

Геоінформаційна Підсистема Моніторингу Концентрації Радіоактивних і Небезпечних Хімічних Речовин Внаслідок Надзвичайної Ситуації

Петро Гучек
кафедра ІТ
ХНТУ
Херсон, Україна
phuchek@gmail.com

Олена Литвиненко, Ігор Астіоненко
кафедра ВМ і ММ
ХНТУ
Херсон, Україна
mmkntu@gmail.com

Geoinformation Subsystem Monitoring the Concentration of Radioactive and Hazardous Chemicals as a Result of an Emergency

Petro Guchek
dept. of IT
KNTU
Kherson, Ukraine
phuchek@gmail.com

Olena Litvinenko, Igor Astionenko
dept. of HM and MM
KNTU
Kherson, Ukraine
mmkntu@gmail.com

Анотація—У разі виникнення надзвичайної ситуації, пов'язаної з виливом (викидом) у довкілля радіоактивних чи небезпечних хімічних речовин, потребується наявність інформації як про саму речовину, площу зараження, так і про величину приземної концентрації токсичних чи радіоактивних речовин в зонах зараження. В рамках дослідження авторами запропоновано застосування експрес-діагностики з використанням серендипових скінченних елементів та геоінформаційної підсистеми моніторингу.

Abstract—In the emergency situation related outpour (emissions) into the environment of radioactive or hazardous chemicals required availability of information as the same substance, the area of infection and about the size of the surface concentration of toxic or radioactive substances into areas of infection. The study authors suggested use of rapid diagnostic using serendipity finite elements and geoinformation subsystem monitoring.

Ключові слова—метод скінченних елементів; серендипові скінченні елементи; функції форми; надзвичайна ситуація; небезпечні хімічні речовини;

Keywords—finite element method; serendipity finite elements; form functions; emergency situation; hazardous chemicals;

I. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В Україні налічується 931 об'єкт, де зберігаються або використовуються у виробничій діяльності 308,07 тис. т. небезпечних хімічних речовин (НХР), зокрема 4,08 тис. т. хлору, 202,66 тис. т. аміаку та 101,33 тис. т. інших небезпечних хімічних речовин. У зонах вірогідного хімічного забруднення мешкає майже 10,24 млн осіб, що складає 22,6% від загальної кількості населення країни. Близько п'яти тисяч закладів та підприємств використовують понад 22000 джерел іонізуючого випромінювання, в тому числі: радіонуклідних джерел – 10 084; генеруючих пристроїв – 12 644[1].

Аварії на таких об'єктах, як правило, супроводжуються забрудненням навколишнього середовища отруйними та радіоактивними речовинами, а також пожежами та вибухами.

Географічне положення України, наявність розвинутої мережі залізниць, автомобільних доріг, морських портів і трубопроводів створює умови для транзиту вантажів у великих обсягах, значна частина з яких є небезпечними вантажами (НВ), що, зокрема, містять радіоактивні та НХР. Крім того, велику загрозу транспортуванню НВ становить збройне протистояння на сході України, не

контрольованість окремих територій і частини державного кордону та загальне зростання тероризму у світі[1].

Тому в умовах надзвичайних ситуацій дуже важливо швидко і правильно прийняти рішення по ліквідації її наслідків. Процес прийняття рішень по ліквідації надзвичайної ситуації характеризується браком часу, неповнотою і поганою якістю подання інформації, необхідної для прийняття рішень.

Таким чином, завчасне створення нових моделей, методів, систем моніторингу та прогнозування розповсюдження небезпечних речовин у повітряному середовищі є актуальними на сьогоднішній день.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Математичному моделюванню забруднення атмосферного повітря присвячені роботи Згуровського М.З., Берлянда М.Е., Бизової Н.Л., Колмогорова А.Н., Марчука Г.И., Гаргера Е.К., Іванова В.Н., Яглома А.Н., Моніна А.С., Соловей В.В., Прохача Е.Ю., Беляєва М.М тощо[2-5].

Розробці інформаційного забезпечення і математичних моделей прогнозування розвитку аварій, що супроводжуються пожежами на різноманітних об'єктах народного господарства, оцінювання обстановки і вироблення управлінських рішень з метою створення автоматизованих систем підтримки та прийняття рішень керівниками ліквідації аварій і надзвичайних ситуацій присвячені результати досліджень, які описані в роботах М.М. Брушлинського, П.П. Ключа, І.Ф. Кимстача, В.Г. Теряєва, Ю.О. Абрамова, О.А. Громовенка, С.М. Мінаєва, Б.Ф. Турніна, П.М. Бортнічука, С.В. Юхимчука, Р.В. Котельникова, В.Ф. Шостака, В.А. Геловані, А.В. Матюшкіна, У. Бейкера, В. Маршалла та інших вітчизняних і зарубіжних авторів.

У методі скінченних елементів (МСЕ) важливу роль відіграють скінченні елементи серендипової сім'ї [6]. Для побудови базису скінченного елемента традиційно використовують *матричну процедуру* [6]. *Процедура систематичного генерування базису*, що була запропонована Тейлором у 1972 році, привела до вже відомих стандартних моделей на елементах серендипової сім'ї [7]. У 70-х роках минулого століття завдяки роботам Уачспреса з'явився метод "*product of planes*" для конструювання базисних функцій СЕ [8]. Але цей метод не застосовувався на серендипових скінченних елементах (ССЕ). На початку 80-х років був запропонований *ймовірнісно-геометричний метод* конструювання базисів скінченних елементів різноманітної конфігурації [9]. Переваги цього метода найбільш виразно проявилися саме на серендипових моделях. Для конструювання серендипових елементів використовувався *геометричний метод*[10]. Це модифікація методу "*product of planes*", яка використовує техніку перемноження рівнянь площин і поверхонь другого порядку. Нові методи значно спрощують процедуру побудови базису (не виникає потреби розв'язувати СЛАР відповідного порядку на елементі) і дозволяють отримати альтернативні моделі ССЕ. Наявність "позавузлових" параметрів у моделях, що

отримані за допомогою нових методів, дає можливість позбутися недоліків, які притаманні стандартним моделям (наприклад, від'ємних значень навантажень у вузлах).

Але побудова систем базисних функцій цими методами не дає можливості будувати базиси на ССЕ з наперед заданими характеристиками. Для розв'язання на ССЕ задачі інтерполявання з умовами [11] був запропонований *аналітичний метод побудови ієрархічних форм базисних функцій* [12].

III. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

За допомогою матричних методів на серендипових елементах отримані базиси, які називаються *стандартними*. Матричний метод був розвинений в працях Вандермонда, Коші, Лагранжа стосовно задач інтерполяції функцій одного аргументу. У МСЕ він вважається основним методом побудови інтерполяційних поліномів для функцій двох і трьох аргументів. Наприклад, процедура побудови базису для СЕ з 4-ма вузлами (рис.1) починається з вибору 4-параметричного поліному з двома аргументами:

$$\varphi(\xi, \eta) = \alpha_1 + \alpha_2\xi + \alpha_3\eta + \alpha_4\xi\eta, \text{ де } |\xi| \leq 1, |\eta| \leq 1 \quad (1)$$

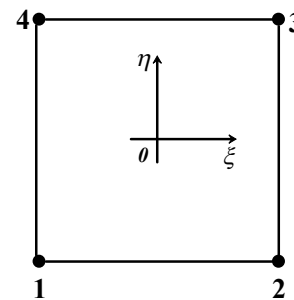


Рис. 1. Елемент з білінійним базисом (СЕ-4)

Базисні функції білінійної інтерполяції $N_i(\xi, \eta)$ ($i = 1, 2, 3, 4$) повинні задовольняти інтерполяційній гіпотезі

$$N_i(\xi_k, \eta_k) = \delta_{ik}, \quad i, k = \overline{1, 4}, \quad (2)$$

де δ_{ik} – символ Кронекера.

Використання (2) приводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь 4×4 відносно параметрів α_j :

$$\alpha_1 + \alpha_2\xi_k + \alpha_3\eta_k + \alpha_4\xi_k\eta_k = \delta_{ik}, \quad (3)$$

де i – номер базисної функції; k – номер вузла.

Знайдемо невідомі параметри α_j і запишемо інтерполяційний поліном (1) у вигляді [6]:

$$\varphi(\xi, \eta) = N_1(\xi, \eta)\Phi_1 + N_2(\xi, \eta)\Phi_2 + N_3(\xi, \eta)\Phi_3 + N_4(\xi, \eta)\Phi_4 = [N_i][\Phi_i], \quad (4)$$

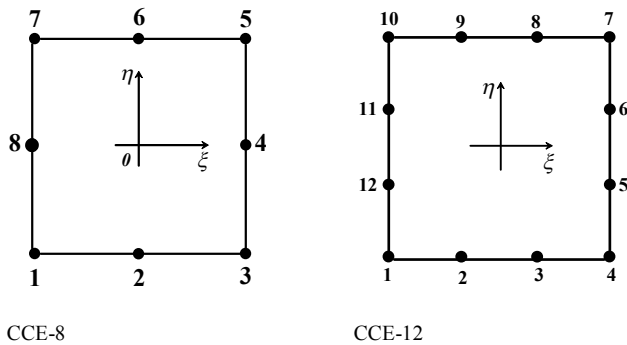
де $[N_i]$ – матриця-рядок базисних функцій СЕ ($i = 1, 2, 3, 4$); $\{\Phi_i\}$ – матриця-стовпець граничних значень функції, що інтерполюється.

Отримуємо білінійний базис на СЕ-4:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta), \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad \xi_i, \eta_i = \pm 1. \quad (5)$$

Функції форми (базисні функції) $N_i(\xi, \eta)$ виконують важливу роль в методі скінченних елементів – апроксимують поле в середині елемента. Від вибору апроксимуючих функцій та їх властивостей в значній мірі залежить точність розв'язку. Слід зауважити, що серендипові моделі є унікальним прикладом одночасної інтерполяції та апроксимації – вони інтерполюють функцію на границі елемента та апроксимують всередині його.

У роботі розглядаються скінченні елементи серендипової сім'ї з біквдратичною та бікубічною інтерполяцією (рис. 2, рис. 3) [6,19].



$$(|\xi| \leq 1, |\eta| \leq 1)$$

$$(|\xi| \leq 1, |\eta| \leq 1)$$

Рис. 2. Використовуючи аналітичний метод побудови ієрархічних форм базисних функцій, множину базисів CSE-8 можливо отримати додаванням до поверхні стандартного базису [12]:

$$N_1^{(s)}(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)(-1 - \xi - \eta), \quad (6)$$

$$N_2^{(s)} = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 - \eta) \quad (7)$$

гіперболічного параболоїда з коефіцієнтом K :

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)(-1 - \xi - \eta + K(1 + \xi)(1 + \eta)), \quad (8)$$

$$N_2 = \frac{1}{2}(1 - \xi)(1 - \eta) \left((1 + \xi) - \frac{1}{2}K(1 + \xi)(1 + \eta) \right) \quad (9)$$

де $N_1^{(s)}, N_2^{(s)}$ - стандартні базисні функції CSE-8,

N_1, N_2 - модифіковані базисні функції CSE-8.

Запишемо узагальнені формули для побудови альтернативних базисних функцій біквдратичного елемента:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(-1 + \xi_i \xi + \eta_i \eta + K(1 - \xi_i \xi)(1 - \eta_i \eta)) \quad (10)$$

$$i = 1, 3, 5, 7; \quad \xi_i = \pm 1; \quad \eta_i = \pm 1.$$

$$N_i = \frac{1}{2}(1 - \xi)(1 + \eta) \left((1 + \xi) - \frac{1}{2}K(1 + \xi)(1 - \eta) \right), \quad (11)$$

$$i = 2, 6; \quad \eta_i = \pm 1.$$

$$N_i = \frac{1}{2}(1 - \eta) \left((1 + \eta) - \frac{1}{2}K(1 + \eta)(1 - \xi_i \xi) \right), \quad (12)$$

$$i = 4, 8; \quad \xi_i = \pm 1.$$

Аналогічно використовуючи аналітичний метод побудови ієрархічних форм базисних функцій отримуємо множину базисів CSE-12 додаванням до поверхні стандартного базису [12]:

$$N_1^{(s)} = \frac{1}{32}(1 - \xi)(1 - \eta)(9\xi^2 + 9\eta^2 - 10), \quad (13)$$

$$N_2^{(s)} = \frac{9}{32}(1 - \xi^2)(1 - \eta)(1 - 9\xi), \quad (14)$$

гіперболічного параболоїда з коефіцієнтом K :

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \left(\frac{1}{8}(9\xi^2 + 9\eta^2 - 10) + K \cdot \frac{9}{4} \cdot (1 + \xi)(1 + \eta) \right), \quad (15)$$

$$N_2 = \frac{3}{8}(1 - \xi)(1 - \eta) \left(\frac{3}{4}(1 + \xi)(1 - 3\xi) - K \cdot \frac{3}{4} \cdot (1 + \xi)(1 + \eta) \right), \quad (16)$$

де $N_1^{(s)}, N_2^{(s)}$ - стандартні базисні функції CSE-12,

N_1, N_2 - модифіковані базисні функції CSE-12.

Запишемо узагальнені формули для побудови альтернативних базисних функцій бікубічного елемента:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta) \times \left(\frac{1}{8}(9\xi^2 + 9\eta^2 - 10) + K \cdot \frac{9}{4} \cdot (1 - \xi_i \xi)(1 - \eta_i \eta) \right), \quad (17)$$

$$i = 1, 4, 7, 10; \quad \xi_i, \eta_i = \pm 1;$$

$$N_i = \frac{3}{8}(1 + 3\xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta) \times \left(\frac{3}{4}(1 - 3\xi_i \xi)(1 + 9\xi_i \xi) - K \cdot \frac{3}{4}(1 - 3\xi_i \xi)(1 - \eta_i \eta) \right), \quad (18)$$

$$i = 2, 3, 8, 9, \quad \eta_i = \pm 1, \quad \xi_i = \pm \frac{1}{3}.$$

$$N_i = \frac{3}{8}(1 + 3\eta_i \eta)(1 + \xi_i \xi) \times \left(\frac{3}{4}(1 - 3\eta_i \eta)(1 + 9\eta_i \eta) - K \cdot \frac{3}{4}(1 - 3\eta_i \eta)(1 - \xi_i \xi) \right), \quad (19)$$

$$i = 5, 6, 11, 12, \quad \xi_i = \pm 1, \quad \eta_i = \pm \frac{1}{3}.$$

Отримані базисні функції відповідають всім властивостям, які притаманні функціям форми в MSE [6,12].

У [13,17-18] авторами була розроблена автоматизована підсистема дослідження моделей скінченних елементів, яка дає користувачеві можливість подальшого дослідження отриманих моделей, вирішувати практичні прикладні задачі, проводити порівняльну характеристику альтернативних моделей і дозволяє приймати рішення щодо подальшого застосування та оптимізації обчислювальних властивостей моделей.

На відміну від традиційної поелементної процедури метода скінченних елементів у роботі показано, що поле приземної концентрації небезпечної радіоактивної чи хімічної речовини (рис.1-3) можна побудувати лише за допомогою одного елемента серендипової сім'ї (експрес-методика), що буває дуже важливо при визначенні нульового наближення розв'язку задачі, яка досліджується.

Концентрація C в будь-якій внутрішній точці при використанні ССЕ-8 визначається за допомогою аналітичної залежності:

$$C = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) \cdot C_i. \quad (20)$$

Значення концентрації небезпечної речовини у вузлових точках C_i можуть бути отримані безпосередньо за допомогою датчиків, на прикладі системи [14,16]. Датчики розташовуються як на стаціонарних постах збору інформації, так і на оперативних пересувних лабораторіях, які обладнанні відповідними каналами передачі даних на сервер автоматизованої системи моніторингу.

Підсистема обробки та аналізу інформації (рис.4) за допомогою спеціальної служби через певні інтервали часу виконує запити до постів збору та передачі інформації для зчитування, обробки та зберігання в базі даних актуальної інформації про стан та концентрацію небезпечних речовин.

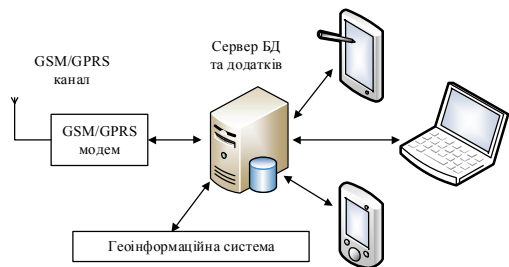


Рис. 3. Підсистема обробки та аналізу інформації

Крім того, комплекс має у своєму складі метеостанцію, яка призначена для вимірювання метеорологічних параметрів, таких як швидкість і напрямок вітру, температура повітря, вологість, атмосферний тиск.

Розроблена підсистема моніторингу (рис. 5) дозволить надати наступні переваги в порівнянні зі звичайними механізмами та методами:

- отримання об'єктивних даних в реальному часі про концентрацію небезпечних речовин в місцях встановлення відповідних датчиків;
- проведення експрес-діагностики при застосуванні запропонованої моделі для скінченно-елементної апроксимації концентрації небезпечних речовин на область, яку покривають датчики;
- зв'язок даної підсистеми з ГІС системою дозволяє виносити на певний шар відповідні значення

концентрації та візуалізувати зону надзвичайної ситуації і прогнозувати можливі наслідки;

- проводити моніторинг наявних та задіяних в ліквідаціях надзвичайних ситуацій сил та засобів на базі інформації, що надходить від GPS трекерів.
- надавати оперативну інформацію мобільним підрозділам про стан, зону надзвичайної ситуації та задіяні підрозділи за допомогою web-сервісів.

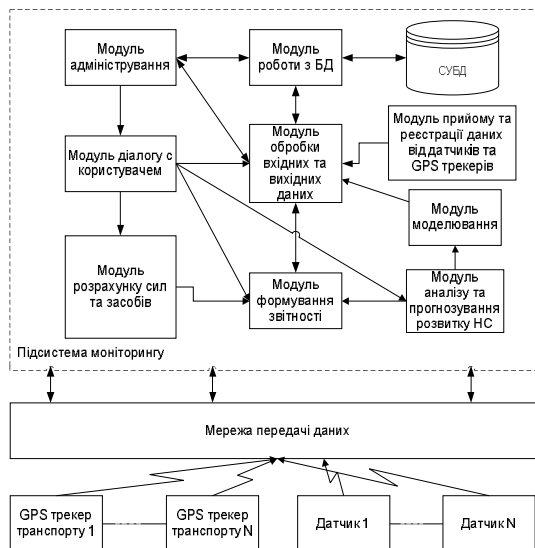


Рис. 4. Підсистема моніторингу

Наприклад, застосовуючи розглянуті методи та моделі, проведемо експрес-діагностику концентрації небезпечних речовин в приземному шарі м. Херсона за даними, які поступають від датчиків, розташованих з географічними координатами, представленими на рис.6.

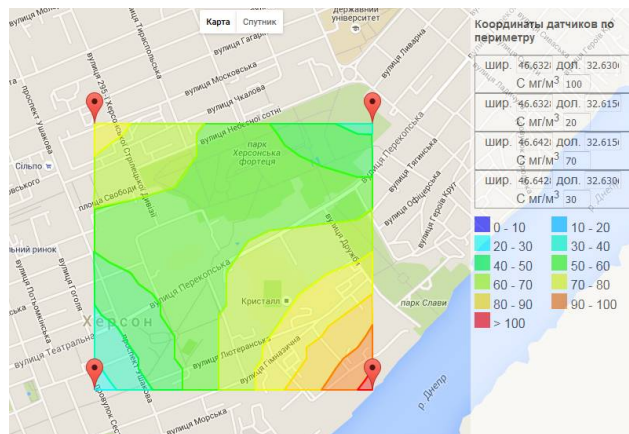


Рис. 5. Поширення концентрації небезпечних речовин

Для проведення експрес-діагностування застосуємо стандартний базис білінійного скінченного елемента (5). Концентрація C в будь-якій внутрішній точці при використанні СЕ-4 визначається за допомогою аналітичної залежності(21):

$$C = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \cdot C_i. \quad (21)$$

Білінійний елемент успішно використовується для апроксимації функцій з малим градієнтом. Для функцій, що швидко змінюються, отримати більш точну апроксимацію у МСЕ можна послідовним подрібненням сітки білінійних елементів. Але це призводить до зростання обчислювальної похибки. З іншого боку, збільшення точності наближення може бути досягнуто послідовним збільшенням степеню базисних функцій. При цьому розміри елементів залишаються без змін, а покращують представлення полів у елементі за допомогою зростаючої кількості вузлів, наприклад, використовуючи CSE-8, CSE-12, CSE-16.

Для визначення концентрації не тільки в приземному шарі необхідно застосовувати просторові скінчені елементи. При цьому датчики розташовують як в приземному шарі, так і у просторі – на висотних будівлях, антенах мобільного зв'язку, а також на різноманітних літальних апаратах, які в динамічному режимі передають дані до ГС.

Методика, яка на сьогоднішній день використовується державною службою з надзвичайних ситуацій, дозволяє лише експрес розрахунок зони можливого поширення небезпечних речовин під час виникнення надзвичайної ситуації (рис. 7) [15].



Рис. 6. Зона поширення небезпечних речовин

Тому для визначення концентрації небезпечних речовин пропонується використовувати дискретні методи відновлення гармонічної функції та геоінформаційні технології.

IV. Висновки

У роботі розглянуто скінченно-елементну модель для експрес-діагностики концентрації небезпечних радіоактивних та хімічних речовин під час викиду (випливу) внаслідок надзвичайної ситуації. Пропонується розробка геоінформаційної системи безперервного моніторингу та прогнозування зони поширення небезпечних речовин.

Перспективним є подальше дослідження з використанням різноманітних моделей, та їх порівняльна характеристика для даного класу задач.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2015 рік. – Режим доступу: <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Analitichniy-oglyad-stanu-tehnogennoyi-ta-prirodnoyi-bezpeki-v-Ukrayini.html>
- [2] Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1982.–320 с.
- [3] Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 448 с.
- [4] Бызова Н.Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примесей / Н.Л. Бызова, Е.Г. Гаргер, В.Н. Иванов. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 273 с.
- [5] Семенчин Е.А. Стохастические методы решения обратных задач в математической модели атмосферной диффузии / Е.А. Семенчин, М.В. Кузякина. – М.: Физматлит, 2012. – 176 с.
- [6] Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
- [7] Taylor R. L. On the completeness of shape functions for finite element analysis / R. L. Taylor // Internat. J. Numer. Methods Eng. — 1972. —V.4. — № 1. — P. 17-22.
- [8] Wachspress E.I. A rational finite element basis / E.I. Wachspress. — Academic Press. — New York, 1975. — 344 p.
- [9] Хомченко А.Н. О вероятностном построении базисных функций МКЭ / А. Н. Хомченко // Ивано-Франковск. ин-т нефти и газа. — Ивано-Франковск, 1982. — 5 с. — Деп. в ВИНТИ 21.10.1982, №5264.
- [10] Хомченко А.Н. Геометрия серендиповых аппроксимаций / А.Н. Хомченко, Е.И. Литвиненко, П.И. Гучек // Прикл. геом. и инж. графика. — К.: Будівельник, 1996. — Вып. 59. — С. 40-42.
- [11] Попов Б.А. Приближение функций для технических приложений / Б.А. Попов, Г.С. Теслер. — Киев: Наукова думка, 1980. — 352 с.
- [12] Хомченко А.Н. Новый подход к построению базисов серендиповых элементов / А.Н. Хомченко, Е.И. Литвиненко, И.А. Астионенко // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2009. – Вып. 23. – С. 90-95.
- [13] Астионенко И.А. Автоматизированная подсистема исследования моделей конечных элементов / И.А. Астионенко, П.И. Гучек, Е.И. Литвиненко // Проблеми інформаційних технологій. – 2014. – № 1. – С. 222-228.
- [14] Гучек П.И. Автоматизация мониторингу та прогнозування розповсюдження небезпечних хімічних речовин внаслідок надзвичайних ситуацій / П.И. Гучек // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: матеріали V міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ – Ворохта – Вінниця, 27-29 травня 2015 р. – Івано-Франківськ: ПНУ, 2015. – С.25-27.
- [15] Методика прогнозування наслідків вилливу(викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті (затверджена спільним наказом МНС України, Міністерства аграрної політики, Міністерства економіки, Міністерства екології і природних ресурсів від 27.03.2001 N 73/82/64/122). – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0326-01>.
- [16] Гучек П.И. Скінченно-елементна модель для оцінки та прогнозування хімічної обстановки внаслідок надзвичайних ситуацій / П.И. Гучек // Комунальне господарство міст. – 2015. – № 1. – С. 6-9.
- [17] Гучек П.И. Система управління базою моделей скінченних елементів / П.И. Гучек, О.І. Литвиненко // Проблеми інформаційних технологій. – 2012. – №2. – С. 54-58.
- [18] Гучек П. И. Интерактивна процедура візуалізації функцій форми на серендипових елементах / П. И. Гучек, О.І. Литвиненко, А. Н. Хомченко // Вестник Херсонського національного технічного університету. – 2012. – Вып. 1 (44). – С. 274-280.
- [19] Астионенко И.А. Многопараметрические серендиповы элементы в 2D / И.А. Астионенко, П.И. Гучек, Е.И. Литвиненко, А.Н. Хомченко // Вестник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2010.–№3(39) – С.40–47.