

УДК 544.344:664

В. Сукманов¹, докт. техн. наук, професор; Ю. Петрова¹, канд. техн. наук, доцент; О. Русанова², канд. техн. наук; І. Лаговський¹

¹*Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, Донецьк, Україна*

²*Донецький національний університет, Донецьк, Україна*

ЩОДО ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОБОЧОЇ КАМЕРИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ФЛЮЇДІВ

Резюме. Розроблено методику створення розрахункової моделі робочої камери флюїдних технологій для обліку температурних напружень у програмі ANSYS. Проведено верифікацію отриманої моделі за формулами Ляме.

Ключові слова: флюїдні технології, ANSYS, напружено-деформований стан.

V.Sukmanov, J.Petrova, O.Rusanova, I.Lagovsky

TO QUESTION OF MATHEMATICAL SIMULATION IN ENGINEERING CALCULATIONS OF THE TENSE-DEFORMED STATE OF WORKING CHAMBER FOR PRODUCTION OF FLUID

The summary. In the article the method of creation of calculation model of working chamber of fluid technologies is developed for the account of temperature tensions in the program ANSYS. Verification of the got model is conducted on the formulas of Lyame.

Key words: fluid technologies, ANSYS, tense-deformed state.

Постановка проблеми та її зв'язок із найважливішими науковими та практичними завданнями. Україна відноситься до держав, докільля якої містить значну кількість антропогенних, у т.ч. мутагенних і тератогенних чинників [1]. І як наслідок – виникнення ланцюгових вільнорадикальних реакцій, підвищення активності окислювальних ферментів і збільшення концентрації пероксидних ліпідів у плазмі крові. Перелік патологічних станів і хвороб, що викликаються збільшенням вмісту вільних радикалів, досить великий. До них відносяться атеросклероз, ішемія органів, бронхіт, бронхіальна астма, емфізема, хвороба Паркінсона, ревматизм, цукровий діабет, порушення обміну катехоламінів, стрес, алергія, гіпоксія, променева хвороба, отруєння, порушення обміну речовин, онкологічні захворювання, імунна недостатність, процес старіння організму, генетичні порушення мітохондріального апарату типу синдрому MELAS та ін. [2].

Запобігти негативному впливові чинників довкілля на здоров'я населення можна при резистентності, активності імунних і відновлювальних процесів.

Тому в даний час істотна увага приділяється пошуку інноваційних технологій, що дозволяють максимально, диференційовано витягувати з рослинної сировини біологічно активні речовини, що володіють антиоксидантними властивостями й ефективно зв'язують вільні радикали. Традиційні методи вирішення цих питань практично вичерпали свої можливості у зв'язку зі зниженням харчової цінності продуктів, а також у зв'язку з високою енергоємністю виробництва [3].

Пошук екологічно безпечних методів екстракції та хімічної модифікації фармацевтично значущих з'єднань рослинного походження є одним з пріоритетних напрямів сучасної харчової та переробної промисловості. Надкритичні флюїдні технології значною мірою відповідають цьому виклику часу [4, 5].

Надкритичні флюїди – це четверта форма агрегатного стану речовини, в яку здатні переходити багато органічних і неорганічних речовин при досягненні певної температури і тиску.

Якщо газ сильно стиснути, а потім нагріти, то його щільність стрибком збільшиться в десятки разів і виявиться близькою до щільності рідини; в'язкість залишиться майже як у газі, а найголовніший параметр, який цікавить практиків, – коефіцієнт дифузії – набуде проміжне для цих станів речовини значення.

Флюїди можуть стискуватися як гази (звичайні рідини практично не стискаються) і водночас, здатні розчиняти тверді речовини, що газам не властиве. Надкритичний стан можливий для більшості рідких і газоподібних речовин, потрібно лише, щоб речовина не розкладалася при критичній температурі. Найпопулярніші надкритичні флюїди — вуглекислий газ, вода, пропан, аміак і деякі інші з'єднання з невисокими критичними температурами.

У даний час основні дослідження проводять на базі понад критичного вуглекислого газу, переважна більшість яких пов'язана з виробництвом екстрактів з природної сировини для потреб фармацевтичної, харчової, косметичної і парфумерної промисловості. Для дослідників і виробників доступна певна лінія лабораторного устаткування, пілотних і промислових установок, пов'язаних з екстракцією на базі вуглекислого газу [6]. Надкритичний вуглекислий газ нетоксичний, дешевий, легко доступний і має зручні параметри ($T_c = 31^\circ\text{C}$, $P_c = 7,38$ МПа). Проте вуглекислий газ є одним із основних парникових газів, як і метан, озон, галогеновуглеці, оксиди азоту, як гази, які містять фтор. Присутність таких газів в атмосфері планети призводить до появи парникового ефекту.

В останнє десятиріччя для екстракції і хімічної модифікації біологічно активних з'єднань запропоновано використовувати субкритичну воду (перегріта вода під тиском при температурах від 100°C до 374°C). Вода стає флюїдом при 374°C і 22,064 МПа, що заважає її практичне використання у зв'язку зі складністю проектування відповідного обладнання.

Є лише розрізнені дані про характер дії субкритичної води на різні продукти [7-10]. А тим часом зі всіх речовин вода зазнає найсильніших змін, переходячи в надкритичний стан. Вода, що знаходиться в рідкому субкритичному стані (при температурах вище 100°C й нижче 374°C і тиску, що забезпечує знаходження води в рідкій фазі), є вельми ефективним і екологічно чистим інструментом екстракції і хімічної модифікації біологічно активних з'єднань за рахунок можливості змінювання її фізико-хімічних властивостей (діелектричної проникливості, іонного добутку, дифузійних властивостей і щільності) при підвищенні тиску і температури. Якщо при нормальному тиску і температурі вода – полярний розчинник, то в надкритичній воді розчиняються майже всі органічні речовини. Розчинність неорганічних речовин також змінюється. З підвищенням температури у воді відбувається значне руйнування сітки *H*-зв'язків між її молекулами і перерозподіл доль *H*-зв'язаних *n*-мерів. При температурах, близьких до критичної, вода має кластероподібну структуру з переважаючим вмістом димерів і тримерів [11].

Для України з її багатючими рослинними ресурсами можливість використання субкритичної води в технологічних процесах є надзвичайно актуальною і має величезне практичне значення, особливо з урахуванням екологічної чистоти, доступності й дешевизни (в порівнянні з традиційними токсичними і дорогими органічними розчинниками). Тому дослідження, націлені на розроблення екологічно чистих методик

екстракції і хімічної модифікації біологічно активних з'єднань у середовищі субкритичної води, є актуальними і мають значний інноваційний потенціал.

Відсутність методики розрахунку такого плану обладнання є гальмом у подальшому розвитку флюїдних технологій. Для створення відповідного обладнання необхідно, в першу чергу, провести дослідження напружено-деформованого стану робочої камери від внутрішнього тиску, температури, циклічних навантажень, втом, провести аналіз крайових умов і так далі. Прояв яких-небудь неврахованих чинників може бути вельми небажаним при ретельному обліку перелічених вище напружень.

Метою статті є дослідження напружено-деформованого стану корпусу експериментальної установки від температурних напружень засобами математичного моделювання.

Високі температури та тиск, необхідні для отримання флюїдної води, можуть призводити до виникнення в корпусі великих напружень, які можуть сягати межі міцності матеріалу. Для конструювання надійного і безпечного лабораторного обладнання необхідно мати точну картину розподілу напружень у корпусі пристрою. У даній роботі досліджується напружено-деформований стан корпусу експериментальної установки автоклава від температурних навантажень.

Зовнішня робоча поверхня автоклава приєднана до тенів з температурою 673 К, внутрішня знаходиться при кімнатній температурі. Існуючий перепад температури призводить до виникнення термопружних напружень.

При лінійній залежності зміни температури для визначення напружень товстостінного циліндра існує аналітичне рішення [12]:

- радіальні напруження

$$\sigma_r(r) = \frac{E\alpha(T_2 - T_1)}{2(1 - \mu)\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \cdot \left(\ln\left(\frac{R_2}{r}\right) + \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2}\right) \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right), \quad (1)$$

- кутові напруження

$$\sigma_\theta(r) = \frac{E\alpha(T_2 - T_1)}{2(1 - \mu)\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \cdot \left(1 - \ln\left(\frac{R_2}{r}\right) + \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2}\right) \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right), \quad (2)$$

де E – модуль Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона; α – коефіцієнт лінійного розширення; R_1 і R_2 – внутрішній і зовнішній радіуси циліндра відповідно; T_1 і T_2 – температура на внутрішній і зовнішній поверхнях циліндра.

При ввімкнених тенах, які постійно працюють, у певний момент весь корпус автоклава прогріється до температури 673 К, тобто температури внутрішньої і зовнішньої поверхонь будуть рівні і, як випливає з формул (1) і (2), температурні напруження не виникають.

З точки зору конструювання безпечного пристрою найнебезпечнішим є напружено-деформований стан корпусу автоклава у момент нагрівання, коли на зовнішній поверхні температура 673 К, а на внутрішній – 293 К. У даному випадку виникає максимальний градієнт температур, який призводитиме до найвеликих температурних напружень.

Розподіл температури між зовнішньою і внутрішньою поверхнями конструкції взагалі кажучи не є лінійною [13]. Для аналітичного вирішення завдання про термопружні напруження необхідно записати відповідні рівняння термопружності із

заданими умовами на поверхні автоклава. Якщо розв'язувати задачу для реальної геометрії, враховувати нелінійний характер розподілу температури, брати до уваги залежність від температури різних коефіцієнтів, що характеризують матеріал, з якого виготовлений автоклав, то знайти аналітичний розв'язок не є можливим [13].

В останні десятиріччя використання технологій комп'ютерного моделювання стало ключовим моментом у процесі розроблення нових виробів. Впровадження комп'ютерного моделювання прискорює процес конструювання і впровадження нових технологій.

Одним із поширених методів при розрахунку на міцність є метод кінцевих елементів, який лежить в основі обчислювального апарату програмного продукту ANSYS. Аналітичний комплекс ANSYS в даний час є однією з небагатьох програм, що володіє достатньою функціональною повнотою і містить в своєму середовищі всі необхідні для роботи інженера засоби.

Запропонована нижче методика розрахунку дозволяє врахувати такі особливості:

- реальну геометрію конструкції автоклава;
- залежність коефіцієнтів теплопровідності, лінійного розширення, модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона від температури;
- нелінійну зміну температури між зовнішньою і внутрішньою поверхнями стінок автоклава;
- допускає наявність великих (кінцевих) деформацій.

Завдання вирішувалося в рамках теорії пружності методом фізичних середовищ. Внаслідок симетрії для вирішення завдання застосувалась осесиметрична постановка. При будівництві кінцево-елементної моделі використовувалось 12100 елементів.

Дискретизація проводилася за допомогою твердотілого 8-вузлового теплового елемента PLANE77 для вирішення теплового завдання і сумісного з ним структурного елемента PLANE82 для виконання структурного аналізу. Обидва елементи дозволяють розв'язувати задачу в осесиметричній постановці, допускають більше однієї форми, що дозволяє побудувати переважно впорядковану прямокутну сітку, і лише там, де це не можливо, використовувати трикутні елементи.

Механічні й температурні властивості сталі залежать від температури і наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Температура, К	273	373	473	573	673
Модуль пружності, Па	$2 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$
Коефіцієнт Пуассона	0,28	0,29	0,3	0,31	0,32
Коефіцієнт теплопровідності, кДЖ/кг К	53	51	49	44	43
Коефіцієнт лінійного розширення, мк/К	$11,9 \cdot 10^{-6}$	$15,1 \cdot 10^{-6}$	$15,5 \cdot 10^{-6}$	$15,6 \cdot 10^{-6}$	$15,7 \cdot 10^{-6}$

При розв'язуванні даної задачі методом фізичних середовищ на першому етапі вирішується теплове завдання. Будується геометрична і кінцево-елементна модель автоклава. Прикладаються граничні умови для теплового завдання: температура на внутрішній поверхні – 293 К, на зовнішній – 673 К. У розв'язку теплової задачі отримано розподіл температури в корпусі автоклава. Залежність температури від радіуса представлена на рисунку 1. Бачимо, що температура змінюється не по лінійному закону. Отримане поле температур записується в програмі ANSYS як тепловий файл фізики.

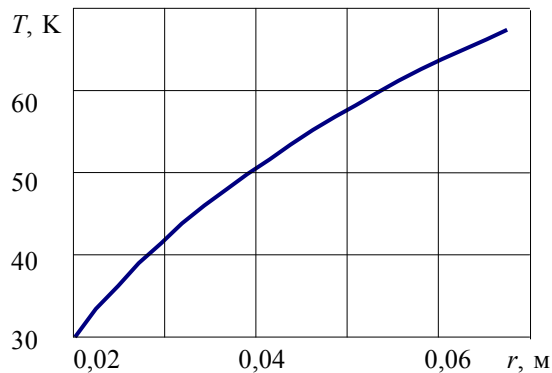


Рисунок 1. Зміна температури по товщині стінки

На другому етапі розв'язуємо структурну задачу. Для цього задаємо структурні граничні умови, зчитується тепловий файл фізики і проводиться їх спільний розв'язок. Згідно з четвертою (енергетичною) теорією міцності: причиною настання граничного напруженого стану є величина питомої потенційної енергії зміни форми. Ця теорія добре працює для пластичних матеріалів і враховує всі три головні напруження, умова для яких може бути записана у вигляді

$$\sigma_{eq} = \sqrt{1/2((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2)} \leq [\sigma]$$

де σ_{eq} – еквівалентне напруження за фон Мізесом; σ_1, σ_2 і σ_3 – головні напруження.

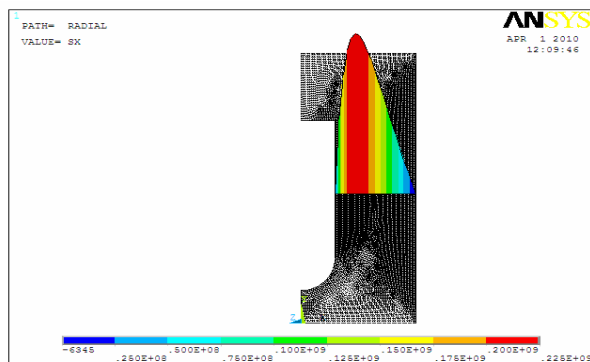


Рисунок 2

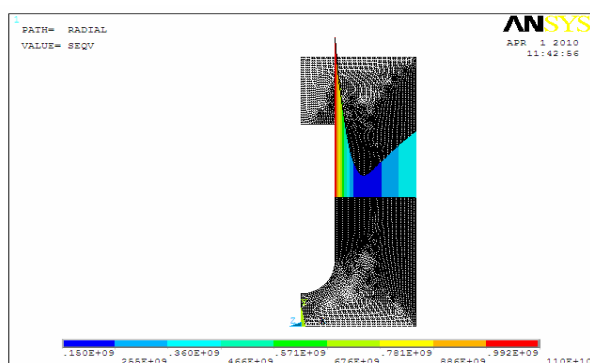


Рисунок 3

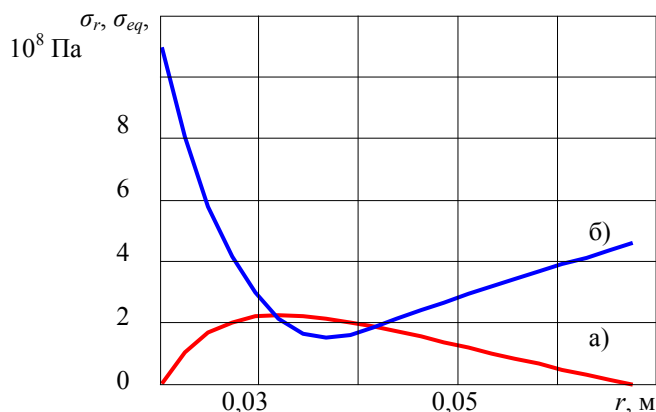


Рисунок 4

Рисунок 2. Епюра радіальних напружень
 Рисунок 3. Еквівалентні напруження за Мізесом
 Рисунок 4. Зміна радіальних та еквівалентних напружень вздовж радіуса автоклава:

- а) – залежність радіальних напружень від радіуса автоклава;
- б) – залежність еквівалентних напружень від радіуса автоклава

На рисунку 2 зображена епюра радіальних напружень у перетині на підставі результатів розрахунку. Форма епюри добре узгоджується із залежністю (1), отриманою на підставі розрахунку товстостінного циліндра з такими ж геометричними параметрами і температурами на зовнішній і внутрішній поверхнях. На рисунку 3 представлені еквівалентні напруження за Мізесом. На рисунку 4 показана залежність радіальних напружень σ_r , крива а), та еквівалентних σ_{eq} , крива б) від радіуса автоклава r . Для матеріалу, з якого виготовлений корпус (40X13), допустимі напруження $[\sigma] = 1520$ МПа. Результуюче напруження знаходиться далеко від межі міцності матеріалу.

Використання програмного комплексу ANSYS за вказаною методикою дозволить інженерові легко і швидко виконати тепловий розрахунок і аналіз напружено-деформованого стану конструкції для подальшої оптимізації пристрою.

Для тестування автоклав моделювався як товстостінний циліндр. Завдання вирішувалося за алгоритмом, що описаний вище. Для того, щоб порівняти результати розрахунку з відомим аналітичним рішенням, перепад температур вибирався невеликим (на внутрішній поверхні 300К, на зовнішній – 350К), для того,

щоб формула (1) була справедливою.

Результати розрахунку радіальних напружень σ_r представлені на рисунку 5. Суцільна крива а) побудована за аналітичною залежністю (1), крива б), що помічена кружечками – чисельний розрахунок, виконаний в ANSYS за описаною вище процедурою. Як бачимо, результати розрахунків збігаються в межах похибки. Максимальна відмінність результатів складає 3,7%.

Проте якщо порівнювати результати розрахунку для реальних температур, за яких працює автоклав, то результати розрахунку починають істотно розходитися. На рисунку 6 представлені радіальні напруження σ_r . Крива а) побудована за аналітичною залежністю (1), крива б) – чисельний розрахунок, виконаний в ANSYS за описаною вище процедурою.

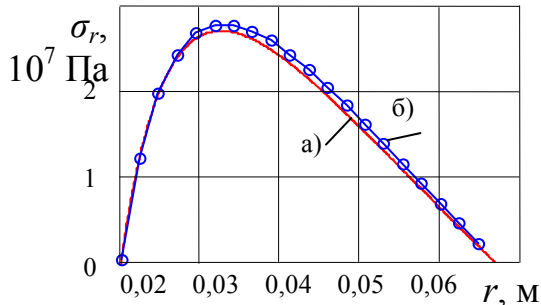


Рисунок 5. Розрахункові значення радіальних напружень:
а) за аналітичною залежністю (1);
б) за програмою ANSYS

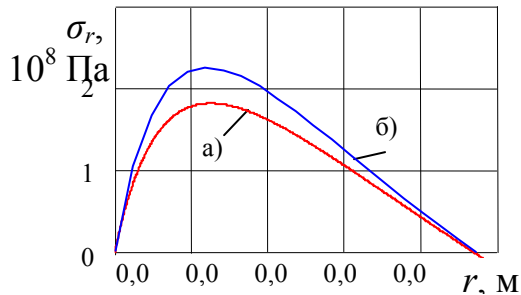


Рисунок 6. Порівняння аналітичного і чисельного розрахунку:
а) за аналітичною залежністю (1);
б) за програмою ANSYS

Форма кривих і радіальна координата максимуму збігаються, а величини напружень відрізняються. Так максимум кривої а) $\sigma_{r1} = 1,81 \cdot 10^8$ Па, а кривої б) $\sigma_{r1} = 2,25 \cdot 10^8$ Па. Форма кривих збігається, тому що форма автоклава близька до циліндрової, а кількісні відмінності пов'язані з тим, що аналітичне рішення, яке базується на залежностях опору матеріалів з певним набором припущень при переході від реального об'єкта до розрахункової схеми, не враховують зміни температури, реальну геометрію, залежність всіх коефіцієнтів від температури.

Висновки. Розроблена методика створення розрахункової моделі робочої камери флюїдних технологій для обліку температурних напружень у програмі ANSYS дає можливість врахувати нелінійний характер залежності температури, коефіцієнти, які характеризують матеріал та оцінити порядок розбіжностей порівняно з аналітичними методами. Значення максимальних напружень, отриманих за аналітичними залежностями дають занижене на 20 % значення напруження.

Перспективами подальших досліджень у цьому напрямку є проведення аналізу напружено-деформованого стану робочої камери автоклава у програмі ANSYS щодо циклічних навантажень, втоми, проведення аналізу крайових умов і так далі.

Література

1. Сердюк, А.М. Методологічні засади поліпшення медико-екологічної ситуації в Україні [Текст] / А.М. Сердюк, О.І. Тимченко // Екологія і безпека життєдіяльності. – 2002. – №4. – С. 3–9.
2. Генофонд і здоров'я населення: методологія оцінки ризику від мутагенів довкілля, напрямки профілактики генетично обумовленої патології [Текст] / А.М. Сердюк, О.І. Тимченко, Н.Г. Гойда, О.І. Турос та співавт. – К.: ІГМЕ АМН України, 2003. – 190с.
3. Cao, G. Antioxidant and prooxidant behavior of flavonoids : structure-activity relationships / G. Cao, E. Cofic, K.L. Prior // Free Rad.Biol.Med. – 1997. – Vol.22. – PP.749–760.
4. Развитие технологий, основанных на использовании сверхкритических флюидов [Текст] / Д.Ю. Заплетухин, Н.А. Тилькунова, И.В. Чернышова, В.С. Поляков // Сверхкритические Флюиды: Теория и практика. – 2006. – Том1. – №1. – С.27–44.

5. Herrero Miguel. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae / Miguel Herrero, Alejandro Cifuentes, Elena Ibanez // *Food Chemistry*. – 2006. – V.98. – P.136–148.
6. Леменовский, Д.А. Сверхкритические среды. Новые химические реакции и технологии [Текст] / Д.А. Леменовский, В.Н. Баграташвили // *Соросовский Образовательный журнал*. – 1999. – № 10. – С.24–31.
7. Ghoreishi, S.M. Subcritical water extraction of mannitol from olive leaves / S.M.Ghoreishi, R.Ghlami Shahrestani // *Journal of Food Engineering*. – 2009. – V.93. – P.474–481.
8. Pourali Omid. Sub-critical water treatment of rice bran to produce valuable materials / Omid Pourali, Feridoun Salak Asghari, Hiroyuki Yoshida // *Food Chemistry*. – 2009. – V.115. – P.1–7.
9. Филонова, О.В. Разработка методики экстракции дигидрокверцетина из древесины лиственницы в среде субкритической воды [Текст] / О.В. Филонова, С.Н.Борисенко, Е.В.Максименко // *Сверхкритические флюиды: теория и практика*. – 2008. – Т.3. – №2. – С.37–42.
10. Масс-спектрометрия аралозидов, извлеченных в среде субкритической воды из корня аралии маньчжурской [Текст] / С.Н. Борисенко, М.И. Руднев, Р.Н. Борисенко, К.С. Тихомирова, Н.И. Борисенко, Е.В. Ветрова, Д.В.Зимаков // *Масс-спектрометрия*. – 2009. – Т. 6. – № 3. – С. 187–190.
11. Oparin, R.D. Influence of isobaric heating of hydrogen bonding in precritical water / R.D.Oparin, M.V. Fedotova // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2007. – V. 77. – № 1. – P. 17–24.
12. Писаренко, Г.С. Опір матеріалів: підручник [Текст] / Г.С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е.С. Уманський; за ред. Г.С. Писаренка. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища школа, 2004. – 655с. – ISBN 966-642-056-2.
13. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики: учебник [Текст] / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Изд-во Московского Универ-та, 1999. – 799 с.