджених часток (електронів, іонів), лазерне випромінювання (імпульсно-періодичне та безперервне) з різною довжиною хвилі, імпульсні та безперервні потоки низькотемпературної плазми, радіаційні теплові потоки, високотемпературні понадзвукові газові потоки, хвилі горіння тощо, які використовуються в цілях проведення технологічних операцій зварювання, термічної обробки, розмірної обробки, полірування, напилювання, наплавлення тощо.

Крайові умови - сукупність початкових (полягають в завданні розподілу температури в тілі в початковий момент часу і необхідні лише при розгляді нестационарних задач) і граничних (задаються розподілом температури по поверхні S тіла у будь-який момент часу:

$$T(x, y, z, t) \Big|_S = \varphi(x, y, z, t) = T_s, \quad x, y, z \in S) \text{ умов.}$$

Криволінійний інтеграл – границя суми скалярних добутків векторного поля на елементарні переміщення вздовж шляху інтегрування, коли довжина кожного переміщення прагне до нуля, а кількість переміщень прагне до нескінченності:

$$\int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{A}(\vec{r}) d\vec{r} = \int_{r_1}^{r_2} A_r dr = \lim_{N \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N \vec{A}(\vec{r}_n) \Delta \vec{r}_n.$$

Лінія струму - (див. Векторна лінія, Силова лінія) векторна лінія поля швидкостей.

Математична модель процесу - сукупність диференціального рівняння теплопровідності та умов однозначності (початкові та граничні умови, фізичні характеристики матеріалу, геометричні розміри тіла), що описують цей процес.

Метод розділення змінних - один з фундаментальних аналітичних методів розв'язання різних задач теплопровідності для обмежених тіл (пластини кінцевої товщини, тонкі стрижні тощо), який полягає у пошуку розв'язків вигляду: $T(x,t)=M(x)N(t)$, де $M(x)$ – функція, яка залежить лише від змінної x , а $N(t)$ - функція залежна тільки від t .

Нестаціонарне температурне поле – (див. Поле) поле, температура якого змінюється і в просторі і з часом. В цьому випадку кажуть, що температура є функція простору і часу: $T=f(x, y, z, t)$.

Оператор - дія (готовність впливати на той вираз, що стоїть праворуч від оператора). Символ $\frac{\partial}{\partial x}$ називається оператором часткової похідної по x . Під

дією цього оператора на функцію $\varphi = \varphi(x, y, z)$ розуміють часткову похідну $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$,

$$\text{тобто } \frac{\partial}{\partial x} \cdot \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x}.$$

Поле величин – (див. Векторне поле, Скалярне поле) сукупність миттєвих значень фізичної величини в усіх точках даної області простору.

Потенціал (векторного поля $\vec{A}(x, y, z)$) – така функція u для якої $\vec{A} = -\overline{\text{grad}} u$.

Потік поля - поверхневий інтеграл по поверхні S від скалярного добутку $\vec{A} \cdot \vec{n}$, де \vec{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні S .

Похідна (по напрямку) – швидкість зміни функції вздовж цього напрямку.

Реологічне рівняння (закон) - рівняння, що встановлює зв'язок між компонентами тензорів напружень, деформацій та швидкостей деформацій.

Ротор векторного поля – (від латин. «rotate» – обертати, «roto» – обертаюся) вектор, проекція якого на довільний напрям \vec{n} дорівнює границі відношення циркуляції поля по замкнутому контуру, який лежить в площині, яка перпендикулярна до

\vec{n} , до площі, яка обмежена цим контуром, якщо контур (і площа) стягується в точку:

$$\left(\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}(\vec{r})\right)_n = \lim_{\substack{L \rightarrow 0 \\ \Delta S_L \rightarrow 0}} \frac{\oint A_t dl}{\Delta S_L}.$$

Силова лінія – (див. Векторна лінія, Лінія струму) векторна лінія поля тяжіння, електричного та/або магнітного полів.

Символ Кронекера - скалярний добуток ортів за умов, що система координат

$$\text{ортогональна: } \vec{l}_i \cdot \vec{l}_k = \delta_{ik} = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}.$$

Скаляр – це величина, яка повністю визначається в будь-якій системі координат одним числом (або функцією), яке в свою чергу не змінюється при зміні просторової системи координат.

Скалярне поле – (див. Поле, Векторне поле) частина простору, кожній точці M якого ставиться у відповідність деяке число $\varphi(M)$.

Соленоїдність поля – представлення векторного поля $\vec{A}(M)$ у вигляді ротору деякого векторного поля $\vec{B}(M)$, тобто $\vec{A} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{B}$.

Стаціонарне температурне поле – (див. Поле) поле, температура якого в будь-якій його точці не змінюється з часом, тобто є функцією тільки координат: $T = f_l(x,$

$$y, z), \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

Стрічковий електронний потік (СЕП) – спрямований потік електронів, сформований у вигляді стрічки електронно-оптичною системою електронно-променевої гармати. СЕП відхиляється магнітним та електричним полем, які використовуються для його керування.

Тензор – величина, яка перетворюється за законом $\hat{P}' = \hat{\alpha} \cdot \hat{P} \cdot \hat{\alpha}^T$,

$$P'_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{n=1}^3 \alpha_{ik} \cdot \alpha_{jn} \cdot P_{kn} = \sum_k \sum_n \alpha_{ik} \cdot P_{kn} \cdot \alpha_{nj}^T.$$

Тензорний аналіз - узагальнення векторного аналізу, розділ тензорного числення, що вивчає диференціальні оператори, які діють на алгебраїчні тензорні поля $D(M)$, що диференціюються.

Теплове випромінювання - процес розповсюдження теплоти електромагнітними хвилями.

Теплоперенесення – фізичний процес передачі теплової енергії від більш гарячого тіла до холодного або безпосередньо (при контакті), або через розділяючу (тіла або середовища) перегородку з якого-небудь матеріалу.

Теплопровідність - молекулярне перенесення теплоти в тілах (або в середовищі між ними), обумовлене неоднорідністю розподілу температури в просторі.

Тепловий потік - (див. Потік поля) кількість теплоти dQ_t , що проходить в одиницю часу dt через одиницю площі ізотермічної поверхні dS , за умов, що напрям у будь-якій точці ізотропного тіла протилежний напрямку градієнта температури:

$$q = |\vec{q}| = \frac{d^2 Q_t}{dt \cdot dS} = \frac{dQ}{dS}.$$

Термічні напруження (термонапруження) - міра внутрішніх сил, які виникають в деформованому тілі під впливом зовнішніх термічних дій (високих температурних градієнтів, теплових ударів тощо).

Трек – сума скалярів, утворена операцією згортки або спрощення, коли повторюють пару індексів (вільні індекси стають німими).

Фізичні умови – умови однозначності, які задають теплофізичні параметри середовища: ρ - щільність, λ - теплопровідність, C_V - об'ємну теплоємність, q_V - об'ємну щільність теплового потоку.

Циркуляція (векторного поля по контуру) - потік ротору цього поля через довільну

поверхню, яка спирається на даний контур: $\oint_L A_t dl = \iint_{\Sigma_L} (\overline{\text{rot } \vec{A}})_n dS$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Kovalenko V. Laser 3D Objects prototyping using their flat images / V. Kovalenko, M. Anyakin , V. Anyakin // Proceeding of International Conference LTWMP-2003, PWI NASU, Kiev, 2003. – p. 183–187.*
2. *Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Абрамович Г. Н. – М.: Наука, 1969. – 824 с.*
3. *Акивис М. А. Тензорное исчисление / М. А. Акивис, В. В. Гольдберг. – М.: Наука, 1969. – 236 с.*
4. *Алексеев В. М. Оптимальное управление / В. М. Алексеев, В. М. Тихомиров, С. В. Фомин. – М.: Наука, 1979. – 286 с.*
5. *Алексеев В. М. Сборник задач по оптимизации. Теория. Примеры. Задачи / В.М.Алексеев, В.М. Галлеев, В.М. Тихомиров. – М.:Наука, 1984. –288с.*
6. *Асцатуров В. Н. Решение нелинейного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах методом переменных направлений / В.Н. Асатуров, А. А. Коновалов // Сборник трудов Всесоюзного НИИ “Теплопроект”. – 1975. – вып. 38. – с. 48–57.*
7. *Багмутов В. П. Исследование тепловых процессов при воздействии на материалы концентрированных источников энергии / В.П.Багмутов, И.Н. Захаров // Физика и химия обработки материалов, 2002. – № 3. – С. 9–17.*
8. *Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс / Банди Б. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.*
9. *Батунер Л. М. Математические методы в химической технике / Л. М. Батунер, М. Е. Позин. – М.: Химия, 1971. – 824 с.*
10. *Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобелько. – М.: Наука, 1987. – 598 с.*
11. *Беляев Н. М. Методы теории теплопроводности / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – М.: Высшая школа, 1982. – 328 с.*

12. Берлин Н. С. Моделирование нестационарных температурных полей с подвижными источниками энергии / Н. С. Берлин // В кн.: Проблемы управления в технике, экономике и биологии. – М.: Наука, 1976. – С.28–36.
13. Берлин Н. С. Расчет температурных полей при электронно-лучевом нагреве Н. С. Берлин, Э. М. Волин, И. А. Кононов // Технология легких сплавов, 1976. – № 11. – С. 49–54.
14. Бицадзе А. В. Сборник задач по уравнения математической физики / А.В.Бицадзе, Д. Ф. Калиниченко – М.: Наука, 1985. – 312 с.
15. Боли Б. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Дж. Уэйнер. – М.: Мир, 1964. – 517 с.
16. Борисов Н. А. Полировка кремниевых пластин электронным лучом / Н. А. Борисов, Г. В. Дудко // Электронная обработка материалов. – 1969. – № 5. – с. 6–8.
17. Бородин А. И. Гиперзвуковой пространственный вязкий ударный слой на затупленных телах, обтекаемых под углами атаки и скольжения / А. И. Бородин, С. В. Пейги // Теплофизика высоких температур, 1988. – т. 26. – № 4. – с. 51–54.
18. Бугров Я. С. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного / Я. С. Бугров, С. М. Никольский. – М.: Наука, 1989. – 464 с.
19. Будаков Б. М. Сборник задач по математической физике / Б. М. Будаков, А. А. Самарский, А. Н. Тихонов. – М.: Гостехиздат, 1956. – 683 с.
20. Бункин Р. В. Особенности воспламенения металлов в воздухе под действием непрерывного лазерного излучения / Р. В. Бункин, Н. А. Кириченко, В. С. Лукьянчук // Квантовая электроника. – 1986. – т. 13. – № 6. – с. 1227–1234.
21. Бутковский А. Г. Характеристики систем с распределенными параметрами / Бутковский А. Г. – К.: Наука, 1979. – 224 с.
22. Ван дер Темпел Л. Теплопроводность стекла. II. Эмпирическая модель / Л. Ван дер Темпел // Физика и химия стекла, 2002. – т. 28. – С.213–220.

23. *Ван дер Темпел, Л.* Конструктивная теплопроводность стекла. I. Измерение с помощью контакта стекло – металл / Л. Ван дер Темпел, Мелис Г. П., Брандсма Т. С. // Физика и химия стекла, 2000. – т. 26. – № 6. – с. 877–886.
24. *Ван-Драйст* Проблема аэродинамического нагрева / Ван-Драйст // Вопросы ракетной техники, 1957. – 5 (41). – с. 36–65.
25. *Ващенко В. А.* Математическое моделирование взаимодействия электронного луча с оптическими материалами / В. А. Ващенко, Д. М. Краснов, Н. И. Кривенко // Материалы Международной конференции “Новые компьютерные технологии в промышленности, энергетике, банковской сфере, образовании”. – Киев: НТУУ “КПИ”, 1998. – с. 17–18.
26. *Ващенко В. А.* Математическое моделирование и расчет оптимальных режимов эксплуатации изделий из оптических материалов в условиях сверхзвукового обдува потоком воздуха / Ващенко В. А. // Гидроаэромеханика в инженерной практике: Сборник трудов II Республиканской научно-технической конференции. – Киев, НТУУ “КПИ”, 1997. – с. 94–95.
27. *Ващенко В. А.* Математическое моделирование электронно-лучевой технологии / В. А. Ващенко, Н. И. Кривенко // Новые компьютерные технологии САПР и АСУ в промышленности, энергетике и строительстве: Материалы международной конференции, 16 – 18 сентября 1997 г., Алушта – Киев: НТУУ “КПИ”, 1997. – с. 37 – 38.
28. *Ващенко В. А.* Методика использования математических моделей для расчета теплового воздействия электронного луча на оптические материалы / В. А. Ващенко, Г. В. Канашевич, И. В. Дробот // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України. – Київ, 2001. – вип.. 11. – с. 99–108.

29. *Ващенко В. А.* Наукові основи керування якістю виробів із спеціальних оптичних матеріалів: автореферат дисер. на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук / Ващенко В.А., К.:НТУУ “КПІ”, 1996. – 32 с.
30. *Ващенко В. А.* Оптимизация влияния параметров электронно-лучевой установки на процессы обработки оптических материалов / В. А. Ващенко, Д. М. Краснов // Материалы международной конференции “Высокоэффективные технологии в машиностроении”. – Киев: НТУУ “КПИ”, 1998. – с. 11 – 12.
31. *Ващенко В. А.* Расчет нагрева металлической оболочки изделия при встречном обдуве потоком воздуха и вращении / В. А. Ващенко, Д.М. Краснов, П. И. Заика // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: Праці II Української науково-технічної конференції. – Київ: НТУУ “КПІ”, 1998. – с. 228 – 231.
32. *Ващенко В. А.* Теоретические основы теплотехники. Курс лекций / Ващенко В. А. – Черкассы: ЧДТУ, 2003. – 80 с.
33. *Ващенко В.А.* Управление качественными характеристиками электронно-лучевой обработки оптических материалов / В. А. Ващенко, Д. М. Краснов // Высокоэффективные технологии в машиностроении: Материалы международной конференции, 28 – 30 октября 1998 г. – Киев: НТУУ “КПИ”, 1998. – с. 12 – 13.
34. *Виленкин С. Я.* Статистическая обработка результатов исследования случайных величин / Виленкин С. Я. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
35. *Виленский В. Д.* Нестационарный конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел / Виленский В. Д. // Теплофизика высоких температур, 1974. – № 5. – с. 1091 – 1101.
36. *Вичак В.С.* Управление температурными напряжениями и перемещениями / Вичак В. С. – К.: Наукова думка, 1988. – 312 с.
37. *Вольман В. И.* Многофункциональные элементы интегральной оптики / В. И. Вольман, Н. Д. Козырев // Радиотехника, 1984. – № 8. – с. 36 – 39.

38. *Воробьева Л.С.* Математическое моделирование нестационарного процесса теплопроводности / Л. С. Воробьева, Г. Н. Жевлахов // Инженерно-физический журнал. – 1980. – т. 39. – № 4. – с. 745–747.
39. *Галкин А. Г.* Гидродинамическая модель изменения формы поверхности при обработке вращающегося цилиндра электронным пучком / А. Г. Галкин, И. В. Зуев, В. В. Савватеев // Физика и химия обработки материалов, 1998. – № 1. – С. 15–21.
40. *Гинзбург И. П.* Аэрогазодинамика / Гинзбург И. П. – М.: Высшая школа, 1966. – 404 с.
41. *Головко Л. Ф.* Технологічні основи керування якістю поверхневого шару при лазерній зміцнюючій обробці матеріалів: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук / Л. Ф. Головко; КПІ. – К., 1994. – 32 с.
42. *Григорьянц А. Г.* Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.
43. *Григорьянц А. Г.* Лазерная обработка неметаллических материалов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов – М.: Высшая школа, 1988. – 191 с.
44. *Гришин А. М.* Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред / А. М. Гришин, В. М. Фомин. – Новосибирск: Наука, 1984. – 316 с.
45. *Гудьер Дж. Н.* Математическая теория упругости / Гудьер Дж. Н. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 190 с.
46. *Гусак А. М.* Основы векторного і тензорного аналізу / А. М. Гусак, Шірінян А. С. – Черкаси: ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2004. – 129 с.
47. *Дахия Р. С.* Двумерные преобразования Лапласа: теоремы и приложения / Р. С. Дахия, М. Эгвурубэ // Украинский математический журнал. – 1987. – т. 39. – № 3. – с. 374–379.
48. *Движение ракет* / [Дмитриевский А. А., Казаковцев В. П., Устинов В. Ф. и др.]. – М.: Военное издательство, 1968. – 464 с.

49. *Действие* излучения большой мощности на металлы / [С. И. Анисимов, Я. А. Исмас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко]. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
50. *Зажигаев Л. С.* Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л. С. Зажигаев, А. А. Китьян, Ю. И. Романиков – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
51. *Зарубин В. С.* Инженерные методы решения задач теплопроводности / Зарубин В. С. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.
52. *Зарубин В. С.* Прикладные задачи термopочности элементов конструкций / Зарубин В. С. – М.: Машиностроение, 1985. – 296 с.
53. *Зельдович Я. Б.* Элементы прикладной математики / Я. Б. Зельдович, А. Д. Мышкис. – М.: Наука, 1972. – 592 с.
54. *Иванова Т. П.* Вычислительная математика и программирование / Т. П. Иванова, Г. В. Пухова . – М.: Просвещение, 1978. – 319 с.
55. *Израилов Ю. Л.* Конечно-разностный метод решения трехмерной задачи нестационарной теплопроводности / Ю. Л. Израилов // В кн.: “Численные методы решения задач термopочности в энергетике”. – М.: Наука, 1981. – с. 3–18.
56. *Израилов Ю. Л.* Метод и алгоритм решения трехмерной задачи нестационарной теплопроводности в телах произвольной формы / Ю. Л. Израилов, А. Л. Лубны-Герцик // Изв. АН СССР. Серия “Энергетика и транспорт”. – 1976. – № 5. – с. 118–121.
57. *Иницирование* воспламенения металлов в окислительной атмосфере лазерным нагревом / [Д. Т. Алимов, И. В. Едвабный, Б. С. Лукьянчук] // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – № 4. – с. 8–12.
58. *Калиткин Н. Н.* Численные методы / Калиткин Н. Н. – М.: Физматгиз, 1978. – 512 с.

59. *Канашевич Г. В.* Електронно-променева обробка поверхні плат оптичних інтегральних схем: автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук / Канашевич Г.В.; К.:НТУУ “КПІ”, 1997. –19 с.
60. *Карташов Э. М.* Аналитические методы в теплопроводности твердых тел / Карташов Э. М. – М.: Высшая школа, 1985. – 324 с.
61. *Коваленко А. Д.* Основы термоупругости / Коваленко А. Д. – К.: Наукова думка, 1970. – 307 с.
62. *Коздоба Л. А.* Вычислительная теплофизика. АН Украины. Институт технической теплофизики / Коздоба Л. А. – К.: Наукова думка, серия “Наука и технический прогресс”, 1992. – 221 с.
63. *Коздоба Л. А.* Решения нелинейных задач теплопроводности / Коздоба Л. А. – Киев.: Наукова думка, 1976. – 305 с.
64. *Корн Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.
65. *Кошляков Н. С.* Дифференциальные уравнения математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 1962. – 767 с.
66. *Краскевич В. Е.* Численные методы в инженерных исследованиях / В. Е. Краскевич, К. Х. Зеленский, В.И.Гречко. – К.: Вища школа, 1986. – 263 с.
67. *Краснов М. Л.* Вариационное исчисление / М. Л. Краснов, Г. Н. Макаренко, А. И. Киселев. – М.: Наука, 1973. – 191 с.
68. *Краснов М. Л.* Обыкновенные дифференциальные уравнения / Краснов М. Л. – М.: Высшая школа, 1983. – 128 с.
69. *Кудрявцев Л. Д.* Математический анализ. Т. 1 / Кудрявцев Л. Д. – М.: Высшая школа, 1973. – 614 с.
70. *Лазарев Л. П.* Инфракрасные приборы самонаведения летательных аппаратов / Лазарев Л. П; . – М.: Машиностроение, 1970. – 232 с.

71. *Лазерное* электроэрозионное упрочнение материалов / [Коваленко В.С., Верхотуров А. Д., Головкин Л. Ф.] – М.: Наука, 1986. – 242 с.
72. *Ландау Л. Д.* Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1973. – 504 с.
73. *Линейное* и нелинейное программирование / [Ляшенко И. Н., Карадогова Е. А., Чернякова Н. В. и др.] – К.: Вища школа, 1975. – 372 с.
74. *Литовский Е. Я.* Теплофизические свойства огнеупоров / Е. Я. Литовский, Н. А. Пучкелевич. – М.: Metallurgy, 1982. – 162 с.
75. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа / Лойцянский Л. Г. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
76. *Лох У.* Динамика и термодинамика спуска в атмосфере планет / Лох У. – М.: Мир, 1966. – 356 с.
77. *Лубны-Герцик А. Л.* Алгоритмы, программы решения задачи теплопроводности для тел сложной формы. Численные методы решения задач термопрочности в энергетике / Лубны-Герцик А. Л. – М.: Наука, 1981. – с. 18–33.
78. *Лыков А. В.* Сопряженные задачи конвективного теплообмена / Лыков А. В., Алексахенко А. А., Алексахенко В. А. – Минск: Издательство ИТМО, 1971. – 192 с.
79. *Лыков А. В.* Теория тепло- и массообмена / Лыков А. В. – М.: Госэнер-гоиздат, 1963. – 536 с.
80. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности / Лыков А. В. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
81. *Лыков А. В.* Теплообмен. Справочник / Лыков А. В. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
82. *Маделунг Э.* Математический аппарат физики. Справочное пособие / Маделунг Э. – М.: Наука, 1968. – 618 с.
83. *Мажукин В. И.* Кинетика поверхностного испарения металла лазерным излучением / В. И. Мажукин // В кн.: “Воздействие концентрированных потоков энергии на металлы”. – М.: Наука. – 1985. – с. 182 – 184.

84. *Мартыненко В. С.* Операционное исчисление / Мартыненко В. С. – К.: Вища школа, 1990. – 359 с.
85. *Марченко В.М.* Температурные поля и напряжения в конструкции летательных аппаратов / Марченко В.М. – М.:Машиностроение, 1965. –256 с.
86. *Марчук Г. И.* Методы вычислительной математики / Марчук Г. И. – М.: Наука, 1977. – 456 с.
87. *Махин В. В.* Аэрогазодинамика и нестационарный тепломассообмен / Махин В. В. – К.: Наукова думка, 1983. – 234 с.
88. *Мейманов А. М.* Задача Стефана / Мейманов А. М. – Новосибирск.: Наука, 1986. – 240 с.
89. *Мелесев Н. Н.* Методы оптимизации / Н. Н. Мелесев, Ю. П. Иванилов, Е. М. Столярова. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
90. *Методы* решения сопряженных задач теплообмена / [Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, В. В. Костюк и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 232 с.
91. *Милленд Дж.* Основы оптоэлектроники и волоконной оптики / Дж. Милленд. – М.: Машиностроение. – 1989. – 264 с.
92. *Михлин С. Г.* Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений / С.Г. Михлин , Х.П. Смолицкий . – М.: Наука, 1965. – 383 с.
93. *Молчанов И. Н.* Машинные методы решения прикладных задач. Дифференциальные уравнения / Молчанов И. Н. – К.: Наукова думка, 1988. – 344 с.
94. *На Ц.* Вычислительные методы решения прикладных граничных задач / На Ц. – М.: Мир, 1982. – 296 с.
95. *Нестационарные* тепловые процессы в энергетических установках летательных аппаратов / [Коваленко Н. Д., Шмукин А. А., Гужва М. И. и др.]. – К.: Наукова думка, 1988. – 234 с.

96. *Обтекание* затупленных тел сверхзвуковым потоком газа / Под ред. О. М. Белоцерковского. – М.:ВЦ АН СССР, 1966. – 400 с.
97. *Оптические* приборы в машиностроении. Справочник / [М. И. Апенко, И. П. Араев, В.А.Афанасьев и др.]. – М.: Машиностроение, 1974. – 238 с.
98. *Остославский И. В.* Динамика полета. Траектории летательных аппаратов / И. В. Остославский, И. В. Стражева. – М.: Машиностроение, 1969. – 499 с.
99. *Пасконов В. М.* Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. М. Полежаев, Л. А. Чудов. – М.: Наука, 1984. – 286 с.
100. *Прикладная* оптика / [Бибчук Л. Г., Богачев Ю. В., Заказнов Н. П. и др.] – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
101. *Растрюгин Л А.* Случайный поиск. – М.: Знание, 1979. – 64 с.
102. *Резников А. Н.* Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
103. *Романовский П. И.* Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа / Романовский П. И. – М.: Наука, 1973. – 336 с.
104. *Рубинштейн Л. И.* Проблема Стефана / Рубинштейн Л. И. – Рига: Звайгзне, 1967. – 457 с.
105. *Рыкалин Н. Н.* Основы электронно-лучевой обработки материалов / Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.; М.:Машиностроение, 1978. – 239 с.
106. *Самарский А. А.* Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
107. *Саркисов П. Д.* Технический анализ и контроль производства стекла и изделий из него / П. Д. Саркисов, А.С. Агарков. – М.: Стройиздат, 1973. – 242 с.
108. *Сахаров Г. И.* Нагрев тел при движении с большими сверхзвуковыми скоростями / Г. И. Сахаров, В. В. Андреевский, В. З. Букреев. – М.: Оборонгиз, 1961. – 287 с.

109. *Свойства* элементов. Часть I. Физические свойства. Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
110. *Скурихин В. Б.* Математическое моделирование / В. Б. Скурихин, В. В. Шифрин, В. В. Дубровский. – К.: Техніка, 1983. – 270 с.
111. *Соболев С. Л.* Уравнения математической физики / Соболев С. Л. – М.: Высшая школа, 1972. – 262 с.
112. *Сокольников И. С.* Тензорный анализ / Сокольников И. С. – М.: Наука, 1971. – 193 с.
113. *Соркин Р. Е.* Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе / Соркин Р. Е. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
114. *Спеціальні методи обробки оптичного скла.* Навчальний посібник / [М. П. Бочок, Н. П. Будко, В. А. Ващенко та ін.] Чернігівський державний технологічний університет, 2001. – 215 с.
115. *Справочник конструктора оптико-механических приборов* / [Панов В. А., Кругер М. Я., Кулагин В. В. и др.]; Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.
116. *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами*; [под ред. М. Абрамовица и И. Стиган]. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
117. *Стекло.* Справочник / Под ред. Н. М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1973. – 487 с.
118. *Температурные измерения.* Справочник. / [Геращенко О. А., Гордов А. Н., Еремина А. К. и др.]. – К.: Наукова думка, 1989. – 704 с.
119. *Теплопроводность твердых тел.* Справочник / [А. С. Охотин, Р. П. Боровикова, Т. В. Нечаева и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
120. *Теплофизические измерения и приборы* / [Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
121. *Тимошенко В. И.* Сверхзвуковые течения вязкого газа / Тимошенко В. И. – К.: Наукова думка, 1987. – 184 с.

122. *Тихонов А. Н.* Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1967. – 600 с.
123. *Тойберт П.* Оценка точности результатов измерений / Тойберт П. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 88 с.
124. *Углов А. А.* Математические модели процессов обработки материалов концентрированными потоками энергии / Углов А. А. – Киев.: Наукова думка, 1988. – 168 с.
125. *Углов А. А.* Расчет процессов нагрева при окислении поверхности металла под действием луча лазера / А. А. Углов, И. Ю. Смуров, А. А. Волков // В кн.: “Воздействие концентрированных потоков энергии на металлы”. – М.: Наука. – 1985. – с. 137–141.
126. *Физико-химические* процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии / Под. Ред. С. И. Анисимова, И. Ю. Смурова, С. В. Селищева. – М.: Наука, 1989. – 268 с.
127. *Черный Г. Г.* Течение газа с большой сверхзвуковой скоростью / Черный Г. Г. – М.: Наука, 1959. – 220 с.
128. *Чубаров Е. П.* Управление системами с подвижными источниками воздействия / Чубаров Е. П. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.
129. *Шевелев Ю. Д.* Трехмерные задачи теории пограничного слоя / Шевелев Ю. Д. – М.: Наука, 1977. – 304 с.
130. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя / Шлихтинг Г. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
131. *Шуп Т.* Решение инженерных задач / Шуп Т. – М.: Мир, 1982. – 238 с.
132. *Юдин Г. И.* Алгоритм численного решения задачи теплопроводности для тел с включениями / Г. И. Юдин, А. Г. Нарижный, В. Н. Сапрыкин // В кн.: “Самолетостроение и техника воздушного флота”. – Харьков.: ХАИ. – 1984. – вып. 51. – с. 18–23.